

**Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet**

Mr Tina P. Dašić, dipl. građ. Inž.

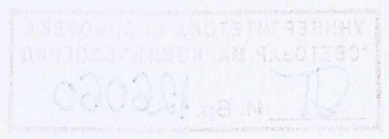
**RAZVOJ MODELA ZA PLANIRANJE
POUZDANOSTI SLOŽENIH
VODOPRIVREDNIH SISTEMA**

-Doktorska disertacija-

Beograd, 2003.

ID=26519311

PA 18073



UNIVERZITET U BEOGRADU
Građevinski fakultet

Mr Tina P. Dašić, dipl.građ.inž.

**RAZVOJ MODELA ZA PLANIRANJE POUZDANOSTI
SLOŽENIH VODOPRIVREDNIH SISTEMA**

• doktorska disertacija •

Beograd, 2003.

УНИВЕРЗИТЕТСКА БИБЛИОТЕКА
"СВЕТОЗАР МАРКОВИЋ"-БЕОГРАД

91 И. Бр. 126060



Mentor:

Prof. dr Branislav Đorđević, dipl.građ.inž.
Građevinski fakultet, Beograd

Članovi komisije:

Datum odbrane
doktorske disertacije: _____
Beograd

DOKTORAT TEHNIČKIH NAUKA
oblast: GRAĐEVINARSTVO

RAZVOJ MODELA ZA PLANIRANJE POUZDANOSTI SLOŽENIH VODOPRIVREDNIH SISTEMA

Rezime

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. Aspekti sigurnosti, iako veoma značajni, u projektima hidrotehničkih sistema razmatraju se vrlo oskudno i neadekvatno. Kao posledica takvog pristupa realizuju se nedovoljno pouzdani sistemi, koje je potrebno naknadno menjati i dopunjavati. Zbog toga je u ovoj disertaciji razmatran aspekt pouzdanosti, odnosno problem određivanja pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema, kao i problematika određivanja optimalne konfiguracije sistema sa stanovišta pouzdanosti.

U disertaciji je razvijena 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 i 2PFREL, koji omogućavaju određivanje pouzdanosti sistema različitih konfiguracija i nivoa složenosti, sa različitim ograničenjima u pogledu hidrauličkih parametara sistema i njihovih vrednosti. Modeli su analizirani na primerima vodovodnih sistema različitih konfiguracija (regionalni i distributivni, gravitacioni i sistemi sa pumpanjem vode).

Kao drugi, veoma važan zadatak, postavlja se problem optimalne alokacije pouzdanosti na elemente sistema. Analizirane su različite metode alokacije, a posebna pažnja posvećena je metodama genetskog algoritma, koje se u okviru ove disertacije prvi put koriste za ispitivani optimizacioni zadatak. Ova metoda kombinovana je sa razvijenim modelima za određivanje pouzdanosti, što se pokazalo kao veoma efikasna metoda za rešavanje zadatka optimalne alokacije pouzdanosti sistema, koja omogućava rešavanje postavljenih zadataka u realnom vremenu, i koja daje rezultate koji uglavnom predstavljaju globalni optimum ili su mu veoma bliski.

Posebna pažnja posvećena je mehaničkim karakteristikama cevi, intenzitetu otkaza i intenzitetu popravke, kao važnim parametrima od kojih u velikoj meri zavisi pouzdanost sistema. Istaknuta je nepohodnost formiranja savremenih oskultaciono-informacionih sistema, kojima se može uticati na smanjenje vremena popravke, a time i na povećanje pouzdanosti sistema. Urađena je i analiza intenziteta otkaza i popravke za beogradski vodovodni sistem.

Ključne reči:

vodoprivredni sistemi, pouzdanost, optimizacija pouzdanosti, genetski algoritmi, osmatranje sistema

RELIABILITY AS TOOL FOR PLANNING COMPLEX WATER RESOURCES SYSTEMS

Summary

Failure of water resources systems, particularly water supply systems, may cause serious consequences in economical and social environment. So these systems have to fulfill high requirements of their functional safety. Although very important, that aspect of safety is not treated adequately in the phases of planning water distribution systems. That is why the aspects of overall water resources systems reliability evaluation, as well as the problems of allocation and reliability optimal system configuration, are considered.

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 NETREL and 2PFREL models were developed. These models are useful for determining reliability of systems with different configurations and complexity. Also, they make possible restriction of various hydraulic parameters and their values. Models were analyzed and verified on different water supply systems: regional and distribution, and gravity and pumping systems.

Another important task, considered in the thesis, was problem of optimal reliability allocation. Different methods were analyzed, but particular point was focused on genetic algorithms. That method, coupled with the reliability evaluation methods, is an efficient tool for problems of water resources systems optimal reliability allocation. This methodology provides performing optimization in real time and results that are usually the global optimum of the considered problem.

Mechanical characteristics of pipes, failure and repair rates, are very important for system's overall reliability. These rates were considered and critically analyzed. Methods for planning operative monitoring-information system are proposed. Such a system allows better monitoring and management, reduction of repair time, which leads to higher values of system's overall reliability. Pipes failure and repair rates for Belgrade water supply system were analyzed and used as the base for evaluation of presented models.

Key words:

water resources systems, reliability, reliability optimization, genetic algorithm, monitoring system

PREDGOVOR

Doktorska disertacija pod naslovom "Razvoj modela za planiranje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema" obrađuje veoma interesantnu i aktuelanu problematiku određivanja, alokacije i optimizacije pouzdanosti vodoprivrednih sistema. Analizi opisanog zadatka prišlo se sa ciljem formiranja metodologije i modela koji će problem pouzdanosti razmatrati na sveobuhvatan način, uključujući i specifičnosti vodoprivrednih sistema, kao što je pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema.

Modeli su opšteg tipa i mogu se koristiti kako za analizu pouzdanosti vodoprivrednih sistema različitih konfiguracija (regionalni, gradski distributivni sistemi), tako i za druge tehničke sisteme. Želja autora je da razvijeni modeli budu od pomoći projektantima pri izboru varijantnog rešenja novog vodoprivrednog sistema, kao i pri izboru optimalnog načina revitalizacije postojećih sistema.

Veliki je broj kolega koji su mi razne načine pomogle pri izradi ove doktorske disertacije. Na ovom mestu želim da pomenem samo neke od njih, kojima dugujem posebnu zahvalnost.

Pre svega, veliku zahvalnost dugujem svom mentoru i učitelju, profesoru Branislavu Đorđeviću, koji je, znajući aktuelno stanje i probleme koji nastaju zbog neadekvatnog sagledavanja aspekta pouzdanosti vodoprivrednih sistema u našoj zemlji, predložio izradu ove doktorske disertacije. Pažljivim praćenjem rada, čestim razgovorima, korisnim savetima i sugestijama profesor Đorđević mi je pružao stručnu i moralnu podršku, koja je bila od neprocenjivog značaja tokom izrade disertacije.

Zahvalnost dugujem i profesorima Dejanu Ljubisavljeviću i Zoranu Radiću, sa kojima sam vodila zanimljive i inspirativne razgovore o problemima i dilemama, koje su se javljale u raznim fazama rada. Zahvaljujem se i profesoru Draganu Radojeviću, koji je detaljno pročitao radnu verziju disertacije i dao mi niz korisnih predloga i sugestija.

Posebno sam zahvalna svom kolegi i prijatelju Milošu Staniću, čije su mi sugestije i iskustva stečena korišćenjem metoda evolucionog programiranja bila veoma značajna, i koji je uvek bio spreman da pravi savet i podršku.

Zahvaljujem se i kolegama iz JKP "Beogradski vodovod i kanalizacija" i JP za vodosnabdevanje "Rzav", koji su mi stavili na raspolaganje podatke o svojim sistemima i time omogućili određivanje realnih vrednosti ulaznih parametara, pa time i pouzdanosti sistema, kao i prikaz rada modela na realnim sistemima.

Autor

SADRŽAJ

Spisak skraćenica, oznaka i simbola	1
Rečnik termina	4
Popis slika	7
Popis tabela	9
1. Uvod	11
1.1. Postavljanje zadatka i određivanje cilja istraživanja	11
1.2. Pouzdanost kao važna kategorija probabilističke efektivnosti	12
2. Pouzdanost vodoprivrednih sistema	18
2.1. Uvod	18
2.2. Stanje istraživanja - podele i pregled postojećih metoda određivanja pouzdanosti vodoprivrednih sistema	19
2.3. Metode analize pouzdanosti	24
2.3.1. Funkcije pouzdanosti elemenata sistema	24
2.3.2. Određivanje pouzdanosti sistema	27
2.4. Određivanje pouzdanosti vodoprivrednih sistema - opis metoda i modela razvijenih u okviru disertacije	37
2.4.1. Mehanička pouzdanost	40
2.4.2. Pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema	51
2.5. Prikaz primera i interpretacija rezultata	54
2.4.1. Primer 1 - regionalni gravitacioni vodovodni sistem	55
2.4.2. Primer 2 - regionalni vodovodni sistem sa pumpanjem vode	61
2.4.3. Primer 3 - distributivni gravitacioni vodovodni sistem	65
2.4.4. Primer 4 - distributivni sistem sa pumpanjem vode i većim brojem rezervoara	72
3. Alokacija pouzdanosti u vodoprivrednim sistemima složene konfiguracije	77
3.1. Uvod	77
3.2. Metode alokacije pouzdanosti koje ne uzimaju u obzir troškove alokacije	77
3.2.1. Metod izjednačavanja pouzdanosti	78
3.2.2. Metod alokacije pouzdanosti preko relativne osetljivosti na otkaz - ARNIC metod	79
3.2.3. Alokacija pouzdanosti prema značajnosti pojedinih elemenata - AGREE metod	80
3.2.4. Alokacija pouzdanosti ojačavanjem najslabije karike	81

3.3. Metode alokacije pouzdanosti koje uzimaju u obzir troškove alokacije	81
3.3.1. Lagranževi množitelji (funkcije)	88
3.3.2. Gradijentne metode	91
3.3.3. Alokacija pouzdanosti primenom metode dinamičkog programiranja	93
3.3.4. Evolucionni algoritmi	95
3.4. Primeri optimizacije pouzdanosti sistema i analiza rezultata	103
3.4.1. Primer 5 - optimizacija pouzdanosti gravitacionog distributivnog sistema	103
3.4.2. Primer 6 - optimizacija pouzdanosti vodovodnog sistema sa pumpanjem vode i većim brojem rezervoara	109
4. Analiza učestalosti otkaza	113
4.1. Otkazi tehničkih sistema	113
4.2. Ukupan broj otkaza u vodovodnim sistemima	119
4.3. Analiza broja otkaza na uličnim cevima	122
5. Održavanje sistema	127
5.1. Održavanje i raspoloživost sistema	127
5.2. Preventivno održavanje	132
5.3. Korektivno održavanje	137
5.4. Sistemi osmatranja vodovodnih sistema	141
6. Zaključci i preporuke	148
7. Referentna literatura	151
8. Korišćena literatura	154
Biografija	156
Prilozi	157

SPISAK SKRAĆENICA, OZNAKA I SIMBOLA

- $A(t)$ - funkcija raspoloživosti popravljivih sistema
 A_i - sopstvena raspoloživost
 A_a - dostignuta raspoloživost
 A_o - operativna raspoloživost
 A_G - gotovost
 C - troškovi, u optimizacionim modelima
Hazen-William-ov koeficijent hrapavosti, u hidrauličkom proračunu
 C_K - kaznena funkcija
 D - prečnik cevi
 f - vrednost kriterijumske funkcije, u optimizacionim metodama
frekvencija (učestalost) preventivnog održavanja
 $f(t)$ - funkcija gustine otkaza
 F - funkcija pogodnosti rešenja
 $h(t)$ - indikator ispravnosti sistema
 $h(\mathbf{y})$ - strukturna funkcija sistema
 L - dužina cevi
 $L(x, \mu)$ - Lagranževa funkcija
 \bar{M} - srednje aktivno vreme korektivnog i preventivnog održavanja
 \bar{M}_c - srednje aktivno vreme korektivnog održavanja
 \bar{M}_p - srednje aktivno vreme preventivnog održavanja
MDT - srednje vreme svih zastoja u sistemu
MTBF - srednje vreme između otkaza
MTTF - srednje vreme do otkaza
MTTR - srednje vreme popravke
 N - broj elemenata
 O - obezbeđenost isporuke vode
 p - pritisak vode
 $P_o(t)$ - funkcija pogodnosti održavanja
 P_v - vremenska obezbeđenost isporuke vode
 P_z - zapreminska obezbeđenost isporuke vode
 q - nepouzdanost elementa
 Q - nepouzdanost sistema
protok vode, u proračunu hidrauličkih pokazatelja
 $Q(t)$ - funkcija nepouzdanosti elementa i/ili sistema
 Q_{ip} - sopstvena potrošnja vode u i -tom čvoru

- Q_{is} - količina vode koja se ispušta ili zahvata za određene potrebe
- Q_{max}^h - potrebe za vodom u času maksimalne potrošnje
- $Q_{max,dn}$ - potrebe za vodom u danu maksimalne potrošnje
- Q_{proj} - potrebe za vodom na koje je sistem projektovan
- $Q_{sr, god}$ - srednje godišnje potrebe za vodom
- r - pouzdanost elementa
- R_0 - jedinična pouzdanost cevi (veze), pouzdanost po jednom dužnom kilometru cevi
- R - pouzdanost sistema
- R^* - zahtevana pouzdanost sistema
- $R(t)$ - funkcija pouzdanosti elementa i/ili sistema
- R_1 - pouzdanost sistema određena kao minimalna vrednost pouzdanosti potrošačkih čvorova
- R_2 - pouzdanost sistema određena kao aritmetička sredina pouzdanosti potrošačkih čvorova
- R_3 - pouzdanost sistema određena kao ponderisana srednja vrednost pouzdanosti potrošačkih čvorova
- R_{og} - optimalna vrednost pouzdanosti sa stanovišta proizvođača (graditelja) sistema
- R_{ok} - optimalna vrednost pouzdanosti sa stanovišta korisnika sistema
- R_{sis} - pouzdanost sistema koja podrazumeva da su u svakom potrošačkom čvoru u sistemu zadovoljeni uslovi
- RT - vreme kada je sistem raspoloživ, ali nije u radu (hladna rezerva)
- S - sigurnost sistema
- t - vreme
- $T(R)$ - funkcija troškova u zavisnosti od pouzdanosti
- T_o - matematičko očekivanje dužine rada sistema bez otkaza
- T_{gr} - troškovi građenja
- T_{kup} - kupovna cena
- T_{odr} - troškovi održavanja
- T_{pop} - troškovi proizvođača nakon prodaje
- T_{pr} - prodajna cena
- T_{up} - ukupni troškovi proizvođača
- v - brzina vode u cevi
- VS - vodoprivredni sistemi
- w - težinski koeficijent koji određuje stepen značajnosti određenog potrošačkog čvora u sistemu
- y - indikator ispravnosti elementa
- \bar{y} - indikator neispravnosti elementa
- $y(t)$ - indikator stanja elementa sistema (binarna promenljiva)

- $\mathbf{y}(t)$ - vektor indikatora stanja elementa sistema
- λ - intenzitet otkaza osnovnog elementa
Darcy-Weisbach-ov koeficijent trenja, u proračunu hidrauličkih pokazatelja
- λ' - intenzitet otkaza rezervnog elementa
- $\lambda(t)$ - funkcija intenziteta otkaza
- μ - intenzitet popravke
Lagranžev množitelj, u Lagranževoj funkciji
- Π - piježometarski nivo
- θ - minimalno prihvatljivo srednje vreme između otkaza
- ω - dozvoljena redukcija vode u sistemu
težinski koeficijent alokacije

REČNIK TERMINA

- alokacija pouzdanosti* - raspoređivanje ukupne zahtevane pouzdanosti na elemente sistema, vodeći računa o konfiguraciji sistema, a prema zadatim uslovima
- efektivnost* - grupa svojstava kojima se definišu radne karakteristike sistema, a najvažnije su kvantitativna, ekonomska, vremenska i probabilistička efektivnost
- ekonomska efektivnost* - pokazatelji kojima se iskazuju ekonomske performanse vodoprivrednih sistema
- evolucionarni algoritmi* - metode globalne optimizacije koje se zasnivaju na principima evolucione strategije živog sveta
- funkcija intenziteta otkaza* - verovatnoća otkaza elementa u jedinici vremena, nakon određenog vremena, pod uslovom da se otkaz do tada nije javio
- funkcija pogodnosti (valjanosti)* - koristi se u metodama evolucionog programiranja za ocenu valjanosti pojedinih kriterijumskih funkcija unutar populacije
- funkcija pouzdanosti* - verovatnoća da će sistem raditi bez otkaza u određenom vremenskom intervalu
- funkcionalna podobnost VS (obezbeđenost isporuke vode)* - verovatnoća sa kojom se može očekivati isporuka određene količine vode iz izvorišta
- gotovost* - predstavlja verovatnoću da će sistem ispravno funkcionisati u nekom zahtevanom vremenskom trenutku, tj. da će biti u radu ili će biti potpuno raspoloživ da primi opterećenje ako se nalazi u ulozi hladne rezerve sistema
- hladna rezerva sistema* - elementi koji se nalaze u sistemu, a koji primaju opterećenje samo u slučaju otkaza osnovnog elementa
- hromozom* - niz simbola konačne dužine kojima se predstavlja jedno moguće rešenje razmatranog optimizacionog problema
- indikator stanja* - promenljiva binarna veličina koja označava da li se sistem nalazi u stanju rada ili otkaza
- intenzitet otkaza* - verovatnoća da će element otkazati, koja je kod popravljivih sistema jednaka recipročnoj vrednosti srednjeg vremena između otkaza
- intenzitet popravke* - verovatnoća popravke elementa, koja je jednaka recipročnoj vrednosti srednjeg vremena popravke elementa
- inženjerstvo održavanja* - nova naučna disciplina koja je usmerena na definisanje aktivnosti u cilju povećanja lakoće održavanja
- kooherentni sistemi* - sistemi koji u svojoj strukturi ne sadrže nebitne elemente
- korektivno održavanje* - postupci koji se sprovode kada dođe do otkaza elementa, u cilju vraćanja elementa u ispravno stanje
- kvalitativna efektivnost* - sposobnost vodoprivrednih sistema da realizuju ciljeve koji su iskazani količinskim pokazateljima
- mehanička pouzdanost* - verovatnoća da između čvorova sistema i izvorišnih čvorova postoji bar jedna putanja koja nije u stanju otkaza

- metod mini preseka* - metod za određivanje strukturne funkcije sistema, koji podrazumeva određivanje svih mogućih preseka čiji neispravan rad dovodi do neispravnog funkcionisanja sistema
- metod mini puteva* - metod za određivanje strukturne funkcije sistema, koji podrazumeva određivanje svih mogućih puteva koji omogućavaju ispravno funkcionisanje sistema
- mutacija* - operator koji se koristi u metodama evolucionog programiranja u cilju sprečavanja preuranjene konvergencije, a predstavlja izmenu genetskog koda (kodiranog rešenja, hromozoma) na slučajan način
- održavanje* - podrazumeva aktivnosti, postupke, metode i tehnike kojima se obezbeđuje ispravan rad sistema u određenom vremenskom periodu
- otkaz elementa ili sistema* - je ono stanje kada element ili sistem nije u mogućnosti da ispuni zahtevane radne funkcije
- paralelna redukcija* - zamena paralelno vezanih elemenata jednim elementom nove, tačno određene, pouzdanosti
- pogodnost održavanja i obnavljanja* - sposobnost sistema da se zadrži u operativnom stanju sprovođenjem aktivnosti preventivnog i korektivnog održavanja
- populacija* - skup većeg broja jedinki (hromozoma)
- pouzdanost konstrukcije* - verovatnoća da će radno opterećenje konstrukcije biti manje od kritične nosivosti
- pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema* - verovatnoća da će u slučaju zadovoljenja mehaničke pouzdanosti u čvorovima i vezama sistema biti zadovoljene hidrauličke karakteristike (pritisci u čvorovima veći od zahtevanih, brzine vode u cevima manje od propisanih, itd.)
- pouzdanost sistema* - verovatnoća da će sistem u određenom vremenskom intervalu biti u mogućnosti da ispuni zahtevane radne performanse
- preventivno održavanje* - postupci održavanja kojima se smanjuje verovatnoća pojave slučajnih otkaza, odnosno postupci kojima se sprečava ili odlaže pojava otkaza
- probabilistička efektivnost* - kategorije radnih performansi sistema koji se iskazuju verovatnoćom
- radna rezerva sistema* - elementi koji se u sistemu nalaze pod nekim opterećenjem nižim od opterećenja osnovnih elemenata
- raspoloživost* - definiše se za popravljive sisteme, a predstavlja verovatnoću da će sistem ispravno funkcionisati u nekom zahtevanom vremenskom trenutku, tj. da će biti u radu ili će biti potpuno raspoloživ da primi opterećenje ako se nalazi u ulozi radne (operativne) rezerve
- redundansa* - predstavlja obilatost, odnosno u slučaju vodoprivrednih sistema predstavlja broj elemenata (obično veza) koji su iznad minimalnog broja elemenata neophodnog da bi sistem pravilno funkcionisao
- selekcija* - koristi se u metodama evolucionog programiranja, a predstavlja način izbora jedinki koje ulaze u formiranje naredne generacije (metode: proporcionalna, integralna, turnirska, idr.)

- serijska redukcija* - zamena serijski vezanih elemenata jednim elementom nove, tačno određene, pouzdanosti
- sistem održavanja* - skup elemenata koji omogućavaju da se potrebni postupci održavanja sprovedu na zahtevani ili propisani način, u datim uslovima i datom intervalu vremena
- stabla otkaza* - metod koji se koristi za analizu otkaza u sistemu, a predstavlja se svojevrsnim grafovima kojima se povezuju mogući otkazi i njihovi uzroci
- strukturna funkcija sistema* - binarna funkcija vektora slučajnih binarnih promenljivih kojom se predstavlja stanje ispravnosti sistema u funkciji ispravnosti njegovih elemenata
- tablice istinitosti* - metod za određivanje strukturne funkcije sistema, koji se zasniva na principu potpune enumeracije
- ukrštanje* - operator koji se koristi u metodama evolucionog programiranja, a predstavlja način rekombinacije jedinki u cilju dobijanja novih jedinki (metode: ukrštanje u jednoj i dve tačke, uniformno ukrštanje itd.)
- vremenska efektivnost* - radna svojstva vodoprivrednih sistema koja se iskazuju vremenskim kategorijama

POPIS SLIKA

- Slika 1.1: Raspodela radnog i kritičnog opterećenja konstrukcije
- Slika 2.1: Inferiorno rešenje sa tehno-ekonomskog stanovišta
- Slika 2.2: Oblik funkcije intenziteta otkaza
- Slika 2.3: Dijagram stanja i prelazaka za sistem sa rezervom
- Slika 2.4: Agregacija složenog sistema (a) do mrežnog sistema veza (b)
- Slika 2.5: Agregacija složenog sistema (a) do granatog sistema veza (b)
- Slika 2.6: Agregacija serijski (a) i paralelno (b) vezanih elemenata
- Slika 2.7: Serijska agregacija po metodi K-čvora
- Slika 2.8: Slepi krajevi mreže (a) i slepa petlja mreže(b)
- Slika 2.9: Redukcija veze i u sistemu
- Slika 2.10: Izbor veze nad kojom se vrši redukcija
- Slika 2.11: Određivanje pouzdanosti redukovanih sistema
- Slika 2.12: Uvođenje imaginarnog čvora i veza u sistemu sa više izvorišnih čvorova
- Slika 2.13: Dekompozicija sistema u cilju određivanje pouzdanosti sistema
- Slika 2.14: Šematski prikaz čvorova u mreži
- Slika 2.15: Šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Boka"
- Slika 2.16: Šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Rzav"
- Slika 2.17: Šematski prikaz sistema A
- Slika 2.18: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u mreži, za potrebe Q_{max}^h
- Slika 2.19: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u mreži, za potrebe u danu maksimalne potrošnje
- Slika 2.20: Promena pouzdanosti u zavisnosti od broja otkaza i minimalnog zahtevanog pritiska u sistemu
- Slika 2.21: Šematski prikaz sistema B
- Slika 2.22: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od zahtevanog minimalnog pritiska u sistemu
- Slika 3.1: Zavisnost pouzdanosti i troškova: (a) graditelja / proizvođača sistema, (b) korisnika sistema. 1 - troškovi građenja / proizvodnje pre predaje korisniku; 2 - troškovi proizvođača nakon predaje korisniku; 3 - ukupni troškovi proizvođača / graditelja; 4 - prodajna / kupovna cena; 5 - troškovi korisnika tokom održavanja; 6 - ukupni troškovi korisnika.
- Slika 3.2: Šematski prikaz optimizacionog zadatka
- Slika 3.3: Šematski prikaz populacije, hromozoma i gena
- Slika 3.4: Proces formiranja naredne generacije
- Slika 3.5: Ukrštanje u jednoj tački
- Slika 3.6: Ukrštanje u dve tačke
- Slika 3.7: Uniformno ukrštanje



- Slika 3.8: Šematski prikaz sistema A i potencijalnih dodatnih veza u sistemu
- Slika 3.9: Brzine konvergencije za nekoliko različitih oblika GA i nekoliko načina definisanja kaznene funkcije
- Slika 3.10: Optimalne vrednosti dodatnih ulaganja za nekoliko različitih oblika GA i nekoliko načina definisanja kaznene funkcije
- Slika 3.11: Optimalno rešenje sistema A, za $R > 0.99$
- Slika 3.12: Optimalne vrednosti dodatnih ulaganja za nekoliko načina definisanja kaznene funkcije
- Slika 3.13: Optimalno rešenje sistema B, za $R > 0.98$ i $p > 2.75$ bara
- Slika 3.14: Optimalno rešenje sistema B, za $R > 0.99$ i $p > 2.75$ bara
- Slika 4.1: Zavisnost verovatnoće otkaza elementa od odnosa raspodele napona i čvrstoće
- Slika 4.2: Zavisnost verovatnoće otkaza elementa od odnosa raspodele napona i čvrstoće u različitim vremenskim presecima
- Slika 4.3: Primer formiranja stabla otkaza
- Slika 4.4: Odnos gubitaka vode i broja kvarova za različite vrste kvarova (Petrašin, 1986)
- Slika 4.5: Broj kvarova na cevi po km mreže za razne vrste materijala
- Slika 4.6: Prosečne zastupljenosti kvarova na cevima po vrsti materijala za beogradski vodovod (prema podacima Bobušića i Krstića, 1995)
- Slika 4.7: Dijagrami zavisnosti broja kvarova od prečnika cevi
- Slika 5.1: Šematski prikaz strukture sistema održavanja
- Slika 5.2: Konceptija preventivnog održavanja prema stanju sa praćenjem parametara stanja
- Slika 5.3: Konceptija preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti
- Slika 5.4: Zona primene koncepta preventivne zamene
- Slika 5.5: Klasifikacija modela preventivnog održavanja
- Slika 5.6: Organizacija sistema monitoringa vodovodnih sistema
- Slika 5.7: Šema uobičajenog sistema osmatranja dela vodovodnog sistema
- Slika 5.8: Šema sistema osmatranja dela vodovodnog sistema
- Slika 5.9: Šematski prikaz najvažnijih merenja u distributivnom sistemu
- Slika 5.10: Primer rasporeda senzora otkaza u delu distribuionog sistema
- Slika 5.11: Dijagram broja izvršenih popravki za određeni vremenski period na cevima beogradskog vodovodnog sistema, za 2000. godinu
- Slika 5.12: Kumulativna kriva izvršenih popravki za određeni vremenski period na cevima beogradskog vodovodnog sistema, za 2000. godinu

POPIS TABELA

- Tabela 2.1: Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti
- Tabela 2.2: Mehaničke pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema "Boka"
- Tabela 2.3: Ukupna pouzdanost i vreme nezadovoljenja potreba za $Q_{\max, \text{dn}}$
- Tabela 2.4: Ukupna pouzdanost i vreme nezadovoljenja potreba za $Q_{\text{sr}, \text{god}}$
- Tabela 2.5: Mehaničke pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema "Rzav"
- Tabela 2.6: Ukupna pouzdanost pojedinih delova sistema
- Tabela 2.7: Vreme nezadovoljenja potreba za vodom (vremenski deficit vode) izražen u danima
- Tabela 2.8: Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti
- Tabela 2.9: Rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema A
- Tabela 2.10: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema A ($p > 25 \text{ m}$)
- Tabela 2.11: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema A ($p > 15 \text{ m}$)
- Tabela 2.12: Rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema B
- Tabela 2.13: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema B
- Tabela 4.1: Odnos broja kvarova i gubitaka vode
- Tabela 4.2: Broj kućnih priključaka, zatvarača i hidranata u nekim većim gradovima Evrope i Jugoslavije (Kujundžić, 1996)
- Tabela 4.3: Odnos vrsta kvarova za beogradski vodovod u periodu od 1984-2000
- Tabela 4.4: Kvarovi na uličnim cevima (Kujundžić, 1995, Petrešin, 1986)
- Tabela 4.5: Broj kvarova na uličnim cevima za grad Beograd
- Tabela 4.6: Zastupljenost pojedinih vrsta materijala za beogradski vodovod
- Tabela 5.1: Gubici vode (u odnosu na ukupnu potrošnju) zabeleženi tokom devedesetih godina u nekim većim gradovima Evrope i Jugoslavije (Kujundžić, 1996)
- Tabela P1.1: Karakteristike čvorova i veza za regionalni sistem "Boka"
- Tabela P1.2: Pouzdanosti veza za regionalni sistem "Boka"
- Tabela P2.1: Karakteristike čvorova i veza za regionalni sistem "Rzav"
- Tabela P2.2: Pumpe i njihove karakteristike (regionalni sistem "Rzav")
- Tabela P2.3: Pouzdanosti veza za regionalni sistem "Rzav"
- Tabela P3.1: Karakteristike čvorova i veza za sistem A
- Tabela P3.2: Rezultati proračuna pouzdanosti sistema A za $Q_{\max, \text{dn}}$ ($p \geq 25 \text{ m}$)
- Tabela P3.3: Rezultati proračuna pouzdanosti sistema A za $Q_{\max, \text{dn}}$ ($p \geq 15 \text{ m}$)
- Tabela P3.4: Pouzdanosti veza sistema A za različite vrednosti povećanja broja otkaza

Tabela P4.1: Karakteristike čvorova i veza za sistem B

Tabela P4.2: Karakteristične kote rezervoara za sistem B

Tabela P4.3: Karakteristike 3 paralelno vezane pumpe (sistem B)

Tabela P5.1: Jedinična ulaganja za čišćenje i ugradnju novih cevi

Tabela P5.2: Karakteristike dodatnih veza za sistem A

Tabela P6.1: Karakteristike dodatnih i revitalizovanih veza za sistem B

1. UVOD

1.1. Postavljanje zadatka i određivanje cilja istraživanja

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 različitih 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.

Kao posledica industrijskog, tehničkog i demografskog rasta dolazi do sve većeg nesklada između rastućih potreba za vodom i sve manjih raspoloživih kvalitetnih resursa. Da bi se potrebe za vodom, u ovakvim uslovima, mogle zadovoljiti neophodno je formiranje 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.

I pored svog velikog značaja, problematika probablističke efektivnosti sistema se, u našoj zemlji, još uvek ne tretira na odgovarajući način. Od svih aspekata te sigurnosti, kada je reč o regionalnim sistemima, razmatra se uglavnom samo obezbeđenost funkcionisanja akumulacije (izvorišta), koja je prvenstveno hidrološko-stohastičkog karaktera, dok čitav kompleks operativne gotovosti i pouzdanosti izvršenja zadatka ostaje nepokriven. Posledice ovakvog pristupa mogu biti veoma ozbiljne. Još jedan nedostatak velikih regionalnih sistema, a koji se može razmatrati preko parametara probablističke efektivnosti, jeste neadekvatan (ili često nepostojanje) monitoring sistema, koji treba da omogući bržu lokalizaciju kvarova na sistemu, pa samim tim i brže vreme popravke kvara, odnosno kraći prekid u snabdevanju vodom potrošača.

Slična situacija je i u gradskim distributivnim sistemima. Određivanje pouzdanosti tih sistema složen je zadatak, pre svega zbog velikog broja veza, izvorišnih i potrošačkih čvorova u sistemu, kao i veoma složenih konfiguracija sistema, koje se ne mogu rešavati serijsko-paralelnim redukcijama, nego se moraju koristiti i drugi kompleksniji pristupi.



Kao posledica opisanog, neadekvatnog i nekompletnog sagledavanja parametara probabilističke efektivnosti, realizuju se sistemi nedovoljno pouzdanih konfiguracija, koje je potrebno naknadno menjati i dopunjavati, što može zahtevati vrlo velike adaptacije i ulaganja. Na žalost, elementi pouzdanosti se ne ugrađuju ni u metode koje se koriste pri izboru novih (dodatnih) parametara i elemenata sistema, odnosno izboru nove - proširene konfiguracije sistema. Optimizacija se u takvim slučajevima obavlja po kriterijumu minimizacije troškova, a uz uslov zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema, obično ne vodeći računa o pouzdanosti novoformiranog sistema ili ocenjujući taj parametar samo iskustveno i/ili intuitivno.

Zbog opisanog, veoma nepovoljnog, stanja u pogledu razmatranja i određivanja parametara probabilističke efektivnosti, odnosno pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema, u našoj zemlji, pristupilo se 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 izvorišnih čvorova u sistemu. Pošto se radi o hidrotehničkim sistemima, u razmatranje pouzdanosti neophodno je, pored razmatranja pouzdanosti mehaničkih karakteristika, uključiti i pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara i analizirati uticaj te pouzdanosti na ukupnu pouzdanost sistema, odnosno ispitati opravdanost uvođenja tog tipa pouzdanosti u ukupnu pouzdanost sistema.

Pored određivanja pouzdanosti uradiće se analiza metoda alokacije pouzdanosti, odnosno optimizacionih metoda, koje se mogu koristiti pri izboru konfiguracije novog sistema, ili prilikom razmatranja varijanti za rekonstrukciju postojećih sistema. Da bi se proces optimizacije mogao sprovesti na realnom sistemu i u realnom vremenu, u okviru disertacije će biti formirani i optimizacioni modeli, koji koriste savremene matematičke metode kao što su metode evolucionog programiranja. Efikasnost i opravdanost uvođenja takvih modela biće analizirani na realnim sistemima.

Pošto su sistemi za snabdevanje vodom najčešći, najkompleksniji i sistemi koji zahtevaju najveću pouzdanost, u disertaciji će se najveća pažnja posvetiti regionalnim vodovodnim sistemima, koji su uglavnom granate strukture (ili ređe imaju manji broj prstenova), kao i sistemima složenih mrežnih struktura, kakvi su veliki gradski vodovodni sistemi.

1.2. Pouzdanost kao važna kategorija probabilističke efektivnosti

Osnovne performanse sistema, koje treba odrediti pri projektovanju vodoprivrednih sistema, karakterišu grupe svojstava kojima se definišu radne karakteristike tih sistema, a najvažnije su sledeće:

- *kvantitativna efektivnost* - sposobnost VS da realizuje ciljeve koji su iskazani količinskim pokazateljima;

- *ekonomska efektivnost* - pokazatelji kojima se iskazuju ekonomske performanse VS;
- *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, razmatra 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 (Đorđević, 1997):

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 obezbeđenost (procentualno izražen odnos vremena u kome su potrebe korisnika u potpunosti zadovoljene i ukupnog razmatranog vremena) i zapreminska obezbeđenost (procentualno izražen odnos zapremine vode isporučene potrošačima i ukupne zahtevane količine vode).

U određenim klasama zadataka neophodno je ograničiti i veličinu dozvoljene redukcije, jer se ne može dopustiti da npr. veliki regionalni sistem ostane dugo bez ikakve isporuke vode. Prema tome, isporuka vode iz akumulacije ili izvorišta podzemne vode može se definisati četvorkom:

$$ISP: \langle Q_{isp}, P_v, P_z, \omega \rangle$$

gde je Q_{isp} količina vode koja se ispušta ili zahvata, P_v i P_z vremenska i zapreminska obezbeđenost isporuke vode i ω dozvoljena redukcija vode u sistemu. Analize pokazuju da je vremenska obezbeđenost po pravilu strožiji kriterijum, pa se često samo taj vid obezbeđenosti uzima u razmatranje.

U slučajevima kada je izvorište akumulacija neophodno je analizirati zavisnost: korisna zapremina - isporuka vode - obezbeđenost isporuke. Ove analize sprovode se sa velikim brojem simuliranih serija protoka (koje imaju iste stohastičke karakteristike kao osmotrena serija) i projektantu VS pružaju važne informacije o potrebnim korisnim zapreminama, kojima se za određenu isporuku vode postiže odgovarajuća obezbeđenost. Upoređivanje varijantnih rešenja bez uključivanje u razmatranje i ovog parametra moglo bi da dovede do izbora inferiornog rešenja sa aspekta obezbeđenosti, odnosno nepouzdanijeg rada u periodu eksploatacije VS.

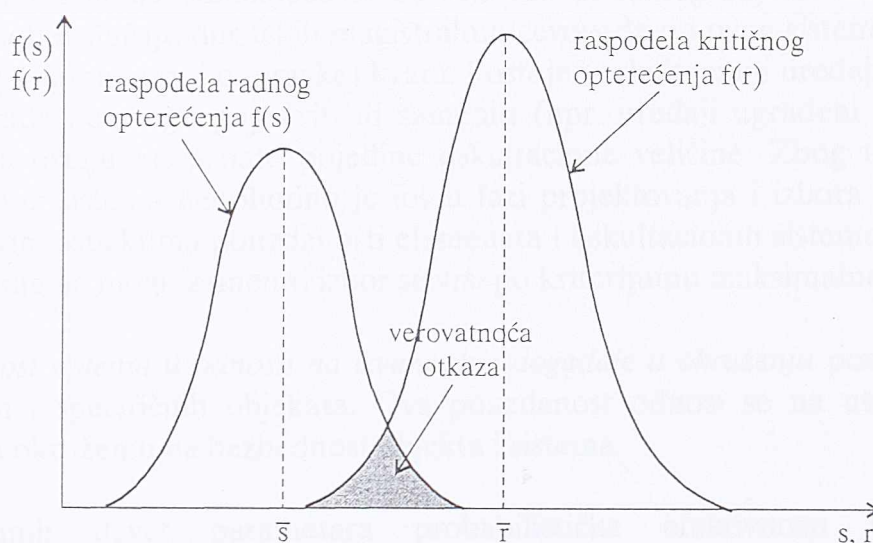
2. *Pouzdanost objekata i sistema* je važna performansa sistema koja izražava sposobnost sistema da ispuni zadate funkcije bez otkaza, pod uslovom da je na početku rada sistem radio normalno. Ovo je veoma važna performansa vodoprivrednih sistema, posebno onih sistema koji su formirani od serijski povezanih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

Ovu performansu sistema neophodno je razmatrati tokom pojedinih faza projektovanja. U fazi generalnog projekta razmatraju se oni aspekti pouzdanosti koji su bitni za ocenu osetljivosti pojedinih razmatranih varijanti sistema sa stanovišta pouzdanosti konfiguracije. U fazi izrade idejnog i glavnog projekta analiza pouzdanosti postaje detaljnija, jer može da se računa sa odabranom ili pretpostavljenom opremom.

3. *Pogodnost održavanja i obnavljanja* je posebno važno svojstvo sistema koje treba sagledati još u fazi projektovanja i ugraditi u dispoziciju projektnog rešenja. Pogodnost održavanja je karakteristika sistema koja označava sposobnost sistema da se zadrži u operativnom stanju sprovođenjem aktivnosti održavanja. Te aktivnosti mogu se podeliti u dve grupe: zadržavanje u operativnom stanju sprečavanjem otkaza, što se postiže preventivnim održavanjem i ponovno vraćanje u radno stanje putem popravki, što se ostvaruje korektivnim održavanjem sistema. U tom cilju definišu se vrednosti zahtevanog srednjeg vremena korektivnog i preventivnog održavanja, maksimalno aktivno vreme korektivnog i preventivnog održavanja, funkcija pogodnosti održavanja, intenzitet popravke i dr. Da bi se operacije preventivnog i korektivnog održavanja mogle obaviti u skladu sa definisanim vrednostima sistem mora imati adekvatno odabrane dispozicione i konstruktivne karakteristike. To znači da je još u fazi projektovanja sistema neophodno voditi računa o pristupu elementima sistema, predvideti ugradnju havarijskih i remontnih zatvarača, kao i merne opreme koja omogućava brzu detekciju kvara i dr.

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. Raspoloživost sistema se tokom korišćenja sistema definiše na tri načina: (1) sopstvena raspoloživost je verovatnoća da će sistem uz idealnu organizaciju i brzu detekciju kvara (koju omogućava odgovarajući monitoring sistem) raditi sa planiranim performansama u datom trenutku vremena; (2) dostignuta raspoloživost je verovatnoća da će sistem raditi u datom trenutku vremena, uz idealnu organizaciju, vodeći računa o zastojima zbog preventivnog održavanja; (3) operativna raspoloživost je verovatnoća da će sistem, kada se koristi u sasvim realnim uslovima, raditi sa planiranim performansama kada se to od njega zatraži.

5. *Pouzdanost konstrukcije*, u opštem slučaju, definiše se verovatnoćom da će radno opterećenje konstrukcije biti manje od kritične nosivosti. Drugim rečima, pošto su i radno opterećenje i kritična nosivost stohastičke kategorije koje se distribuiraju po određenim funkcijama raspodele, po pravilu dolazi do preklapanja ovih funkcija. Preklopljena površina predstavlja verovatnoću otkaza konstrukcije (slika 1.1). 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 (količnik kritičnog i radnog opterećenja) 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.



Slika 1.1: Raspedela radnog i kritičnog opterećenja konstrukcije

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. U tom slučaju izostaje eksplicitiranje hidrauličke pouzdanosti, što onemogućava vrednovanje svih kategorija pouzdanosti sistema. Hidraulička pouzdanost se principijelno može računati na isti način kao pouzdanost konstrukcije samo se menja priroda radnog opterećenja i kritične nosivosti. U ovom slučaju radno opterećenje su nivoi velikih voda zajedno sa dopunskim uticajima (visina talasa), koji su stohastička kategorija, dok se otpor sistema predstavlja efektivnom visinom objekta (kota krune nasipa ili brane) zajedno sa rezervnim nadvišenjem.

7. *Upravljačka podobnost sistema* podrazumeva takvo projektovanje upravljačkih uređaja da se upravljačka pouzdanost čoveka, kao upravljačkog elementa sistema, poveća do zahtevane granice. Ona se definiše verovatnoćom uspešnog izvršenja postavljenih zadataka upravljanja tokom određenog vremena, tj. verovatnoćom da čovek, kao element sistema, neće načiniti grešku u upravljanju tokom određenog vremenskog intervala. Može se pokazati da se sa gledišta pouzdanosti čovek, kao upravljački organ, ponaša analogno svim drugim sistemima (Đorđević, 1996). Jedina je razlika što čovek ima sposobnost samokorigovanja, koja se takođe može analitički definisati. Zbog toga se prilikom projektovanja upravljačkih sistema mora uzeti u obzir i ovaj aspekt pouzdanosti. Postoje brojne mere kojima se može povećati pouzdanost čoveka: adekvatno definisanje položaja i pristupačnosti pojedinih komandnih uređaja, izbor procedure rukovanja uređajima, kontrole i dr.

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. Postoje i oskultacioni uređaji koji se nakon ispada iz rada ne mogu popraviti ili zameniti (npr. uređaji ugrađeni u telo brane), nakon čega ostaju neopznate pojedine oskultacione veličine. Zbog takvog značaja oskultacionog sistema neophodno je još u fazi projektovanja i izbora opreme voditi računa o svim aspektima pouzdanosti elemenata i oskultacionih sistema. Za elemente koji se kasnije ne mogu zameniti izbor se vrši po kriterijumu maksimalne pouzdanosti.

9. *Bezbednost sistema u odnosu na izvanredne događaje u okruženju* postavlja se samo kod velikih i specifičnih 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 razmatra se, uglavnom, 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.

U početnim fazama projektovanja, kada se vrši upoređivanje i izbor varijantnog rešenja, pouzdanost sistema bi, pored ekonomskih i kvantitativnih efekata, trebalo razmatrati kao jedan od merodavnih kriterijuma. U fazi izrade glavnog projekta, pouzdanost takođe ima značajnu ulogu, jer se celovit uvid u karakteristike sistema može steći samo ako se pored ostalih razmatra i aspekt pouzdanosti. Tako se npr. u distributivnim sistemima očekivano vreme otkaza sistema (period bez dovoljnih količina vode) ili očekivana količina deficita vode mogu odrediti tek nakon analize obezbeđenosti isporuke vode, pouzdanosti elemenata sistema i sistema kao celine, operativne gotovosti sistema i pogodnosti održavanja i obnavljanja sistema. Navedeni

parametri probabilističke efektivnosti objedinjuju se u jedan: sigurnost sistema (S). Ovaj parametar može se definisati na sledeći način:

$$S = O \times R$$

gde je: O - obezbeđenost isporuke vode, R - pouzdanost sistema, koja se u slučaju neobnovljivih sistema definiše preko pouzdanosti objekata i sistema, dok se u slučaju obnovljivih sistema ovim parametrom obuhvataju pogodnost održavanja i obnavljanja i operativna gotovost sistema.

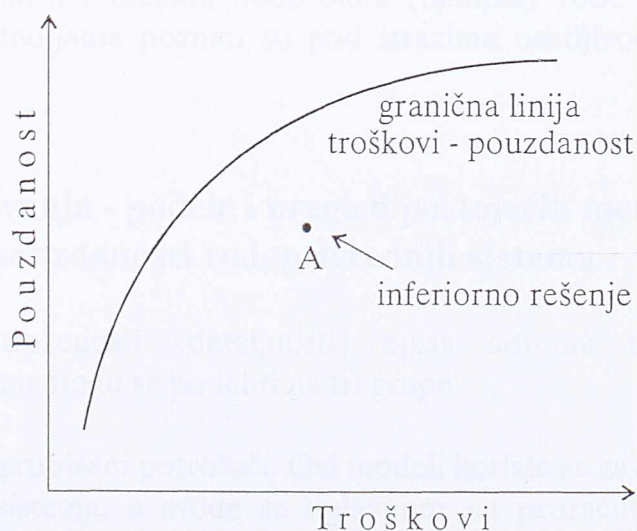
Analiza obezbeđenosti isporuke vode podrobno je ispitana performansa probabilističke efektivnosti, koja se standardno sprovodi pri analizi i projektovanju vodoprivrednih sistema. Zbog toga će se u ovoj doktorskoj disertaciji razmatrati drugi parametar sigurnosti sistema - **pouzdanost sistema**. Pod pojmom 'pouzdanost' podrazumevaju se sledeće tri kategorije probabilističke efektivnosti: pouzdanost objekata i sistema, operativna gotovost i pogodnost održavanja i obnavljanja sistema. Navedene tri kategorije su međusobno nerazdvojno povezane, zbog čega su obuhvaćene u jedinstvenu meru. Na pouzdanost sistema utiče veliki broj različitih faktora koji se generalno mogu podeliti na tri tipa (Walski, 1993): 1) konfiguracija, koja obuhvata veličinu i lokaciju komponenti i izbor materijala, 2) operativnost, pod kojom se podrazumevaju faktori operativnosti vezani za osmatranje otkaza (kvara), minimizacije vremena popravke i obučenosti ekipe i 3) održivost, koja obezbeđuje pravilno funkcionisanje komponenti i pravilan izbor i izvođenje rehabilitacije sistema. Zbog svega navedenog u nastavku disertacije će se pod pojmom pouzdanost podrazumevati navedene tri kategorije probabilističke efektivnosti i njihove međuzavisnosti.

2. POUZDANOST VODOPRIVREDNIH SISTEMA

2.1. Uvod

Pod pojmom projektovanja vodoprivrednih (distributivnih) sistema za isporuku vode korisnicima podrazumeva se dimenzionisanje elemenata sistema tako da se zadovolje količine vode i pritisci koje zahtevaju potrošači, odnosno korisnici sistema. Od probabilističkih parametara uglavnom se računa samo obezbeđenost isporuke vode. Poslednjih desetak godina još jedan parametar probabilističke efektivnosti - pouzdanost - počinje intenzivnije da se analizira. Jedan od razloga što se ovaj parametar nije ranije uključivao u projekte VS je i činjenica da on zavisi od velikog broja različitih parametara sistema i njegovih elemenata, od njihove međuzavisnosti, kao i od konfiguracije sistema, pa je veoma komplikovan za izračunavanje.

Zbog navedenih činjenica često se u praksi i ne pokušava odrediti pouzdanost rada sistema. Umesto toga sprovode se analize najnepovoljnijih slučajnih događaja, definiše se najnepovoljniji scenario, i u odnosu na njega se definišu elementi sistema. Na primer, odgovor na pretpostavljenu, ali analitički nesagledanu opasnost od kvara pumpi je instalisanje većeg broja pumpi, tako da sistem može podmiriti potrebe potrošača i u slučaju ispada najveće pumpe. Ili, projektni odgovor na mogućnost prekida magistralnih dovoda vode je napajanje korisnika iz različitih pravaca (izvorišta), dupliranje ključnih dovoda, povećanje rezervoarskih prostora, izgradnja novih rezervoara duž dovoda, itd. Takav način definisanja elemenata sistema može kao rezultat dati rešenje inferiorno sa tehno-ekonomskog stanovišta (tačka A na slici 2.1, Hobbs & Beim, 1988).



Slika 2.1: Inferiorno rešenje sa tehno-ekonomskog stanovišta

Izvesnu teškoću predstavlja i činjenica da ne postoji jedinstveno mišljenje o načinu definisanja, merenja i vrednovanja pouzdanosti sistema, kao ni oko parametara koje treba uključiti u tu meru. Pouzdanost se na najopštijem nivou (prema ISO 8402) definiše kao sposobnost sistema da ispuni određene zahteve u određenom vremenskom intervalu i pod određenim radnim uslovima i uslovima u okruženju.

Za pouzdanost vodoprivrednih sistema predložen je veliki broj različitih definicija. Međutim, ni jedna od njih nije opšte prihvaćena, a svaka od njih može biti korisna prilikom sprovođenja određenih vrsta analize. Zbog toga se ovde se navode neke najčešće korišćene definicije (Hobbs & Beim, 1988):

- Pouzdanost se definiše kao sposobnost sistema da zadovolji određene potrebe pri različitim slučajnim događajima. Prema ovoj definiciji sistem se može oceniti kao pouzdan ako može zadovoljiti potrebe, npr. pri najvećoj zabeleženoj suši, ili ako otkaze ključni element opreme. Međutim, kriterijum slučajnog događaja podleže proizvoljnosti u izboru događaja i nepostojanosti (nestalnosti), pošto različite konfiguracije nekog sistema koje mogu izdržati iste slučajne događaje mogu imati različite pouzdanosti.
- Verovatnoća otkaza VS predstavlja verovatnoću da će zahtevi za vodom u sistemu biti veći od trenutno raspoloživih kapaciteta. Uzrok takvog stanja može biti nedovoljan kapacitet mreže, neodgovarajući raspoloživi kapacitet, ili ugrožena operativnost sistema na neki drugi način.
- Pokazatelji neispravnosti opisuju veličinu otkaza (kvara) sistema. Jedan takav pokazatelj bila bi očekivana količina manjka vode u sistemu u odnosu na količinu vode koja bi bila isporučena da sistem radi sa pouzdanošću od 100%. U nekim studijama vodoprivrednih sistema pouzdanost se definiše kao odnos dostupne i potrebne (zahtevane) godišnje količine vode.
- Pokazatelji frekvencija - trajanje koriste se za definisanje učestalosti otkaza i dužine njihovog trajanja.
- Pokazatelji ekonomskih efekata nedostatka (manjka) vode se često koriste. U vodoprivrednim studijama poznati su pod izrazima osetljivost, ranjivost sistema, kao i rizik.

2.2. Stanje istraživanja - podele i pregled postojećih metoda određivanja pouzdanosti vodoprivrednih sistema

U zavisnosti od složenosti (detaljnosti) opisa sistema modeli pouzdanosti vodoprivrednih sistema mogu se podeliti na tri grupe:

1) Grupisani izvori - grupisani potrošači. Ovi modeli koriste se za preliminarne analize velikih regionalnih sistema, a svode se uglavnom na proračun procenta vremena tokom koga će potrebe prevazići raspoložive količine vode i učestalost (frekvenciju) nedostatka vode (deficita), tj. očekivani broj deficita po vremenu.

2) Razgrupisani izvori i elementi prenosa vode - grupisani potrošači (korisnici). Modelima ove grupe modeliraju se izvorišta i sistem distribucije vode sa svim pratećim elementima. Potrošači (korisnici) se grupišu u potrošačke čvorove kojima se predstavlja potrošnja vode u pojedinim naseljima. U fizičkom smislu potrošački čvorovi predstavljaju npr. rezervoar vode pre ulaska u naselje. Sistemi ove grupe predstavljaju se uglavnom serijsko - paralelnim mrežama (sistemima veza). Pod pojmom serijsko - paralelnih mreža podrazumevaju se neorjentisane mreže bez petlji (zatvorenih sistema elemenata) koje se mogu redukovati u granatu strukturu samo sprovodeći serijske i paralelne agregacije. Svaki element ovakvog sistema definiše se funkcijama verovatnoće vremena rada i vremena otkaza. Za elemente sistema koji se javljaju u slučaju modeliranja vodoprivrednih sistema može se sa velikom tačnošću pretpostavi da se navedene funkcije mogu aproksimirati eksponencijalnom raspodelom, kao i da su elementi sistema popravljivi. Pod ovim pretpostavkama za potpuno definisanje sistema potrebno je raspolagati samo veličinom srednjeg vremena popravke (MTTR - Mean Time To Repair) i srednjeg vremena između otkaza (MTBF - Mean Time Between Failure). Na ovom nivou kompleksnosti modela često se koriste i analize stabla otkaza.

3) Razgrupisani izvorni i potrošački čvorovi. Ovi modeli koriste se za detaljne analize, kada je potrebno modelirati i sam distributivni sistem. Sistem se u tom slučaju predstavlja složenim mrežnim strukturama koje sadrže petlje i ne mogu se redukovati u granate sisteme elemenata. Veliki broj modela ove grupe bavi se mehaničkom pouzdanošću veze između dva čvora, povezanosti grupe čvorova i povezanosti celog sistema (svih čvorova), a samo manji broj modela uključuje i ograničenja vezana za kapacitete veza.

U zavisnosti od metoda proračuna modeli se mogu podeliti na dva osnovna tipa: Monte Carlo simulacija i modeli analitičke simulacije*.

Monte Carlo simulacija

Monte Carlo simulacija je već postala tradicionalna tehnika koja omogućava određivanje svih mera pouzdanosti sistema. Ovaj metod analize pouzdanosti prvi su primenili Damelin et al. (1972) na sistem tipa: grupisani izvori - grupisani potrošači. Modelom je obuhvaćeno deset bunara i buster stanica sa neizvesnošću u pogledu kapaciteta i determinističkim promenama zahteva za vodom. Eksplicitno su modelirani i nivoi u rezervoaru, a otkaz sistema definisan je kao situacija kada postoji deficit kapaciteta a rezervoar je prazan. Wagner et al. (1988) su, takođe, koristili Monte Carlo simulaciju za modeliranje distributivnog sistema. Pumpe i cevi su u modelu podložne slučajnom otkazu prema unapred definisanoj verovatnoći raspodele, a količina vode u čvorovima mreže je definisana kao funkcija pritiska.

* Izraz "analitička simulacija", iako sam po sebi nije potpuno precizan, prihvaćen je u praksi, a predstavlja podkategoriju analitičkih metoda.

Iako ovaj tip modela omogućava određivanje svih mera pouzdanosti, trajanje i troškovi proračuna su ogromni, pošto se simulacija sprovodi za celi vek sistema. Ovo posebno dolazi do izražaja kada se mera pouzdanosti uključuje u optimizacione modele, gde se zahteva ispitivanje velikog broja različitih konfiguracija sistema.

Modeli analitičke simulacije

Modeli analitičke simulacije koriste teoriju verovatnoće i numeričke metode za proračun pouzdanosti određenih parametara sistema čije su kapacitivne komponente podložne slučajnom ispadu. Pošto se koriste numeričke metode, parametri pouzdanosti nisu eksplicitne funkcije parametara sistema.

Metode ovog tipa imaju više prednosti nad Monte Carlo simulacijama. Za proračun frekvencije (učestalosti) slučajnih događaja nije potrebno sprovoditi duge simulacije, što značajno skraćuje vreme modeliranja. Analiza osetljivosti rešenja se obično lako sprovodi, bez potrebe izvršavanja simulacionih analiza. Posebna prednost je i činjenica da se ovi modeli lakše ugrađuju u druge modele: optimizacione, upravljačke i dr.

Za potrebe modeliranja vodoprivrednih sistema koriste se tri tipa analitičke simulacije: modeli tipa frekvencija - trajanje (frequency - duration FD modeli), modeli koji koriste Markove lance (modele) i modeli pouzdanosti mreže.

♦ **FD modeli** koriste se pri sprovođenju opštijih analiza vodoprivrednih sistema, analiza tipa grupisani izvori - grupisani potrošači i razgrupisani izvori i elementi transporta - grupisani potrošači. Prvi modeli ovog tipa koristili su se za određivanje verovatnoće pojave količinskog (zapreminskog) deficita, njihove učestalosti (frekvencije) i trajanja. Ovim modelima eksplicitno su se modelirali zahtevi za vodom (kao slučajna komponenta), kapacitivne veličine elemenata sistema (kao kapacitivni element podrazumevao se i dotok vode u sistem, ako on nije regulisan akumulacijom). Osnovne FD metode nisu uzimale u razmatranje rezervoare, pa su davale tzv. gornju granicu pouzdanosti sistema.

Kuliasha (1983) u modele ovog tipa uvodi i zapreminu rezervoara, uz pretpostavku da se rezervoar napuni na kraju svakog zapreminskog deficita. Duan & Mays (1987) razvijaju FD model koji razmatra nekoliko elemenata vezanih serijski i paralelno, kao i rezervoar.

Dalji razvoj ovog tipa analize dovodi do formiranja modela koji omogućavaju modeliranje sistema sa neograničenim brojem serijski i paralelno vezanih elemenata, kod kojih su potrebe za vodom slučajne veličine (Hobbs & Beim, 1988). Rezervoari se modeliraju uz pretpostavku da se napune na kraju svakog kumulativnog zapreminskog deficita. Očekivana neisporučena količina vode (očekivani zapreminski deficit) dobija se kod rezultat verovatnoće otkaza sistema. U ovom modelu pretpostavlja se da elementi (pumpe, cevovodi) imaju konstantan kapacitet i verovatnoću otkaza (mehanička pouzdanost).

U modelu koji su razvili Duan et al. (1990) kapacitet elemenata se računa kao funkcija pritiska. Model služi sa optimalno projektovanje pumpnog i distribucionog sistema sa stanovišta pouzdanosti. Treba napomenuti da se pod distribucionim sistemom podrazumevaju serijsko - paralelni sistemi, tj. distribucija vode od izvora do grupisanih potrošača (čvorovi koji su definisani pre ulaska u naselje). Model se sastoji od glavnog dela u kome se principom enumeracije na osnovu troškova sistema određuje potreban broj pumpi i rezervoara, i podprograma u kome se principom nelinearnog programiranja određuje optimalna dispozicija mreže u strogo kontrolisanim granicama (koje su definisane pumpama i rezervoarima određenim u glavnom delu programa). U svakoj iteraciji nelinearne optimizacije određuju se parametri pouzdanosti i rešavaju se jednačine održanja mase i energije korišćenjem hidrauličkog simulacionog modela. U model se, korišćenjem metode Lagranževih kaznenih funkcija, ugrađuju granične vrednosti pritiska i pouzdanosti. Ovaj metod ne uzima u obzir mehanički otkaz veza (cevi) u sistemu i ograničen je na analizu relativno malih sistema serijsko - paralelnih struktura.

♦ Modeli koji se zasnivaju na korišćenju **Markovih lanaca** omogućavaju tačnije modeliranje i analizu rezervoara kao elementa sistema. U modelima ovog tipa obično se korišćenjem Markovljevih lanaca modeliraju dotok vode u sistem (rečni protoci i sl.), raspoloživi kapaciteti i zahtevi za vodom, dok se nivoi u rezervoarima i/ili akumulacijama definišu kao promenljive veličine čija je promena deterministička funkcija ostalih komponenti sistema (Beim & Hobbs, 1988).

Ovim modelima određuje se veliki broj parametara pouzdanosti: zapreminski deficit, učestalost i trajanje otkaza sistema, i dr. Osnovni nedostatak ove metode je veliko vreme proračuna, koje nije značajnije manje od Monte Carlo simulacionih modela.

♦ Treći tip analitičke simulacije - **analiza pouzdanosti mreže** - koristi se za analizu pouzdanosti složenih distributivnih sistema. To su sistemi koji imaju veći broj potrošačkih čvorova (čvorovi u kojima se zahteva određena količina vode i određeni pritisak), više izvorišnih čvorova i koji nisu obični kombinovani serijsko - paralelni sistemi elemenata.

Jednostavniji modeli ovog tipa razmatraju samo mehaničku pouzdanost elemenata i sistema (verovatnoća da će element/sistem biti u operativnom stanju u određenom vremenskom trenutku), koja se određuje korišćenjem veličina kao što su srednje vreme između otkaza (MTBF) i srednje vreme popravke (MTTR). U kompleksnijim modelima uvodi se i proračun hidraulike, odnosno podrazumeva se da čvor nije operativan ako su količine ili pritisci vode u njemu manji od minimalnih potrebnih veličina. O ovim pouzdanostima biće više reči u nastavku disertacije.

Prvi istraživači koji su se bavili problematikom pouzdanosti složenih distributivnih sistema (Rowell & Barnes, 1982) smatrali su da svaki potrošački čvor treba da ima dve nezavisne putanje (od izvorišnog čvora), pri čemu svaka treba da bude tako dimenzionisana da do potrošačkog čvora može da dovede zahtevanu količinu vode.

Goulter & Coals (1986) kao meru pouzdanosti čvora koriste komplement izolovanosti čvora, pri čemu se pod izolovanošću čvora podrazumeva verovatnoće istovremenog otkaza svih veza povezanih sa ispitivanim čvorom. Cullinane (1986) kao mere pouzdanosti koristi koncepte mehaničke pouzdanosti i dostupnosti čvora (procenat vremena kada je pritisak u čvoru veći od trenutno potrebnog u zavisnosti od zahteva za vodom). Očekivana pouzdanost čvora dobija se kombinovanjem ovih mera pouzdanosti. Iako ova metoda ima izvesne prednosti, jer uzima u obzir probabilističku prirodu zahteva za vodom, vreme proračuna je vema veliko, zbog velikog broja hidrauličkih simulacija, što ograničava njenu upotrebu.

Za proračun pouzdanosti kompleksnih sistema mnogi autori koriste i metod minimalnih preseka - minimalni skup komponenti sistema čiji istovremeni otkaz dovodi do otkaza sistema (Shamir & Howard, 1979, Mays et al., 1986, Su et al., 1987). Međutim, veliki broj minimalnih preseka zahteva i veliki broj hidrauličkih simulacija, što rezultuje velikim vremenom proračuna.

Smanjenje broja simulacija postiže se sprovođenjem proračuna kroz nekoliko faza (koraka). Metod je razvila grupa istraživača (Yang et al., 1996), a zasniva se na određivanju pouzdanosti (korišćenjem metode minimalnih preseka) za sledećih nekoliko tipova stanja (faze) sistema: 1) pouzdanost za svaki par 'izvorni čvor - potrošački čvor', što u stvari predstavlja verovatnoću da je određeni potrošački čvor povezan sa određenim izvornim čvorom; 2) pouzdanost za svaki potrošački čvor predstavlja verovatnoću da je određeni potrošački čvor povezan sa bilo kojim izvornim čvorom; 3) pouzdanost grupe potrošačkih čvorova je verovatnoća da su potrošački čvorovi određene grupe povezani sa bar jednim izvorišnim čvorom; 4) pouzdanost sistema predstavlja verovatnoću da je svaki potrošački čvor povezan sa najmanje jednim izvorišnim čvorom. Skup minimalnih preseka određuje se samo za prvu fazu, dok se u ostalim fazama skup minimalnih preseka dobija kombinovanjem rezultata prve faze. Iako se u prvoj fazi proračuna sprovodi detaljna analiza parova 'izvor - potrošač', ukupan broj skupova veza (minimalnih preseka) je značajno manji u odnosu na ispitivanje cele mreže. Nedostatak ovog modela je činjenica da se modelom određuje samo mehanička pouzdanost sistema. Drugi nedostatak je mogućnost sprovođenja proračuna samo za sisteme sa orijentisanim grafovima, što ograničava mogućnost korišćenja ovog modela na jednostavnije sisteme u kojima je unapred poznat smer toka vode.

Smanjenje broja simulacija može se postići i uvođenjem pretpostavke da istovremeno mogu otkazati najviše dve veze u sistemu. U programskom paketu AquaRel (Røstum et al., 2000) koristi se ova pretpostavka u cilju određivanja skupa mini preseka mreže. Pri tome se za svaku kombinaciju otkaza veza sprovodi hidraulički proračun, odnosno proveravaju se efekti otkaza veza na svaki čvor. Na ovaj način dobija se skup mini preseka za svaki čvor, na osnovu kojih se dalje sprovodi analiza pouzdanosti.

Za proračun složenih neorijentisanih mreža koristi se i model zasnovan na polinomnom algoritmu, koji računa pouzdanost K-čvora neorijentisane serijsko -

paralelne mreže (Wagner et al., 1988). Ovako izračunatoj mehaničkoj pouzdanosti dodaje se i mera pouzdanosti hidraulike, kao verovatnoća da potrošački čvor dobija dovoljne količine vode.

Dalji razvoj metoda analize pouzdanosti distributivnih mreža usmeren je ka implementaciji mera pouzdanosti u optimizacione modele (prvenstveno modele minimizacije troškova). Fujiwara & De Silva (1990) predlažu heuristički iterativni metod kojim se razmatra veza (zavisnost) između pouzdanosti i koštanja sistema. Optimizacionim modelom se prvo određuju elementi sistema (prečnici cevi i protoci). Zatim, model pouzdanosti računa maksimalne protoke koji se javljaju kao posledica otkaza nekog elementa (veze, cevi), a nakon toga i samu veličinu pouzdanosti. Razvija se iterativni metod i protoci se modifikuju tako da se postigne značajno povećanje pouzdanosti sa malim povećanjem cene. Postupak se ponavlja dok se postigne pouzdanost veća od neke zahtevane vrednosti. Model pouzdanosti pretpostavlja da u sistemu može otkazati samo jedna veza, čime se sa 2^R kombinacija, proračun svodi na $R+1$ kombinaciju (R - broj veza u sistemu). Nedostatak metode je i činjenica da se pri proračunu pouzdanosti sistema ne uzima u obzir hidraulički kontinuitet unutar svake petlje, što kao rezultat može dati asimetrična rešenja za potpuno simetrične sisteme.

2.3. Metode analize pouzdanosti

Kao što je već istaknuto, pod pojmom pouzdanost 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. Po 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 - podsisteme.

Problematika vezana za određivanje pouzdanosti pokrivena je postojećom literaturom (Đorđević, 1990, Vujošević, 1999, Nahman, 2001). U ovom delu disertacije, u cilju preglednosti i celovitosti teksta, navode se samo osnovni pojmovi iz teorije pouzdanosti elemenata i sistema, koji su osnova za dalje složenije proračune i metode.

2.3.1. Funkcije pouzdanosti elemenata sistema

Funkcija pouzdanosti $R_i(t)$ nekog i -tog elementa sistema (C_i) definiše se kao verovatnoća da element neće otkazati u nekom intervalu vremena t :

$$R_i(t) = P\{T_i > t\}$$

gde je T_i slučajna promenljiva koja označava vreme od početka rada do prvog otkaza elementa C_i .

Funkcija nepouzdanosti $Q_i(t)$, analogno funkciji pouzdanosti, definiše verovatnoću da će element otkazati u nekom intervalu vremena t :

$$Q_i(t) = P\{T_i < t\} = 1 - R_i(t)$$

Dve najvažnije funkcije u teoriji pouzdanosti, preko kojih se određuju sve ostale veličine pouzdanosti elementa, su funkcija gustine otkaza $f_i(t)$ i funkcija intenziteta otkaza $\lambda_i(t)$ ili funkcija opasnosti od kvara:

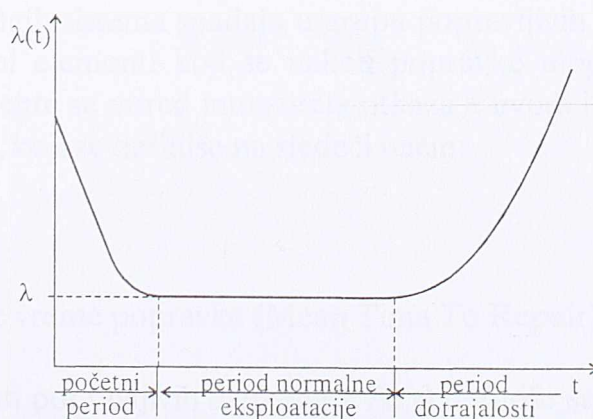
$$f_i(t) = \frac{dQ_i(t)}{dt}$$

$$\lambda_i(t) = \frac{f_i(t)}{R_i(t)} = -\frac{dR_i(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R_i(t)} = -\frac{dR_i(t)}{R_i(t)dt}$$

Iz poslednje relacije dobija se najopštiji matematički oblik funkcije pouzdanosti koji se može primeniti za bilo koju funkciju gustine otkaza:

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t)dt\right)$$

Funkciju intenziteta otkaza određuje, po pravilu, proizvođač elementa eksperimentalnim ispitivanjem N elemenata, odabranih metodom 'slučajnog uzorka'. Funkcija $\lambda_i(t)$ definiše odnos broja otkaza u jedinici vremena i broja elemenata koji još nisu otkazali. Ova funkcija najčešće ima karakterističan oblik "kade" (slika 2.2), sa većim vrednostima intenziteta otkaza u početnom periodu eksploatacije, zbog skrivenih mana pri izradi elementa, tzv. "period dečijih bolesti", približno konstantnim vrednostima u periodu tzv. normalnog rada elementa i ponovnog povećavanja vrednosti intenziteta otkaza u završnom vremenu eksploatacije, koje su rezultat starenja i istrošenosti elementa.



Slika 2.2: Oblik funkcije intenziteta otkaza

Za elemente vodoprivrednih sistema funkcija gustine otkaza najčešće se aproksimira eksponencijalnom raspodelom (mada su moguće i druge raspodele):

$$f_i(t) = \lambda_i(t) \cdot e^{-\lambda_i t}$$

pa je funkcija pouzdanosti u tom slučaju:

$$R_i(t) = 1 - \int_0^t \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot dt = 1 - e^{-\lambda_i t}$$

Funkcija intenziteta otkaza je u tom slučaju:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i$$

Iz prethodnih relacija može se zaključiti da u slučaju eksponencijalne raspodele funkcije gustine otkaza funkcija intenziteta otkaza na zavisi od vremena, i konstantna je vrednost. Ta vrednost uglavnom odgovara vrednosti intenziteta otkaza u ustaljenom (normalnom) periodu rada elementa, sa konstantnim intenzitetom otkaza, do koga dolazi iznenada, iz slučajnih razloga (vrednost λ na slici 2.2).

Očekivano (srednje) vreme bezotkznog rada $T_{0,i}$ dobija se kao matematičko očekivanje slučajne promenljive T_i :

$$T_{0,i} = M(T_i) = \int_0^{\infty} t \cdot f_i(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R_i(t) dt$$

U slučaju eksponencijalne raspodele funkcije gustine otkaza ova vrednost postaje konstantna:

$$T_{0,i} = \frac{1}{\lambda_i}$$

Umesto oznake $T_{0,i}$ često se koriste i oznake $MTTF_i$ (Mean Time To Failure - srednje vreme do otkaza) za nepopravljive elemente i $MTBF_i$ (Mean Time Between Failure - srednje vreme između otkaza) za popravljive elemente.

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 pored intenziteta otkaza λ uvodi i novi pokazatelj nazvan intenzitet popravke μ , koji se definiše na sledeći način:

$$\mu_i = \frac{1}{MTTR_i}$$

gde je $MTTR_i$ srednje vreme popravke (Mean Time To Repair).

Funkcija raspoloživosti popravljivih elemenata $A_i(t)$ definiše se kao verovatnoća da će element raditi u nekom vremenskom trenutku t :

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

U slučajevima kada je vrednost intenziteta popravke jednaka nuli ($\mu_i=0$), tj. kada je reč o nepopravljivim elementima, raspoloživost elementa jednaka je njegovoj pouzdanosti.

$$A_i(t) = R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

U slučajevima dugog rada elementa, kada $t \rightarrow \infty$, raspoloživost elementa teži konstantnoj vrednosti, tj. stacionarnom koeficijentu raspoloživosti:

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

2.3.2. Određivanje pouzdanosti sistema

Funkcije pouzdanosti sistema definišu se analogno definisanju funkcija elemenata sistema, pa se ovde neće ponavljati.

Za sisteme sa statistički međusobno nezavisnim otkazima elemenata moguće je direktno dobiti funkciju pouzdanosti korišćenjem koncepta strukturne funkcije (Reinschke, 1979, Vujošević, 1999). 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:

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

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:

$$\mathbf{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t))$$

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

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

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.

Najjednostavniji sistemi elemenata su serijski i paralelni sistemi. Sistem sastavljen od serijski povezanih elemenata je ispravan samo ako su ispravni svi elementi tog sistema, odnosno neispravan je ako je bar jedan element sistema neispravan. Svi elementi takvog sistema vezani su logičkom vezom (znakom) "I":

$$h(\mathbf{y}) = h(y_1, y_2, \dots, y_N) = \bigwedge_{i=1}^N y_i = y_1 \wedge y_2 \wedge \dots \wedge y_N$$

Prema tome za sisteme sastavljene od serijski vezanih elemenata strukturna funkcija se može napisati u sledećem obliku:

$$h(\mathbf{y}) = \bigwedge_{i=1}^N y_i = \prod_{i=1}^N y_i$$

Sistem sastavljen od paralelno vezanih elemenata u slučaju funkcionalnosti po principu "jedan od N", ispravan je ako je bar jedan element ispravan, odnosno neispravan je ako su svi njegovi elementi neispravni. Znači elementi takvog sistema vezani su logičkim znakom "ILI":

$$h(\mathbf{y}) = \bigvee_{i=1}^N y_i = y_1 \vee y_2 \vee \dots \vee y_N$$

Ako se sa \bar{y}_i označi indikator stanja neispravnosti ($\bar{y}_i = 1 - y_i$), može se napisati:

$$h(\bar{\mathbf{y}}) = \bigwedge_{i=1}^N \bar{y}_i = \bar{y}_1 \wedge \bar{y}_2 \wedge \dots \wedge \bar{y}_N = (1 - y_1) \wedge (1 - y_2) \wedge \dots \wedge (1 - y_N)$$

iz navedenih relacija dobija se izraz za strukturnu funkciju sistema paralelno vezanih elemenata:

$$h(\mathbf{y}) = 1 - h(\bar{\mathbf{y}}) = 1 - \prod_{i=1}^N \bar{y}_i = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - y_i)$$

Za drugi tip paralelne veze, kada je za ispravan rad sistema neophodno da radi najmanje r od ukupno n istih elemenata (tip "r od N") strukturna funkcija sistema može se opisati na sledeći način:

$$h(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } \sum_{j=1}^N y_j \geq r \\ 0, & \text{ako je } \sum_{j=1}^N y_j < r \end{cases}$$

Korišćenjem binomne raspodele, za slučaj kada su u sistemu isti elementi, dobija se sledeći izraz:

$$h(\mathbf{y}) = \sum_{x=r}^N \binom{N}{x} y^x (1-y)^{N-x} ; \quad \binom{N}{x} = \frac{N!}{x!(N-x)!}$$

U vodoprivrednim sistemima veoma često se javlja slučaj da je za ispravan rad sistema (ili nekog njegovog dela) neophodno da rade "2 od 3" elementa. U tom slučaju strukturna funkcija sistema ima sledeći oblik:

$$h(\mathbf{y}) = (y_1 \wedge y_2) \vee (y_2 \wedge y_3) \vee (y_1 \wedge y_3)$$

iz koga se dobija algebarska formulacija:

$$h(\mathbf{y}) = 1 - (1 - y_1 y_2) (1 - y_2 y_3) (1 - y_1 y_3) = y_1 y_2 + y_2 y_3 + y_1 y_3 - 2 y_1 y_2 y_3$$

U slučaju kada je razmatrani sistem (tipa "2 od 3") sastavljen od istih elemenata, strukturna funkcija dobija sledeći oblik:

$$h(\mathbf{y}) = 3 y^2 - 2 y^3$$

što je, naravno, i oblik koji se dobija razvijanjem napred navedenog izraza za sistem tipa "r od N" elemenata.

Korišćenjem (kombinovanjem) opisanih strukturnih funkcija za serijski i paralelno vezane elemente može se odrediti strukturna funkcija bilo kog kombinovanog serijsko - paralelnog sistema elemenata. 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 mrežnih sistema mogu se odrediti na nekoliko načina. Naravno, svakom od metoda, koje će u nastavku biti izložene, može se odrediti i strukturna funkcija serijsko - paralelnih sistema.

Tablice istinitosti zasnivaju se na principu potpune enumeracije, tj. određuju se indikatori ispravnosti sistema za sve moguće kombinacije ispravnosti elemenata. Na osnovu vrednosti iz tablice istinitosti određuje se strukturna funkcija. Da bi se ona odredila neophodno je skup E svih N-točlanih vektora $E = \{\mathbf{y}\}$ podeliti na dva podskupa:

- podskup ispravnih sistema, kada je indikator ispravnosti jednak 1:

$$E_+ = \{\mathbf{y} : h(\mathbf{y})=1\}$$

- podskup neispravnih sistema, kada je indikator ispravnosti jednak 0:

$$E_- = \{\mathbf{y} : h(\mathbf{y})=0\}$$

Ako se vreme bezotkaznog rada sistema definiše kao $T = \{t : \mathbf{y}(t) \in E_-\}$, onda se verovatnoća otkaza sistema može definisati sa:

$$\bar{R}(t) = Q(t) = P \{T < t\},$$

a verovatnoća bezotkaznog rada sistema sa:

$$R(t) = P \{T \geq t\}.$$

Sada se jednostavno dobija izraz za verovatnoću bezotkaznog rada sistema:

$$R(t) = \sum_{\mathbf{y} \in E_+} \left\{ \prod_{i=1}^N (R(t)_i^{y_i} (1 - R(t)_i)^{1-y_i}) \right\}$$

Pošto se broj mogućih kombinacija povećava po eksponencijalnom zakonu sa povećanjem broja elemenata sistema (broj mogućih kombinacija sistema je 2^N) ovaj metod je primenljiv samo za sistema sa relativno malim brojem elemenata.

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

$$(1_i, \mathbf{y}) = (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, 1, y_{i+1}, \dots, y_N) \quad i$$

$$(0_i, \mathbf{y}) = (y_1, y_2, \dots, y_{i-1}, 0, y_{i+1}, \dots, y_N),$$

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

$$h(\mathbf{y}) = y_i \cdot h(1_i, \mathbf{y}) + (1 - y_i) \cdot h(0_i, \mathbf{y})$$

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

* * *

Prilikom određivanja pouzdanosti koherentnih sistema (kakvi su uglavnom vodoprivredni sistemi) mogu se koristiti i metode minimalnih puteva i minimalnih preseka.

Pod koherentnim sistemima podrazumevaju se sistemi koji ne sadrže nebitne komponente (komponente koje ne utiču na stanje sistema). Znači, ne postoje komponente za koje bi važilo: $h(1_i, \mathbf{y}) = h(0_i, \mathbf{y})$.

Strukturalna funkcija koherentnih sistema je neopadajuća po svakom argumentu, tj. zadovoljava sledeće uslove:

$$h(\mathbf{1}) = 1, \quad \text{pri čemu je } \mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)$$

$$h(\mathbf{0}) = 0, \quad \text{pri čemu je } \mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)$$

$$h(\mathbf{y}) \geq h(\mathbf{z}), \quad \text{za } y_i \geq z_i, \quad i=1, \dots, N$$

Znači, sistem je ispravan ako su sve njegove komponente ispravne, odnosno neispravan ako su mu sve komponente neispravne. Treći uslov znači da će sistem biti ispravan za svaki skup elemenata koji je nadskup skupa elemenata za koji je sistem ispravan.

Za strukturnu funkciju koherentnih sistema važi i relacija:

$$\bigwedge_{i=1}^N y_i \leq h(\mathbf{y}) \leq \bigvee_{i=1}^N y_i,$$

odnosno:

$$\prod_{i=1}^N y_i \leq h(\mathbf{y}) \leq 1 - \prod_{i=1}^N (1 - y_i)$$

kojom se iskazuje da pouzdanost koherentnog sistema ne može biti manja od pouzdanosti sistema koji bi bio formiran od serijski vezanih elemenata, ni pouzdaniji od sistema koji bi bio sastavljen od elemenata vezanih paralelno.

Metod minimalnih puteva podrazumeva određivanje svih puteva koji omogućavaju ispravan rad sistema. Skup $A = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ naziva se mini putem ako je:

- sistem ispravan ako je ispravan svaki element tog skupa, nezavisno od funkcionisanja ostalih elemenata u sistemu,
- nijedan podskup skupa A ne ispunjava prethodni uslov, što znači da ni jedan mini put nije u potpunosti sadržan u nekom drugom mini putu.

Svaki mini put sastoji se od serijski vezanih elemenata, a za ispravan rad sistema neophodno je da je ispravan bar jedan mini put. Prema tome, strukturna funkcija sistema predstavlja se paralelnom vezom mini puteva, koji su serijska veza svojih elemenata.

Neka se sistem sastoji od m mini puteva:

$$A_1 = \{y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,n_1}\}$$

.....

$$A_j = \{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,n_j}\}$$

.....

$$A_m = \{y_{m,1}, y_{m,2}, \dots, y_{m,n_m}\}$$

gde je n_j broj elemenata koji formiraju j -ti mini put. Ako se sa $y_{j,i}$ označi i -ti element j -tog mini puta, strukturna funkcija sistema može se napisati na sledeći način:

$$h(\mathbf{y}) = \bigvee_{j=1}^m \left[\bigwedge_{i=1}^{n_j} y_{j,i} \right] = \bigvee_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^{n_j} y_{j,i} \right] = 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} y_{j,i} \right]$$

Metod minimalnih preseka podrazumeva određivanje svih preseka čiji neispravan rad dovodi do neispravnog funkcionisanja sistema. Skup elemenata $A = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ naziva se mini presek ako je:

- sistem neispravan ako je neispravan svaki element tog skupa, nezavisno od funkcionisanja ostalih elemenata u sistemu,
- nijedan podskup skupa A ne ispunjava prethodni uslov, što znači da ni jedan mini presek nije u potpunosti sadržan u nekom drugom mini preseku.

Svaki mini presek sastoji se od paralelno vezanih elemenata, a za ispravan rad sistema neophodno je da je ispravan bar jedan od njih. Prema tome, strukturna funkcija sistema predstavlja se serijskom vezom mini preseka, a oni predstavljaju paralelnu vezu svojih elemenata.

Neka se, kao i u prethodnom slučaju, sistem sastoji od m mini preseka:

$$A_1 = \{y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,n_1}\}$$

.....

$$A_j = \{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,n_j}\}$$

.....

$$A_m = \{y_{m,1}, y_{m,2}, \dots, y_{m,n_m}\}$$

gde je n_j broj elemenata koji formiraju j -ti mini presek. Ako se sa $y_{j,i}$ označi i -ti element j -tog mini preseka, strukturna funkcija sistema može se napisati na sledeći način:

$$h(\mathbf{y}) = \bigwedge_{j=1}^m \left[\bigvee_{i=1}^{n_j} y_{j,i} \right] = \bigwedge_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - y_{j,i}) \right] = \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - y_{j,i}) \right]$$

* * *

Za sisteme sa međusobno nezavisnim otkazima iz strukturne funkcije $h(\mathbf{y})$ moguće je direktno dobiti funkciju pouzdanosti sistema R :

$$R = \psi(r_1, r_2, \dots, r_N) = \psi(\mathbf{r})$$

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

Funkcije pouzdanosti dobijaju se direktno iz strukturne funkcije ako se promenljive koje označavaju indikatore stanja zamene pouzdanostima elemenata. Izrazi za pouzdanost serijskih (R_S) i paralelnih (R_P) sistema elemenata dobijajeni na ovaj način, naravno, iste su kao izrazi prikazani u ranijem delu teksta:

$$R_S = P\{h(\mathbf{y})=1\} = P\left\{\prod_{i=1}^N y_i = 1\right\} = \prod_{i=1}^N P\{y_i = 1\} = \prod_{i=1}^N r_i$$

$$R_P = P\{h(\mathbf{y})=1\} = P\left\{1 - \prod_{i=1}^N (1 - y_i) = 1\right\} = 1 - \prod_{i=1}^N P\{(1 - y_i) = 1\} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_i)$$

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

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

gde je:

$$(1_i, \mathbf{r}) = (r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, 1, r_{i+1}, \dots, r_N)$$

$$(0_i, \mathbf{r}) = (r_1, r_2, \dots, r_{i-1}, 0, r_{i+1}, \dots, r_N)$$

Na sličan način dobijaju se i izrazi za pouzdanost korišćenjem metoda mini puteva i mini preseka.

Pouzdanost sistema sa međusobno zavisnim otkazima

U prethodnom razmatranju opisane su metode analize pouzdanosti pod pretpostavkom da su otkazi elemenata u sistemu nezavisni, tj. da otkaz jednog elementa nema nikakav uticaj na otkaze ostalih elemenata u sistemu. Međutim, postoje situacije kada ova pretpostavka ne važi, odnosno kada su otkazi elemenata međusobno zavisni.

Zavisnost otkaza može se svrstati u nekoliko grupa:

1. Postojanje rezerve u sistemu

Rezervni elementi omogućavaju funkcionisanje sistema i nakon otkaza osnovnog elementa, preuzimajući njegovo opterećenje. Postojanje ovih elemenata u sistemu utiče na povećanje gotovosti i pouzdanosti sistema. Rezervni elementi se dodaju određenim, izuzetno važnim, elementima sistema, od čijeg funkcionisanja zavisi rad celog sistema.

U zavisnosti od opterećenja, rezervni elementi mogu se podeliti na tri grupe:

- *potpuno opterećeni rezervni elementi (radna rezerva)* - u koje spadaju elementi koji se u sistemu nalaze pod punim radnim opterećenjem. Ovi elementi rade sa određenom pouzdanošću, određenom verovatnoćom i učestalošću otkaza, nezavisno od toga da li je element u radu ili rezervi. Verovatnoća otkaza takvih elemenata zavisi samo od njihovih svojstava, pa se otkazi rezervnih elemenata iz ove grupe mogu smatrati statički nezavisnim od funkcionisanja ostalih elemenata sistema.

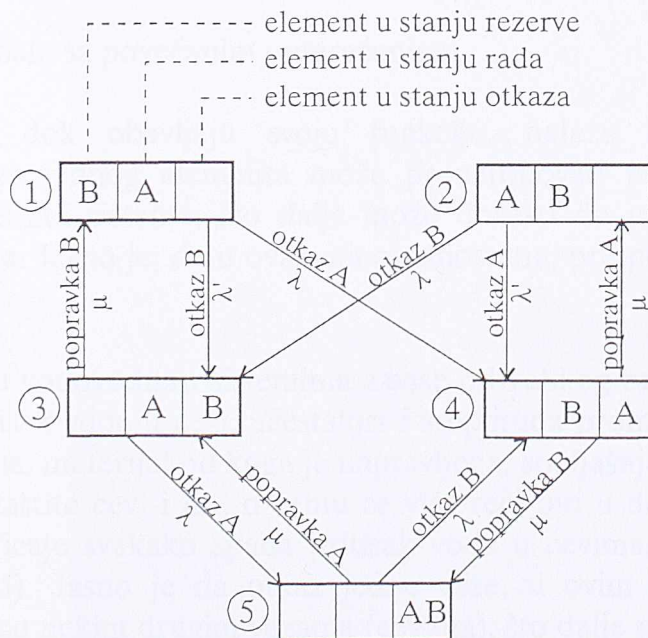
- *neopterećeni rezervni elementi (hladna rezerva)* - su elementi koji primaju opterećenje u slučaju otkaza osnovnog elementa. Dok se nalaze u stanju rezerve rezervni elementi ove grupe ne mogu otkazati, tj. verovatnoća otkaza ovih elemenata jednaka je nuli. Nakon ulaska u rad i primanja opterećenja verovatnoća otkaza dobija neku realnu vrednost, što znači da otkazi rezervnih elemenata ove grupe zavise od otkaza osnovnih elemenata.

- *delimično opterećeni rezervni elementi* - nalaze se u sistemu pod nekim nižim opterećenjem. Znači, ovi elementi mogu otkazati dok se nalaze u ulozi rezerve, ali je verovatnoća otkaza mnogo manja od verovatnoće otkaza osnovnog elementa. Nakon otkaza osnovnog elementa rezervni element prima puno opterećenje, pa njegova verovatnoća otkaza dobija realnu, veću vrednost, što, kao i u slučaju neopterećenih rezervnih elemenata, znači da otkazi zavise od otkaza osnovnih elemenata.

Na najopštijem nivou verovatnoća da se sistem sa rezervom nalazi u stanju "i", u nekom vremenskom trenutku t zavisi od verovatnoće ulaska i izlaska sistema iz tog stanja. Ako se sa $R_i(t)$ označi verovatnoća da se sistem nalazi u stanju "i", pri čemu su stanja "i" kombinacije rada osnovnog i rezervnog elementa (slika 2.3), izvod $R'_i(t)$ može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$R'_i(t) = (\text{ulazi u stanje } i) - (\text{izlazi iz stanja } i)$$

$$R'_i(t) = \sum_j (\text{intenzitet prelaza u stanje } i \text{ iz drugih stanja } j) \cdot (\text{verovatnoća stanja } j) - \sum_j (\text{intenzitet prelaza iz stanja } i \text{ u druga stanja } j) \cdot (\text{verovatnoća stanja } j)$$



Slika 2.3: Dijagram stanja i prelazaka za sistem sa rezervom

Na opisani način formira se sistem diferencijalnih jednačina, za svaki od mogućih stanja, čijim se rešavanjem (uz poznavanje početnih uslova) dolazi do rešenja. Za slučaj sistema sastavljenog od dva ista elementa, od kojih se svaki može naći u stanju rada, rezerve i otkaza, čija je šema prikazana na slici 2.3, sistem diferencijalnih jednačina je sledeći:

$$R_1'(t) = -(\lambda + \lambda')R_1(t) + \mu R_3(t)$$

$$R_2'(t) = -(\lambda + \lambda')R_2(t) + \mu R_4(t)$$

$$R_3'(t) = \lambda' R_1(t) + \lambda R_2(t) - (\lambda + \mu)R_3(t) + \mu R_5(t)$$

$$R_4'(t) = \lambda' R_2(t) + \lambda R_1(t) - (\lambda + \mu)R_4(t) + \mu R_5(t)$$

$$R_5'(t) = \lambda R_3(t) + \lambda R_4(t) - 2\mu R_5(t)$$

uz početne uslove:

$$R_1(0) = 1$$

$$R_2(0) = R_3(0) = R_4(0) = R_5(0) = 0$$

gde su:

μ - intenzitet popravke

λ i λ' - intenziteti otkaza osnovnog i rezervnog elementa. Ove vrednosti zavise od tipa opterećenja rezervnog elementa, pa važi:

- rezervni element radi kao opterećena (radna) rezerva: $\lambda = \lambda'$,
- rezervni element se nalazi u ulozi neopterećene (hladne) rezerve: $\lambda' = 0$,
- rezervni element radi kao delimično opterećena rezerva: $0 < \lambda' < \lambda$.

2. Postojanje elemenata sa povećanim opterećenjem

Elementi sistema, dok obavljaju svoju funkciju, nalaze se pod određenim opterećenjem. Otkaz jednog elementa može prouzrokovati povećano opterećenje nekih drugih elemenata sistema, što dalje može dovesti do povećanog intenziteta otkaza tih elemenata. Jasno je, da u ovakvim okolnostima, pretpostavka o nesavisnim otkazima ne važi.

Otkazi veza (cevi) u vodovodnim sistemima zavise od velikog broja različitih uticaja, kao što su npr: pritisak vode u cevi, učestalost i amplituda promene pritiska, teren u kome je cev položena, materijal od koga je napravljena, spoljašnje opterećenje na cev, starost cevi, način zaštite cevi i dr., o čemu će više reči biti u delu 4 ove disertacije. Među najvažnije uticaje svakako spada pritisak vode u cevima, i njegove oscilacije (amplituda i period). Jasno je da otkaz jedne veze, u ovim sistemima, rezultuje povećanjem pritiska u nekim drugim vezama (cevima), što dalje neminovno dovodi do povećanog intenziteta otkaza.

U opštem slučaju, ako se režimom $\varepsilon = \varepsilon(t)$ definiše slučajni proces od koga zavisi vreme bezotkaznog rada elementa, a sa $F(t|\varepsilon)$ uslovna verovatnoća bezotkaznog rada sistema

(pod uslovom određenim režimom $\varepsilon(t)$), onda se funkcija pouzdanosti može napisati na sledeći način:

$$R(t) = M_{\varepsilon} F(t|\varepsilon)$$

gde je M_{ε} srednje matematičko očekivanje režima $\varepsilon(t)$.

U nastavku će se metod određivanja pouzdanosti sistema, u slučaju zavisnih otkaza, opisati za jedan jednostavan primer sistema sastavljenog od dva paralelno vezana elementa. Takav sistem uspešno će funkcionisati u sledećim situacijama:

- oba elementa rade ispravno tokom vremena t ;
- oba elementa rade ispravno tokom vremena t_1 , nakon čega otkáže prvi element;
- oba elementa rade ispravno tokom vremena t_1 , nakon čega otkáže drugi element;

U poslednja dva slučaja, element koji ostaje u radu trpi povećano opterećenje, zbog čega mu se povećava i intenzitet otkaza. Pouzdanost sistema se u tom slučaju može definisati na sledeći način:

$$R(t) = P(T_1 > t \cap T_2 > t) + P(T_1 < t \cap T_2 > T_1 \cap T_2 > t - T_1) + P(T_2 < t \cap T_1 > T_2 \cap T_1 > t - T_2)$$

gde su T_1 i T_2 vremena bezotkaznog rada elemenata e_1 i e_2 .

Ako se sa $f_1(t)$ i $f_2(t)$ označe funkcije sopstvene gustine otkaza, tj. gustine otkaza kada oba elementa rade sa nekim predviđenim opterećenjem, a sa $f_1'(t)$ i $f_2'(t)$ funkcije uslovne (zavisne) gustine otkaza, tj. gustine otkaza kada radi samo jedan element, koji, zbog otkaza drugog elementa, radi sa povećanim opterećenjem, izraz za pouzdanost sistema može se napisati u obliku:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) + \int_0^t f_1(t_1) \cdot R_2(t_1) \cdot R_2'(t - t_1) \cdot dt_1 + \int_0^t f_2(t_1) \cdot R_1(t_1) \cdot R_1'(t - t_1) \cdot dt_1$$

gde su:

$R_1(t_1)$ i $R_2(t_2)$ - funkcije sopstvene pouzdanosti elemenata e_1 i e_2 , tj. funkcije pouzdanosti elemenata do otkaza jednog od njih, za koje važi:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

$R_1'(t - t_1)$ i $R_2'(t - t_1)$ - funkcije uslovne pouzdanosti elemenata, tj. funkcije pouzdanosti elemenata nakon otkaza jednog od njih, za koje važi:

$$R'(t) = \int_t^{\infty} f'(t) dt$$

U slučaju kada je sistem sastavljen od istih elemenata dobija se sledeći oblik:

$$R(t) = [R(t)]^2 + 2 \int_0^t f(t_1) \cdot R(t_1) \cdot R'(t - t_1) \cdot dt_1$$

Za slučaj eksponencijalnog zakona raspodele dobija se sledeći izraz:

$$R(t) = e^{-2\lambda t} + \frac{2\lambda}{2\lambda - \lambda'} (e^{-\lambda' t} - e^{-2\lambda t})$$

gde su λ i λ' sopstveni i uslovni intenziteti otkaza elemenata.

3. Vanredni (izuzetni) događaji

Vanredni događaji kao što su požar, zemljotres, poplava i sl. mogu da prouzrokuju istovremeni otkaz većeg broja elemenata. U takvim slučajevima otkazi elemenata ne mogu se tretirati kao slučajna veličina. Ovaj tip zavisnih otkaza ne uključuje se u modele pouzdanosti zbog male verovatnoće pojave i veoma komplikovanog proračuna, koji zavisi od brojnih slučajnih uticaja.

4. Uzajamno isključivi ishodi događaja

Ako u sistemu postoje elementi čiji ishodi događaja isključuju jedan drugog, tj. postojanje jednog događaja isključuje mogućnost postojanja drugog događaja (npr. "prekidač uključen" - "prekidač isključen") neophodno je uvesti određenu zavisnost (koja je uglavnom tipa 0-1) za ishode događaja.

2.4. Određivanje pouzdanosti vodoprivrednih sistema - opis metoda i modela razvijenih u okviru disertacije

Mrežni 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. elektro-mehanički 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 verovatnoću da će u čvoru / čvorovima sistema biti zadovoljeni i zahtevani pritisci. Ova verovatnoća izražena je pojmom "pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara" (koja bi se mogla nazvati i "pouzdanost protočnosti

sistema"). Ovaj izraz ne treba poistovećivati sa pojmom hidrauličke pouzdanosti sistema koji je pominjan u uvodnom delu disertacije.

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) - 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:

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

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

gde je R_S - pouzdanost sistema, R_i pouzdanost čvora i , a N ukupan broj potrošačkih čvorova u sistemu.

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

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

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

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

gde je w_i - težinski koeficijent koji određuje stepen značaja potrošačkog čvora u sistemu na osnovu protoka (Q_i) koji se u njemu zahteva i iznosi:

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

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 (o čemu je više reči bilo u delu 2.3.2. ove disertacije), u modelima pouzdanosti vodoprivrednih sistema ovi uticaji se po pravilu ne uzimaju u obzir, pa u daljem delu disertacije važe napred navedene pretpostavke.

U nastavku se daje opis modela za izračunavanje mehaničke i ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti distributivnih sistema koji su razvijeni u okviru ove disertacije, kao i opis modela za određivanje pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara u sistemu. Ovi modeli sastavni su delovi programa NETREL (**NET**work **REL**iability) i 2PFREL (**2** Pipe **F**ailure **REL**iability). Oba programa služe za računanje ukupne pouzdanosti sistema (sa mogućnošću računanja samo mehaničke pouzdanosti, što određuje sam korisnik prilikom startovanja programa). Programi se razlikuju u načinu (kompleksnosti) određivanja pouzdanosti, odnosno u programu 2PFREL uvodi se dodatna pretpostavka: u sistemu istovremeno mogu da otkazu najviše dve cevi. Ovo je veoma česta pretpostavka u programima za računanje pouzdanosti vodoprivrednih sistema, koja se uvodi zbog složene strukture sistema i neophodnosti sprovođenja velikog broja hidrauličkih proračuna, koji značajno usporavaju celi proračun. Brzina proračuna posebno je značajna u zadacima alokacije pouzdanosti - optimizacije sistema, u kojima često predstavlja ograničavajući faktor mogućnosti korišćenja modela za određene realne sisteme. O tome će više reči biti u delu 3. ove disertacije.

2.4.1. Mehanička pouzdanost

U narednom delu teksta opisaće se moduli za određivanje ukupne mehaničke pouzdanosti sistema, koji se koriste u programu NETREL. Vrednosti dobijene na ovaj način predstavljaju stvarne vrednosti pouzdanosti sistema i čvorova, jer za njihovo određivanje nisu uvedene nikakve dodatne pretpostavke, kao što će to biti slučaj pri određivanju pouzdanosti u programu 2PFREL.

Mehanička pouzdanost distributivnih sistema određuje se korišćenjem osnovne teoreme dekompozicije binarnih funkcija. Pod pojmom distributivnih sistema podrazumevaju se dve klase sistema:

1. Regionalni distributivni sistemi kojima se voda transportuje od nekog izvorišta (akumulacija, izvorište podzemne vode) do potrošača, pri čemu se pod potrošačima podrazumevaju određena naselja. U ovim sistemima potrebe za vodom naselja predstavljaju čvrne potrošnje, tj. razmatra se distribucija vode do rezervoara pre ulaska u naselje. U tom slučaju, otkaz magistralnog cevovoda uzrokuje poremećaj koji dovodi u pitanje snabdevanje jednog ili više naselja.
2. Distributivni sistem naselja, kojim se modelira distribucija vode unutar samog naselja. U ovim sistemima izvorišta vode su rezervoari i lokalna izvorišta podzemnih voda, dok su potrošači individualni potrošači i industrija, čija je potrošnja koncentrisana u čvornim tačkama (na način na koji se to uobičajeno radi pri sprovođenju hidrauličkog proračuna - raspodeljena potrošnja vode duž cevi koncentriše se na krajevima cevi, i to podjednaka količina vode na oba kraja cevi). Treba naglasiti da se pri proračunu distributivnih sistema naselja modeliraju samo glavne cevi, bez ulaženja u neke detaljnije opise sistema, koji bi značajno povećali vreme proračuna, bez značajnijeg uticaja na rezultate proračuna. Naime, otkaz neke manje cevi, zbog koga će bez vode ostati nekoliko potrošača, nije istog značaja kao i otkaz neke glavne cevi koji može prouzrokovati nestanak vode celom bloku ili delu grada.

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

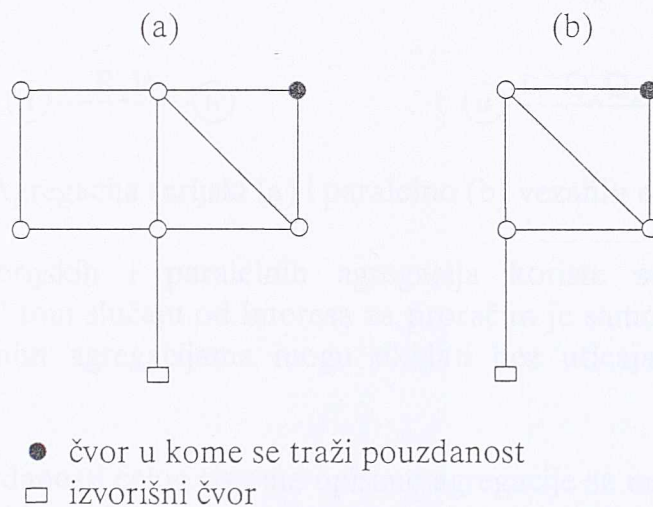
Proračun mehaničke pouzdanosti sastoji se od nekoliko celina (podprograma), predstavljenih posebno u nastavku teksta:

1. Agregacioni model
2. Redukcija sistema
3. Određivanje međupouzdanosti

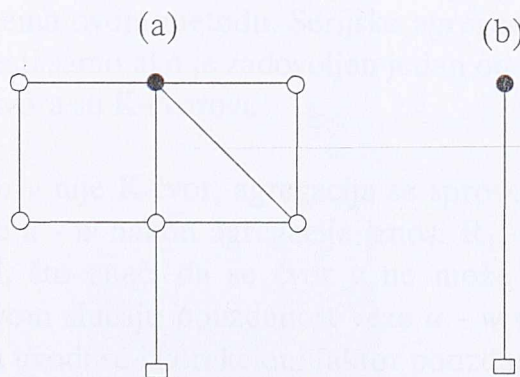
1. Agregacioni model

Agregacioni model je važan deo programa kojim se jedan složeni sistem veza svodi na jednostavniji (sistem lakši za proračun) poštujući određene funkcionalne zavisnosti, kriterijume i ograničenja. Pod pojmom "agregacija" podrazumeva se zamena dve ili više veza jednom vezom u kojoj su objedinjene osobine ukinutih veza. Izbor veza koje se ukidaju, odnosno agregiraju u jednu vezu, zavisi od kriterijuma i ograničenja po kojima se agregacija sprovodi, a karakteristike agregiranih veza zavise od funkcionalnih zavisnosti agregacionog modela.

Za potrebe određivanja mehaničke pouzdanosti distributivnih sistema agregacija se sprovodi po principu serijsko - paralelnih agregacija. Ovim proračunom se jedan složeni sistem veza (slike 2.4a, 2.5a) svodi na čisto mrežni sistem (slika 2.4b) (sistem u kome ne postoje serijske i paralelne veze) ili granati sistem veza (slika 2.5b).



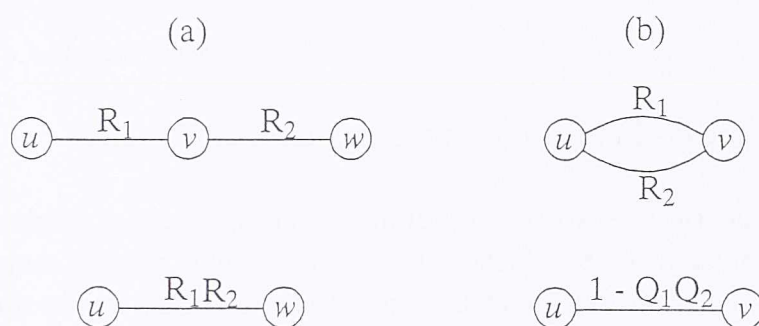
Slika 2.4: Agregacija složenog sistema (a) do mrežnog sistema veza (b)



Slika 2.5: Agregacija složenog sistema (a) do granatog sistema veza (b)

Pod serijskom agregacijom podrazumeva se zamena dve veze ($u - v$ i $v - w$), koje imaju jedan zajednički čvor (čvor v), jednom vezom ($u - w$) (slika 2.6a). Ako su pouzdanosti originalnih veza R_1 i R_2 , pouzdanost nove veze biće jednaka proizvodu pouzdanosti serijski vezanih elemenata, odnosno u opisano primeru $R_1 \cdot R_2$.

Pod paralelnom agregacijom (agregacija paralelno vezanih elemenata) podrazumeva se zamena dve veze koje povezuju dva ista čvora u jednu vezu (slika 2.6b). Ako su pouzdanosti pojedinačnih elemenata R_1 i R_2 , a verovatnoće otkaza (nepouzdanost elemenata) Q_1 i Q_2 ($Q_1=1-R_1$, $Q_2=1-R_2$), pouzdanost nove veze biće $1 - Q_1 \cdot Q_2$.

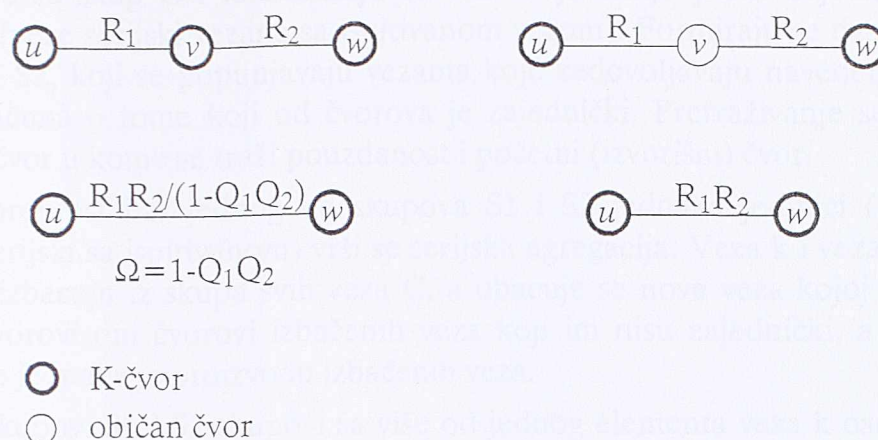


Slika 2.6: Agregacija serijski (a) i paralelno (b) vezanih elemenata

Opisane metode serijskih i paralelnih agregacija koriste se pri određivanju pouzdanosti čvora. U tom slučaju od interesa za proračun je samo jedan čvor, dok se ostali čvorovi opisanim agregacijama mogu ukidati bez uticaja na pouzdanost u traženom čvoru.

Pri određivanju pouzdanosti celog sistema opisane agregacije se ne mogu sprovesti na opisani način, jer ukidanje bilo kog čvora utiče na ukupnu pouzdanost sistema. Za određivanje serijsko - paralelnih agregacija, u ovom slučaju, koriste se osnove metode pouzdanosti K-čvora, koji su razvili Satyanarayana & Wood (Wagner et al., 1988). Prema ovom metodu pod pojmom K-čvora podrazumeva se čvor od značaja, a u sistemu mogu postojati i drugi "obični" čvorovi. Postoje određena ograničenja za sprovođenje agregacija prema ovom metodu. Serijske agregacije, za veze $u - v$ i $v - w$ (slika 2.7), mogu se sprovesti samo ako je zadovoljen jedan od sledeća dva uslova: čvor v je običan čvor ili sva tri čvora su K-čvorovi.

U prvom slučaju, ako čvor v nije K-čvor, agregacija se sprovodi na već opisan način, odnosno, pouzdanost veze $u - w$ nakon agregacije iznosi $R_1 \cdot R_2$. U drugom slučaju, sva tri čvor su K-čvorovi, što znači da se čvor v ne može ukinuti bez uticaja na pouzdanost sistema. U ovom slučaju pouzdanost veze $u - w$ nakon ukidanja čvora v iznosi $R_1 \cdot R_2 / (1 - Q_1 \cdot Q_2)$, a uvodi se i korekcionni faktor pouzdanosti sistema (Ω) koji se množi sa $(1 - Q_1 \cdot Q_2)$ (slika 2.7). Korekcionim faktorom uračunava se neophodnost povezanosti srednjeg K-čvora u serijskoj vezi, iako nakon agregacije izgleda kao da je on nestao. Nakon sprovođenja svih serijsko-paralelnih agregacija u sistemu, dobijena pouzdanost sistema množi se sa korekcionim faktorom.



Slika 2.7: 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.

Pri određivanju pouzdanosti celog sistema, iz same definicije K-čvora, jasno je da su svi čvorovi u sistemu K-čvorovi, pa se svaka serijska agregacija sprovodi po metodi K-čvorova, računajući uporedo i korekcionni faktor Ω .

Algoritam agregacionog modela organizuje se po sledećem postupku:

1. Definiše se čvor u kome se traži pouzdanost i skup svih veza u sistemu za koji se vrši agregacija. Svaka veza definiše se sa četiri elementa: identifikaciona oznaka veze, početni čvor, krajnji čvor i pouzdanost veze, odnosno $C = [id, fnode, tnode, r]$. Ovi podaci neophodni su za računanje mehaničke pouzdanosti. Pored ovih osnovnih podataka, mogu se za svaku vezu definisati još i prečnik, dužina i koeficijent hrapavosti cevi, koji su neophodni u slučaju kada se određuje ukupna, odnosno mehaničko-hidraulička pouzdanost čvora i/ili celog sistema.
2. Iz skupa svih veza C uzima se jedna veza (k) (za prvi prolaz to je prva veza, a za naredne prolaze sledeća veza iz skupa).
3. Formira se novi skup veza P koji se popunjava vezama paralelno vezanim sa ispitivanom vezom. Znači, pretražuje se skup veza C i veze koje ispunjavaju uslov: oba čvorova veze su ista kao čvorovi ispitivane veze, ubacuju se u skup P .
4. Ako skup P nije prazan skup (postoje veze paralelno vezane sa ispitivanom vezom), vrše se paralelne agregacije. Ispitivana veza ostaje u sistemu, ali dobija novu vrednost za pouzdanost, u kojoj su obuhvaćene i osobine paralelnih veza:

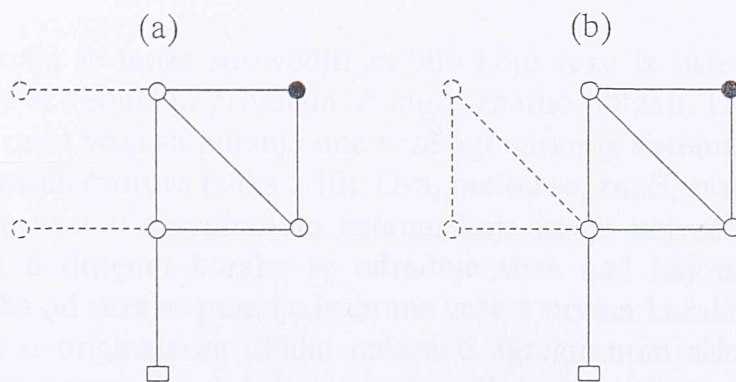
$$r_k = 1 - (1 - r_k) \prod_{i=1}^{N_p} (1 - r_i)$$

gde je N_p brojnost skupa P , tj. broj veza paralelno vezanih sa vezom k . Veze koje se nalaze u skupu P izbacuju se iz skupa svih veza C .

5. Pretražuje se skup C i identifikuju se veze koje imaju jedan zajednički čvor sa vezom k (veze serijski vezane sa ispitivanom vezom). Formiraju se dva nova skupa veza $S1$ i $S2$, koji se popunjavaju vezama koje zadovoljavaju navedeni uslov, i to vodeći računa o tome koji od čvorova je zajednički. Pretraživanje se ne obavlja samo za čvor u kome se traži pouzdanost i početni (izvorišni) čvor.
6. Ako je brojnost bar jednog od skupova $S1$ i $S2$ jednaka jedinici (postoji veza vezana serijski sa ispitivanom) vrši se serijska agregacija. Veza k i veza iz skupa $S1$ ili $S2$ se izbacuju iz skupa svih veza C , a ubacuje se nova veza kojoj su početni i krajnji čvorovi oni čvorovi izbačenih veza koji im nisu zajednički, a pouzdanost nove veze jednaka je proizvodu izbačenih veza.
7. Ako su skupovi $S1$ i $S2$ skupovi sa više od jednog elementa veza k ostaje u skupu svih veza C u nepromenjenom obliku.
8. Ako je veza k poslednja veza iz skupa C i ako ni za jednu vezu iz skupa C nisu vršene serijske i paralelne agregacije, skup veza C je konačan agregirani skup. Proračun se završava.
U suprotnom - ide se na korak 2.

Za slučaj određivanja pouzdanosti celog sistema agregacioni model se malo razlikuje od opisanog modela, koji važi kada se radi agregacija sistema u cilju određivanja pouzdanosti čvora. U ovom slučaju, u koraku 5, pretraživanje veza sa zajedničkim jednim čvorom ne obavlja se samo za početni čvor. U koraku 6 pouzdanost nove veze računa se po malo izmenjenim izrazima, a za svaku serijsku agregaciju korekcionni faktor sistema se menja na ranije opisani način.

U slučajevima kada se određuje pouzdanost jednog čvora u mreži, iz skupa veza C mogu se izbaciti slepi krajevi i "slepe petlje" (slika 2.8), jer ne utiču na pouzdanost ispitivanog čvora. Pod pojmom slepe petlje podrazumevaju se zatvorene strukture veza koje su sa glavnim delom mreže (deo u kome se nalazi ispitivani čvor) spojene preko samo jednog zajedničkog čvora.



Slika 2.8: Slepi krajevi mreže (a) i slepa petlja mreže(b)

2. Redukcija sistema

Ako se kao rezultat serijsko - paralelnih agregacija dobije čisto mrežno sistem, znači da se ovim agregacijama ne može izračunati pouzdanost, te je neophodno "ukidanje" (redukcija) neke veze sistema. Prilikom redukcije neke veze i od jednog sistema formiraju se dva: $(1_i, \mathbf{y})$ - sistem u kome se pretpostavlja da je pouzdanost veze i jednaka jedinici i $(0_i, \mathbf{y})$ - za koji se pretpostavlja da je pouzdanost veze i jednaka nuli, tj. da veza ne postoji u sistemu (slika 2.9). Za dobijena dva sistema određuju se pouzdanosti koje se množe sa r_i i $(1 - r_i)$, respektivno:

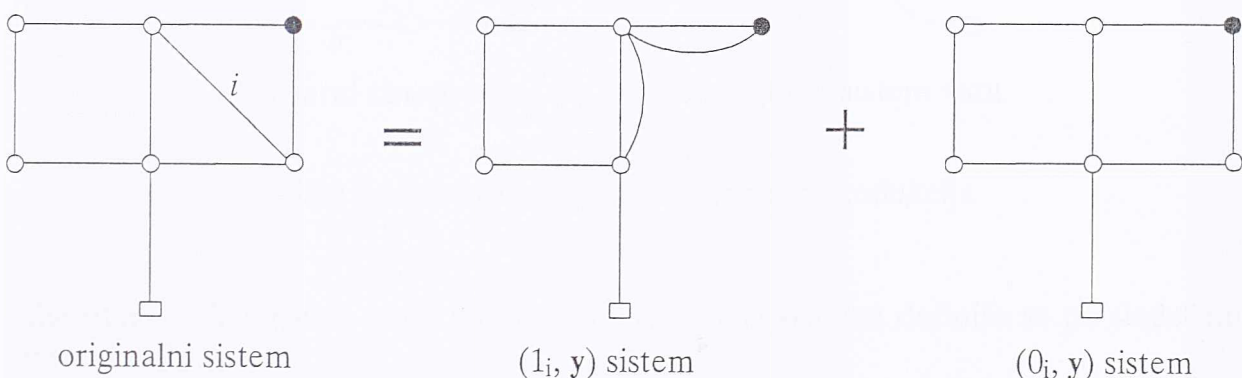
$$R = r_i \psi(1_i, \mathbf{r}) + (1 - r_i) \psi(0_i, \mathbf{r})$$

gde je:

$\psi(1_i, \mathbf{r})$ - strukturna funkcija pouzdanosti sistema $(1_i, \mathbf{y})$

$\psi(0_i, \mathbf{r})$ - strukturna funkcija pouzdanosti sistema $(0_i, \mathbf{y})$

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

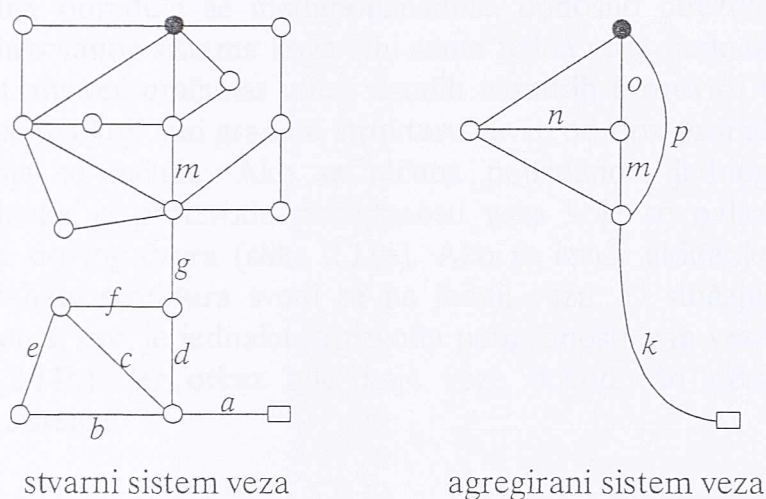


Slika 2.9: Redukcija veze i u sistemu

Generalno, redukcija 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 (slika 2.10). Ovaj metod se, znači, sastoji iz dva koraka. U prvom se traže veze u agregiranom sistemu koje imaju najveći broj ponavljanja svojih čvorova, a u drugom koraku se određuje veza nad kojom će se sprovesti redukcija, kao neka od veza sa putanje izabrane veze u prvom koraku. Prednost imaju one veze koje se u originalnom obliku nalaze u agregiranom sistemu. Određujući vezu za koju će se sprovesti redukcija na ovaj način, izbegava se mogućnost biranja veze kojom se ne postiže nikakav efekat redukcije, kao što su npr. veze b, c, d, e, f sa slike 2.10.

U primeru prikazanom na slici 2.10 prednost za redukciju ima veza m nad ostalim vezama u agregiranom sistemu, jer se nad vezom m nisu vršile serijsko - paralelne agregacije, pa se efekat redukcije postiže jednim korakom, za razliku od npr. veze n za koju bi se isti efekat postigao sa dva koraka.

Veza nad kojom se vrši redukcija, naravno, ne sme biti takva da onemogući formiranje putanje između početnog (izvorišnog) čvora i čvora u kome se traži pouzdanost. U primeru sa slike 2.10 to je veza k u agregiranom sistemu, odnosno veze a i g u stvarnom sistemu veza.



Slika 2.10: Izbor veze nad kojom se vrši redukcija

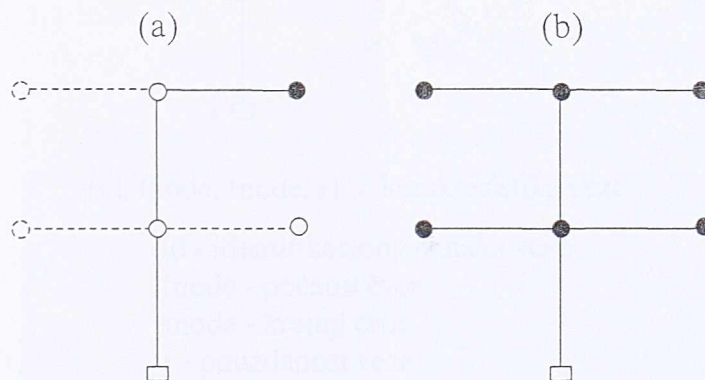
Algoritam za izbor veze nad kojom se vrši redukcija sistema definiše se po sledećem postupku:

1. Za svaki čvor iz agregiranog sistema (skup veza A) određuje se broj ponavljanja tog čvora. Parovi (čvor, broj ponavljanja) ubacuju se u skup BP , koji se uređuje u opadajući niz prema broju ponavljanja.
2. Uzimaju se dva čvora iz skupa BP (počinje se od čvorova sa najvećim brojem ponavljanja).
3. Ispituje se postojanje veze u skupu A koja sadrži oba ispitivana čvora.
 - 3.1. Ako takva veza postoji ispituje se da li ona postoji i u originalnom skupu veza (skup C - skup veza pre sprovođenja agregacionog modela).
Ako postoji, to je veza nad kojom će se vršiti redukcije. Završava se proračun.
Ako ne postoji, veza se ubacuje u skup veza PV i ide se na korak 3.2.
 - 3.2. Ako ne postoji uzimaju se sledeći čvorovi iz skupa A i ide se na korak 3.
4. Za svaku vezu iz skupa PV određuje se broj veza u originalnom skupu veza C koje su agregirane u tu vezu.

5. Određuje se veza sa najmanjim brojem agregiranih veza.
6. Veza nad kojom će se sprovesti redukcija je neka od veza iz skupa C koja je agregirana u izabranu vezu određenu u koraku 5, tj. neka od veza sa putanje izabrane veze agregiranog sistema A.

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 redukovanog sistema koga čini samo jedna veza jednaka je pouzdanosti te veze, jer je u nju već uračunat uticaj ostalih ukinutih čvorova i veza. Pouzdanost redukovanog 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 (slika 2.11a). 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 (slika 2.11b), jer otkaz bilo koje veze dovodi do otkaza (neispravnog funkcionisanja) sistema.

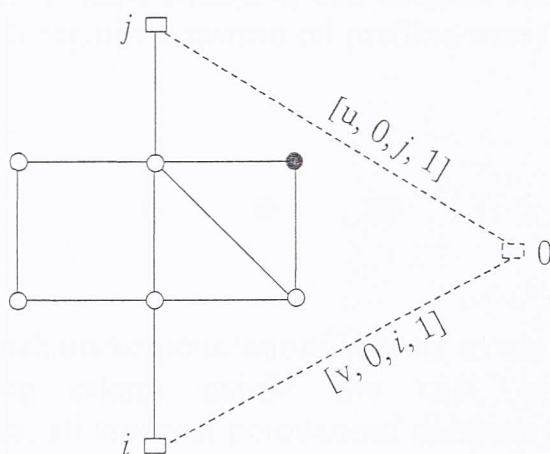


Slika 2.11: Određivanje pouzdanosti redukovanih sistema

Distributivni sistemi se vrlo često oslanjaju na nekoliko izvorišta vode (važi za obe razmatrane klase distributivnih sistema), odnosno, u matematičkom smislu, imaju više od jednog izvorišnog čvora (čvorovi sa fiksnim nivoom). U tom slučaju neophodno je uvođenje imaginarnog izvorišnog čvora i imaginarnih veza kojima se spajaju stvarni izvorišni čvorovi sa imaginarnim (slika 2.12). 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 opisani način.

Algoritam proračuna:

1. Identifikuje se početni čvor, čvor u kome se traži pouzdanost, skup svih veza C i skup svih čvorova N . Formira se skup REDUK koji je u početnom trenutku prazan, a u koji će se smestati veze koje se redukuju i skupovi veza koji prethode redukciji veze. Veze koje se redukuju definišu se prefiksom $+$ ili $-$, pouzdanost veze sa prefiksom $+$ (pozitivna veza) jednaka je stvarnoj pouzdanosti veze, dok je pouzdanost veze sa prefiksom $-$ (negativna veza) jednaka komplementu stvarne pouzdanosti. Formira se skup POZ u koji se unose pouzdanosti sistema dobijenih agregacijom pozitivnih veza.
2. Primenjuje se agregacioni model, a zatim se iz dobijenog skupa veza izbacuju veze koje čine slepe krajeve i slepe petlje i dobija se novi skup veza AGR.



$[id, fnode, tnode, r]$ - karakteristika veze

id - identifikaciona oznaka veze
 fnode - početni čvor
 tnode - krajnji čvor
 r - pouzdanost veze

Slika 2.12: Uvođenje imaginarnog čvora i veza u sistemu sa više izvorišnih čvorova

3. Ako je AGR skup od jednog člana i ako je u pitanju prvi prolaz, tj. skup POZ je prazan, pouzdanost sistema jednaka je pouzdanosti veze iz skupa AGR. Proračun se završava.
4. Ako je AGR skup od jednog člana i ako skup POZ nije prazan međupouzdanost sistema jednaka je pouzdanosti veze iz skupa AGR.
 - 4.1. Ako je veza koja se agregira pozitivna, proizvod pouzdanosti veze i međupouzdanosti podsistema dodaje se skupu POZ, a poslednji član skupa REDUK se izbacuje.
 - 4.2. Ako je veza koja se agregira negativna, pouzdanost prethodne veze iz skupa REDUK dobija vrednost proizvoda pouzdanosti te agregirane veze i sume

međupouzdanosti podsistema (pouzdanost poslednje veze iz REDUK) i poslednjeg člana skupa POZ. Poslednji članovi skupova REDUK i POZ se ukidaju.

Ako su skupovi REDUK i POZ ostali prazni određuje se pouzdanost celog sistema kao suma pouzdanosti poslednjeg člana iz REDUK i poslednjeg člana iz skupa POZ. Proračun se završava.

U suprotnom, uzima se poslednji član skupa REDUK i vraća se na početak koraka 4.2.

5. Ako je skup AGR mrežni sistem - ide se na redukciju sistema. Veza za koju se sprovodi redukcija određuje se za način opisan u algoritmu za izbor veze koja se redukuje. Skupu REDUK dodaju se dva nova elementa, članovi sa pozitivnom i negativnom vezom.
6. Uzima se poslednji član skupa REDUK, nad skupom veza iz tog člana izvrši se redukcija (pozitivna ili negativna zavisno od prefiksa veze) i sa dobijenim skupom veza ide se na korak 2.

* * *

Ako se za određivanje mehaničke pouzdanosti sistema uvede dodatna pretpostavka: mogućnost istovremenog otkaza najviše dve cevi, proračun se značajno pojednostavljuje i ubrzava, ali vrednost pouzdanosti dobijena na ovaj način manje ili više (u zavisnosti od konfiguracije sistema) odstupa od stvarne pouzdanosti. I pored toga, navedena pretpostavka* često se uvodi u modele pouzdanosti vodoprivrednih sistema, a polazna je pretpostavka i za program 2PFREL. Broj iteracija, u proračunima ovog tipa, je reda N^2 , ili tačnije maksimalan broj iteracija iznosi:

$$S = \frac{N(N+1)}{2} + 1$$

gde je N ukupan broj veza u sistemu.

Određivanje mehaničke pouzdanosti čvorova sistema sprovodi se jednostavnim ispitivanjem mogućih kombinacija otkaza veza. Za svaku kombinaciju otkaza jedne ili dve veze ispituje se povezanost čvora u kome se traži pouzdanost (M) i nekog od izvorišnih čvorova. U slučaju nepostojanja mehaničke veze između čvorova računa se nepouzdanost po izrazu:

* Vrlo često se u modelima pouzdanosti vodoprivrednih sistema, posebno u onim koji uzimaju u obzir i pouzdanost hidraulike, uvodi i nešto slabija pretpostavka: mogućnost otkaza samo jedne veze (cevi) u sistemu, u određenom vremenskom trenutku. Ova pretpostavka dodatno olakšava proračun (broj mogućih iteracija je $N+1$), ali vrednost pouzdanosti još više odstupa od stvarne vrednosti.

$$Q_{ij} = q_i \cdot q_j \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ k \neq j}}^N r_k$$

gde su:

i i j - veze koje su otkazale

q_i - nepouzdanost veze i , koja iznosi $q_i = 1 - r_i$

r_i - pouzdanost veze i

U slučaju mehaničke povezanosti čvora za izvorom radi se hidraulički proračun. Ako su pritisci u čvoru zadovoljeni nepouzdanost je jednaka nuli $Q_{ij}=0$, u suprotnom nepouzdanost se računa prema gornjem izrazu.

Ukupna pouzdanost čvora (M) u ovom slučaju iznosi:

$$R_M = 1 - \sum_{i,j=1}^N Q_{ij}$$

Algoritam proračuna ukupne pouzdanosti sistema obuhvata sledeće operacije:

1. Identifikuje se početni čvor, čvor u kome se traži pouzdanost (m), skup svih veza C i skup svih čvorova. Formira se skup REDUK koji je u početnom trenutku prazan, a u koji će se smeštati veze koje se redukuju i skupovi veza koji prethode redukciji veze.
2. Uzima se sledeća (u prvom prolazu - prva) veza iz skupa C (npr. veza i). Ta veza ubacuje se u skup REDUK, a zatim se formira novi sistem (skup veza) MREZA bez ukinute veze.
3. Ispituje se da li u novoformiranom sistemu MREZA postoji fizička veza između čvora m i izvorišnog čvora.
4. Ako čvor nije povezan sa izvorišnim čvorom računa se nepouzdanost tog podsistema prema relaciji:

$$Q_i = q_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N r_k + q_i \sum_{s=i}^N (q_s \cdot \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq i \\ t \neq s}}^N r_t)$$

5. Uzima se sistem (skup veza) iz poslednjeg člana skupa REDUK. Iz skupa REDUK se izbacuje poslednji član i ide se na korak 2.
6. Ako je čvor povezan sa izvorišnim čvorom sprovodi se hidraulički proračun za sistem MREZA.
 - 6.1. Ako pritisci u čvoru nisu zadovoljeni računa se nepouzdanost prema izrazu iz koraka 4. Uzima se sistem (skup veza) iz poslednjeg člana skupa REDUK. Iz skupa REDUK se izbacuje poslednji član i ide se na korak 2.

- 6.2. Ako su pritisci u čvoru zadovoljeni ukida se sledeća veza (npr. veza j) iz skupa C (u prvom prolazu to je prva sledeća veza posle veze i). Ta veza ubacuje se u skup REDUK, a zatim se formira novi sistem veza.
7. Ispituje se da li u novoformiranom sistemu postoji fizička veza između čvora m i izvorišnog čvora.
8. Ako čvor m nije povezan sa izvorišnim čvorom računa se nepouzdanost tog podsistema prema relaciji:

$$Q_{ij} = q_i \cdot q_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i \\ k \neq j}}^N r_k$$

Uzima se sistem (skup veza) iz poslednjeg člana skupa REDUK. Iz skupa REDUK se izbacuje poslednji član i ide se na korak 6.2.

9. Ako je čvor m povezan sa izvorišnim čvorom sprovodi se hidraulički proračun.
- 9.1. Ako pritisci u čvoru nisu zadovoljeni računa se nepouzdanost prema izrazu iz koraka 8. Uzima se sistem (skup veza) iz poslednjeg člana skupa REDUK. Iz skupa REDUK se izbacuje poslednji član i ide se na korak 6.2.
- 9.2. Ako su pritisci u čvoru zadovoljeni ide se na korak 6.2.
10. Postupak se nastavlja dok se ne prođu sve veze iz skupa C , a zatim se prelazi na korak 2, i postupak se nastavlja dok se i u spoljašnjoj petlji ne dođe do kraja skupa C .
11. Ukupna pouzdanost sistema računa se kao recipročna vrednost zbira svih nepouzdanosti podsistema, prema izrazu:

$$R = 1 - \sum_{i=1}^N (Q_i + \sum_{j=i}^N Q_{ij})$$

2.4.2. 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 2.13 mehanička pouzdanost čvora k ($R_{k,meh}$) iznosi:

$$R_{k,meh} = 1 - (1 - R_i) \cdot (1 - R_j) = R_i \cdot (1 - R_j) + R_j \cdot (1 - R_i) + R_i \cdot R_j$$

Međutim, pritisak u čvoru k , za neke od podsistema može biti manji od minimalnog zahtevanog pritiska, što znači da će pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara za taj podsistem biti jednaka nuli, odnosno ukupna (mehaničko-hidraulička) pouzdanost biće manja za vrednost mehaničke pouzdanosti tog podsistema. Ako npr. za sistem prikazan na slici 2.13 čvor k može da dobije zahtevane količine vode odgovarajućeg pritiska samo u slučaju kada rade obe veze, odnosno pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara za podsisteme S_1 i S_2 jednaka je nuli:

$$R_{k,hyd}(S_1) = 0$$

$$R_{k,hyd}(S_2) = 0$$

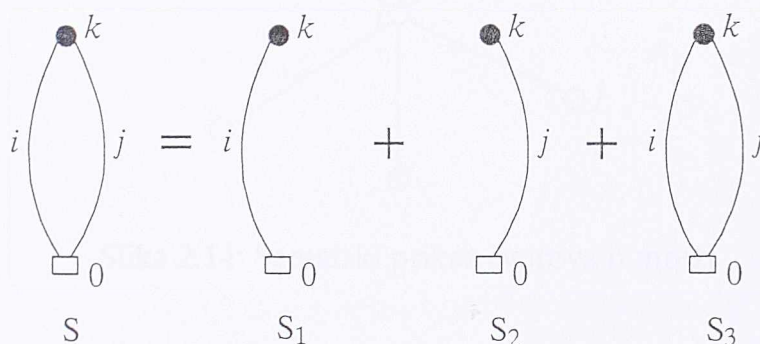
$$R_{k,hyd}(S_3) = 1$$

mehaničko - hidraulička pouzdanost celog sistema biće:

$$R_k = R_{k,meh}(S_1) \cdot R_{k,hyd}(S_1) + R_{k,meh}(S_2) \cdot R_{k,hyd}(S_2) + R_{k,meh}(S_3) \cdot R_{k,hyd}(S_3)$$

$$R_k = 0 \cdot R_i \cdot (1 - R_j) + 0 \cdot R_j \cdot (1 - R_i) + 1 \cdot R_i \cdot R_j$$

$$R_k = R_i \cdot R_j$$



Slika 2.13: Dekompozicija sistema u cilju određivanja pouzdanosti sistema

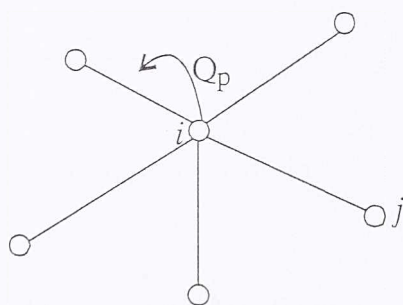
Zbog tih hidrauličkih osobnosti pouzdanosti zadatka - isporuke vode - neophodno je sprovesti hidraulički proračun za svaki sistem veza za koji je moguće izračunati mehaničku pouzdanost. Ako su pritisci u čvoru zadovoljeni - pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara jednaka je jedinici, a ukupna 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 $(0_i, y)$ 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.

Naravno, zahtevi za vodom variraju u toku dana, nedelje, sezonski i godišnje. Hidraulički proračun sa ovakvim promenljivim zahtevima za vodom trajao bi isuviše dugo, pa se pri proračunu usvaja skup "projektovanih opterećenja", odnosno zahteva za vodom. Uobičajeno je da se za analizu pouzdanosti koriste vrednosti srednje dnevne potrošnje u danu maksimalne potrošnje.

Hidraulička analiza - analiza pritiska u čvorovima

Za rešavanje problema ustaljenog tečenja u mrežama pod pritiskom (distributivnim sistemima) 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 pijeziometarskim kotama (metod čvorova).

U okviru modela pouzdanosti, za proračun ustaljenog tečenja korišćen je programski paket EPANET 2.0, koji jednačine rešava po nepoznatim pijeziometarskim kotama. Osnove metode biće izložene u nastavku teksta.



Slika 2.14: Šematski prikaz čvorova u mreži

Jednačina održanja količine kretanja za cev $i-j$ (slika 2.14) može se izraziti direktno preko nepoznate vrednosti protoka:

$$Q_{ij} = \text{sgn}(\Pi_i - \Pi_j) \left(\frac{|\Pi_i - \Pi_j|}{R_{ij}} \right)^{1/2}$$

gde je:

$\text{sgn}(\Pi_i - \Pi_j)$ - znak od $(\Pi_i - \Pi_j)$

R_{ij} - karakteristika cevi koje je funkcija koeficijenta trenja (λ_{ij}), prečnika (D_{ij}) i dužine cevi (L_{ij}), a iznosi

$$R_{ij} = \frac{8\lambda_{ij}L_{ij}}{\pi^2 g D_{ij}^5}$$

Jednačina kontinuiteta u čvoru i ima sledeći oblik:

$$F_i(Q) = \sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij} + Q_{ip} = 0$$

gde je:

N_i - broj veza koje se susiču u čvoru i

Q_{ip} - sopstvena potrošnja u čvoru i

Zamenom prve jednačine u drugu dobija se izraz:

$$F_i(\Pi) = \sum_{j=1}^{N_i} \text{sgn}(\Pi_i - \Pi_j) \frac{|\Pi_i - \Pi_j|^{1/2}}{R_{ij}^{1/2}} + Q_{ip} = 0$$

koji se definiše za svaki čvor u mreži.

Dobijeni sistem nelinearnih jednačina rešava se metodom Newton-Raphson-a. Jednačina $f(Q) = \Pi_i - \Pi_j$ razvija se u Tejlorov red oko (k) -te iteracije, da bi se dobila $(k+1)$ iteracija, jednačina se linearizuje i dobija se izraz:

$$Q_{ij}^{(k+1)} = \frac{\Pi_i^{(k+1)} - \Pi_j^{(k+1)}}{2R_{ij} |Q_{ij}^{(k)}|} + \frac{Q_{ij}^{(k)}}{2}$$

Nakon zamene u jednačinu kontinuiteta dobija se sledeći sistem linearizovanih jednačina:

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{(\Pi_i^{(k+1)} - \Pi_j^{(k+1)})}{R_{ij} |Q_{ij}^{(k)}|} + Q_{ip} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij}^{(k)} = 0 \quad i=1, 2, \dots, NC$$

čiji je broj jednak broju čvorova sa nepoznatim piježometarskim kotama (NC) u mreži. Jednačine se rešavaju iterativno.

2.5. Prikaz primera i interpretacija rezultata

U nastavku rada biće prikazani rezultati određivanja pouzdanosti korišćenjem opisanih programskih paketa: NETREL i 2PFREL, za četiri različita vodovodna sistema: dva regionalna vodovodna sistema (gravitacioni i pumpni) i dva distributivna (gradska) vodovodna sistema različite konfiguracije. Rezultati proračuna biće upoređeni i daće se procena greške koja nastaje uvođenjem pretpostavke o mogućnosti istovremenog otkaza samo dve cevi u sistemu, odnosno pouzdanosti računate programom 2PFREL i stvarne pouzdanosti dobijene programom NETREL.

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

- Rsis - pouzdanost sistema koja pretpostavlja da svaki potrošački čvor u sistemu mora da dobije vodu, što znači da se, u slučaju mehaničke pouzdanosti, nemogućnost dopremanja vode do bilo kog potrošačkog čvora u sistemu računa kao otkaz celog sistema. U slučaju ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti to znači da se slučajevi kada pritisak, u bilo kom potrošačkom čvoru u sistemu, padne ispod određene granice računaju kao otkazi celog sistema. Ovakav način određivanja pouzdanosti često se naziva i povezanost (connectivity) sistema.
- R1 - pouzdanost sistema određena kao minimalna vrednost pouzdanosti potrošačkih čvorova.
- R2 - pouzdanost sistema određena kao aritmetička sredina pouzdanosti u svim potrošačkim čvorovima.
- R3 - pouzdanost sistema određena kao ponderisana srednja vrednost čvornih pouzdanosti, prema kojoj se pouzdanosti potrošačkih čvorova množe sa težinskim faktorom, a koji predstavlja odnos zahteva za vodom (potrošnje) u tom čvoru i ukupnih potreba za vodom svih korisnika u sistemu.

2.5.1. Primer 1 - regionalni gravitacioni vodovodni sistem

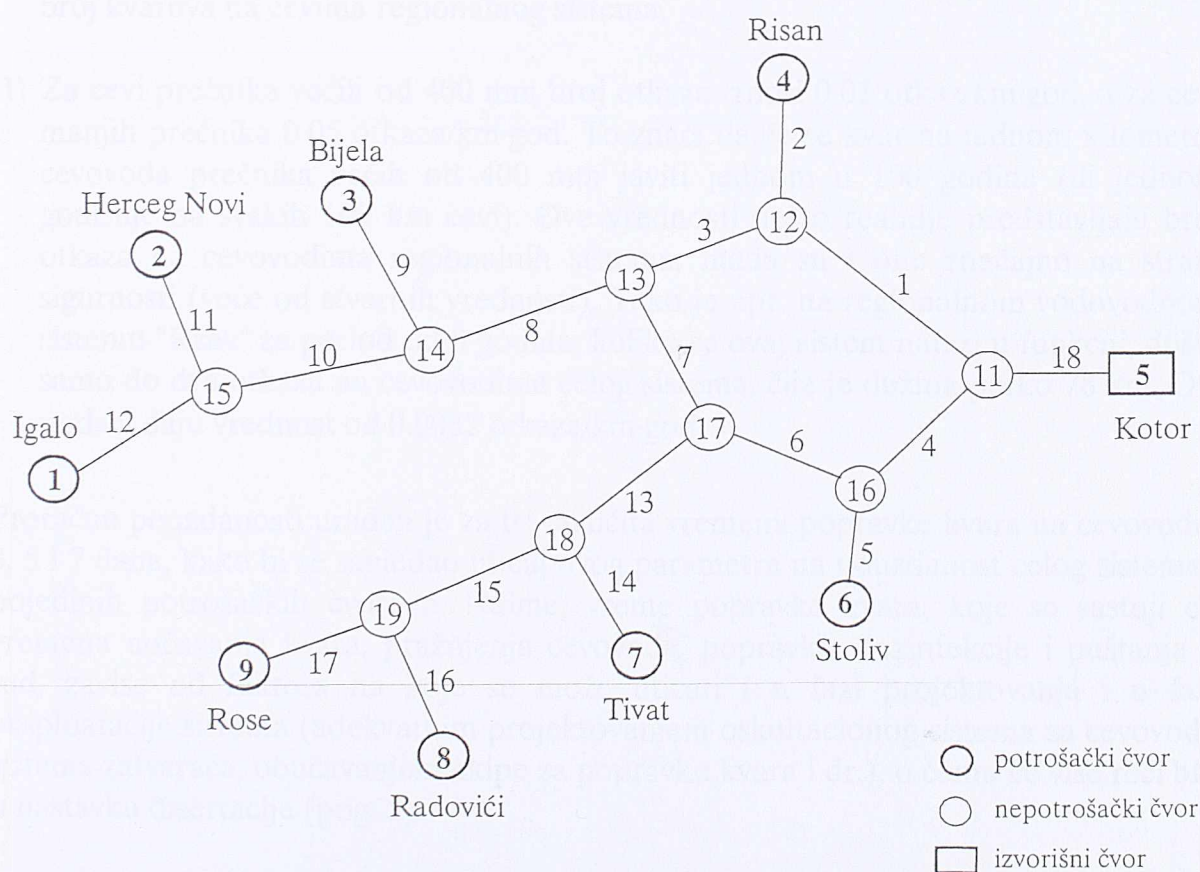
U ovom primeru razmatra se pouzdanost jednog regionalnog vodovodnog sistema, kojim se voda do korisnika dovodi gravitaciono. Reč je o regionalnom vodovodnom sistemu "Boka", koji služi za snabdevanje vodom naselja u Boko - Kotorskom zalivu. Ovim sistemom, koji je još uvek u fazi projektovanja, rešio bi se problem snabdevanja vodom velikog broja manjih naselja (oko 35 naselja), koja sada nemaju adekvatno rešen problem vodosnabdevanja, a koji posebno postaje izražen tokom letnjih meseci, kada se potrošnja značajno povećava.

Regionalnim vodovodnim sistemom "Boka" voda bi se gravitaciono dopremala do nekoliko rezervoara, lociranih u blizini većih naselja, a dalje bi se voda do potrošača odvodila sekundarnom vodovodnom mrežom, koja nije u sastavu regionalnog sistema, pa nije od interesa za ovaj proračun. Predviđa se formiranje 9 rezervoara: Igalo, Herceg Novi, Bijela, Risan, Kotor, Stoliv, Tivat, Radovići i Rose. Pošto je predmet ovog proračuna određivanje pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema, navedeni rezervoari ujedno predstavljaju i krajnje, odnosno potrošačke, čvorove u sistemu.

Predviđeno je da se voda za ovaj sistem zahvata iz podzemne kraške akumulacije "Lovćen", koja treba da se formira u području Njeguškog polja, odakle se gravitaciono transportuje u rezervoar Kotor, koji za proračun pouzdanosti u ovom primeru predstavlja izvorni čvor. Proračun količina vode koje se mogu akumulirati u podzemnoj akumulaciji "Lovćen" nisu predmet ove analize, pa se proračun radi pod pretpostavkom da količina vode u akumulaciji može zadovoljiti potrebe za vodom u svakom trenutku, odnosno, da je kota vode u rezervoaru Kotor konstantna.

Na slici 2.15 dat je prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Boka". Dužine cevi i trasa cevovoda nisu prikazani u razmeri (ne odgovaraju stvarnim vrednostima), nego su dati samo šematski, radi sagledavanja konfiguracije sistema. Karakteristike čvorova (potrošačkih i izvornog), kao i karakteristike veza (cevovoda) date su u tabeli P1.1 u prilogu.

Kao što se vidi na slici 2.15, u ovom sistemu pored potrošačkih postoje i nepotrošački čvorovi. Ti čvorovi u stvari predstavljaju mesta račvanja cevovoda i u njima nema sopstvene potrošnje. Nepotrošačke čvorove neophodno je uneti prilikom definisanja konfiguracije sistema, a njihove kote terena u ovom primeru variraju od 5 do 25 *mnm*. Za svaki od potrošačkih čvorova, u tabeli P1.1 date su i veličine zapremine rezervoara i vreme mogućeg snabdevanja potrošača iz rezervoara. Kao kote terena, za te čvorove, date su minimalne kote u rezervoarima, a maksimalna dubina za svaki rezervoar je ista i iznosi 4 *m*. Za sve cevovode usvojena je vrednost Hazen William-ovog koeficijenta 130. Proračun pouzdanosti rađen je za vrednosti potreba za vodom u danu maksimalne potrošnje, kao i za srednje godišnje vrednosti potreba za vodom, jer se i vrednosti otkaza daju na godišnjem nivou.



Slika 2.15: Šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Boka"

Proračun pouzdanosti elemenata sistema, odnosno pouzdanost veza (cevovoda) kao jedinih elemenata u sistemu, određena je za nekoliko kombinacija broja (učestalosti) otkaza elementa i vremena popravke. Naime, razmatrane su dve varijante vrednosti broja otkaza:

- I) Za cevi prečnika većih od 400 mm broj otkaza iznosi 0.05 otkaz/km·god, a za cevi manjih prečnika 0.1 otkaza/km·god. To znači da će se kvar na jednom kilometru cevovoda prečnika manjih od 400 mm javiti jednom u 10 godina (ili jednom godišnje na svakih 10 km cevovoda), dok će se na cevovodima većih prečnika kvar javljati jednom u 20 godina (ili jednom godišnje na cevovodu dužine 20 km). Ove vrednosti preporučene su od strane nekih autora, prema kojima je za prečnike cevi veće od 400 mm broj otkaza konstantan i iznosi oko 0.05 otkaza/km·god (Ambrose, 1979). Nešto manja vrednost (oko 0.04 otkaz/km·god) dobija se prema izrazu za broj kvarova cevovoda datim u Gargano & Pianese, 2000 (detaljnije o broju otkaza u poglavlju 4). Međutim, analize kojima se došlo do navedenih vrednosti sprovedene su za gradske vodovodne sisteme, kod kojih su spoljašnja opterećenja na cevovod, materijal od kojih su cevi napravljene, način izrade i ugradnje cevi, kao i promene pritiska u cevima, dosta nepovoljnije, pa se može očekivati manji broj kvarova na cevima regionalnog sistema.
- II) Za cevi prečnika većih od 400 mm broj otkaza iznosi 0.01 otkaz/km·god, a za cevi manjih prečnika 0.05 otkaza/km·god. To znači da će se kvar na jednom kilometru cevovoda prečnika većih od 400 mm javiti jednom u 100 godina (ili jednom godišnje na svakih 100 km cevi). Ove vrednosti nešto realnije predstavljaju broj otkaza na cevovodima regionalnih sistema, mada su i one značajno na strani sigurnosti (veće od stvarnih vrednosti). Tako je npr. na regionalnom vodovodnom sistemu "Rzav" za period od 8 godina, koliko se ovaj sistem nalazi u funkciji, došlo samo do dva otkaza na cevovodima celog sistema, čija je dužina preko 78 km. Ovi podaci daju vrednost od 0.0032 otkaza/km·god.

Proračun pouzdanosti urađen je za tri različita vremena popravke kvara na cevovodu: 3, 5 i 7 dana, kako bi se sagledao uticaj ovog parametra na pouzdanost celog sistema i pojedinih potrošačkih čvorova. Naime, vreme popravke kvara, koje se sastoji od vremena uočavanja kvara, pražnjenja cevovoda, popravke, dezinfekcije i puštanja u rad, zavise od faktora na koje se može uticati i u fazi projektovanja i u fazi eksploatacije sistema (adekvatnim projektovanjem oskultacionog sistema za cevovod i sistema zatvarača, obučavanjem ekipe za popravku kvara i dr.), o čemu će više reći biti u nastavku disertacije (pog. 5).

U tabeli 2.1 date su vrednosti intenziteta otkaza (λ) i intenziteta popravke (μ), kao i vrednosti pouzdanosti za 1 km cevi (R_0), za cevovode prečnika većih od 400 mm, za svaku navedenu kombinaciju. Ove vrednosti dobijene su korišćenjem izraza:

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

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

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

gde je N - broj kvarova po 1 km cevi u godini dana, a T - vreme popravke kvara izraženo u danima.

Tabela 2.1: Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti

N (otkaz/km·god)	T (dan)	λ	μ	R_0
0.05	3	$5.71 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.999589041
	5	$5.711 \cdot 10^{-6}$	0.008333	0.999315149
	7	$5.713 \cdot 10^{-6}$	0.005952	0.999041136
0.01	3	$1.141 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.999917854
	5		0.008333	0.999863098
	7		0.005952	0.999808229

Vrednosti pouzdanosti veza, cevovoda određene dužine (L), dobijene su iz izraza:

$$R = R_0^L$$

pri čemu se dužina cevovoda unosi u kilometrima. Ove vrednosti date su za svaku vezu u sistemu i za svaku kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara u tabeli P1.2 u prilogu.

Proračun pouzdanosti urađen je korišćenjem programa opisanih u prethodnom delu teksta: NETREL (kompletan proračun pouzdanosti) i 2PFREL (pouzdanost određena uz pretpostavku o mogućem istovremenom otkazu najviše dve veze u sistemu). Dobijene vrednosti razlikuju se za manje od 0.001%, što znači da su razlike vremenskog deficita vode kod korisnika, dobijene navedenim programima, manje od 5 minuta. Zbog toga se može smatrati da su dobijene vrednosti pouzdanosti korišćenjem oba programa iste, pa će u nastavku biti prikazani i analizirani samo rezultati dobijeni programom NETREL.

U tabeli 2.2 prikazani su rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti pojedinih potrošačkih čvorova, kao i napred opisane četirivrednosti pouzdanosti celog regionalnog vodovodnog sistema "Boka", za svaku ispitivanu kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara.

Tabela 2.2: Mehaničke pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema "Boka"

čvor	0.05 otkaza/km·god			0.01 otkaza/km·god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1	0.9919	0.9865	0.9810	0.9984	0.9973	0.9962
2	0.9934	0.9889	0.9844	0.9987	0.9978	0.9969
3	0.9977	0.9962	0.9945	0.9995	0.9992	0.9989
4	0.9996	0.9993	0.9989	0.9999	0.9999	0.9998
6	0.9997	0.9995	0.9993	0.99996	0.9999	0.9999
7	0.9974	0.9957	0.9939	0.9995	0.9992	0.9988
8	0.9934	0.9890	0.9846	0.9986	0.9977	0.9967
9	0.9851	0.9752	0.9654	0.9944	0.9907	0.9870
Rsis	0.9762	0.9606	0.9451	0.9925	0.9875	0.9826
R1	0.9851	0.9752	0.9654	0.9944	0.9907	0.987
R2	0.9948	0.9913	0.9878	0.9986	0.9977	0.9968
R3	0.9949	0.9915	0.9880	0.9989	0.9982	0.9975

U narednim tabelama prikazane su vrednosti ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema (R) i prosečno godišnje vreme (u danima) (T) tokom koga potrebe korisnika za vodom nisu zadovoljene, pri čemu se podrazumevaja nedostatak vode koji se javlja samo kao posledica nepouzdanosti veza u sistemu, ne ulazeći u bilans potrebnih i dostupnih količina na izvoristu. U tabeli 2.3 date su navedene vrednosti računate sa potrebnim količinama u danu maksimalne potrošnje, a u tabeli 2.4 sa prosečnim godišnjim potrebama za vodom.

Tabela 2.3: Ukupna pouzdanost i vreme nezadovoljenja potreba za $Q_{max,dn}$

čvor	0.05 otkaza/km·god						0.01 otkaza/km·god					
	3 dana		5 dana		7 dana		3 dana		5 dana		7 dana	
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T
1	0.9767	8.5	0.9616	14.0	0.9467	19.4	0.9953	1.7	0.9922	2.8	0.9890	4.0
2	0.9782	7.9	0.964	13.1	0.95	18.2	0.9956	1.6	0.9927	2.7	0.9897	3.8
3	0.9825	6.4	0.9712	10.5	0.96	14.6	0.9965	1.3	0.9941	2.1	0.9918	3.0
4	0.9882	4.3	0.9804	7.1	0.9728	9.9	0.9976	0.9	0.9960	1.5	0.9944	2.0
6	0.9856	5.3	0.9762	8.7	0.9671	12.0	0.9971	1.1	0.9951	1.8	0.9932	2.5
7	0.9824	6.4	0.971	10.6	0.9598	14.7	0.9965	1.3	0.9941	2.1	0.9917	3.0
8	0.9785	7.8	0.9645	12.9	0.9508	18.0	0.9956	1.6	0.9926	2.7	0.9896	3.8
9	0.9703	10.8	0.951	17.9	0.9323	24.7	0.9914	3.1	0.9856	5.3	0.98	7.3
Rsis	0.9612	14.2	0.9362	23.3	0.9119	32.2	0.9894	3.9	0.9824	6.4	0.9755	8.9
R1	0.9703	10.8	0.951	17.9	0.9323	24.7	0.9914	3.1	0.9856	5.3	0.98	7.3
R2	0.9803	7.2	0.9675	11.9	0.9549	16.4	0.9957	1.6	0.9928	2.6	0.9899	3.7
R3	0.9796	7.4	0.9664	12.3	0.9534	17.0	0.9958	1.5	0.9929	2.6	0.9900	3.6

Treba naglasti da prilikom računanja 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. U slučajevima kada u gradskim rezervoarima postoji određena količina vode (što je ujedno i realnija situacija u praksi) vrednosti vremenskog deficita treba umanjiti za vreme tokom koga se može obezbediti snabdevanje vodom iz rezervoara.

Tabela 2.4: Ukupna pouzdanost i vreme nezadovoljenja potreba za $Q_{sr, god}$

čvor	0.05 otkaza/km·god						0.01 otkaza/km·god					
	3 dana		5 dana		7 dana		3 dana		5 dana		7 dana	
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T
1	0.9883	4.3	0.9806	7.1	0.9729	9.9	0.9977	0.8	0.9961	1.4	0.9945	2.0
2	0.9889	4.0	0.9815	6.7	0.9742	9.4	0.9978	0.8	0.9963	1.3	0.9948	1.9
3	0.9932	2.5	0.9887	4.1	0.9843	5.7	0.9986	0.5	0.9977	0.8	0.9968	1.2
4	0.9883	4.3	0.9809	7.0	0.9736	9.6	0.9977	0.8	0.9961	1.4	0.9945	2.0
6	0.9961	1.4	0.9936	2.3	0.991	3.3	0.9992	0.3	0.9987	0.5	0.9982	0.7
7	0.9929	2.6	0.9883	4.3	0.9836	6.0	0.9986	0.5	0.9976	0.9	0.9967	1.2
8	0.9889	4.0	0.9817	6.7	0.9745	9.3	0.9977	0.8	0.9961	1.4	0.9946	2.0
9	0.9806	7.1	0.968	11.7	0.9555	16.2	0.9935	2.4	0.9892	3.9	0.9849	5.5
Rsis	0.9652	12.7	0.9427	20.9	0.9207	28.9	0.9903	3.5	0.9838	5.9	0.9774	8.2
R1	0.9806	7.1	0.968	11.7	0.9555	16.2	0.9935	2.4	0.9892	3.9	0.9849	5.5
R2	0.9897	3.8	0.9829	6.2	0.9762	8.7	0.9976	0.9	0.996	1.5	0.9944	2.0
R3	0.9903	3.5	0.9839	5.9	0.9776	8.2	0.9980	0.7	0.9966	1.2	0.9953	1.7

Kao što se vidi iz prikazanih rezultata broj otkaza i vreme popravke značajno utiču na pouzdanost sistema. Tako npr. produženje vremena popravke kvara sa 3 na 5 časova dovodi do smanjenja pouzdanosti, odnosno od povećavanja vremenskog deficita vode za oko 70%, dok produženje vremena popravke sa 5 na 7 dana povećava vremenski deficit za još oko 50%. Zbog toga je veoma važno skratiti vreme popravke na što manju meru (uvođenjem većeg broja zatvarača, rigoroznim osmatranjem sistema uz postojanje odgovarajuće opreme, obučavanjem ekipe za popravku, i dr., o čemu će više reći biti u delu 5 ove disertacije).

Pouzdanost čvora, odnosno vrednost vremenskog deficita vode kod korisnika u velikoj meri zavisi i od dispečerskog pravila koje se uvodi prilikom otkaza neke cevi. Najbolji primer za to je čvor 4, čija pouzdanost iznosi 0.9883 (za 0.05 otkaza/km·god, vreme popravke od 3 dana i za srednje godišnje potrebe za vodom), odnosno vremenski deficit tog korisnika iznosi 4.3 dana. Pouzdanost ovog čvora manja je od pouzdanosti nizvodnih čvorova zbog velikih gubitaka koji se javljaju prilikom otkaza pojedinih cevi, što dovodi do pada pritiska, koji su u čvoru 4 u tim slučajevima manji od potrebnih. Ako bi se uvelo pravilo da se u slučaju otkaza neke od cevi regionalnog sistema potrošnja u naseljima (čvorovima) smanji za 10%, pouzdanost čvora 4 značajno bi se povećala i iznosila bi 0.9951, odnosno vremenski deficit u rezervoaru iznosio bi oko 1.8 dana. Ako se uzme u obzir i dostupna količina vode u rezervoaru, pod uslovom da je

on u trenutku otkaza cevi pun, vreme koje bi potrošači ostali bez vode, na godišnjem nivou značajno bi se smanjila, i iznosila bi oko 1.4 dana, odnosno oko 34 časa. Do sličnih rezultata došli bi i proverom pouzdanosti za ostale čvorove, i razmatrane kombinacije. Ovakvi rezultati dovode do zaključka da pouzdanost pojedinih čvorova, odnosno pouzdanost snabdevanja vodom iz određenih čvorova (rezervoara), u velikoj meri zavisi i od dispečerskog pravila koje se uvodi u slučaju otkaza cevi regionalnog sistema.

Pouzdanost snabdevanja vodom korisnika u velikoj meri zavisi i od zapremine gradskog rezervoara, odnosno vremena tokom koga se može obaviti snabdevanje vodom korisnika iz rezervoara. Tako se, npr. iz rezultata proračuna dobijenih za slučaj 0.01 otkaza/km·god, vreme popravke od 5 dana, i za potrošnju $Q_{sr, god}$, može zaključiti da će, pri navedenim zapreminama gradskih rezervoara, korisnici ostajati bez vode do 20 časova u toku godine. Izuzetak su čvorovi: 6 u kome ne dolazi do prekida u snabdevanju vodom korisnika, i čvor 9 u kome prekid vodosnabdevanja korisnika iznosi oko 70 časova godišnje. U slučaju da su zapremine gradskih rezervoara dimenzionisane tako da zadovolje dnevne potrebe za vodom u danu maksimalne potrošnje, do prekida u vodosnabdevanju došlo bi samo u čvoru 9 (oko 50 časova), dok u ostalim čvorovima ne bi dolazilo do nepalnskih isključenja korisnika na godišnjem nivou.

2.5.2. Primer 2 - regionalni vodovodni sistem sa pumpanjem vode

U ovom primeru razmatra se problem određivanja pouzdanosti jednog regionalnog vodovodnog sistema u kome se voda do korisnika doprema pumpanjem. Reč je o regionalnom vodovodnom sistemu "Rzav", koji obezbeđuje vodu za snabdevanje 5 naselja: Arilje, Požega, Lučani, Čačak i Gornji Milanovac.

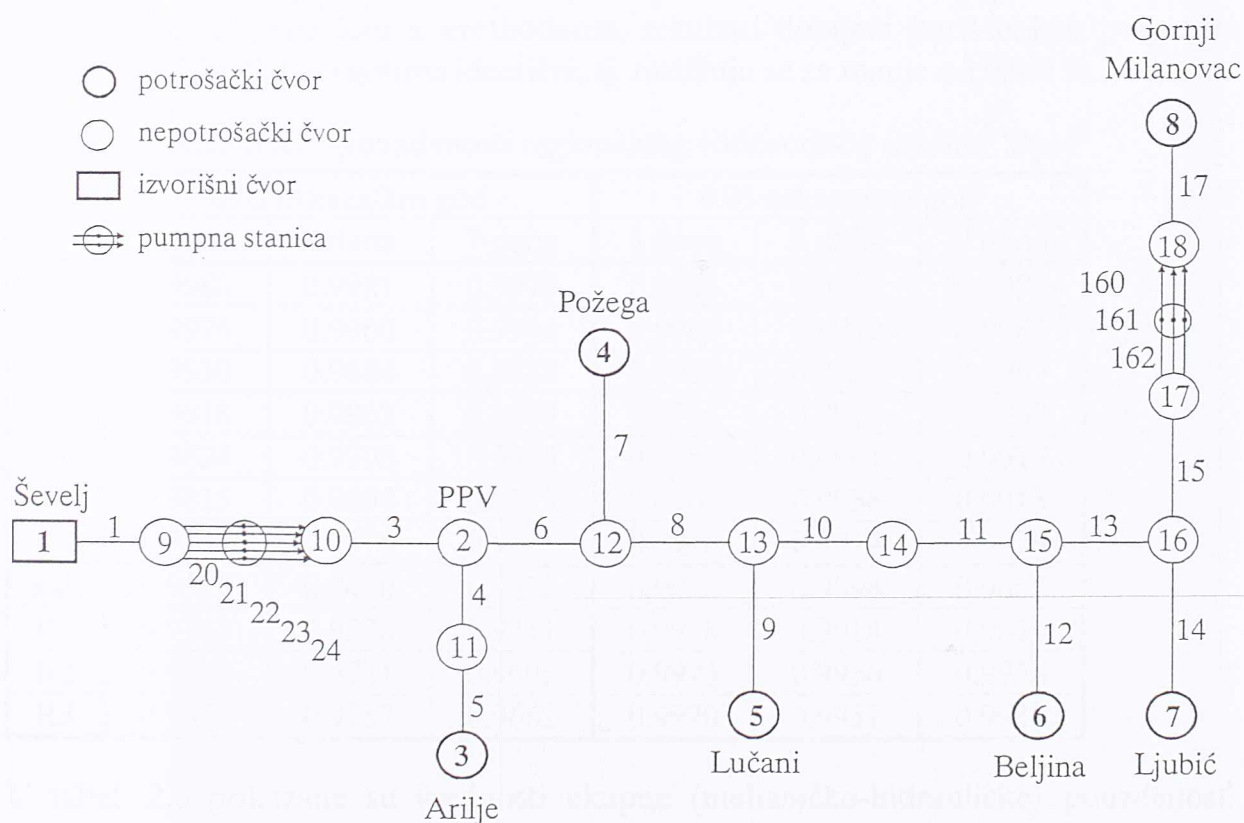
Voda se, za ovaj regionalni sistem, zahvata iz živog toka reke Veliki Rzav, na privremenom vodozahvatu "Ševelj", koji je formiran adaptacijom bujične pregrade (ovo je samo privremeno rešenje, koje treba da služi do izgradnje brane "Svračkovo", iz koje će se, prema koncepciji sistema, zahvatati voda za ovaj regionalni sistem). Pretpostavlja se da je kota vode na vodozahvatu konstantna i iznosi 336.75 mm. Od vodozahvata voda se pumpno transportuje do postrojenja za pračišćavanje vode. Pumpna stanica, za potiskivanje sirove vode, opremljena je sa 5 pumpnih agregata, ukupnog kapaciteta oko 1000 l/s (veze 20 - 24 na slici 2.16). Karakteristike pumpi date su u tabeli P2.2 u prilogu. Pouzdanost samog postrojenja za pračišćavanje vode u ovom primeru nije razmatrana (smatra se da je postrojenje apsolutno pouzdano, tj. njegova pouzdanost je jednaka 1), mada se generalno može uključiti u proračun aproksimirajući postrojenje sa jednom ili više veza određene pouzdanosti.

Iz postrojenja za pračišćavanje vode, ili konkretnije iz rezervoara koji se nalaze pri postrojenju za pračišćavanje, voda se dalje gravitaciono upućuje prema korisnicima.

Postoje dva rezervoara čiste vode, ukupne zapremine 8450 m³, sa maksimalnom kotom vode od 379.8 mm i minimalnom 374.6 mm.

Na slici 2.16 dat je prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Rzav", pri čemu dužine cevi i trasa cevovoda nisu prikazani u razmeri, nego su dati samo šematski, radi sagledavanja konfiguracije sistema. Karakteristike potrošačkih čvorova, sa osnovnim parametrima rezervoara, kao i karakteristike veza (cevovoda) dati su u tabeli P2.1 u prilogu. Za sve cevovode usvojena je vrednost Hazen William-ovog koeficijenta 120. Na mestima račvanja cevovoda, kao i na mestima promene prečnika cevovoda nalaze se nepotrošački čvorovi, koje je neophodno uvesti radi definisanja konfiguracije sistema.

Regionalni vodovodni sistem "Rzav" je izgrađen i pušten u rad, ali su trenutne potrebe za vodom znatno manje (od 2 do 4 puta) od potreba predviđenih za I fazu sistema (1200 l/s), za koju je veći deo sistema dimenzionisan i izgrađen (delovi sistema izvedeni su za konačnu fazu za koju su projektovane potrebe 2100 l/s). Zbog toga je proračun ukupne pouzdanosti sproveden za dva režima rada sistema: za stvarne srednje godišnje potrebe za vodom i za projektovane potrebe korisnika sistema. Ovi podaci dati su u tabeli P2.1. u prilogu.



Slika 2.16: Šematski prikaz regionalnog vodovodnog sistema "Rzav"

Slično kao i u prethodnom primeru, regionalni sistem je odgovoran za proizvodnju i distribuciju vode samo do gradskih rezervoara, odakle se dalje do krajnjih potrošača voda transportuje sekundarnim vodovodnim mrežama, koje se u ovom primeru ne razmatraju. Snabdevanje vodom grada Čačka obavlja se iz dva rezervoara: Beljina i Ljubić. Do glavnog rezervoara u Gornjem Milanovcu voda se ne može transportovati gravitaciono, pa se voda u taj rezervoar doprema pumpanjem. U tu svrhu izgrađen je hidraulički čvor "Brđani", koji se sastoji od prekidne komore (čvor 17, na slici 2.16) i pumpne stanice (veze 160, 161, 162). Pumpna stanica sastoji se od tri agregata ukupnog kapaciteta oko 350 l/s. Karakteristike pumpi date su u tabeli P2.2 u prilogu.

Proračun pouzdanosti veza (cevovoda) urađen je za nekoliko različitih vrednosti intenziteta otkaza (λ) i intenziteta popravke (μ), odnosno za iste kombinacije svih vrednosti kao u primeru 1. Prema tome, i za ovaj primer važe vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti iz tabele 2.1, a vrednosti pouzdanosti za svaku vezu date su u tabeli P2.3. u prilogu. Pretpostavlja se da pumpe otkazuju jednom godišnje, a da njihova popravka traje 50 časova (prema podacima iz Wagner et al., 1988), tako da pouzdanost svake pumpe iznosi 0.9943.

U tabeli 2.5 prikazani su rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti celog regionalnog vodovodnog sistema "Rzav", kao i pojedinačne pouzdanosti potrošačkih čvorova, za svaku ispitivanu kombinaciju broja otkaza i vremena popravke kvara. I u ovom primeru, slično kao u prethodnom, rezultati dobijeni korišćenjem programa NETREL i 2PFREL su gotovo identični, tj. razlikuju se za manje od 0.001%.

Tabela 2.5: Mehaničke pouzdanosti regionalnog vodovodnog sistema "Rzav"

čvor	0.05 otkaza/km·god			0.01 otkaza/km·god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
2	0.9988	0.9981	0.9973	0.9998	0.9996	0.9995
3	0.9976	0.9960	0.9944	0.9995	0.9992	0.9989
4	0.9930	0.9884	0.9838	0.9986	0.9977	0.9967
5	0.9918	0.9863	0.9809	0.9984	0.9973	0.9962
6	0.9824	0.9708	0.9593	0.9964	0.9941	0.9917
7	0.9815	0.9694	0.9575	0.9963	0.9938	0.9913
8	0.9743	0.9576	0.9411	0.9948	0.9914	0.9879
Rsis	0.9685	0.9480	0.9280	0.9936	0.9894	0.9852
R1	0.9743	0.9576	0.9411	0.9948	0.9914	0.9879
R2	0.9868	0.9781	0.9695	0.9973	0.9956	0.9938
R3	0.9853	0.9757	0.9662	0.9970	0.9951	0.9931

U tabeli 2.6 prikazane su vrednosti ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema za oba razmatrana režima rada sistema, odnosno potreba korisnika za vodom, i za svaku od razmatranih varijanti. U tabeli 2.7 dato je prosečno godišnje vreme tokom koga postoji prekid snabdevanja vodom pojedinih potrošačkih čvorova. Ti vremenski deficiti vode bili bi ujedno i deficiti kod korisnika kada bi gradski rezervoari

bili prazni u trenutku prekida dotoka vode do njih. Stvarno vreme prekida snabdevanja vodom korisnika manje je od ove vrednosti za ono vreme za koja se potrebe korisnika za vodom mogu zadovoljiti iz gradskih rezervoara.

Tabela 2.6: Ukupna pouzdanost pojedinih delova sistema

čvor	0.05 otkaza/km·god						0.01 otkaza/km·god					
	3 dana		5 dana		7 dana		3 dana		5 dana		7 dana	
	Q _{srgod}	Q _{proj}	Q _{srgod}	Q _{proj}	Q _{srgod}	Q _{proj}	Q _{srgod}	Q _{proj}	Q _{srgod}	Q _{proj}	Q _{srgod}	Q _{proj}
2-3	0.99875		0.99792		0.99708		0.99975		0.99958		0.99942	
2-4	0.99418		0.99032		0.98648		0.99884		0.99806		0.99728	
2-5	0.99295		0.98827		0.98361		0.99859		0.99764		0.99670	
2-6	0.9835		0.97266		0.96192		0.99668		0.99447		0.99227	
2-7	0.98269		0.97132		0.96007		0.99652		0.99420		0.99189	
2-17	0.97814		0.96383		0.94972		0.99559		0.99267		0.9897	
17-8	0.99725		0.99543		0.99360		0.99945		0.99908		0.99872	
1-2	0.9988	0.9707	0.9981	0.9699	0.9973	0.9692	0.9998	0.9716	0.9996	0.9714	0.9995	0.9713
17-18	R(Q _{sr.god})=0.99999981 R(Q _{proj})=0.9999						R(Q _{sr.god})=0.99999981 R(Q _{proj})=0.9999					
Rsis	0.9674	0.94	0.9462	0.9194	0.9255	0.8993	0.9934	0.9653	0.989	0.961	0.9846	0.9568
R1	0.9743	0.9468	0.9576	0.9305	0.9411	0.9145	0.9948	0.9667	0.9914	0.9633	0.9879	0.9600
R2	0.9868	0.9589	0.9781	0.9505	0.9695	0.9422	0.9973	0.9692	0.9956	0.9675	0.9938	0.9658
R3	0.9837	0.9576	0.9730	0.9482	0.9624	0.9390	0.9967	0.9689	0.9945	0.9670	0.9924	0.9651

Tabela 2.7: Vreme nezadovoljenja potreba za vodom (vremenski deficit vode) izražen u danima

čvor	0.05 otkaza/km·god						0.01 otkaza/km·god					
	3 dana		5 dana		7 dana		3 dana		5 dana		7 dana	
	T _{srgod}	T _{proj}	T _{srgod}	T _{proj}	T _{srgod}	T _{proj}	T _{srgod}	T _{proj}	T _{srgod}	T _{proj}	T _{srgod}	T _{proj}
2	0.4	10.7	0.7	11.0	1.0	11.3	0.1	10.4	0.1	10.4	0.2	10.5
3	0.9	11.1	1.5	11.7	2.1	12.3	0.2	10.5	0.3	10.6	0.4	10.7
4	2.5	12.8	4.2	14.4	5.9	16.0	0.5	10.8	0.9	11.1	1.2	11.4
5	3.0	13.2	5.0	15.1	7.0	17.0	0.6	10.9	1.0	11.3	1.4	11.6
6	6.4	16.5	10.7	20.7	14.9	24.7	1.3	11.5	2.2	12.4	3.0	13.2
7	6.7	16.8	11.2	21.1	15.5	25.4	1.4	11.6	2.3	12.5	3.2	13.4
8	8.4	18.5	13.9	23.8	19.3	29.1	1.7	12.0	2.8	13.1	3.9	14.1
Rsis	11.9	21.9	19.6	29.4	27.2	36.8	2.4	12.7	4.0	14.2	5.6	15.8
R1	9.4	19.4	15.5	25.4	21.5	31.2	1.9	12.2	3.2	13.4	4.4	14.6
R2	4.8	15.0	8.0	18.1	11.1	21.1	1.0	11.2	1.6	11.9	2.3	12.5
R3	5.9	15.5	9.9	18.9	13.7	22.3	1.2	11.3	2.0	12.0	2.8	12.7

Sve dobijene vrednosti pouzdanosti i vremenskog deficita vode, osim za potrošačke čvorove, date su i za čvor 2, kojim je predstavljeno postrojenje za prečišćavanje vode, i koji je značajan element sistema. Pouzdanost čvora 2 posebno se ističe i zbog toga što

je pouzdanost od ovog čvora do ostalih potrošačkih čvorova (sa izuzetkom čvora 8), za oba razmatrana režima rada sistema, potpuno ista kao mehanička pouzdanost tih delova sistema. Ovakva situacija rezultat je činjenice da je ispitivani regionalni vodovodni sistem granate strukture. Otkaz bilo koje veze na potezu od čvora 2 do nekog potrošačkog čvorova dovodi do prekida u snabdevanju vodom tog čvora, odnosno hidraulika sistema nije zadovoljena bez obzira na količinu vode koja se korisniku (čvoru) isporučuje.

Određena razlika između mehaničke i ukupne pouzdanosti javlja se na potezu od čvora 1 do 2 i od 17 do 18. Jer se na tim deonicama nalaze pumpne stanice sa paralelno vezanim agregatima. U slučaju kada sistem ne radi sa punim projektovanim kapacitetom, odnosno kada radi sa srednjim godišnjim potrebama korisnika za vodom, dovoljno je da između čvorova 9 i 10 (pumpna stanica sirove vode) rade samo dva od pet postojećih agregata, što pouzdanost ove veze povećava sa 0.97182 (pouzdanost kada je potrebno da rade svi agregati - slučaj kada sistem radi sa projektovanim opterećenjem) na 0.99999. Slično se dešava i sa vezom između čvorova 17 i 18, koja predstavlja pumpnu stanicu sa tri paralelno vezana agregata, od kojih je za potrošnju u čvoru 8 na nivou srednje godišnje potrošnje, dovoljno da radi samo jedna. Pouzdanost te veze se, u tom slučaju povećava sa 0.983 na 0.99999. Dodatnu pogodnost čini i prekidna komora određene zapremine (čvor 17), iz koje se voda može upućivati prema čvoru 8 određeni vremenski period (koji zavisi od količine vode u komori i potrebe korisnika za vodom), u slučaju otkaza neke veza od izvornog čvora do čvora 17.

Pošto je pumpna stanica sa gledišta pouzdanosti najslabiji element sistema, u slučaju kada su potrebe korisnika na nivou projektovanih potreba za vodom, interesantno je razmotriti uticaj uvođenja jednog dodatnog agregata (rezervna pumpa) u pumpnu stanicu sirove vode (odnosno uvođenje dodatne veze između čvorova 9 i 10), istih karakteristika kao postojećih pet agregata. Pouzdanost veze, bi se u ovom slučaju značajno povećala, i iznosila bi 0.99952, odnosno pouzdanost čvora 2 povećala bi se sa 0.97069 na 0.99835. Ovo dalje znači da bi se vremenski deficit u čvoru 2 smanjio sa 10.7 dana, na samo 0.6 dana prosečno godišnje. Pošto pouzdanost čvora 2 utiče na pouzdanost svih ostalih čvorova, u slučaju uvođenja jednog dodatnog agregata u pumpnu stanicu sirove vode, vremenski deficiti vode u svim čvorovima smanjili bi se za oko 10 dana, na srednjem godišnjem nivou.

2.5.3. Primer 3 - distributivni gravitacioni vodovodni sistem

Programi opisani u prethodnom delu teksta, pored regionalnih vodovodnih sistema (primeri 1 i 2), primenjeni su i na određivanje pouzdanosti distributivnih vodovodnih sistema u naselju. U ovom primeru radi se o hipotetičnom vodovodnom sistemu jednog manjeg ravničarskog naselja (sistem A). Sistem se sastoji od 11 potrošačkih čvorova, koji se svi nalaze na istoj koti od 85 mnm, a koji su međusobno povezani sa 15

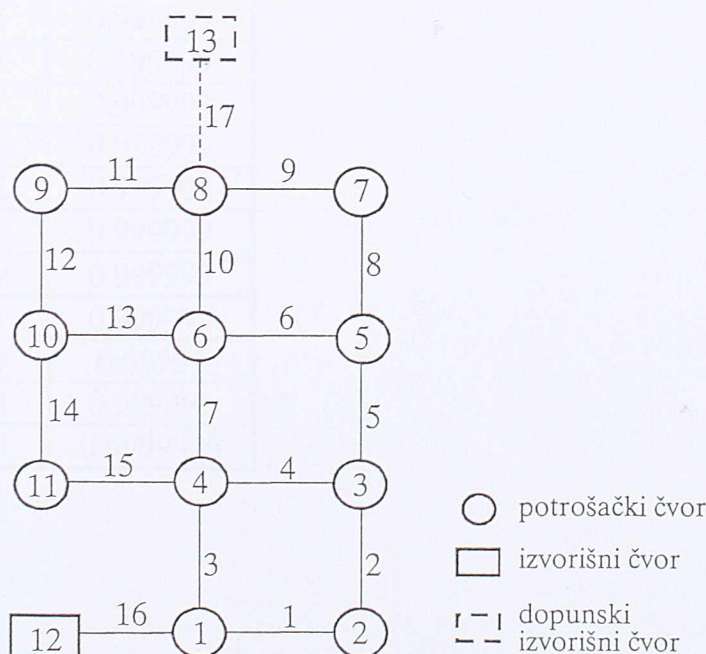
veza (cevi). Šema sistema data je na slici 2.17. Do potrošačkih čvorova voda se iz rezervoara dovodi gravitaciono, a razmatraju se dve varijante snabdevanja vodom:

1. sistem se snabdeva iz jednog izvorišnog čvora - postoji jedan čvor sa konstantnim nivoom ($Z_{12}=123.3$ mm), a u sistemu je ukupno 16 veza;
2. sistem se snabdeva iz dva izvorišna čvora (npr. postoje dva izvorišta ili izvorište i rezervoar su na različitim krajevima naselja) ($Z_{12}=123.3$ mm i $Z_{13}=120$ mm) - postoje dva čvora sa konstantnim nivoom, ukupno 17 veza u sistemu.

Karakteristike čvorova i veza neophodne za izračunavanje pouzdanosti sistema date su u prilogu, u tabeli P3.1. Za sve cevi usvojena je vrednost Hazen William-ovog koeficijenta 90, koji približno odgovara vrednostima za livenogvozdene cevi starosti oko 20 godina. Minimalan potreban pritisak u mreži iznosi 2.5 bara. Razmatrane su pouzdanosti za dva režima potrošnje vode u naselju:

- potrebe u času maksimalne potrošnje (Q_{max}^h), vrednosti ovih potrba date su u tabeli P3.1. u prilogu i
- potrebe u danu maksimalne potrošnje, 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, a odgovara približno srednjoj vrednosti podataka prikupljenih za beogradski vodovod. Ovi podaci predstavljaju približno i srednje vrednosti podataka koji su preporučeni u literaturi (videti sliku 4.4 u poglavlju 4). Pretpostavlja se da vreme popravke kvara, bez obzira na prečnik cevi, iznosi 3 dana. Vrednosti broja otkaza, intenziteta otkaza λ i popravke μ , kao i jedinične pouzdanosti R (pouzdanost za jedan kilometar cevi) dati su u tabeli 2.8. Vrednost pouzdanosti svake veze u sistemu data je u tabeli P3.1, u prilogu.



Slika 2.17: Šematski prikaz sistema A

Tabela 2.8: Vrednosti intenziteta otkaza, intenziteta popravke i jedinične pouzdanosti

Prečnik cevi (mm)	N (otkaz/km·god)	λ	μ	R_0
100	0.8	$91.93 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99342
125	0.7	$80.37 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99425
150	0.6	$68.83 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99507
200	0.4	$45.81 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99671
300	0.2	$22.87 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99835
400	0.2	$22.87 \cdot 10^{-6}$	0.013889	0.99835

U tabeli 2.9 dati su rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema A za obe razmatrane varijante, a u tabeli 2.10 rezultati ukupne pouzdanosti sistema i pojedinih potrošačkih čvorova, kao i vrednosti vremenskog deficita vode za te čvorove*. Pretpostavlja se da je hidraulika u potrošačkom čvoru zadovoljena ako u njemu postoji pritisak od najmanje 25 m. Rezultati proračuna pouzdanosti dobijeni korišćenjem programa NETREL i 2PFREL razlikuju se za najviše 0.001%, pa su prikazani rezultati dobijeni samo jednim od programa.

Tabela 2.9: Rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema A

čvor	varijanta 1	varijanta2
1	0.99917	0.999999
2	0.99916	0.999999
3	0.999165	0.999999
4	0.999165	0.999999
5	0.999165	0.999999
6	0.999165	0.999999
7	0.99916	0.999993
8	0.999165	0.999999
9	0.999162	0.999995
10	0.999165	0.999999
11	0.999159	0.999993
Rsis	0.999141	0.999974
R1	0.999159	0.999999
R2	0.999164	0.999997
R3	0.999163	0.9999996

* Rezultati su prikazani sa većim brojem decimala, kako bi se mogle uočiti razlike pouzdanosti za pojedine potrošačke čvorove i za ispitivane dve varijante.

Tabela 2.10: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema A ($p > 25$ m)

čvor	varijanta 1		varijanta2	
	R	T (dan)	R	T (dan)
1	0.99917	0.3	0.99917	0.3
2	0.99531	1.7	0.99683	1.2
3	0.98517	5.4	0.9908	3.4
4	0.99834	0.6	0.99917	0.3
5	0.97262	10	0.98812	4.3
6	0.99763	0.9	0.99999	0
7	0.98677	4.8	0.99789	0.8
8	0.99669	1.2	0.99999	0
9	0.99407	2.2	0.99899	0.4
10	0.98506	5.5	0.9936	2.3
11	0.99598	1.5	0.99751	0.9
R _{sis}	0.9688	11.4	0.98261	6.3
R1	0.97262	10	0.98812	4.3
R2	0.99153	3.1	0.99655	1.3
R3	0.991	3.3	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, povećavajući pouzdanost sa povećanjem broja tih čvorova, 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. Uviđenje 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.

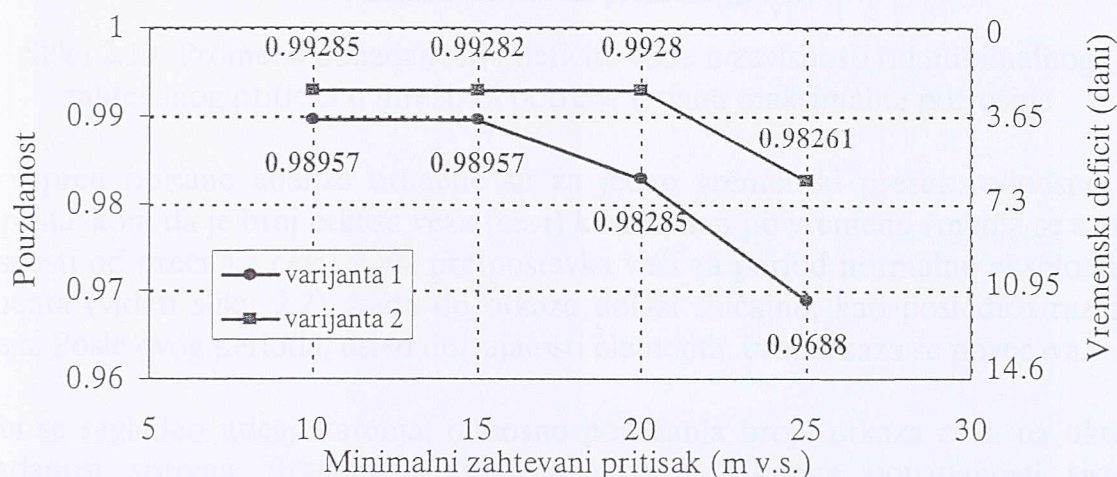
Urađena je i analiza pouzdanosti za slučaj kada se u sistemu zahteva minimalni pritisak od 15 m vodenog stuba. Rezultati su prikazani u tabeli 2.11. Analizom dobijenih vrednosti može se zaključiti da je pouzdanost kritičnih čvorova mreže 5, 10, 3 i 7, za varijantu sa samo jednim izvorišnim čvorom, značajno povećana, odnosno deficiti vode u ovim čvorovima smanjeni su za 60 - 70%. U ostalim čvorovima mreže dolazi do izvesnog smanjenja deficita, ali ti efekti nisu tako izraženi.

Slična situacija uočava se i u drugoj ispitivanoj varijanti, varijanti sa dva izvorišna čvora u sistemu. U toj varijanti, u svim čvorovima sistema vremenski deficit vode je manji (ili jednak) od jednog dana na prosečnom godišnjem nivou. Prilikom razmatranja ove varijante treba imati u vidu da je kao minimalan pritisak usvojena vrednost od 15 m, što bez ugrađenih hidrofora, može zadovoljiti korisnike prizemnih i jednospratnih objekata.

Tabela 2.11: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema A ($p > 15$ m)

čvor	varijanta 1		varijanta 2	
	R	T (dan)	R	T (dan)
1	0.99917	0.3	0.99999	0
2	0.996	1.5	0.99766	0.9
3	0.99522	1.7	0.99759	0.9
4	0.99834	0.6	0.99999	0
5	0.99223	2.8	0.9978	0.8
6	0.99763	0.9	0.99999	0
7	0.9946	2	0.99788	0.8
8	0.99672	1.2	0.99999	0
9	0.99572	1.6	0.999	0.4
10	0.99406	2.2	0.99733	1
11	0.99669	1.2	0.99835	0.6
R _{sis}	0.98957	3.8	0.99282	2.6
R1	0.99406	2.2	0.99733	1
R2	0.99603	1.4	0.99869	0.5
R3	0.99584	1.5	0.99858	0.5

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 2.18. Kao što se može videti vremenski deficit vode u razmatranom sistemu značajno se menja sa promenom zahtevanog pritiska. U varijanti sa jednim izvorom 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.

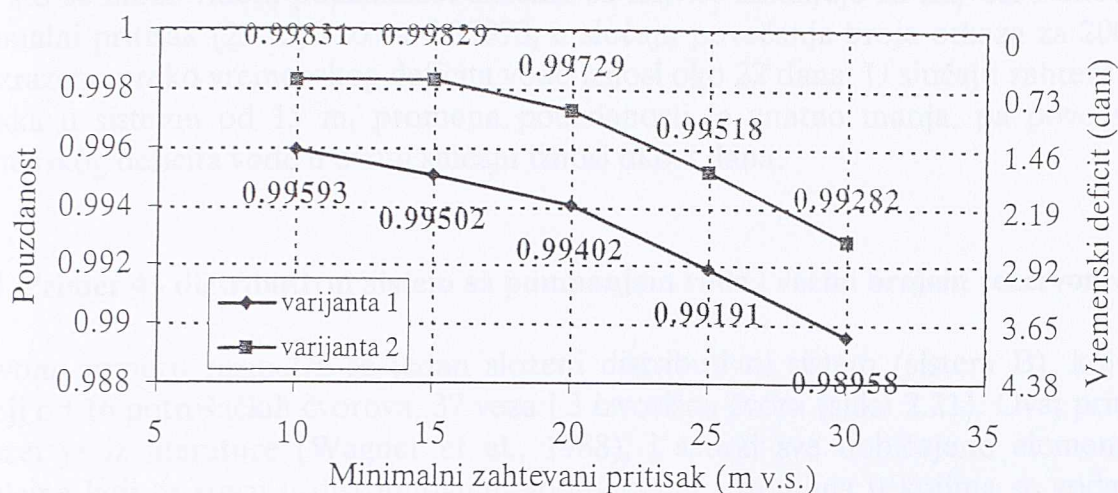


Slika 2.18: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u mreži, za potrebe Q^h_{max}

Pouzdanost ispitivane mreže razmatrana je i za slučaj kada se kao ograničenje, pored pritiska u čvorovima mreže, uvede i brzina vode u cevima. Kao maksimalna brzina vode usvojeno je $v_{max} = 1.5$ m/s. Sa ovakvim ograničenjima razmatrana je pouzdanost celog sistema. Dobijeni rezultati pokazuju da je za razmatrani sistem pritisak vode u čvorovima kritičan parametar, odnosno pouzdanost sistema se ne menja uvođenjem brzine kao ograničenja, ni u jednoj od ispitivanih varijanti.

Analiza pouzdanosti urađena je i za slučaj kada su potrebe u sistemu na nivou maksimalne dnevne potrošnje. Veličine pouzdanosti i deficita vode u čvorovima mreže, kao i ukupne pouzdanosti sistema, za minimalne zahtevane pritiske od 25 m v.s. i 15 m v.s., date su u tabelama P3.2 i P3.3 u prilogu. Na slici 2.19 prikazana je promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog pritiska koji se zahteva u sistemu.

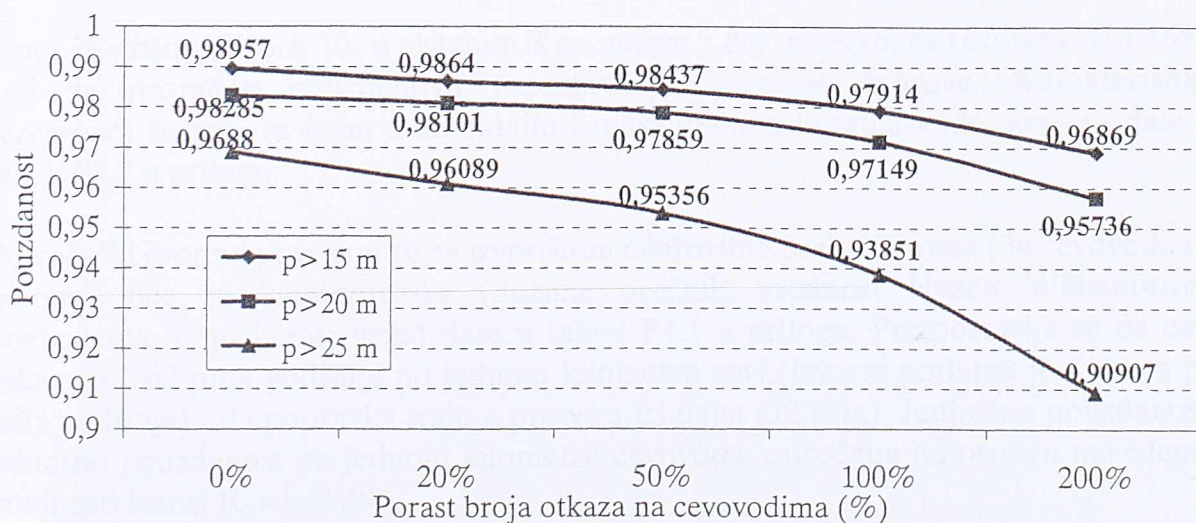
Slika 2.20: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od minimalnog zahtevanog pritiska u sistemu



Slika 2.19: 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 (videti sliku 2.2), 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 2.20.



Slika 2.20: 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 zahtevanog pritiska u sistemu od 15 m, promena pouzdanosti je znatno manja, pa povećanje vremenskog deficita vode u ovom slučaju iznosi oko 8 dana.

2.5.4. Primer 4 - distributivni sistem sa pumpanjem vode i većim brojem rezervoara

U ovom primeru razmatra se jedan složeni distributivni sistem (sistem B), koji se sastoji od 16 potrošačkih čvorova, 37 veza i 3 izvorišna čvora (slika 2.21). Ovaj primer preuzet je iz literature (Wagner et al., 1988), i sadrži sve uobičajene elemente i probleme koji se sreću u distributivnim vodovodnim sistemima u kojima se voda do korisnika dovodi pumpanjem. Zbog toga se ovaj primer 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.

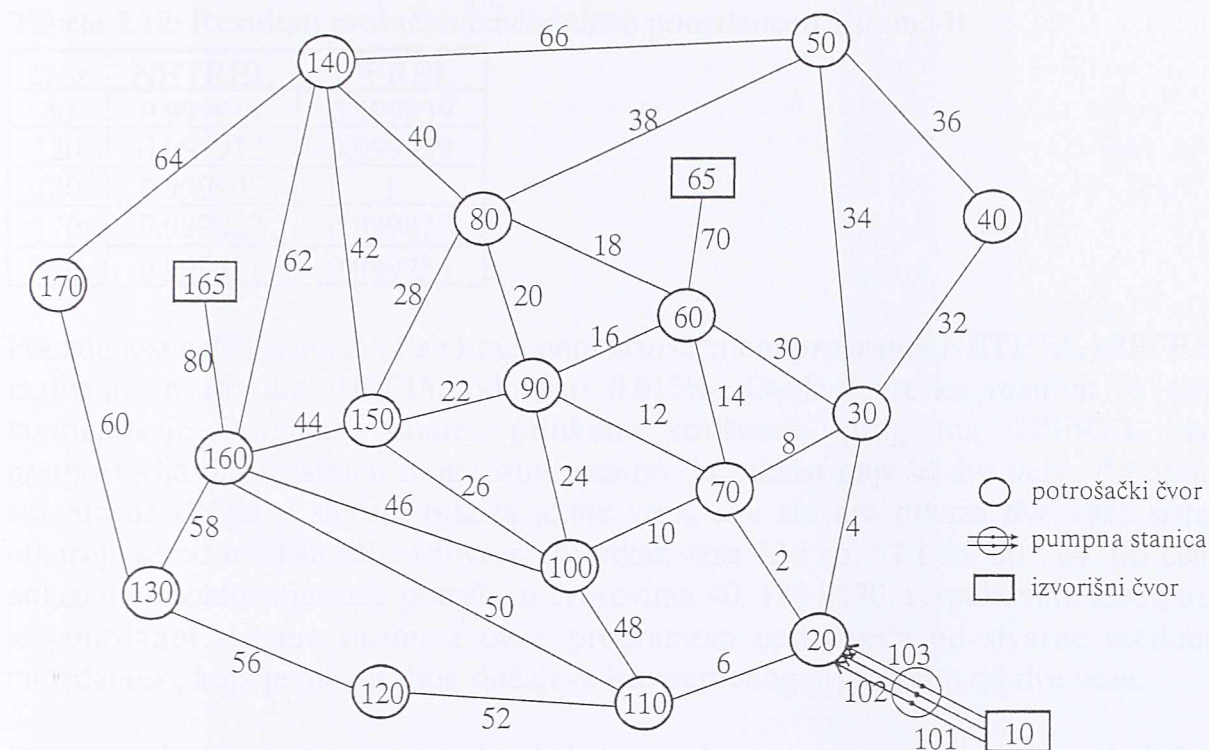
Voda za potrebe korisnika se u sistem B uvodi pumpanjem iz reke (izvorni čvor 10). Pumpna stanica sastoji se od tri paralelno vezana agregata (veze 101, 102 i 103). Karakteristike pumpi date su u tabeli P4.3 u prilogu. Pretpostavlja se da pumpe otkazuju 8 puta godišnje i da popravka traje u proseku 52 sata, odnosno pouzdanost svake pumpe iznosi 0.9543.

Potrošački čvorovi u ovom hipotetičkom naselju B 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 (kota terena i potrebe za vodom) date su u tabeli P4.1 u prilogu.

Osim izvorišnog čvora 10, u sistemu B se nalaze i dva rezervoara (čvorovi 65 i 165), koji za proračun pouzdanosti predstavljaju izvorišne čvorove. Karakteristike rezervoara su iste, sa istim minimalnim i maksimalnim kotama vode, koje su date u tabeli P4.2 u prilogu.

Potrošački čvorovi povezani su sa izvorišnim čvorovima preko 37 veza (34 cevovoda i 3 pumpe), čije su karakteristike (dužina, prečnik, vrednost Hazen William-ovog koeficijenta, pouzdanost veze) date u tabeli P4.1 u prilogu. 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 2.21: Šematski prikaz sistema B

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 bio veći 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 hipotetičkog naselja B.

Razultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema, dobijeni korišćenjem opisanih programa: NETREL i 2PFREL, 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. U tabeli 2.12 prikazane su samo one vrednosti pouzdanosti u čvorovima i pouzdanosti sistema koje su manje od 1.

Tabela 2.12: Rezultati proračuna mehaničke pouzdanosti sistema B

čvor	NETREL	2PFREL
40	0.999914	0.999939
120	0.999912	0.999939
130	0.999995	1
170	0.999827	0.999877
Rsis	0.999611	0.999755

Pouzdanost celog sistema (Rsis) računata korišćenjem programa NETREL i 2PFREL razlikuju se za oko 0.00015, odnosno 0.015%. Ovakva greška rezultat je same konfiguracije sistema. Naime, prilikom korištenja programa 2PFREL, koji pretpostavlja da u sistemu mogu istovremeno da otkazu najviše dve veze, do otkaza sistema ne dolazi u slučaju otkaza jedne veza, a u slučaju otkaza dve veze sistem otkazuje samo u tri slučaja: istovremeni otkaz veza 32 i 36, 52 i 56, 60 i 64, pri čemu dolazi do nezadovoljavanja potreba u čvorovima 40, 120 i 170, respektivno. Zbog toga je pouzdanost sistema računata ovim programom nešto veća od stvarne vrednosti pouzdanosti, koja je manja zbog slučajeva istovremenog otkaza više od dve veze.

Rezultati ukupne (mehaničko-hidrauličke) pouzdanosti sistema B dati su u tabeli 2.13. 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.

Tabela 2.13: Rezultati proračuna ukupne pouzdanosti sistema B

čvor	NETREL	Deficit vode (časovi)	2PFREL	Deficit vode (časovi)
20	0.99996	0.3	1	0
30	0.999944	0.5	0.999998	0
40	0.999865	1.2	0.999937	0.5
50	0.999942	0.5	0.999998	0
60	0.99996	0.3	0.999998	0
70	0.999957	0.4	0.999998	0
80	0.999958	0.4	0.999998	0
90	0.999959	0.4	0.999998	0
100	0.999949	0.4	0.999998	0
110	0.999922	0.7	0.999978	0.2
120	0.99777	19.5	0.998022	17.3
130	0.989324	93.5	0.989701	90.2
140	0.999914	0.8	0.999968	0.3
150	0.999557	3.9	0.999614	3.4
160	0.998467	13.4	0.998523	12.9
170	0.989198	94.6	0.989569	91.4
Rsis	0.988827	97.9	0.989446	92.5
R1	0.989198	94.6	0.989569	91.4
R2	0.998353	14.4	0.998456	13.5
R3	0.998564	12.6	0.998656	11.8

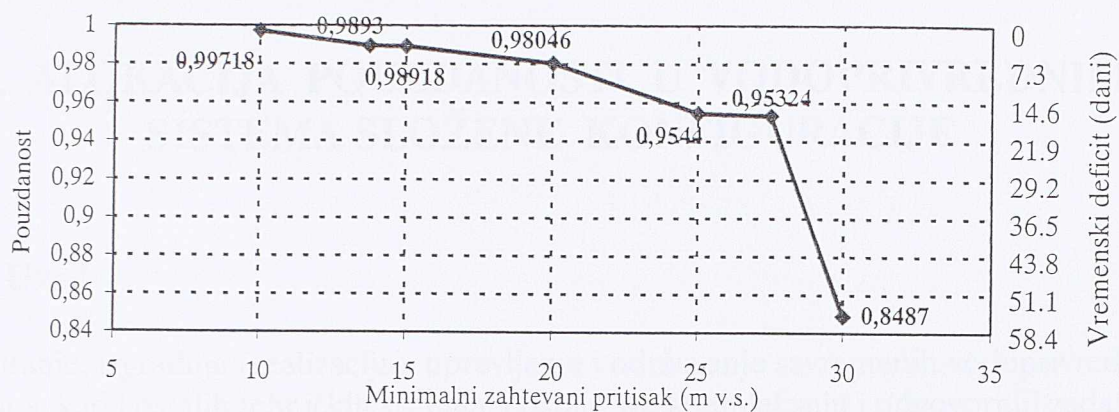
Iz razloga koji su već obrazloženi javlja se izvesna razlika između dobijenih vrednosti ukupne pouzdanosti celog razmatranog sistema (R_{sis}) dobijenih primenom dva razmatrana modela. Međutim, razlike pouzdanosti su relativno male i iznose oko 0.06%, što izraženo preko vremenskog deficita vode u potrošačkim čvorovima iznosi oko 5 časova. Razlike pouzdanosti i deficita vode koje se javljaju za pojedine potrošačke čvorove manje su i kreću se od 0.3 do 3 časa prosečno godišnje.

Dobijeni rezultati 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 defцитi vode za ove čvorove iznosi oko 4 dana, što je veoma blisko pouzdanosti, odnosno vremenskom defцитu 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 celig 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 defцитvode je gotovo četiri puta manji i iznosi oko jednog dana prosečno godišnje. Razlog za ovo je činjenica da se čvor 120 nalazi na granici druge i prve 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 (R_{sis}) za slučaj kada se u rezervoarima 65 i 165 nalazi polovina od ukupne količine vode (kote nivoa vode u rezervoarima iznose 72.9 mnm) pouzdanost sistema je nešto manja i iznosi 0.988362. Vremenski defцит 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 otkáže 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 pouzdanosi javlja se kao rezultat hidrauličkih mogućnosti dopremanja vode do određenih čvorova, u slučaju sniženja kote vode u rezervoarima.

Analizirana je i promena pouzdanosti sistema, odnosno deficita vode, u odnosu na zahtevani minimalni pritisak u mreži. Ova zavisnost prikazana je na slici 2.22.



Slika 2.22: Promena pouzdanosti i deficita vode u zavisnosti od zahtevanog minimalnog pritiska u sistemu

3. ALOKACIJA POUZDANOSTI U VODOPRIVREDNIM SISTEMA SLOŽENE KONFIGURACIJE

3.1. Uvod

Planiranje, izgradnja (realizacija), upravljanje i održavanje savremenih vodoprivrednih sistema, kao i ostalih tehničkih sistema, postaje sve kompleksniji i odgovorniji zadatak. Ovi sistemi, sve složenijih struktura, moraju da ispune brojne i veoma kompleksne zahteve u pogledu funkcionalnosti, upravljivosti, bezbednosti, ekonomičnosti i dr. U takvim uslovima neophodno je i pouzdanost sistema odrediti sa što većom preciznošću i sigurnošću kako bi se, na osnovu te vrednosti, mogle predvideti količine vode koje nije moguće isporučiti određenim potrošačkim čvorovima (ili deficite vode u celom sistemu) zbog kvarova na mreži (u prvom redu kao posledica otkaza cevi). U slučajevima kada su deficiti veći od predviđenih, odnosno kada je pouzdanost manja od zahtevane (željene) neophodno je pouzdanost sistema dovesti na odgovarajući nivo. U tom smislu se pred projektante postavlja ozbiljan teorijski problem raspoređivanja pouzdanosti na pojedine elemente sistema. Postupci "raspoređivanja" u aglosaksonskoj literaturi se obično nazivaju alokacijom pouzdanosti.

Problem raspoređivanja (alokacije) pouzdanosti može se javiti u dva oblika:

- (1) alokacija pouzdanosti u slučaju unapred zahtevane pouzdanosti složenog sistema;
- (2) alokacija u uslovima kada se pored zahtevane pouzdanosti u razmatranje uzimaju i troškovi alokacije (ulaganja).

3.2. Metode alokacije pouzdanosti koje ne uzimaju u obzir troškove alokacije

Metode ove grupe imaju zadatak da rasporede zadatu pouzdanost sistema na njegove elemente vodeći računa samo o ispunjenju zahteva pouzdanosti, uz uvođenje ograničenja koja se odnose na određene tehničke zahteve sistema. Ove metode pogodne su za alokaciju pouzdanosti sistema kod kojih se zahtevana pouzdanost može najjednostavnije ostvariti dodavanjem paralelno vezanih elemenata. Metode ovog tipa uspešno se koriste pri alokaciji određenih elektrotehničkih sistema, dok se za alokaciji pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema ređe koriste, samo za pojedine klase sistema i uz određene uslove.

Polazna pretpostavka za metode ovog tipa je da su otkazi pojedinih elemenata nezavisni, pa zadatak alokacije pouzdanosti, u opštem slučaju, ima sledeći oblik:

$$R(\mathbf{y}) \geq R^*$$

gde su:

R^* - zahtevana pouzdanost sistema

$R(\mathbf{y})$ - alocirana pouzdanost sistema, tj. pouzdanost sistema sa alociranim pouzdanostima elemenata sistema

$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ - vektor alociranih pouzdanosti elemenata sistema

Postavljena jednačina ima beskonačno mnogo rešenja, ako se ne postave neki uslovi vezani za raspoređivanje pouzdanosti po pojedinim elementima sistema. Ti zahtevi se mogu postaviti u vidu određenih kriterijuma. U zavisnosti od usvojenih kriterijuma razvijen je veći broj metoda za raspoređivanje pouzdanosti, koje se daju u nastavku teksta.

3.2.1. Metod izjednačavanja pouzdanosti

Metod izjednačavanja pouzdanosti je najjednostavniji metod alokacije pouzdanosti. Primenjuje se u slučajevima kada se pouzdanost nekog sistema elemenata želi dovesti iznad zahtevanog nivoa, pri čemu se zanemaruju svi drugi činioci.

Pouzdanost pojedinih elemenata sistema se, u ovom slučaju, određuje koristeći sledeće relacije:

- serijska veza elemenata:

$$\prod_{i=1}^N R_i = R^* \Rightarrow R_i = (R^*)^{1/N}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$$

- paralelna veza elemenata:

$$1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) = R^* \Rightarrow R_i = 1 - (1 - R^*)^{1/N}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$$

Ovaj metod alokacije pouzdanosti može se primeniti i za kombinovane serijsko - paralelne strukture elemenata, ako je poznata strukturna funkcija sistema. Postupak je generalno primenljiv i za mrežne strukture, ali je čak i za jednostavnije sisteme ovog tipa strukturna funkcija veoma komplikovana, što je čini nepogodnom za ovaj tip proračuna.

Drugi nedostatak metode izjednačavanja pouzdanosti je činjenica da se ne uzimaju u obzir troškovi (koštanje razvoja elementa do postizanja određenog nivoa pouzdanosti), kao ni uslovi rada pojedinih elemenata. Zbog svega navedenog, pouzdanosti elemenata dobijene korišćenjem ove metode često ne predstavljaju najekonomičnije rešenje ostvarivanja zahtevane pouzdanosti, posebno u uslovima kada se podizanje pouzdanosti pojedinih elemenata do neke vrednosti ne postiže uz isti priraštaj troškova, a njihova vremena rada nisu ista.

3.2.2. Metoda alokacije pouzdanosti preko relativne osetljivosti na otkaz - ARNIC metod

Ova metoda predstavlja pokušaj da se alokacija pouzdanosti na elemente sistema uskladi sa realnim mogućnostima njihovog ostvarivanja. Razvijena je za sisteme sastavljene od serijski vezanih elemenata, pri čemu otkaz bilo kog elementa dovodi do otkaza celog sistema. Pretpostavlja se da su intenziteti otkaza konstantne vrednosti (eksponencijalna raspodela funkcije gustine otkaza) i da je vreme rada elemenata jednako vremenu rada celog sistema.

Pouzdanosti elemenata se, u ovoj metodi, izračavaju preko intenziteta otkaza, a cilj je da se intenziteti otkaza λ_i i-tih elemenata sistema tako alociraju da se zadovolji nejednakost:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^* \leq \lambda^*$$

gde su:

λ_i^* - alocirani intenzitet otkaza i-tog elementa

λ^* - zahtevani intenzitet otkaza celog sistema

Da bi se ovaj metod mogao sprovesti neophodno je poznavanje vrednosti intenziteta otkaza elemenata sistema (λ_i). Raspodela potrebne pouzdanosti na pojedine elemente vrši se srazmerno "statističkoj težini" odgovarajućih vrednosti intenziteta otkaza, preko koeficijenta alokacije ili težinskog faktora ω_i . Ovaj faktor se određuje za svaki element sistema preko relacije:

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad i=1, 2, \dots, N$$

Može se zaključiti da ω_i predstavlja pokazatelj relativne osetljivosti na otkaz i-tog elementa sistema, pa važi:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

Zahtevani (alocirani) intenzitet otkaza i-tog elementa sistema računa se preko relacije:

$$\lambda_i^* = \omega_i \lambda^*$$

pri čemu se pretpostavlja da u napred navedenom izrazu $\sum_{i=1}^N \lambda_i^* \leq \lambda^*$ važi znak jednakosti.

Zahtevana pouzdanost pojedinih elemenata sistema može se odrediti iz izraza za pouzdanost (za eksponencijalnu raspodelu funkcije gustine otkaza), uzimajući u obzir i zahtevano vreme rada sistema:

$$R_i = e^{-\lambda_i \cdot t}$$

3.2.3. Alokacija pouzdanosti prema značajnosti pojedinih elemenata - AGREE metod

Ovaj metod razvijen je za alokaciju pouzdanosti složenih sklopova i nešto je povoljniji od prethodno opisanih metoda. Osnovne prednosti ogledaju se u uključivanju relativnog značaja pojedinih elemenata u sistemu, sa stanovišta njihovog uticaja na uspešan rad sistema, kao i na uvažavanju kompleksnosti pojedinih podsistema, tj. njihove unutrašnje strukture.

Osnovna pretpostavka u ove metode je da svi elementi u složenom sistemu slede eksponencijalnu raspodelu pouzdanosti. Značaj nekog i-tog dela sistema određuje se preko faktora značajnosti w_i , koji se definiše preko verovatnoće otkaza celog sistema u slučaju otkaza i-tog dela. Faktor značajnosti uzima vrednosti $0 \leq w_i \leq 1$. U slučajevima kada je $w_i = 1$, i-ti deo sistema mora raditi pouzdano da bi radio čitav sistem. Niže vrednosti faktora značajnosti znače da u nekim periodima eksploatacije rad i-tog dela sistema ne uslovljava rad celog sistema.

Kao polazište za alokaciju pouzdanosti određuje se minimalno prihvatljivo srednje vreme između otkaza (θ_i) i-tog dela sistema, prema relaciji:

$$\theta_i = \frac{N \cdot w_i \cdot t_i}{N_i \cdot (-\ln R(t))}$$

gde su:

N - ukupan broj elemenata složenog sistema

w_i - faktor značajnosti i-tog dela sistema

t_i - vreme rada i-tog dela sistema

N_i - broj elemenata u i-tom delu sistema

$R(t)$ - zahtevana pouzdanost sistema u vremenu t

Veličina neophodne pouzdanosti koju treba alocirati u i-tom delu sistema definiše se relacijom:

$$R_i(t_i) = \exp\left(-\frac{t_i}{\theta_i}\right)$$

3.2.4. Alokacija pouzdanosti ojačavanjem najslabije karike

Ovaj metod primenljiv je za sisteme sa serijski vezanim elementima, kada se zahteva da pouzdanost bude veća od neke zadate vrednosti R^* . Element sa najmanjom vrednošću pouzdanosti (najslabija karika sistema) ojačava se uvođenjem paralelno vezanih elemenata, i računa se nova pouzdanost tog podsistema i celog sistema. Ukoliko je pouzdanost manja od R^* , opisana procedura se nastavlja sve dok se ne postigne pouzdanost sistema veća od zahtevane vrednosti.

* * *

Opisana klasa metoda može se primeniti i u nekim klasama vodoprivrednih sistema. Tako se metoda izjednačavanja pouzdanosti može koristiti kod relativno jednostavnih sistema, kod kojih su svi elementi i sklopovi koji čine sistem istog reda značajnosti sa stanovišta posledica u pogledu otkaza, a njihove investicione vrednosti nisu veoma različite (nema elemenata čija je investiciona vrednost znatno veća od investicione vrednosti ostalih elemenata). U sličnim okolnostima, kod jednostavnijih sistema, može se primeniti i metoda alokacije pouzdanosti preko relativne osetljivosti na otkaz (ARNIC metoda), pri čemu se ovom metodom mogu dobiti težine osetljivosti na otkaz pojedinih elemenata. Alokacija pouzdanosti prema značajnosti pojedinih elemenata (AGREE metod) može se primeniti u slučaju onih klasa sistema kod kojih se mogu proceniti faktori značajnosti pojedinih elemenata, takođe pod uslovom da investicione vrednosti pojedinih elemenata sistema nisu jako različite.

Iz ove klase metoda najveću upotrebnu vrednost ima metoda alokacije pouzdanosti ojačavanjem najslabije karike. Ona se može primenjivati u slučajevima raspoređivanja pouzdanosti kod linijskih prenosnih sistema (npr. magistralni cevovodi regionalnih sistema) sa dodatnim elementima za održavanje zahtevanih hidrauličkih režima (buster stanice, prekidne komore, upravljački zatvarači i sl.). Kod takvih sistema je dosta logično da se kao prva aproksimacija u analizi pouzdanosti, u fazi izbora konfiguracije sistema, primeni metoda ojačavanja najslabije karike. U kasnijim fazama projektovanja mogu se primenjivati optimizacione metode, radi detaljnije alokacije pouzdanosti - sa sklopova na podsklopove, sa podsklopova na elemente sistema.

3.3. Metode alokacije pouzdanosti koje uzimaju u obzir troškove alokacije

Metode ove grupe, koje pored zahtevane pouzdanosti sistema u razmatranje uzimaju i troškove alokacije, imaju širu praktičnu primenu i daju bolje (realnije) rezultate, u odnosu na metode prve grupe. Pod troškovima alokacije podrazumevaju se sva

ulaganja u elemente sistema neophodna da se pouzdanost elementa dovede do zahtevanog (proračunom određenog) nivoa.

U zavisnosti od načina definisanja kriterijumske funkcije, uslova i ograničenja, zadaci ove grupe mogu se definisati na više načina od kojih su najčešća sledeća dva:

- direktni zadatak optimizacije - alokacija pouzdanosti ako je zadata (poznata) vrednost troškova (ulaganja), a po kriterijumu maksimizacije pouzdanosti (zadana cena - maksimalna pouzdanost)
- obrnuti zadatak optimizacije - alokacija pouzdanosti ako je zadata (poznata) zahtevana pouzdanost sistema, a po kriterijumu minimizacije troškova (zadana pouzdanost - minimalna cena)

Funkcionalna zavisnost 'koštanje - pouzdanost'

Alokacija pouzdanosti uz zadovoljenje ekonomskih kriterijuma - investicionih ulaganja, odnosno godišnjih troškova (troškova / ulaganja) i pouzdanosti ostvaruje se tehnikama optimizacije. Da bi se proračuni ove vrste mogli sprovesti neophodno je, pored karakteristika pouzdanosti elemenata, poznavanje i funkcionalne zavisnosti između pouzdanosti i koštanja elemenata sistema. Utvrđivanje ove zavisnosti je posebno složen zadatak, jer se povećanje pouzdanosti može postići na razne načine. U slučaju cevovoda, koji su najzastupljeniji, a često i jedini elementi na osnovu kojih se određuje pouzdanost vodoprivrednih sistema, povećanje pouzdanosti elemenata se može postići izborom boljeg materijala, boljim postupcima obrade, boljom kontrolom proizvodnog procesa, povećanjem pojedinih dimenzija i dr.

U slučaju vodoprivrednih sistema veoma često se postavlja zadatak alokacije pouzdanosti postojećeg sistema, tj. povećanje pouzdanosti do nekog zahtevanog nivoa. U tim slučajevima u razmatranje se moraju uvesti i mogućnost zamene postojećeg elementa novim elementom veće pouzdanosti, koje pored toga imaju i bolje hidrauličke karakteristike (manju hrapavost), uvođenje novih elemenata (novih veza) u sistem, kao i mogućnost dodavanja izvornih čvorova (izvorišta, rezervoari).

Problem određivanja funkcije troškova u zavisnosti od pouzdanosti $C(R)$, rešava se na razne načine, obično uvođenjem određenih aproksimacija i pretpostavki. Ova funkcija je najčešće nelinearnog tipa, a često se zadaje i kao diskretan skup tačaka (pouzdanost - cena). Osnovni uslovi koje funkcija troškova mora zadovoljiti su:

1. $C(R_0, R) > 0$
2. $C(R_0, R)$ ne opada za fiksno R_0
3. $C(R_0, 1) \rightarrow +\infty$

gde je R_0 početna pouzdanost elementa, a R pouzdanosti koja se želi postići, pri čemu, naravno, važi nejednakost: $R > R_0$.

Znači, funkcija troškova mora uzimati vrednosti veće od nule i mora biti neopadajuća funkcija, što je i intuitivno potpuno jasno. Treći uslov predstavlja matematičku formulaciju logičnog stava da je u realnim uslovima projektovanja i proizvodnje nemoguće dobiti apsolutno pouzdan element za konačne troškove.

Navedene uslove zadovoljavaju mnoge funkcije, a jedna od najčešće korištenih je:

$$C = C_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^a$$

gde su λ i λ_0 intenziteti otkaza koji odgovaraju pouzdanostima R i R_0 , a a - parametar koji zavisi od karakteristika elemenata, uz uslov $a > 0$. U slučaju eksponencijalne raspodele funkcija dobija se sledeći oblik:

$$C = C_0 \left(\frac{\ln R_0}{\ln R} \right)^a$$

Često se funkcionalna zavisnost između cene i pouzdanosti iskazuje i u obliku:

$$C = K \cdot R^\alpha$$

ili u obliku:

$$C = k (-\ln R)^{-a}$$

gde su a , K i α - konstantne vrednosti, a predstavljaju karakteristike elementa.

Ovde treba istaći jednu karakteristiku vodoprivrednih sistema, posebno distributivnih sistema u naseljima. Naime, osnovni elementi (često i jedini elementi koji se uključuju u modele određivanja i alokacije pouzdanosti) ovih sistema su cevovodi različitih prečnika. Uzimajući u obzir način izrade i nabavke ovih elemenata jasno je da se ne može (osim u nekim specifičnim slučajevima) odrediti kontinualna funkcija 'troškovi - pouzdanost'. U takvim slučajevima, u optimizacije modele ulazi se sa diskretnim vrednostima troškova za cevi određenih karakteristika.

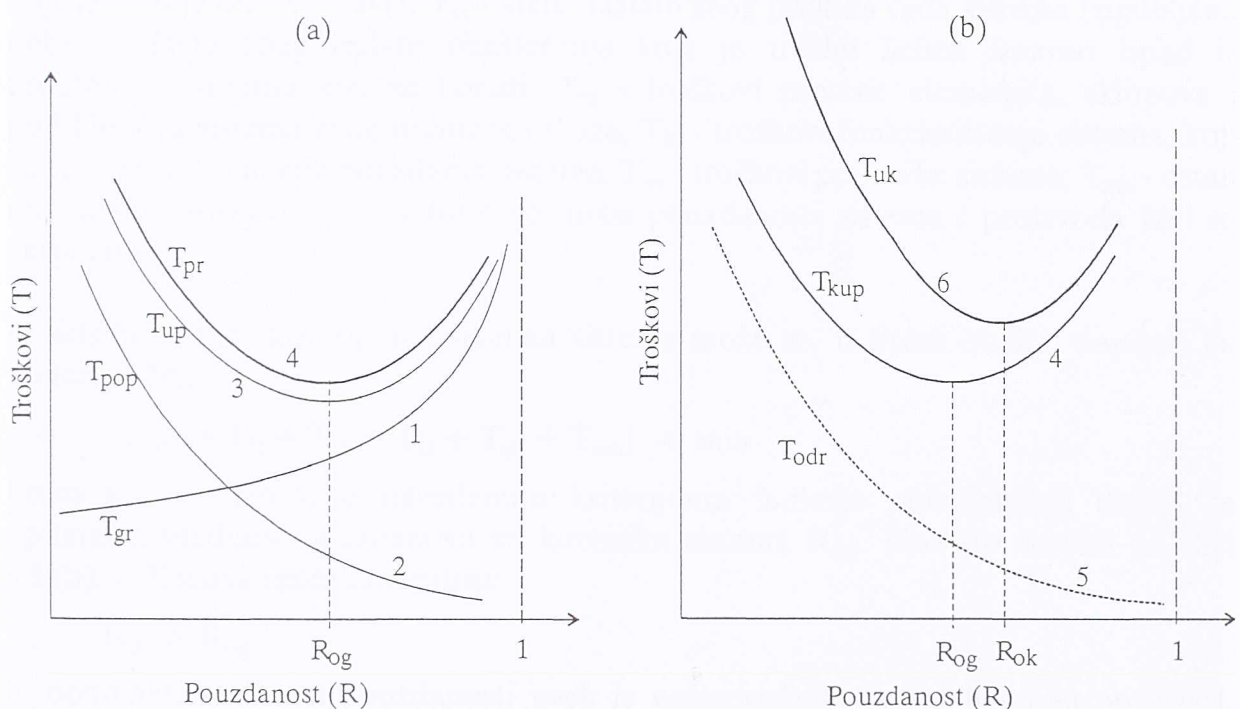
Važno pitanje: Za koga je rešenje optimalno?

U svim zadacima tehno-ekonomske optimizacije opstavlja se izuzetno važno pitanje: Za koga je rešenje optimalno? To pitanje se postavlja sa dosta velikom težinom, u i zadacima optimizacije pouzdanosti.

Prvo pitanje koje se postavlja u klasičnom zadatku izbora pouzdanosti nekog proizvoda je sledeće: "Koji nivo pouzdanosti ugraditi u sistem koga treba proizvesti/izgraditi, a kasnije tokom eksploatacije i održavati?" Na takvo pitanja odgovor je dosta jasan: "Optimalan nivo pouzdanosti je onaj za koji su troškovi proizvodnje/izgradnje, održavanja i eksploatacije minimalni."

Drugo pitanje koje proizilazi iz prvog glasi: "Šta sve obuhvatiti stavkom 'troškovi'?" Za ovo pitanje odgovor nije jednoznačan. Različiti su troškovi proizvođača - prodavca proizvoda i toškovi kupca - onoga ko će sistem da koristi i održava tokom celog veka njegove eksploatacije.

Ukupni troškovi proizvođača sastoje se od troškova proizvodnje / građenja (troškovi pre prodaje) i troškova nakon isporuke / prodaje, odnosno predaje sistema kupcu, koji se sastoje od troškova održavanja sistema u garantnom roku. Ovi troškovi prikazani su na slici 3.1.(a), na kojoj se vidi funkcionalna zavisnost pouzdanosti i troškova koje ima prodavac, odnosno graditelj sistema.



Slika 3.1: Zavisnost pouzdanosti i troškova: (a) graditelja / proizvođača sistema, (b) korisnika sistema. 1 - troškovi građenja / proizvodnje pre predaje korisniku; 2 - troškovi proizvođača nakon predaje korisniku; 3 - ukupni troškovi proizvođača / graditelja; 4 - prodajna / kupovna cena; 5 - troškovi korisnika tokom održavanja; 6 - ukupni troškovi korisnika.

Prodajna cena prodavca predstavlja sumu svih troškova uvećanu za dobit (kriva 4), a to je ujedno i kupovna cena za korisnika sistema. U skladu sa kriterijumom proizvođača

$$\{T_{gr} + T_{pop}\} \rightarrow \min$$

dobija se da je za proizvođača / graditelja sistema optimalna vrednost pouzdanosti R_{og} (slika 3.1.(a)). Naravno, bilo koja druga vrednost pouzdanosti, veća ili manja od R_{og} , rezultuje većim ukupnim troškovima za proizvođača, a time i većom prodajnom cenom. Znači, u tržišno uređenim sistemima, u kojima su jasno definisane obaveze proizvođača, sa ekonomskog stanovišta, nije isplativa (uputna, preporučljiva) izrada

proizvoda sa nedovoljnom pouzdanošću, jer će tada troškovi popravke i zamene elemenata u garantnom roku biti visoki. Sa druge strane, nije uputna ni izrada proizvoda sa previše visokom pouzdanošću, jer je tada to redundantno predimenzionisan i preskup proizvod.

Za korisnika sistema kriterijum za optimizaciju pouzdanosti je drugačiji i definiše se u sledećem obliku:

$$\{T_{\text{kup}} + T_{\text{odr}}\} \rightarrow \min$$

U troškove održavanja spadaju svi troškovi koji nastaju u fazi održavanja sistema, a koji se sastoje od više stavki: $T_{\text{št}}$ - štete nastale zbog prekida rada sistema (izgubljena dobit + štete zbog isplate obeštećenja koje je trećim licima izazvao ispad iz proizvodnje sistema koji se koristi, T_{zs} - troškovi zamene elemenata, sklopova i podsklopova sistema zbog njihovog otkaza, T_{fs} - troškovi funkcionisanja sistema, koji su veći u slučaju manje pouzdanih sistema, T_{ps} - troškovi popravke sistema, T_{ms} - ostali materijalni troškovi, koji su funkcija nivoa pouzdanosti sistema / proizvoda koji se eksploatiše.

U skladu sa tim, kriterijum korisnika sistema može se, u širem obliku, napisati na sledeći način:

$$\{T_{\text{kup}} + T_{\text{št}} + T_{\text{zs}} + T_{\text{fs}} + T_{\text{ps}} + T_{\text{ms}}\} \rightarrow \min$$

Pošto su svi članovi u navedenom kriterijumu funkcije pouzdanosti, dobija se optimalna vrednost pouzdanosti za korisnika sistema R_{ok} . Kao što se vidi na slici 3.1.(b), važi jedna opšta zakonitost:

$$R_{\text{ok}} > R_{\text{og}}$$

tj. optimalna vrednost pouzdanosti uvek je nešto veća za kupca nego za prodavca. Razlog je i intuitivno jasan: vreme eksploatacije / korišćenja proizvoda je znatno duže od garantnog roka (tokom koga troškove popravke snosi proizvođač), tako da će tokom eksploatacije sistem iskazati i svoje skrivene mane, koje finansijski opterećuju korisnika sistema.

I u slučaju vodoprivrednih sistema mogu se pojaviti pomenute dve kategorije optimalne vrednosti pouzdanosti, zavisno od organizaciono - finansijske šeme realizacije objekta / sistema. Jedna šema, sada najrasprostranjenija, jeste da se za realizaciju nekog novog složenog vodoprivrednog sistema formira investitorska grupa, koja organizuje projektovanje sistema i njegovu realizaciju, a nakon završetka sistema prerasta u organizaciju koja koristi sistem. Slično se dešava i u slučaju već postojećeg preduzeća, kome se poverava zadatak da u okviru svog razvoja realizuje proširenje sistema, tako da preraste u veliki sistem (npr. neki postojeći vodovod realizuje veliki regionalni sistem višeg reda, kojim će, nakon završetka, upravljati). U oba slučaja reč je o optimalnoj pouzdanosti korisnika sistema (R_{ok}), pa je logično očekivati da takav korisnik još u fazi istraživanja i projektovanja postavi zahtev da se pouzdanost sistema

digne do veličine R_{ok} , jer će u tim uslovima imati najmanju sumu troškova građenja i eksploatacije.

U slučajevima sistema koji se grade, a zatim se predaju / prodaju korisniku, po principu "ključ u ruke" situacija je sasvim drugačija. Ova šema prisutna je u nizu zemalja: raspisuje se tender za projektovanje, izgradnju i uhodavanje sistema, nakon čega se predaje na dalje korišćenje korisniku, uz jasno definisane obaveze (garantni rok, i dr.). U ovom slučaju radi se o optimalnoj pouzdanosti proizvođača / graditelja (R_{og}). U ovom slučaju će graditelj sistema, pored svih navedenih troškova rada u garantnom periodu (otkazi elemenata i njihova zamena, nadoknađivanje šteta nastalih u periodu zastoja, povećani troškovi održavanja i servisa, dodatni transportni troškovi za ljude, opremu i elemente koji se zamenjuju, plaćanje penala, i dr.), morati da računa i sa troškovima koji nastaju kao posledica gubitka dobre graditeljske reputacije. Ovaj poslednji trošak, koji se u svetu sve češće egzaktno kvantifikuje, pomera vrednost R_{og} prema vrednosti R_{ok} .

Još jedna važna napomena vezana za način tretmana troškova. Pošto se veliki vodoprivredni sistemi realizuju više godina, sa novcem koji se pozajmljuje na tržištu kapitala, određivanje svih kategorija troškova, posebno investicionih, mora se zasnivati na diskontnoj analizi, računajući sa realnim kamatama (r) koje će se vraćati kroz anuitete (A) i realno pretpostavljenim stopama porasta troškova održavanja i remonta (e), u skladu sa inflatornim kriterijumima. U ovom slučaju, ako se zajam u visini K dobijen na N godina, sa kamatom (r), otplaćuje u jednakim godišnjim iznosima A - anuitetima, koji čini da deo glavnice i kamata, onda se vrednost anuiteta definiše relacijom:

$$A = k \cdot K, \quad \text{gde je } k = [r(1+r)^n] / [(1+r)^n - 1]$$

Vrednost anuiteta je jedna od najvećih stavki stalnih godišnjih troškova građenja (T_{gr}), za određenu pouzdanost graditelja (R_g). Pošto i u najstabilnijim ekonomijama postoji porast troškova održavanja i remonta, po nekoj stopi (e), neophodno je izvršiti aktuelizaciju i tih troškova po relaciji:

$$T_{odr,n} = T_{odr,0} \cdot (1+e)^n$$

gde je n - indeks n -te godine, a "0" - indeks početne vrednosti troškova, u fazi planiranja.

Formalizacija zadatka alokacije pouzdanosti

Opšta matematička formulacija problema alokacije pouzdanosti, za poznatu zahtevanu pouzdanost sistema, a po kriterijumu minimizacije troškova, ima sledeći oblik:

- kriterijumska funkcija:
$$\min \sum_{i=1}^N C_i(x_i, y_i)$$

- uslov: $R(\mathbf{y}) \geq R^*$

- ograničenja: $0 \leq x_i \leq y_i \leq 1$

gde je:

$C_i(x_i, y_i)$ - troškovi potrebni da se nivo pouzdanosti elementa i podigne sa x_i na y_i

$R(\mathbf{y})$ - alocirana pouzdanost sistema

R^* - zahtevana pouzdanost sistema

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ - vektor početnih pouzdanosti elemenata sistema

$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ - vektor alociranih pouzdanosti elemenata sistema

N - broj elemenata sistema

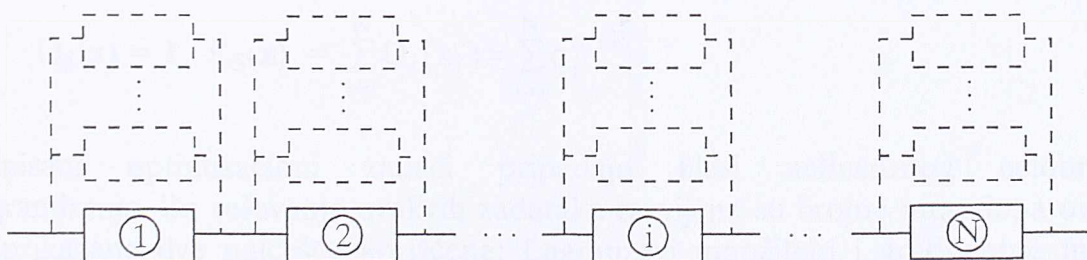
Na sličan način se dobija i formulacija problema alokacije pouzdanosti u slučaju kada su poznati troškovi, a po kriterijumu maksimizacije pouzdanosti:

- kriterijumska funkcija: $\max R(\mathbf{y})$

- uslov: $\sum_{i=1}^N C_i(x_i, y_i) \leq C^*$

- ograničenja: $0 \leq x_i \leq y_i \leq 1$

Jedan od najviše proučavanih zadataka alokacije pouzdanosti je određivanje optimalnog broja redundantnih elemenata (elementi koji povećavaju pouzdanost sistema - rezerva u sistemu, a u opisanom zadatku to su elementi koji se vezuju paralelno sa postojećim elementima) za sistem kod koga su osnovni elementi vezani serijski (slika 3.2.).



Slika 3.2: Šematski prikaz optimizacionog zadatka

Direktni zadatak optimizacije pouzdanosti (zadata cena - maksimalna pouzdanost) za napred definisani zadatak može se formulisati na sledeći način:

- kriterijum: $\max R_S(\mathbf{x}) = \max \prod_{i=1}^N R_i(\mathbf{x}) = \max \prod_{i=1}^N [1 - (1 - y_i)^{x_i+1}]$

- uslov: $\sum_{i=1}^N C_i(x_i) \leq C^*$

gde je:

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ - vektor broja redundantnih elemenata, za svaki postojeći element sistema

y_i - pouzdanost i -tog elementa sistema

Na sličan način definiše se i obrnuti zadatak optimizacije pouzdanosti (zadatak pouzdanost - minimalna cena):

- kriterijum: $\min \sum_{i=1}^N C_i(x_i)$

- uslov: $R_S(\mathbf{x}) \geq R^*$

Postavljeni zadatak maksimizacije pouzdanosti može se definisati i kao zadatak minimizacije nepouzdanosti ($Q_S(\mathbf{x}) = 1 - R_S(\mathbf{x})$), na koji se u literaturi češće nailazi. Razlog za to leži u činjenici da se funkcija nepouzdanosti za serijsko-paralelne sisteme, koji su sastavljeni od visoko pouzdanih elemenata, može aproksimirati jednostavnijim izrazom:

$$R_S(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^N R_i(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^N (1 - Q_i(\mathbf{x}))$$

$$R_S(\mathbf{x}) = 1 - \sum_{i=1}^N Q_i(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N Q_i(x_i) Q_j(x_j) - \dots + (-1)^N \prod_{i=1}^N Q_i(x_i)$$

U slučajevima kada je $Q_i(x_i) \ll 1/N$, tada je:

$$R_S(\mathbf{x}) \approx 1 - \sum_{i=1}^N Q_i(x_i)$$

$$Q_S(\mathbf{x}) = 1 - R_S(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N Q_i(x_i) = \sum_{i=1}^N q_i^{x_i+1}$$

Definisani optimizacioni zadaci pripadaju klasi nelinearnog celobrojnog programiranja. Za rešavanje ovakvih zadataka razvijene su brojne metode, a ovde će biti prikazane dve najčešće korišćene: Lagranževi množitelji i gradijentne metode (poglavlja 3.3.1. i 3.3.2.)

3.3.1. Lagranževi množitelji (funkcije)

Jedna od metoda kojom se može rešiti opisani zadatak ekstremizacije, uz određena ograničenja, jeste primena Lagranževih množitelja. Da bi se ovaj metod mogao primeniti neophodno je uvesti izvesne relaksacije originalnih ograničenja. Naime, promenljive problema posmatraju se kao kontinualne, a ograničenja koja su tipa nejednakosti, zamenjuju se ograničenjima tipa jednakosti. Kao posledica opisanih relaksacija, dobijeno rešenje ne mora da bude celobrojno. Zaokruživanjem dobijenih

optimalnih vrednosti uslovi optimalnosti prestaju da važe, pa dobijeno rešenje nije uvek optimalno (mada u većini slučajeva jeste).

Prema ovom metodu, za opšti zadatak napisan u obliku:

$$\max R_S(\mathbf{x})$$

$$\sum_{j=1}^J g_j(\mathbf{x}) = 0$$

formira se Lagranževa funkcija

$$L(\mathbf{x}, \mu) = R_S(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^J \mu_j g_j(\mathbf{x})$$

gde su μ_j Lagranževi množitelji.

Zadatak se rešava korišćenjem Karuš-Kun-Takerovih (KKT) uslova za ekstremum, koji daju sledeće jednakosti:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \Rightarrow \frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial R_S}{\partial x_i} - \sum_{j=1}^J \mu_j \frac{\partial g_j}{\partial x_i}; \quad i=1, 2, \dots, N$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_j} = g_j(\mathbf{x}) \quad ; \quad j=1, 2, \dots, J$$

Opisani metod primenjuje se na zadatak maksimizacije pouzdanosti definisan u prethodnom delu teksta, uz navedene relaksacije ograničenja i logaritmovanu funkciju pouzdanosti

$$\max \ln R_S(\mathbf{x}) = \max \sum_{i=1}^N \ln(1 - q_i^{x_i+1})$$

$$\sum_{i=1}^N C_i \cdot x_i - C^* = 0$$

Lagranževa funkcija, u ovom slučaju, je oblika:

$$L(\mathbf{x}, \mu) = \sum_{i=1}^N \ln(1 - q_i^{x_i+1}) - \mu \left(\sum_{i=1}^N C_i x_i - C^* \right)$$

KKT uslovi daju sledeće jednakosti:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{-q_i^{x_i+1} \ln q_i}{1 - q_i^{x_i+1}} - \mu C_i = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^N C_i x_i - C^* = 0$$

Iz prve jednačine dobija se:

$$\frac{-q_i^{x_i+1} \ln q_i}{\mu C_i} = 1 - q_i^{x_i+1} \Rightarrow q_i^{x_i+1} \left(-\frac{\ln q_i}{\mu C_i} + 1 \right) = 1$$

$$q_i^{x_i+1} = \frac{1}{1 - \frac{\ln q_i}{\mu C_i}} / \ln \Rightarrow (x_i + 1) \ln q_i = -\ln \left(1 - \frac{\ln q_i}{\mu C_i} \right)$$

$$x_i = -\frac{\ln \left(1 - \frac{\ln q_i}{\mu C_i} \right)}{\ln q_i} - 1$$

Pošto nepoznata vrednost x_i zavisi od Lagranževog množitelja μ , zadatak se rešava iterativno, na sledeći način: Zadaje se neka početna vrednost μ_0 , npr. za $x_1=0$:

$$\mu_0 = \frac{1 - q_1 \ln q_1}{C_1(1 - q_1)},$$

a zatim se određuju vrednosti nepoznatih x_i ($i=1, \dots, N$). Proverava se ograničenje i ako je ono približno zadovoljeno, npr. $|\sum C_i x_i - C^*| \leq \varepsilon = 10^{-4}$ smatra se da je nađeno optimalno rešenje. U suprotnom menja se vrednost Lagranževog množitelja na sledeći način:

- za $\sum C_i x_i - C^* > 0$, vrednost množitelja se povećava
- za $\sum C_i x_i - C^* < 0$, vrednost množitelja se smanjuje

Vrednosti x_i dobijene na ovaj način nisu celobrojne, pa je neophodno izvršiti njihovo zaokruživanje i proveru ograničenja.

Opisanim metodom može se rešavati i zadatak minimizacije troškova, uz uslov da je pouzdanost veća od neke zahtevane vrednosti. Taj se zadatak, uz relaksaciju ograničenja i izražen preko nepouzdanosti (Q), definiše na sledeći način:

$$\min \sum_{i=1}^N C_i x_i$$

$$\sum_{i=1}^N q_i^{x_i+1} = Q^*$$

gde je Q^* zahtevana vrednost nepouzdanosti ($R^*=1-Q^*$). Lagranževa funkcija je oblika:

$$L(x, \mu) = \sum_{i=1}^N C_i x_i - \mu \left(\sum_{i=1}^N q_i^{x_i+1} - Q^* \right)$$

KKT uslovi daju jednakosti:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = C_i + \mu(\ln q_i) q_i^{x_i+1} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^N q_i^{x_i+1} - Q^* = 0$$

Uvodeći smenu: $a_i = -\frac{C_i}{\ln q_i}$,

dobija se:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{Q^*} \Rightarrow x_i = -\frac{a_i}{C_i} \ln \frac{a_i Q^*}{q_i \sum a_i}$$

Prema tome, optimalne vrednosti x_i dobijaju se direktno korišćenjem poslednjeg obrasca, što je značajna prednost u odnosu na iterativne postupke. Ovako dobijeno rešenje, kao i u prethodnom slučaju, nije celobrojno, pa je neophodno izvršiti zaokruživanje vrednosti i ponovnu proveru ograničenja. Zbog toga se ne može sa sigurnošću tvrditi da je dobijeno rešenje optimalno za postavljeni zadatak.

Metod Lagranževih množitelja može se uspešno primeniti i za rešavanje alokacije pouzdanosti sistema složenijih struktura. Neophodan preduslov za rešavanje takvih zadataka je poznavanje analitičkog izraza strukturne funkcije sistema, tj. jednačine pouzdanosti sistema. Određivanje tog izraza za jednostavnije sisteme ne predstavlja problem, međutim, za velike sisteme složenih struktura (kakvi su vodovodni sistemi) određivanje ovog izraza postaje veoma komplikovano, sam izraz je veoma složen, a potrebno je i značajno vreme za njegovo određivanje. Pored neophodnosti poznavanja jednačine strukturne funkcije sistema, ostaje i problem određivanja funkcije troškova elemenata sistema u zavisnosti od njihove pouzdanosti. Zbog svega opisanog, ovaj metod, iako definisan od strane nekoliko autora, još uvek nije ušao u širu upotrebu kao metod alokacije pouzdanosti kompleksnih sistema.

3.3.2. Gradijentne metode

Osnovna ideja ove metode je da se, počevši od neke tačke, iterativno vrši poboljšavanje vrednosti kriterijumske funkcije, pri čemu se poboljšavanja vrše po pravcu najvećeg priraštaja kriterijumske funkcije, tj. po pravcu gradijenta. Pretpostavlja se da su promenljive veličine u ovom metodu konstantne vrednosti. Da bi se ovaj metod mogao primeniti na zadatak optimizacije pouzdanosti neophodno je izvršiti određene modifikacije, odnosno uvesti sledeće pretpostavke:

- promenljive problema su celobrojne,
- pri izboru pravca kojim se kreće ka optimalnom rešenju mora se voditi računa o ograničenjima.

Originalni naziv algoritma za rešavanje ovako definisanog zadatka optimizacije pouzdanosti je algoritam inkrementalnog povećanja pouzdanosti po funti (IRPP - Incremental Reliability per Pound Algorithm). U ovom metodu dužina koraka optimizacije $\Delta_i R_S$ određena je jediničnim priraštajem, što znači da se u svakom koraku broj redundantnih elemenata povećava za jedan. Za optimizacioni zadatak definisan u prethodnom delu dužina koraka optimizacije može se definisati na sledeći način:

$$\Delta_i R_S = R_S(x_1, x_2, \dots, x_{i+1}, \dots, x_N) - R_S(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$$

Izbor podsistema kome se dodaje redundantni element vrši se na osnovu odnosa priraštaja kriterijumske funkcije i priraštaja ograničenja. Naime, ovaj odnos računa se za svaki podsistem, za povećavanje broja komponenti podsistema za jedan:

$$\delta_i = \frac{\frac{\Delta_i R_S}{\Delta x_i}}{\frac{\Delta_i C(\mathbf{x})}{\Delta x_i}} = \frac{\Delta_i R_S}{\Delta_i C(\mathbf{x})}$$

U slučaju kada postoji samo jedno linearno ograničenje dobija se:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i R_S}{C_i}$$

Element se dodaje onom podsistemu za koji je vrednost δ_i maksimalna, pod uslovom da su ograničenja zadovoljena. Pretpostavlja se da u početnom trenutku ne postoji ni jedan redundantni element, tj. početni vektor redundantnih komponenti je $\mathbf{x}=(0, 0, \dots, 0)$.

Priraštaj pouzdanosti, za razmatrani zadatak, računa se veoma jednostavno:

$$\Delta_i R_S = R_i(x_i+1) \prod_{k=1}^N R_k(x_k) - \prod_{i=1}^N R_i(x_i)$$

$$\Delta_i R_S = \frac{R_i(x_i+1)}{R_i(x_i)} \prod_{i=1}^N R_i(x_i) - \prod_{i=1}^N R_i(x_i) = \frac{R_i(x_i+1) - R_i(x_i)}{R_i(x_i)} R_S(\mathbf{x})$$

$$\Delta_i R_S = \frac{1 - q_i^{x_i+1} - (1 - q_i^{x_i})}{1 - q_i^{x_i}} R_S(\mathbf{x}) = \frac{q_i^{x_i} (1 - q_i)}{1 - q_i^{x_i}} R_S(\mathbf{x})$$

$$\Delta_i R_S = \frac{y_i Q_i(x_i)}{R_i(x_i)} R_S(\mathbf{x})$$

gde je $y_i = 1 - q_i$ i $R_i(x_i) = 1 - Q_i(x_i)$

Gradijentni metod omogućava veoma jednostavno i računski efikasno dolaženje do rešenja. Međutim, ovaj metod proračuna ne garantuje dobijanje optimalnog rešenja za

raspoložive resurse C^* , nego dobijanje dominantnog rešenja za iskorišteni resurs $\sum C_i x_i$.

3.3.3. Alokacija pouzdanosti primenom metode dinamičkog programiranja

Ovaj metod primanjuje se kod sistema sastavljenih od serijski vezanih elemenata, tj. sistema kod kojih otkaz bilo kog elementa dovodi do otkaza celog sistema. Pretpostavlja se da su otkazi elemenata nezavisni, kao i da podsistemi funkcionišu nezavisno. Kriterijumska funkcija po kojoj se obavlja optimizacija je funkcija minimizacije troškova alokacije, a može se, kao što je već ranije istaknuto, napisati na sledeći način:

$$f_N^*(R) = \min_{\{y_i\}} \sum_{i=1}^N C_i(x_i, y_i)$$

Uslov pod kojim se alokacija (optimizacija) obavlja je da je pouzdanost alociranog sistema veća od zahtevane pouzdanosti. Pošto je reč o serijski vezanom sistemu elemenata, uslov optimizacija se može napisati kao:

$$\prod_{i=1}^N y_i \geq R^*$$

Pri tome, alocirana pouzdanost i -tog elementa (y_i) mora biti veća ili jednaka početnoj pouzdanosti tog elementa (x_i):

$$0 \leq x_i \leq y_i \leq 1$$

Prema osnovnoj metodi dinamičkog programiranja postupak optimizacije sprovodi se u iteracijama (fazama / etapama), pri čemu se u zadatku alokacije pouzdanosti pod iteracijom proračuna podrazumeva određivanje optimalne pouzdanosti po elementima sistema.

Ako se sa r_k označe pouzdanosti koje može da dostigne deo sistema u k -toj iteraciji proračuna, odnosno deo sistema od prvih k elemenata ($i=1, 2, \dots, k$), onda je:

$$r_k = r_{k-1}^* \cdot y_k = \prod_{i=1}^k y_i$$

gde je r_{k-1}^* optimalna vrednost pouzdanosti iz prethodne iteracije. Skup pouzdanosti r_k je skup svih vrednosti koje se dobijaju množenjem vrednosti r_{k-1}^* sa y_k , pri čemu se, naravno, iste vrednosti ne ponavljaju. Prema ovom postupku, u svakoj sledećoj iteraciji k mogući broj pouzdanosti za koje se traži optimalna vrednost jednaka je proizvodu broja elemenata ta dva skupa:

$$C(r_k) = C(r_{k-1}^*) \cdot C(y_k)$$

U slučajevima kada su skupovi mogućih pouzdanosti elemenata veliki, ovakav pristup može biti vremenski veoma zahtevan.

Drugi način određivanja skupa mogućih pouzdanosti za koje se sprovodi proračun je definisanje diskretnih vrednosti pouzdanosti koji se tokom proračuna ne menjaju. U ovom slučaju, gore navedene jednačine dobijaju sledeći oblik:

$$r_k \leq \prod_{i=1}^k y_i$$

Za pouzdanosti r_k važi:

$$R^* \leq r_k \leq R^{\max} \leq 1$$

pri čemu je

$$R^{\max} = \prod_{i=1}^N y_i^{\max}$$

gde je y_i^{\max} maksimalna moguća (razmatrana) pouzdanost elementa i .

Za izvođenje rekurentne relacije razmatra se raspodela pouzdanosti na k -ti element i ostalih $k-1$ elemenata. U tom slučaju je:

$$r_k = \prod_{i=1}^k y_i$$

$$f_k^*(r_k) = \min_{y_k} \min_{y_1, \dots, y_{k-1}} \left[C_k(x_k, y_k) + \sum_{i=1}^{k-1} C_i(x_i, y_i) \right]$$

$$f_k^*(r_k) = \min_{y_k} \left[C_k(x_k, y_k) + \min_{y_1, \dots, y_{k-1}} \sum_{i=1}^{k-1} C_i(x_i, y_i) \right]$$

Pošto je:

$$f_{k-1}^*(r_{k-1}) = \min_{y_1, \dots, y_{k-1}} \sum_{i=1}^{k-1} C_i(x_i, y_i),$$

pri čemu je $r_{k-1} = r_k / y_k$, dobija se izraz za rekurentnu relaciju:

$$f_k^*(r_k) = \min_{y_k} \left[C_k(x_k, y_k) + f_{k-1}^*(r_{k-1}) \right], \quad k=1, \dots, N$$

koja se rešava uz sledeće uslove i ograničenja:

$$R_0 = R^*$$

$$R_N = 1$$

$$R_0 \leq r_k \leq R_N$$

$$x_k \leq y_k \leq 1$$

$$r_{k-1} = \frac{r_k}{y_k}$$

$$f_0^*(r_0) = 0$$

Optimalne veličine pouzdanosti pojedinih elemenata određuju se u prolazu unazad, polazeći, naravno, od pouzdanosti za koju su dobijeni minimalni troškovi alokacije.

Alokacija pouzdanosti metodom dinamičkog programiranja može se primeniti samo za raspoređivanje pouzdanosti u sistemima sastavljanim od serijski vezanih elemenata. Ovaj uslov veoma strogo ograničava mogućnost primene opisane metode za planiranje (optimizaciju, rekonstrukciju, adaptaciju) vodoprivrednih sistema. Metod je primenljiv u slučajevima alokacije regionalnih vodovodnih sistema (naravno, samo onih sistema sastavljenih od serijski vezanih elemenata). Alokacija se u tom slučaju vrši na najvišem nivou, a pod elementima sistema podrazumevaju se cevovodi, rezervoari, prekidne komore, pumpne stanice, postrojenja za prečišćavanje i dr.

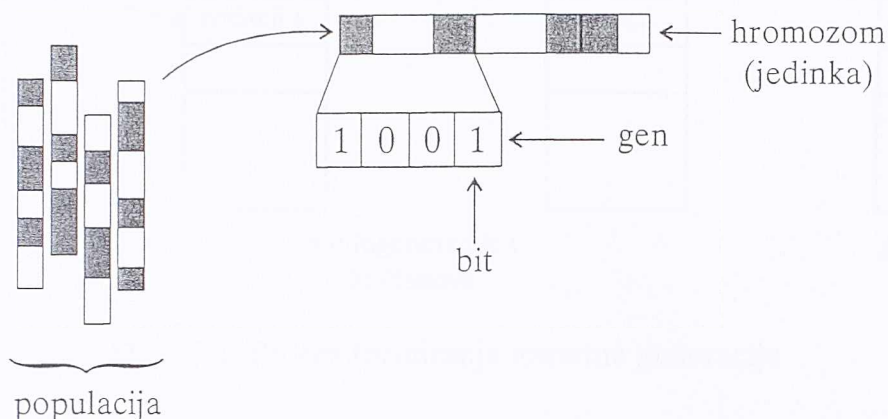
3.3.4. Evolucionni algoritmi

Evolucionni algoritmi (EA) se na najopštijem nivou mogu definisati kao metode globalne optimizacije koje se zasnivaju na primeni zakonitosti (principa) evolucije živog sveta na veštačke sisteme. Pod pojmom evolucionni algoritmi (ili evolucionni proračuni) podrazumeva se čitav niz optimizacionih metoda: genetski algoritmi (GA), evolucione strategije, evoluciono programiranje, genetsko programiranje i dr. (Sipper, 1992).

Generalno, evolucionni algoritmi predstavljaju grupu stohastičkih proračunskih metoda, nad kojima se sprovodi iterativni proračun da bi se dobilo optimalno rešenje. Za razliku od klasičnih optimizacionih metoda, kod kojih se proračun sprovodi nad jednim mogućim rešenjem, EA operišu sa populacijom. Slično kao u živom svetu, populacija je sastavljena od većeg broja individua (jedinki). Svaka jedinka populacije predstavlja se nizom simbola konačne dužine koji se naziva hromozom (string, genom) (slika 3.3), a hromozom predstavlja jedno moguće rešenje problema, iz skupa svih mogućih rešenja.

Metode evolucionog algoritma podrazumevaju da se proračun sprovodi nad skupom kodiranih rešenja. Kodirana rešenja su skupovi konačne dužine, definisani nad nekom azbukom koja se naziva kod. Kod može biti skup binarnih stringova (0,1), kao što je to slučaj u kanoničnom obliku GA (koji je jedan od osnovnih metoda). Pored ovog osnovnog načina prikazivanja hromozoma, mogu se koristiti i neke složenije strukture, kao što su stabla, liste, prostor i dr., ali se mora voditi računa o činjenici da svaka jedinka predstavlja jedno moguće rešenje problema. Proces kodiranja veoma je važna procedura, koja prethodi proračunskom metodu EA. Ovim procesom se stvarne

vrednosti iz vektora nezavisno promenljive prevode u nizove konačne dužine definisane nad nekim kodom.



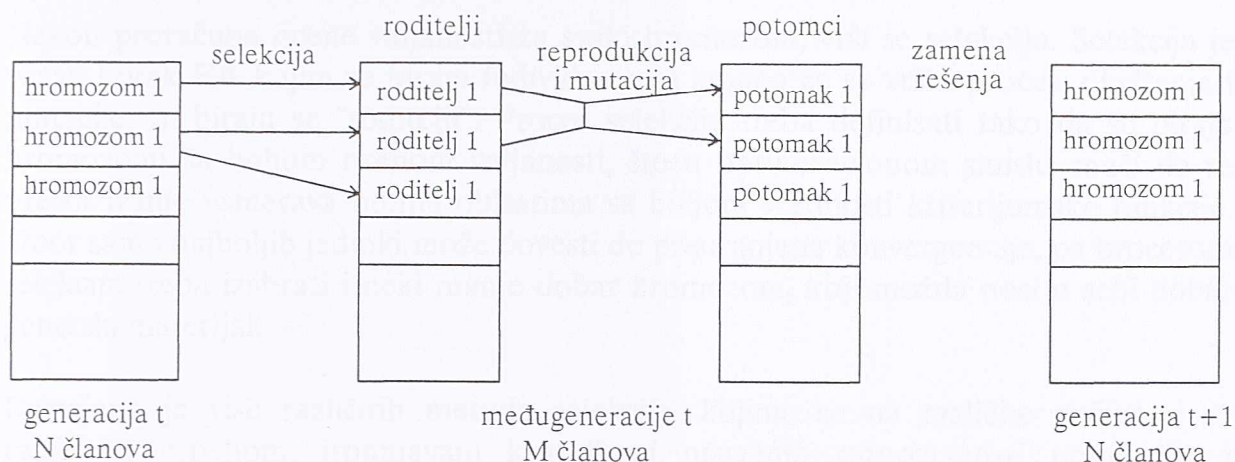
Slika 3.3: Šematski prikaz populacije, hromozoma i gena

Metod EA može se na najopštijem nivou predstaviti sa sledećih nekoliko koraka:

1. Generiše se početna populacija jedinki (hromozoma) na slučajan način.
2. Svakoj jedinki populacije pridružuje se ocena valjanosti (pogodnosti) rešenja.
3. U procesu selekcije biraju se jedinke koje formiraju međugeneraciju, odnosno ulaze u proces stvaranja naredne generacije.
4. Operatorima reprodukcije (ukrštanja) i mutacije menjaju se izabrane jedinke iz međugeneracije.
5. Modelima zamene starih rešenja (iz prethodne generacije) rešenjima iz međugeneracije formira se nova populacija.

Procedura se završava nakon dostizanja nekog, unapred zadatog, maksimalnog broja generacija (iteracija), ili nakon dostizanja zadovoljavajuće vrednosti kriterijumske funkcije.

Proces formiranja naredne generacije može se predstaviti kao dvofazni proces (slika 3.4.) (Whitley, 1993). U prvoj fazi sprovodi se proces selekcije, kojim se određuju hromozomi koji idu u dalji proračun, tj. jedinke koje formiraju međugeneraciju. Samom selekcijom ne mogu se formirati novi članovi populacije (nova rešenja problema). Oni se generišu, genetički inspirisanim, operatorima ukrštanja (reprodukcije) i mutacije, a zatim se modelom zamene rešenja formira sledeća generacija.



Slika 3.4: Proces formiranja naredne generacije

Procesi kodiranja i definisanja funkcije za ocenu valjanosti rešenja. Ti procesi, koji prethode napred opisanoj metodi EA, veoma su važni i moraju se definisati posebno za svaki razmatrani problem. Od načina definisanja funkcije valjanosti (pogodnosti) zavisi brzina konvergencije procesa, kao i širina pretraživanja, što su dva suprotna zahteva. Da bi se ocena valjanosti mogla sprovesti neophodno je prethodno dekodirati članove populacije, a zatim, za svaki od njih, odrediti vrednost funkcije. Jedna od funkcija koja se često koristi za ocenu valjanosti rešenja je linearno skaliranje, koja se, za slučaj minimizacije kriterijumske funkcije, može napisati u obliku:

$$F_i = \frac{\max_i f - f_i}{\max_i f - \min_i f} a + b$$

gde su a i b parametri modela, a f_i vrednost kriterijumske funkcije za rešenje koje je dobijeno dekodiranjem hromozoma i . Određivanje vrednosti parametara a i b je od suštinske važnosti, jer od njih zavise brzina konvergencije i širina pretraživanja prostora mogućih rešenja.

Za ocenu pogodnosti rešenja može se koristiti i položaj (rang) vrednosti kriterijumske funkcije u sortiranom nizu vrednosti, pri čemu bi, za slučaj minimizacije kriterijumske funkcije, rešenje sa minimalnom vrednošću te funkcije bilo na prvom mestu. Ovaj način smanjuje mogućnost pojave preuranjene konvergencije, odnosno prostor se pretražuje relativno široko, ali je, naravno, brzina konvergencije manja.

Funkcija pogodnosti, koja brzo konvergira, ali koja preterano favorizuje bolja rešenja, zbog čega može doći do preuranjene konvergencije, jeste stepena funkcija:

$$F_i = a \cdot f_i^b$$

gde su a i b parametri modela.

Nakon proračuna ocene valjanosti za svaki hromozom, vrši se **selekcija**. Selekcija je važan korak EA kojim se biraju individue nad kojima će se vršiti procesi ukrštanja i mutacije, tj. biraju se "roditelji". Proces selekcije treba definisati tako da se biraju hromozomi sa boljom ocenom valjanosti, što u optimizacionom smislu znači da se pretraživanje usmerava prema oblastima sa boljom vrednosti kriterijumske funkcije. Izbor samo najboljih jedinki može dovesti do preuranjene konvergencije, pa procesom selekcije treba izabrati i neki manje dobar hromozom, koji možda nosi u sebi dobar genetski materijal.

Razvijeno je više različitih metoda selekcije, kojima se na različite načine, i sa različitim uspehom, ispunjavaju kriterijumi očuvanja raznovrsnosti populacije i usmeravanje pretraživanja prema boljim rešenjima.

Jedan od najčešće korištenih metoda selekcije je proporcionalna selekcija, u kojoj se jedinke koje formiraju međugeneraciju biraju na slučajan način, ali dajući srazmerno veću težinu (verovatnoću izbora) jedinkama sa većim vrednostima funkcije pogodnosti, prema izrazu:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}$$

Ovaj metod selekcije primenjuje se u kanoničnom obliku GA.

Drugi tip selekcije, koji se takođe veoma često koristi, a koji daje nešto veću težinu boljim rešenjima, je integralna selekcija. Ovaj metod zasniva se na relativnoj oceni pogodnosti rešenja

$$p_i = \frac{F_i}{\bar{F}}$$

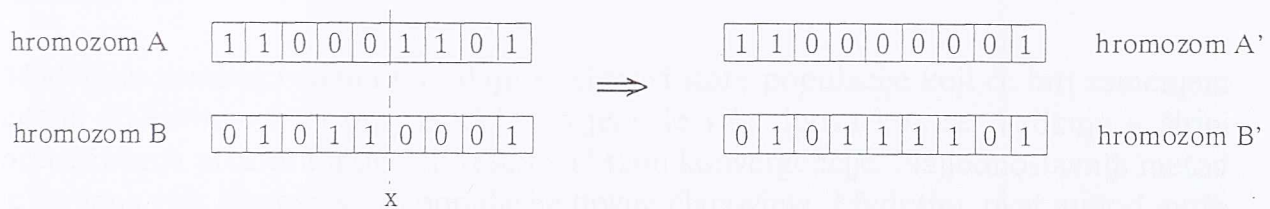
gde je \bar{F} srednja vrednost funkcije pogodnosti za populaciju. Za svaku jedinku i za koju je vrednost p_i veća od 1, broj kopija te jedinke koje direktno odlaze u međugeneraciju odgovara celobrojnom delu vrednosti p_i . Nedostajuću deo jedinki u među populaciji popunjava se metodom proporcionalne selekcije, pri čemu težina koja se pridružuje jedinkama odgovara ostatku celobrojne promenljive p_i . Na primer, ako se proračunom dobije da je relativna ocena pogodnosti nekog hromozoma (jedinke) 1.7, u međugeneraciju sigurno odlazi jedan hromozom, a prilikom izbora nedostajućih jedinki međupopulacije, tom hromozomu se daje težina 0.7.

Još jedan tip selekcije koji se često koristi je turnirska selekcija. Ovaj metod zasniva se na izboru određenog broja jedinki (n_t) po principu proporcionalne selekcije, od kojih najbolja odlazi u međugeneraciju. Postupak se ponavlja onoliko puta kolika je brojnost međupopulacije. Brzina konvergencije metode zavisi od broja n_t . Tako se za $n_t=1$ dobija metod proporcionalne selekcije, dok se sa povećavanjem ovog broja

povećava i brzina konvergencije. Zbog opasnosti od pojave preuranjene konvergencije, ovaj metod se najčešće koristi sa $n_t=2$, tzv. binarna turnirska selekcija.

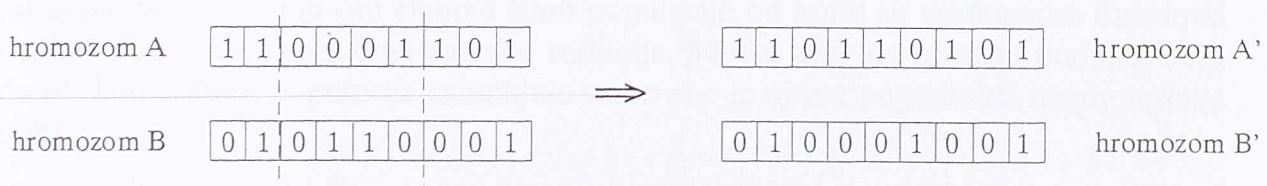
U procesu evolucije (odnosno proračuna) može se desiti da se najbolje rešenje pojavi, a zatim izgubi (procesima reprodukcije i mutacije) i da se više ne može naći. Da bi se ovakve situacije izbegle, često se najbolje rešenje iz jedne generacije automatski prosleđuje u narednu generaciju. Ovaj princip nazvan je *elitizam*, i može ga podržavati svaki tip zamene rešenja.

Nakon završetka procesa selekcije, nad novoformiranom međupopulacijom sprovodi se **reprodukcija (ukrštanje)**. Proces se sastoji od slučajnog izbora dve jedinke, koje se kombinuju i formiraju nove jedinke (hromozome), koje ulaze u sledeću generaciju. Ukrštanje se obično sprovodi sa nekom unapred definisanom verovatnoćom. Ukrštanje (kombinovanje) jedinki može se sprovesti na više načina. Jedan od najčešće korištenih i najjednostavnijih tipova (koji se koristi i u kanoničnoj formi GA) je ukrštanje u jednoj tački. Mesto ukrštanja se, prema ovoj metodi, određuje na slučajan način, a zatim se delovi hromozoma rekombinuju i dobijaju se dva nova hromozoma. Princip je prikazan na slici 3.5. A i B su hromozomi izabrani na slučajan način iz međupopulacije, a x je takođe slučajno izabrano mesto ukrštanja. A' i B' su potomci, tj. novi hromozomi koji idu u sledeću generaciju.



Slika 3.5: Ukrštanje u jednoj tački

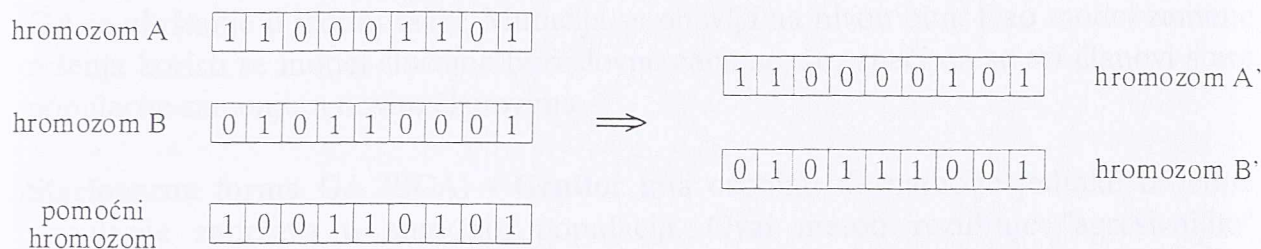
Ukrštanje u dve tačke je drugi tip reprodukcije, koji je sličan opisanom, ali kojim se postiže nešto šire pretraživanje prostora (slika 3.6).



Slika 3.6: Ukrštanje u dve tačke

Model uniformnog ukrštanja se takođe često koristi. Ovaj model podrazumeva generisanje pomoćnog slučajnog binarnog niza bitova, čija je dužina ista kao dužina hromozoma. Ukrštanje se obavlja tako što se pozicija jedinica iz pomoćnog niza

zamenjuje bitovima jednog hromozoma, npr. hromozoma A, a pozicije nula bitovima drugog hromozoma, npr. B i obrnuto (slika 3.7).



Slika 3.7: Uniformno ukrštanje

Mutacija je operator koji treba da spreči preuranjenu konvergenciju ka lokalnom optimumu. Predstavlja izmenu genetskog materijala, odnosno kodiranog rešenja, a sprovodi se sa nekom unapred definisanom verovatnoćom, obično manjom od 1%. Najčešći oblik mutacije je mutacija na nivou jednog, slučajno izabranog, bita. Ovaj oblik mutacije koristi se u kanoničnoj formi GA. Pored ovog, razvijeni su i drugi tipovi mutacije, koji se koriste za različite kodne strukture: ponovna inicijalizacija, za hromosome predstavljene nizom karaktera; mutacija sa konstantnim korakom, kada su rešenja predstavljena nizom numeričkih vrednosti; uniformna gausova mutacija i dr.

Modelima zamene rešenja određuju se članovi stare populacije koji će biti zamenjeni novim članovima. I za ovaj model razvijeno je više tipova koji se razlikuju u širini pretraživanja prostora mogućih rešenja i brzini konvergencije. Najjednostavniji metod je zamena svih članova stare populacije novim članovima. Međutim, ovaj metod može da dovede do preuranjene konvergencije usled dominacije jednog hromozoma, pa su razvijeni i drugi tipovi zamene rešenja. Slučajna bezuslovna zamena sastoji se od zamene slučajno izabranih M članova stare populacije sa novim članovima. Slična njoj je i rangirana bezuslovna zamena, prema kojoj se novim članovima zamenjuje M najboljih članova stare populacije. Model turnirske zamene podrazumeva slučajan izbor jedinki stare populacije, od kojih se najbolja zamenjuje novim rešenjem. Model po kome se zamenjuju oni članovi stare populacije od kojih su ukrštanjem formirani novi članovi naziva se model zamene roditelja. Model uslovne zamene podrazumeva da se članovi stare populacije zamenjuju samo ako je ocena pogodnosti novog rešenja bolja.

U zavisnosti od izbora tipa selekcije, operatora ukrštanja i mutacije i metode zamene rešenja, razvijeno je više različitih formi genetskog algoritma. U nastavku teksta biće ukratko izloženi najčešće korišteni tipovi.

Kanonična forma GA (CGA) podrazumeva da se svaki član populacije (svako moguće rešenje problema) može predstaviti binarnim nizom određene dužine. Funkcija pogodnosti računa se na osnovu stvarnih vrednosti kriterijumske funkcije. Selekcija

jedinki koje ulaze u međupopulaciju obavlja se po principu proporcionalne selekcije. Reprodukcijska se obavlja nad slučajno izabranim parom hromozoma, sa nekom, unapred definisanom, verovatnoćom p_i . Tip rekombinacije koji se koristi u ovoj formi GA je ukrštanje u jednoj tački. Mutacija se obavlja na nivou bita. Kao model zamene rešenja koristi se model slučajne bezuslovne zamene, što znači da se svi članovi stare populacije zamenjuju novim članovima.

Stacionarna forma GA (SGA) - Genitor ima osobinu da najbolje jedinke iz jedne populacije zadržava u narednoj populaciji. Ovaj metod rezultuje "agresivnijim" pretraživanjem prostora mogućih rešenja, što se u praksi pokazalo prilično efikasnim (Whitley, 1993). Postoje tri osnovne razlike između CGA i SGA. Prva razlika je u načinu određivanja funkcije pogodnosti, koja se u ovom tipu GA određuje na osnovu ranga. Na taj način uticaj selekcije kroz iteracije je konstantan, što omogućava veću širinu pretraživanja prostora mogućih rešenja. Druga razlika je što se u procesu reprodukcije stvara samo jedan novi potomak (jedan hromozom). Naime, za reprodukciju se biraju dve jedinke iz stare populacije koje stvaraju jednu novu jedinku koja se vraća u populaciju. Treća razlika je upravo u načinu vraćanja nove jedinke u populaciju, koja u ovom tipu GA ne zamenjuje roditelje, nego onu jedinku stare populacije koja ima najlošiju ocenu pogodnosti. Ovaj tip GA pripada tzv. $(\mu+\lambda)$ tipu evolucione strategije, prema kome se od μ roditelja formira λ potomaka. Populacija se zatim redukuje na μ jedinki, birajući one jedinke, među roditeljima i potomcima, koji imaju najbolje ocene pogodnosti.

CHC algoritam, koji se, u suštini, zasniva na monotonom prikupljanju najboljih jedinki, razvio je Larry Eshelman (1991), a naziv algoritma je skraćenica od **C**ross generation elitist selection, **H**eterogenous recombination, **C**ataclysmic mutation. Prema ovom metodu sledeća generacija formira se izborom potrebnog broja jedinki (N) iz obe populacije (roditelja i potomaka), bez mogućnosti ponavljanja jedinki. Pošto je u ovakvom pristupu uticaj selekcije značajan, nema potrebe za dodatnim mehanizmima selekcije, pa ovaj metod koristi slučajnu selekciju. Jedino ograničenje koje se uvodi je na jedinke koje mogu da uđu u proces reprodukcije. Naime, ove jedinke moraju da budu na određenoj "udaljenosti", kako bi se sprečila pojava "incesta", tj. da bi se povećala raznovrsnost populacije. Kao operator reprodukcije obično se koristi uniformno ukrštanje, kao protivteža "agresivnom" pretraživanju. Ovaj metod se koristi za male populacije, koje veoma brzo konvergiraju ka nekoj jedinki koja počinje manje-više da formira iste jedinke. Zbog toga se kao operator mutacije koristi kataklizmatična mutacije, prema kojoj svi bitovi podležu mutaciji, pri čemu je, kao što je već istaknuto, verovatnoća mutacije mala.

Paralelni GA inspirisani su biološki svetom i činjenicom da je on nasledno paralelan. U biološkim populacijama hiljade jedinki egzistira paralelno. To je dalo ideju da stepen paralelnosti može biti direktno proporcionalan veličini populacije genetskog pretraživanja. U modelima ovog tipa hromozomi se na izvestan način prevode u procesore, obično maksimizirajući paralelizam i izbegavajući nepotrebnu

komunikaciju procesora. Razvijeni su različiti modeli ovog tipa, koji se razlikuju samo u ulozi lokalne prema globalnoj komunikaciji.

Najneposredniji način primene paralelnih GA je njihova primena na kanonični oblik GA, modifikacijom samo u smislu izbora tipa selekcije. U ovom slučaju koristi se turnirska selekcija, prema kojoj se, kao što je već ranije istaknuto, biraju dve jedinke od kojih se bolja smešta u međupopulaciju, a proces se ponavlja dok se ne popuni međupopulacija. Na ovako definisan oblik GA primenjuje se paralelizam. Pretpostavlja se postojanje $N/2$ procesora (za populaciju veličine N), svaki sa po dve nezavisno izabrane jedinke. U procesorima ostaju bolje (od postojeće dve) jedinke. Nove jedinke predstavljaju međupopulaciju, nad kojom se dalje paralelno sprovode procesi ukrštanja i mutacije.

Ostrvski modeli su tip paralelnih GA kod kojih je paralelizam više izražen nego u prethodnom tipu. Koriste se u slučaju kada je brojnost populacije velika. Model se sastoji u paralelnom sprovođenju više modela GA (procesora) sa određenom brojnošću podpopulacije. Npr. ako je potrebno sprovesti model GA sa populacijom od 1600 individua, koristi se 16 procesora sa podpopulacijama od po 100 individua. Nad svakom od podpopulacija sprovodi se GA (to može biti kanonični GA, Genitor, CHC ili neki drugi oblik) i svaka podpopulacija evoluira različito, zavisno od genetskog materijala. Povremeno, npr. svake pete generacije, podpopulacije ukrštaju po neku jedinku, i na taj način dele međusobno svoj genetski materijal. Ovaj proces, tzv. "migracija", omogućava ostrvskim modelima da iskoriste različitost populacija, koja u suštini predstavlja izvor genetske raznolikosti. Svaka podpopulacija je ostrvo, i na određeni način genetski materijal se pomera sa jednog ostrva na drugo. U modelima ovog tipa veoma značajno je određivanje učestalosti migracija. Ako je broj jedinki koje migriraju u svakoj generaciji veliki, dolazi do globalnog mešanja i genetske razlike među podpopulacijama (ostrvima) se gube. Sa druge strane, ako su migracije previše retke, mogu biti nedovoljne da spreče prevremenu konvergenciju svake podpopulacije.

Celularni GA pogodni su u slučajevima postojanja velikog broja procesora, a osnovna karakteristika im je da se procesi selekcije i ukrštanja ograničavaju na usku (lokalnu) okolinu procesora. Procesori se smeštaju u izvesnu dvodimenzionalnu mrežu, pri čemu se svaki od njih ukršta sa najboljim jedinkama koje se nalaze u njegovom okruženju, a može se koristiti i neka lokalna propabilistička selekcija. Novoformirana jedinka postaje član oba procesora. Individue koje su delovi procesora udaljenih 20-tak koraka ponašaju se slično ostrvima (u ostrvskim modelima), a ovaj tip razdvojenosti naziva se "izolacija daljinom". Posle nekoliko generacija, sprovodeći ovaj tip GA, formira se više manjih celina sa različitim jedinkama i sličnim ocenama pogodnosti. Lokalno ukrštanje i selekcija dovode do lokalnog evolucionog trenda. Posle više generacija rivalstvo između lokalnih grupa rezultovaće manjim brojem većih suseda.

3.4. Primeri optimizacije pouzdanosti sistema i analiza rezultata

Optimizacija, odnosno alokacija pouzdanosti sprovedena je primenom metoda evolucionog algoritma. Kao podprogram za računanje pouzdanosti, u ovom modelu, koristi se program 2PFREL, koji je detaljno opisan u delu 2 ove disertacije. Ovaj program radi pod pretpostavkom mogućnosti istovremenog otkaza najviše dve cevi u sistemu, što znači da ne daje stvarne vrednosti pouzdanosti sistema. Međutim, iz ranije prikazanih primera vidi se da su razlike između stvarnih vrednosti pouzdanosti (dobijenih programom NETREL) i vrednosti dobijenih programom 2PFREL veoma male (manje od 0.1%), dok je brzina rada drugog programa značajno veća. Ova činjenica presudno je uticala na izbor programa kojim će se određivati pouzdanost sistema, s obzirom da je u optimizacionim modelima brzina rada važan, i često ograničavajući faktor primene metode.

3.4.1. Primer 5 - optimizacija pouzdanosti gravitacionog distributivnog sistema

U ovom primeru razmatra se problem optimizacije pouzdanosti postojećeg složenog distributivnog sistema (sistem A), za koji su pouzdanosti (mehanička i ukupna) razmatrane u primeru 3, poglavlje 2, ove disertacije. Reč je o varijanti 1 sistema A, sa samo jednim izvorišnim čvorom u sistemu, za koju je dobijena vrednost ukupne pouzdanosti celog sistema (connectivity) $R_{sis} = 0.9688$.

Zadatak optimizacije sistema A pripada klasi obrnutih zadataka optimizacije, prema kojima se traži ona optimalna konfiguracija sistema čija je pouzdanost veća od neke zadate vrednosti, a prema kriterijumu minimizacije cene dodatnih ulaganja u sistem. Prema tome, optimizacioni zadatak formuliše se na sledeći način:

- Ciljevi, odnosno ograničenja su podizanje pouzdanosti sistema iznad neke zahtevane vrednosti, koja za ovaj optimizacioni zadatak iznosi 0.99, odnosno:
 $R_{sis} \geq R^* = 0.99$

- Kriterijumska funkcija (f) predstavlja sumu dodatnih ulaganja u sistem (C) i kaznene funkcije (C_K).

$$f = C + C_K \rightarrow \min$$

Pod ulaganjima u sistem misli se na sumu investicija onih aktivnosti (promenljivih) koje se razmatraju u određenoj varijanti, odnosno zbir cena ugradnje novih cevi i cene revitalizacije određenih cevovoda. Jedinična ulaganja za obe opisane vrste aktivnosti date su u tabeli P5.1. u prilogu. Treba naglasiti da čišćenje, odnosno revitalizacija cevovoda ne utiče na povećanje mehaničke pouzdanosti sistema (pouzdanost cevi ostaje nepromenljiva). Međutim, povoljniji koeficijenti hrapavosti utiču na ukupnu (mehaničko-hidrauličku) pouzdanost sistema, zbog čega je ova promenljiva (aktivnost) uključena u optimizacioni zadatak.

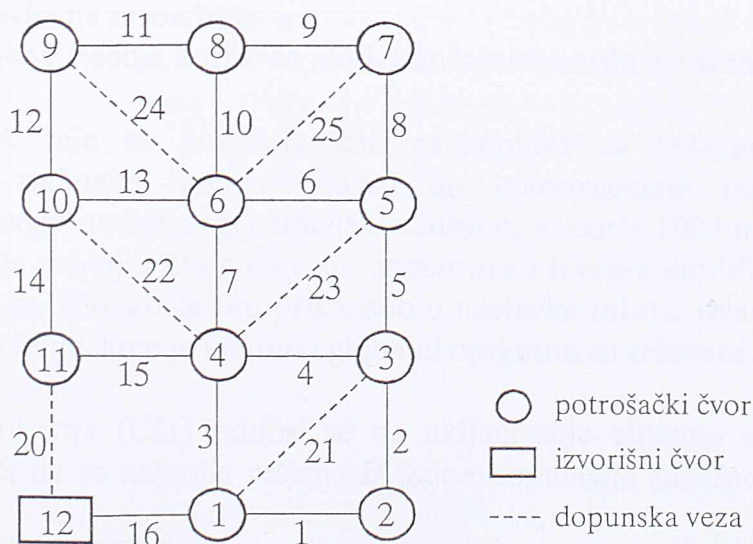
Kaznena funkcija uvodi se samo u slučajevima kada je pouzdanost sistema za ispitivanu varijantu manja od zahtevane pouzdanosti sistema (R^*). U ovom optimizacionom zadatku razmatrane su i upoređene dve vrste kaznene funkcije:

- I) Kaznena funkcija definisana kao konstantna vrednost $C_K = \text{const}$.
- II) Kaznena funkcija definisana kao funkcija odstupanja dobijene vrednosti pouzdanosti (R) od zahtevane pouzdanosti (R^*). Specifična vrednost kaznene funkcije označena je sa ω_K , a u optimizacionom zadatku njene vrednosti su varirane.

$$C_K = (R^* - R) \cdot \omega_K, \text{ za } R < R^*$$

$$C_K = 0, \text{ za } R \geq R^*$$

- Promenljive vrednosti u ovom zadatku predstavljaju aktivnosti kojima se postiže povećanje pouzdanosti sistema. Moguće su sledeće intervencije:
 - Svaka od 16 postojećih cevi u sistemu može biti očišćena (revitalizovana). Pri tome se menja njen koeficijent hrapavosti, pa Hazen William-ov koeficijent hrapavosti, nakon čišćenja ima vrednost 125.
 - Moguće je uključiti nove cevi u sistem. U ovom zadatku razmatrana je mogućnost uvođenja šest novih cevi (cevi prikazane isprekidanim linijama na slici 3.8, a njihove karakteristike date su u tabeli P5.2. u prilogu). Hazen William-ov koeficijent hrapavosti novih cevi iznosi 130. Prilikom definisanja trase novih alternativnih veza (cevi) polazilo se od ideje da se dodatnim vezama povežu oni čvorovi koji imaju najmanju pouzdanost. Treba naglasiti da su sve karakteristike (dužina, prečnik, pouzdanost, i dr.) novih cevi koje se uvode u sistem ulazni parametri za optimizacioni zadatak, odnosno karakteristike novih veza su potpuno definisane, a optimizacionim zadatkom dobija se odgovor na pitanje: Da li određenu cev uvesti u sistem ili ne?



Slika 3.8: Šematski prikaz sistema A i potencijalnih dodatnih veza u sistemu

Znači, u optimizacionom zadatku postoji 22 promenljive veličine, koje uključujemo ili ne uključujemo u sistem, što znači da postoji 2^{22} mogućih kombinacija među kojima treba odrediti optimalnu*.

Kao što je već istaknuto, opisani zadatak se rešava primenom metoda evolucionog algoritma. Svako varijantno rešenje, odnosno svaka jedinka populacije, predstavlja se hromozomom koji se sastoji od 22 gena, pri čemu svaki gen predstavlja jednu razmatranu promenljivu. Pošto se u procesu traženja optimalnog rešenja određene promenljive (aktivnosti) uključuju i isključuju iz sistema, njihova stanja mogu se opisati bitnim stringom (0, 1). Pri tome se naravno podrazumeva da 1 znači da je promenljiva uključena u sistem, a 0 da ta aktivnost nije uključena u sistem u ispitivanoj varijanti. Prema tome, svaki gen se u ovom optimizacionom zadatku predstavlja sa po jednim bitom.

Za rešavanje postavljenog optimizacionog zadatka korišćeno je i upoređeno neko različitih formi GA, pri čemu je u svim ispitivanim slučajevima usvojena brojnost populacije od 20 jedinki (hromozoma, odnosno varijanti). Razmatran je i uticaj definisanja kaznene funkcije na dobijeno optimalno rešenje i brzinu konvergencije. Brzine konvergencije navedene u narednom delu teksta odnose se na kaznenu funkciju definisanu kao funkcija razlike zahtevane i stvarne pouzdanosti sistema: $C_K = (R^* - R) \cdot 200000 \cdot 10^3 \$$.

- Kanonična forma GA (CGA) koristi sledeće parametre:
 - funkcija pogodnosti računa se na osnovu stvarnih vrednosti kriterijumske funkcije;
 - selekcija jedinki obavlja se po principu proporcionalne selekcije;
 - reprodukcija se obavlja nad slučajno izabranim parom hromozoma;
 - tip rekombinacije koji se koristi u ovoj formi GA je ukrštanje u jednoj tački;
 - mutacija se obavlja na nivou bita;
 - kao model zamene rešenja koristi se model slučajne bezuslovne zamene.

Ova forma GA nije se pokazala kao primenljiva za rešavanje razmatranog optimizacionog zadatka, jer ne dolazi do konvergencije rešenja u nekom prihvatljivom opsegu iteracija (generacija), odnosno, ni posle 1000 iteracija nije došlo do konvergencije rešenja. Zbog toga su razmatrane i izvesne modifikacije kanonične forme GA, koje su, kao što će biti prikazano u nastavku teksta, relativno brzo stizale do optimalnog rešenja, koje je ujedno i globalni optimum za rešavani zadatak.

Jedna od modifikacija (CI1) odnosi se na uključivanje elitizma u model zamene rešenja, što znači da se najbolja rešenja iz jedne populacije zadržavaju i u narednoj

* Određivanje optimalne konfiguracije metodom kompletne enumeracije (ispitivanje svih kombinacija) za opisani optimizacioni zadatak trajao bi gotovo mesec dana pod uslovom da je za proračun pouzdanosti jedne kombinacije potreban samo jedan sekund.

populaciji. Ovakav pristup sigurno ubrzava konvergenciju rešenja i onemogućava 'gubljenje' optimalnog rešenja, koje u nekim slučajevima više nije moguće postići. Korišćenjem ovako modifikovane kanonične forme GA do optimalnog rešenja dolazi se nakon 20-tak iteracija, ali dobijeno rešenje ne predstavlja globalni optimum. Promena još jednog parametra, tipa rekombinacije, koji se sa ukrštanja u jednoj tački menja na ukrštanje u dve tačke (CI2) omogućava nešto šire pretraživanje prostora mogućih rešenja. Ni ovom formom GA ne dolazi se do optimalnog rešenja, ali je dobijeno rešenje nešto povoljnije nego u prethodnom slučaju, a do njega se dolazi nakon 30-tak iteracija.

Drugi tip modifikacije (CII1) kanonične forme GA je promena načina računanja funkcije pogodnosti rešenja, koje se u ovom obliku računa preko ranga, a ne preko stvarnih vrednosti funkcije. Naime, nakon računanja stvarnih vrednosti kriterijumske funkcije za svaku varijantu (svaki hromozom) iz populacije, njihove vrednosti se rangiraju i u dalji proračun, kao vrednost funkcije pogodnosti rešenja ide samo rang, a ne stvarna vrednost kriterijumske funkcije. Pored opisane promene u ovom obliku proračuna uključen je i elitizam. Do optimalnog rešenja dolazi se nakon 20-tak iteracija, a dobijeno optimalno rešenje ujedno je i globalni optimum. Ukrštanjem u dve tačke (CII2) do optimalnog rešenja dolazi se nakon manjeg broja iteracija, ali dobijeno rešenja nije globalni optimum zadatka.

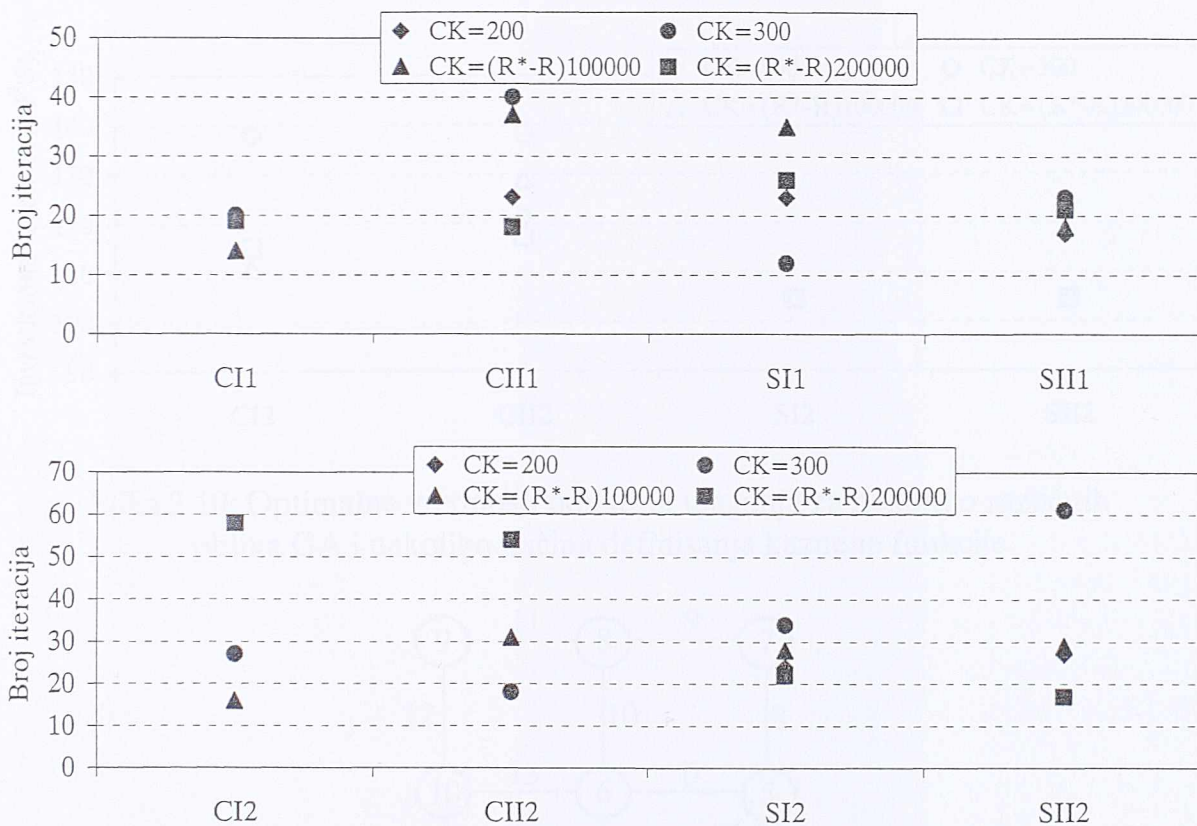
- Stacionarna forma GA (SI) koristi sledeće parametre:
 - funkcija pogodnosti određuje se na osnovu ranga, a ne stvarne vrednosti kriterijumske funkcije;
 - selekcija jedinki obavlja se po principu proporcionalne selekcije;
 - reprodukcija se obavlja nad slučajno izabranim parom hormozoma;
 - tip rekombinacije je ukrštanje u jednoj tački;
 - mutacija se obavlja na nivou bita;
 - modelom zamene, menjaju se one jedinke stare populacije koje imaju najlošiju ocenu pogodnosti. Ovo znači da se N formiranih potomaka upoređuje sa jedinkama iz prethodne populacije, i u narednu generaciju idu one jedinke koje imaju bolju ocenu pogodnosti. U ovakvom pristupu elitizam je automatski podržan.

Ovaj tip GA, za ispitivani optimizacioni zadatak, dosta je povoljniji od kanoničnog tipa GA. Oba ispitivana tipa ove forme GA (ukrštanje u jednoj i dve tačke) dolaze do optimalnog rešenja koje odgovara globalnom optimumu zadatka, ili je voma blisko toj vrednosti (rešenje dobijeno ukrštanjem u dve tačke odstupa za oko 5% od globalnog optimuma). Za dostizanje optimalnog rešenja potreban je nešto veći broj iteracija nego u prethodnim metodama.

Ispitan je i modifikovani oblik ovog tipa GA (SII1), u kome je promenjen način određivanja funkcije pogodnosti rešenja, odnosno ova funkcija se određuje direktno, na osnovu stvarnih vrednosti kriterijumske funkcije, a ne na osnovu njihovog ranga. Do optimalnog rešenja se u ovom slučaju dolazi nakon relativno malog broja iteracija

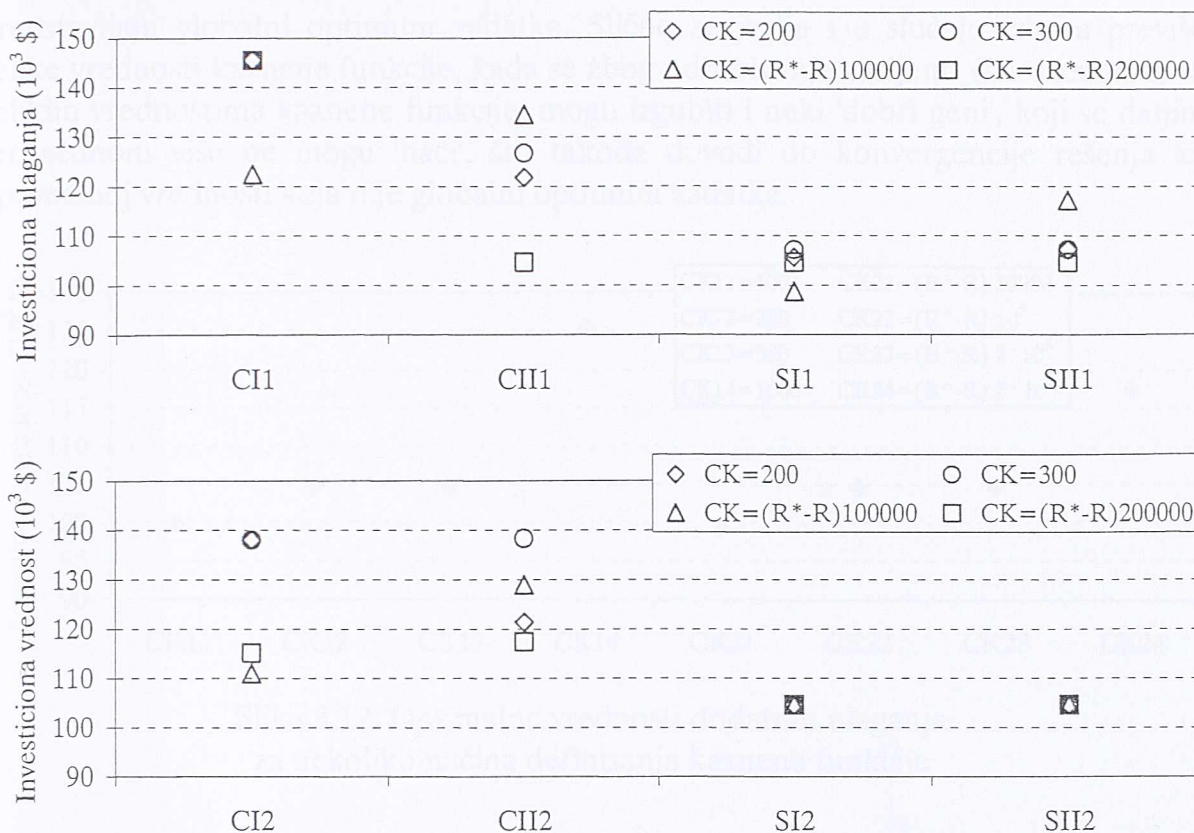
(oko 20 iteracija), a dobijena optimalna rešenja predstavljaju globalni optimum zadatka, za obe ispitivane varijante.

Vrednosti brzine konvergencije za nekoliko različitih načina definisanja kaznene funkcije i za razmatrane tipove GA prikazane su na slici 3.9. Dobijene optimalne vrednosti dodatnih ulaganja, za ispitivane tipove GA, prikazane su na slici 3.10, dok je globalno optimalno rešenje prikazano na slici 3.11. Pouzdanost dobijenog sistema iznosi 0.9912, a dodatna ulaganja $104.624 \cdot 10^3$ \$.

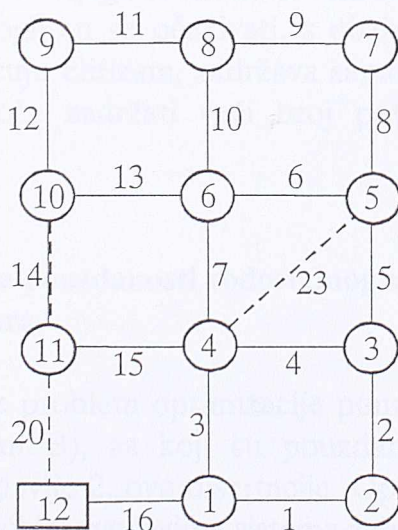


Slika 3.9: Brzine konvergencije za nekoliko različitih oblika GA i nekoliko načina definisanja kaznene funkcije

Kao što se može videti, brzina konvergencije, kao i samo optimalno rešenja u velikoj meri zavise od načina definisanja kaznene funkcije. Da bi se bolje sagledao uticaj izbora ove funkcije na dobijeno optimalno rešenje, za jedan od ispitivanih tipova GA (SI2) urađena je analiza optimalnog rešenja za veći broj različitih vrednosti kaznene funkcije. Radi se o stacionarnoj formi GA, u kojoj se funkcija pogodnosti određuje na osnovu ranga, a rekombinacija se ostvaruje ukrštanjem u dve tačke. Pored već analizirana četiri tipa kaznene funkcije, razmatrano je još nekoliko tipova, a rezultati analize prikazani su na slici 3.12.



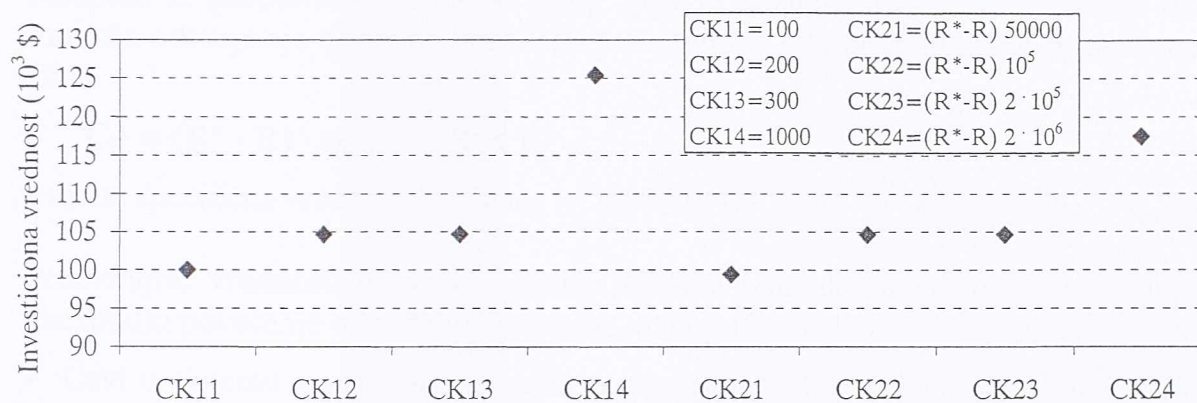
Slika 3.10: Optimalne vrednosti dodatnih ulaganja za nekoliko različitih oblika GA i nekoliko načina definisanja kaznene funkcije



Slika 3.11: Optimalno rešenje sistema A, za $R > 0.99$ (isprekidanom linijom predstavljene su dodatne cevi u sistemu, odnosno rekonstruisane postojeće cevi)

Jasno je da vrednosti kaznene funkcije ne smeju da budu previše male, u odnosu na veličinu dodatnih ulaganja, jer se u tom slučaju ne kažnjavanju dovoljno varijante za koje nije ispunjen uslov zadatka, odnosno varijante za koje pouzdanost sistema nije veća od zahtevane vrednosti. Zbog toga se dobijaju optimalna rešenja koja ne

predstavljaju globalni optimum zadatka. Slično se javlja i u slučaju izbora previše velike vrednosti kaznene funkcije, kada se zbog odbacivanja varijanti (hromozoma) sa velikim vrednostima kaznene funkcije, mogu izgubiti i neki 'dobri geni', koji se daljim proračunom više ne mogu 'naći', što takođe dovodi do konvergencije rešenja ka optimalnoj vrednosti koja nije globalni optimum zadatka.



Slika 3.12: Optimalne vrednosti dodatnih ulaganja za nekoliko načina definisanja kaznene funkcije

Upoređivanje razmatranih tipova GA i njihovih modifikacija dolazi se do zaključka da je za ispitivani zadatak stacionarna forma GA povoljnija od kanonične forme, odnosno njenih modifikacija. Za ovaj tip GA dobijeno optimalno rešenje je uglavnom i globalni optimum zadatka, a do njega se dolazi se relativno brzo, nakon manjeg broja iteracija. Ovakvi rezultati mogli su se očekivati, s obzirom da se u modifikacijama kanonične forme, koje uključuju elitizam, zadržava samo jedno najbolje rešenje, dok se u stacionarnoj formi može zadržati veći broj potomaka sa boljim ocenama pogodnosti.

3.4.2. Primer 6 - optimizacija pouzdanosti vodovodnog sistema sa pumpanjem vode i većim brojem rezervoara

U ovom primeru razmatra se problem optimizacije pouzdanosti postojećeg složenog distributivnog sistema (sistem B), za koji su pouzdanosti (mehanička i ukupna) razmatrane u primeru 4, poglavlje 2, ove disertacije. Optimizacioni zadatak sprovodi se za slučaj kada se u potrošačkim čvorovima sistema zahteva zadovoljenje normalnog radnog pritiska (2.75 bara), za koju je pouzdanost postojećeg sistema $R_{sis} = 0.95324$.

Slično kao u prethodnom primeru, optimizacioni zadatak formulisan je na sledeći način:

- Ciljevi, odnosno ograničenja su podizanje pouzdanosti sistema iznad neke zahtevane vrednosti, koja za ovaj optimizacioni zadatak iznosi 0.98, odnosno:

$$R_{sis} \geq R^* = 0.98$$

- Kriterijumska funkcija (f) predstavlja sumu dodatnih ulaganja u sistem (C) i kaznene funkcije (C_K), koja se uvodi za slučajeve kada je pouzdanost sistema manja od zahtevane pouzdanosti.

$$f = C + C_K \rightarrow \min$$

Za definisanje kaznene funkcije iskorištena su saznanja do kojih se došlo analizom rezultata iz prethodnog primera. Zbog toga je kaznena funkcija definisana kao funkcija odstupanja dobijene vrednosti pouzdanosti (R) od zahtevane pouzdanosti (R^*):

$$C_K = (R^* - R) \cdot \omega_K, \text{ za } R < R^*$$

a njena specifična vrednost iznosi $\omega_K = 200000 \cdot 10^3$ \$.

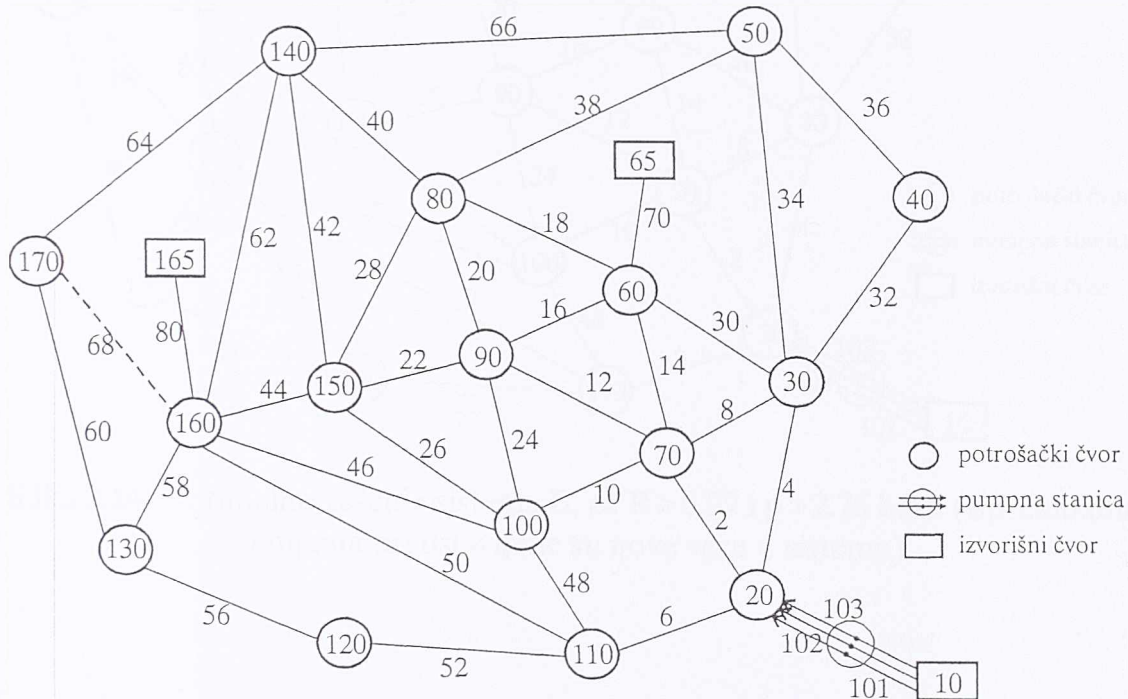
- Promenljive vrednosti u ovom zadatku predstavljaju aktivnosti kojima se nastoji obezbediti povećanje pouzdanosti sistema, a moguće su sledeće intervencije:
 - Cevi u sistemu mogu biti očišćene (revitalizovane), pri čemu se menja njihov koeficijent hrapavosti, pa Hazen William-ov koeficijent nakon čišćenja ima vrednost 125. Ovu aktivnost moguće je sprovesti na cevima sistema sa koeficijentom hrapavosti 70, a takvih cevi u sistemu ima 14.
 - Moguće je uključiti nove cevi u sistem. U ovom zadatku, slično kao u prethodnom, novim cevima su povezivani oni potrošački čvorovi koji imaju najmanju vrednost čvorne pouzdanosti. S obzirom na veoma dobru povezanost čvorova sistema B, razmatra se mogućnost uvođenja samo dve nove cevi u sistem.

Znači, u optimizacionom zadatku postoji 16 promenljivih veličina, koje uključujemo ili ne uključujemo u sistem. Cene ulaganja u postavljanje novih i revitalizaciju starih cevi isti su kao u prethodnom primeru, zbog čega se ovde neće ponavljati. Karakteristike cevi koje se uvode u sistem i cevi koje se revitalizuju date su u tabeli P6.1, u prilogu.

Koristeći zaključke do kojih se došlo analizom različitih tipova genetskog algoritma u prethodnom primeru, optimizacioni zadatak rešavan je metodama koje se zasnivaju na stacionarnoj formi genetskog algoritma. Naime, primenjeni su modifikovani oblici stacionarne forme GA, koji su detaljno opisani u prethodnom delu teksta, a modifikacije se odnose na način definisanja funkcije pogodnosti, čije se vrednosti određuju ili na osnovu ranga, ili direktno na osnovu stvarnih vrednosti kriterijumske funkcije, kao i tipa rekombinacije (ukrštanje u jednoj ili dve tačke).

Rezultati dobijeni korišćenjem opisanih optimizacionih metoda pokazuju veoma brzu konvergenciju prema optimalnom rešenju. U svakoj od ispitivane četiri modifikacije stacionarne forme genetskog algoritma, optimalno rešenje do koga se dolazi predstavlja globalni optimum zadatka, a do optimalnog rešenja dolazi se nakon 15-tak iteracija.

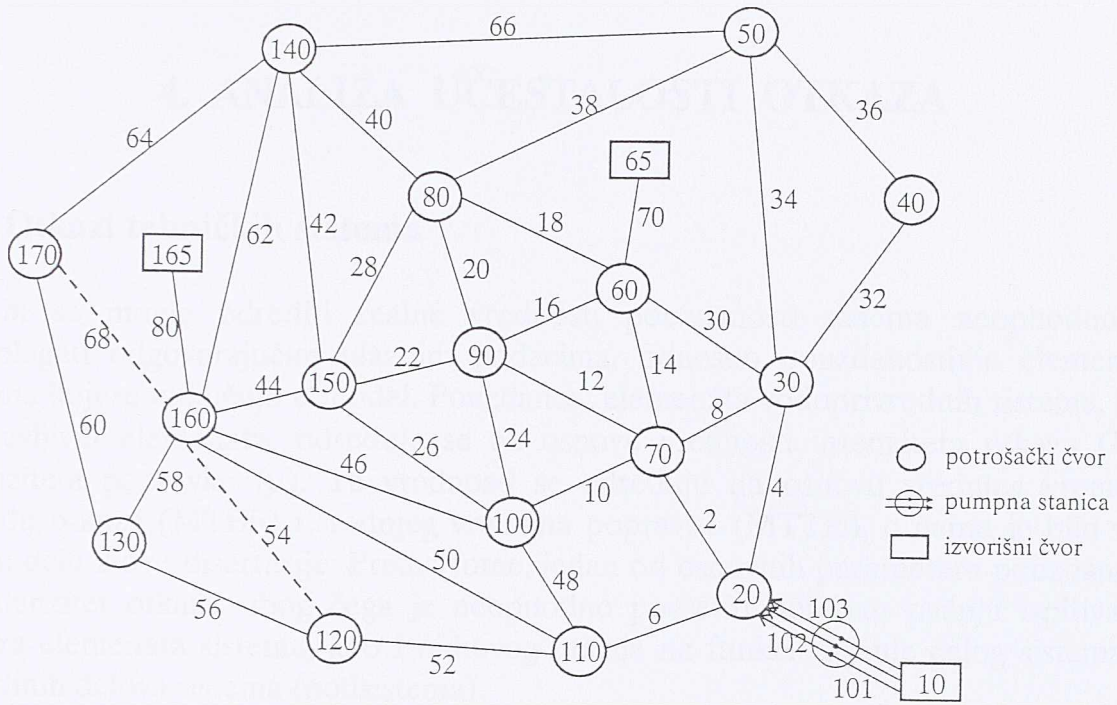
Optimalna, odnosno minimalna dodatna ulaganja u sistem, potrebna za podizanje ukupne pouzdanosti celog sistema iznad zahtevane vrednosti od 0.98, uz uslov da se u sistemu ne javljaju pritisci manji od normalnog radnog pritiska (2.75 m), iznose $160.19 \cdot 10^3$ \$. Optimalno rešenje kojim se ispunjava postavljeni zadatak predstavlja uvođenje jedne nove veze u sistem (veza 68), koja spaja čvorove 160 i 170 (videti sliku 3.13). Pouzdanost novog sistema iznosi 0.98018.



Slika 3.13: Optimalno rešenje sistema B, za $R > 0.98$ i $p > 2.75$ bara (isprekidanom linijom predstavljena je nova veza (cev) u sistemu)

Za isti sistem (sistem B) urađena je i optimizacija sa nešto strožijim ograničenjem pouzdanosti, odnosno za pouzdanost $R^* > 0.99$, pri čemu su svi drugi kriterijumi, ograničenja i promenljive vrednosti ostali isti kao u prethodno urađenom optimizacionom zadatku.

Optimizacija je i u ovom slučaju rađena sa modifikovanim stacionarnim formama GA (SI i SII), i za isti način definisanja kaznene funkcije: $C_K = (R^* - R) \cdot 200000 \cdot 10^3$ \$. Sve ispitivane forme GA konvergirale su, relativno brzo, do istog optimalnog rešenja, koje je ujedno i globalni optimum zadatka. Prema rezultatima sprovedene analize, povećanje pouzdanosti sistema iznad 0.99, uz minimalna dodatna ulaganja, može se postići uvođenjem dve nove veze 68 i 54 (slika 3.14). Na ovaj način, ulaganjima od $320.38 \cdot 10^3$ \$, postiže se povećanje ukupne pouzdanosti sistema na 0.9975. Rešenje je provereno ispitivanjem pouzdanosti varijante sistema prema kojoj se u sistem uvodi veza 68, a sve ostale veze (za koje je ta mogućnost predviđena - 14 veza) se revitalizuju. Pouzdanost takvog sistema iznosi 0.9887, što je manje od zahtevane pouzdanosti sistema od 0.99.



Slika 3.14: Optimalno rešenje sistema B, za $R > 0.99$ i $p > 2.75$ bara (isprekidanim linijama predstavljene su nove veze u sistemu)

4. ANALIZA UČESTALOSTI OTKAZA

4.1. Otkazi tehničkih sistema

Da bi se mogle odrediti realne vrednosti pouzdanosti sistema neophodno je raspolagati odgovarajućim ulaznim podacima, odnosno pouzdanostima elemenata sistema koji se uključuju u model. Pouzdanost elemenata vodoprivrednih sistema, kao popravljivih elemenata, određuje se na osnovu vrednosti intenziteta otkaza (λ) i intenziteta popravke (μ). Te vrednosti se određuju na osnovu srednjeg vremena između otkaza (MTBF) i srednjeg vremena popravke (MTTR), o čemu je bilo više reči u delu 2 ove disertacije. Prema tome, jedan od osnovnih parametara pouzdanosti je intenzitet otkaza, zbog čega je neopodno posvetiti posebnu pažnju ispitivanju otkaza elemenata sistema, kao i njihovog uticaja na funkcionisanje celog sistema ili pojedinih delova sistema (podsistema).

Pod otkazom elementa, dela sistema ili celog sistema podrazumeva se ono neželjeno stanje kada element, deo sistema ili celi sistem ne mogu ispuniti zahtevanu funkciju. Otkazi se javljaju kao posledica različitih uticaja, koji se javljaju u različitim periodima 'životnog veka' elemenata, a i sam otkaz, u zavisnosti od tipa, može različito da utiče na funkcionisanje sistema.

Otkaze tehničkih sistema, na opštem nivou, možemo klasifikovati na različite načine:

- ◇ U zavisnosti od karaktera promene parametara stanja po vremenu, otkaze možemo podeliti na:
 - iznenadni otkaz, kod koga se promena parametara stanja, od vrednosti normalnog rada do potpunog otkaza elementa, dogodi u veoma kratkom vremenskom intervalu (gotovo trenutno). U vodoprivrednim sistemima takvi otkazi nisu retki, npr. pucanje cevi ili ispad iz pogona nekog pumpnog agregata.
 - postepeni otkaz, kod koga se parametri stanja menjaju postepeno tokom određenog vremenskog perioda. Ovi otkazi manje su opasni od trenutnih, i u slučaju postojanja adekvatnog oskultacionog sistema mogu se uočiti i otkloniti pre potpunog razvoja kvara i otkaza elementa. Primer ovog tipa otkaza je npr. prslina na cevi, koja se postepeno razvija, tokom više dana ili nedelja, da bi na kraju došlo do potpunog otkaza (pucanja) cevi.
- ◇ U zavisnosti od međusobne veze sa drugim otkazima, otkaze delimo na:
 - zavisni otkazi, koji se javljaju samo u slučaju pojave nekog drugog otkaza, odnosno otkazi koje poruzrokuju drugi otkazi. Iako se ovi modeli u praksi javljaju (npr. pojava hidrauličkog udara pri otkazu nekog pumpnog agregata, može da prouzrokuje otkaz (pucanje) cevovoda) oni se po pravilu ne uključuju u

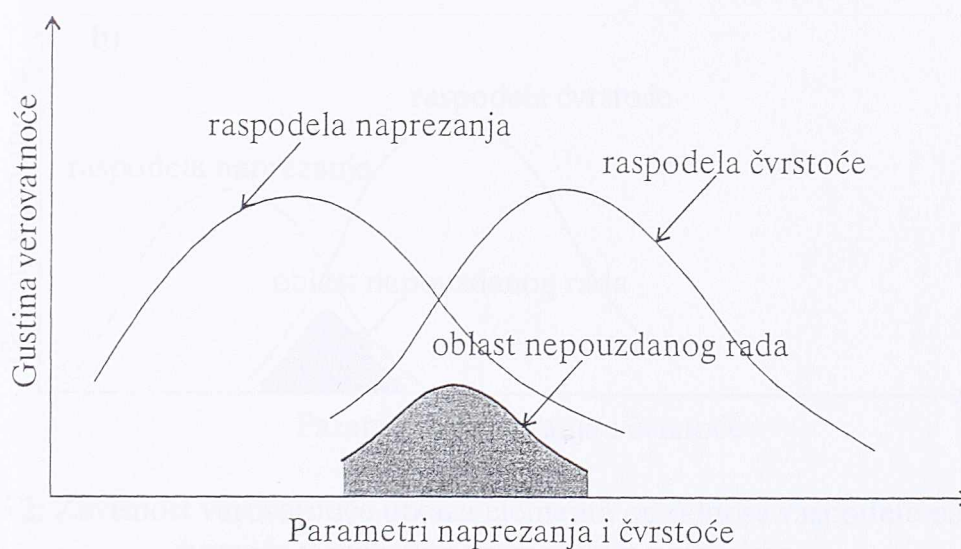
modele pouzdanosti sistema (polazna pretpostavka za računanje pouzdanosti je da su otkazi u sistemu nezavisni).

- nezavisni otkazi, kada do otkaza elemenata u sistemu dolazi slučajno, odnosno nezavisno od drugih otkaza.
- ◇ U zavisnosti od vremenskog trenutka (perioda) u 'životnom veku' elementa kada se otkaz desio možemo ih podeliti na:
- otkaz u probnom radu, kada do otkaza dolazi u periodu ispitivanja ili početnog rada, uglavnom kao posledica propusta u izradi i ugradnji elementa. Taj period zove se i 'period dečijih bolesti', kada je broj otkaza nešto veći nego u eksploatacionom periodu. Često se elementi od vitalnog značaja (npr. određeni delovi aviona) ugrađuju tek nakon isteka ovog perioda, za vreme koga rade na probnom stolu.
 - otkazi u periodu normalnog rada, kada do otkaza dolazi slučajno, kao posledica spoljašnjih uticaja i unutrašnjih karakteristika elementa. Pošto ovaj period traje znatno duže od preostala dva perioda 'životnog veka' elementa, svi naponi za povećanje pouzdanosti usmereni su na smanjenje broja otkaza upravo u ovom periodu.
 - otkazi usled dotrajalosti elementa, istrošenosti i zamora materijala javljaju se u poslednjem periodu 'životnog veka' elementa. Elementi od vitalnog značaja se, zbog povećanja broja otkaza u ovom periodu, menjaju nakon isteka perioda normalnog rada, čak i u slučajevima kada ispravno funkcionišu.
- ◇ U zavisnosti od uzroka zbog koga je došlo do otkaza, mogu se podeliti na:
- primarni otkaz, je onaj otkaz do koga dolazi u zadanim režimima rada, a kao posledica starenja / istrošenosti elementa, a ne usled nekog vanrednog događaja sa strane, npr. pucanje cevi usled zamora materijala pri redovnom režimu eksploatacije.
 - sekundarni otkaz je onaj koji nastaje zbog nekih delovanja sa strane: neregularno naprezanje elemenata sistema, delovanje okruženja, preopterećenje, i dr. Primer ovog tipa otkaza su: pucanje cevi usled aktiviranja klizišta, ispad osigurača zbog nedopustivog preopterećenja, i sl.
 - pogrešno upravljanje je onaj otkaz do koga dolazi zbog pogrešno izdate naredbe. Najčešće ne zahteva nikakav remont, ali u nekim slučajevima može da dovede do preopterećenja elemenata sistema, koji usled toga mogu da dožive sekundarni otkaz.

Prema definiciji (Dillon i Singh, 1981) do otkaza dolazi u slučajevima kada je čvrstoća elementa manja od dozvoljenog naprezanja. Pri tome se pod pojmom naprezanje podrazumevaju sva ona opterećenja kojima se pokušava izazvati otkaz elementa: mehaničko opterećenje, delovanje okoline, temperature, protoka i dr, a pod pojmom čvrstoća - sposobnost elementa da ispuni zahtevane funkcije bez otkaza, pri delovanju navedenih opterećenja.

Naprezanje i čvrstoća elementa opisuju se zakonima verovatnoće, mada se ovim zakonima ne mogu opisati svi uticaji. U slučajevima kada se čvrstoća elementa može opisati raspodelama sa manjim vrednostima disperzije, pouzdanost elementa je veća nego u slučajevima sa istim srednjim vrednostima, ali većom disperzijom. Na povećanje disperzije utiču zamor materijala, korozija, dotrajalost i dr. Da bi se ovi faktori ispoljili neophodno je da prođe određeno vreme, što znači da je čvrstoća elementa funkcija vremena. Raspodela naprezanja se menja, i zavisi od uslova eksploatacije, spoljšnjih uticaja, tehničke upotrebe i dr. Međutim, sve ove efekte je teško ispitivati u labalatorijskim uslovima i definisati njihove zakonitosti.

U slučajevima kada je moguće oceniti raspodele parametara naprezanja i čvrstoće elementa, ispitivanjem odnosa između tih parametara može se odrediti verovatnoća otkaza elementa (slika 4.1). Međutim, teorija koja opisuje ovu zavisnost primenljiva je samo u slučajevima kada u zadatom vremenskom intervalu ne dolazi do promene bitnijih svojstava elementa. Pretpostavlja se da pojava otkaza zavisi samo od trenutnih naprezanja, a ne i od karaktera promene naprezanja u prošlosti.

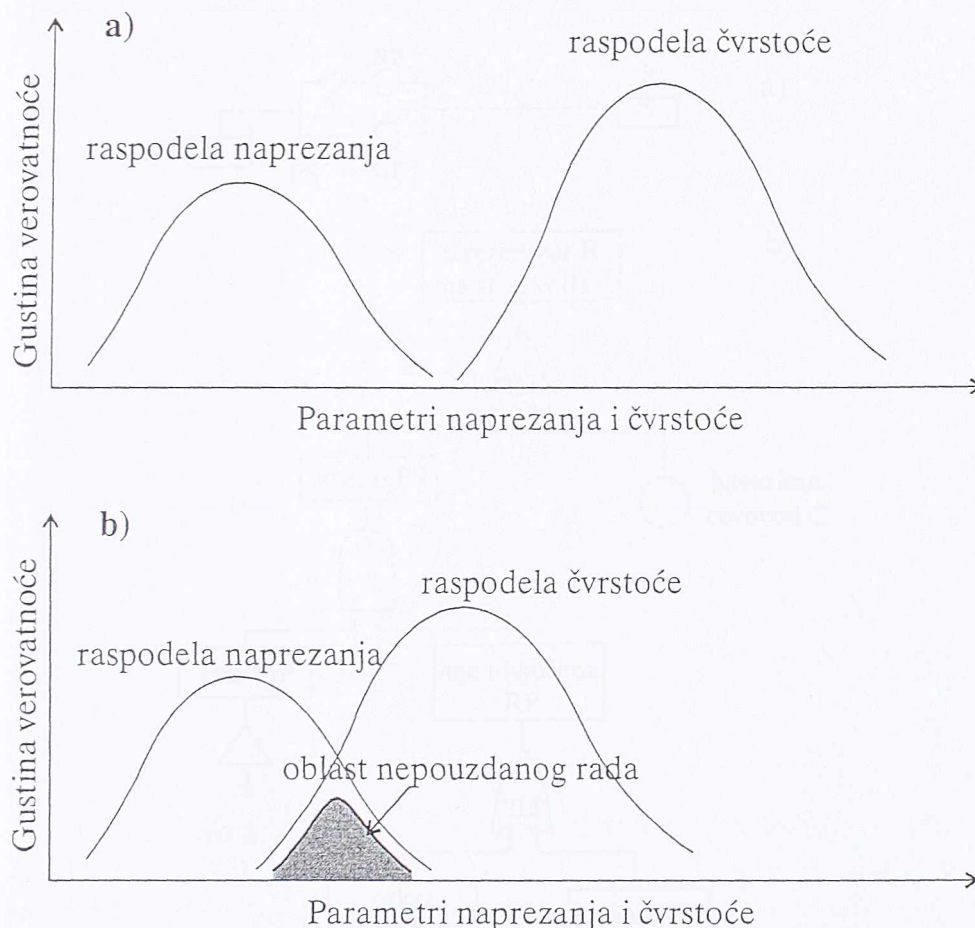


Slika 4.1: Zavisnost verovatnoće otkaza elementa od odnosa raspodele napona i čvrstoće

Raspodele naprezanja i čvrstoće menjaju se kroz vreme, pa je i verovatnoća otkaza elementa funkcija vremena. Na slici 4.2 prokazane su raspodele parametara naprezanja i čvrstoće u dva različita vremenska preseka, t_1 (slika 4.2.a) i t_2 (slika 4.2.b). Radi jednostavnijeg prikazivanja pretpostavlja se da je raspodela naprezanja nepromenljiva, dok se raspodela čvrstoće menja kroz vreme.

Jedna od metoda za analizu otkaza, pa time i pouzdanosti tehničkih sistema, koja se u svetu često, koristi je formiranje **stabla otkaza**. Ova metoda razvijena je početkom 70-tih godina, i veoma uspešno se koristi za analizu bezbednosti najdelikatnijih sistema (kosmičke letelice, avioni, vojni uređaji, nuklearne elektrane i dr.). Kod nas se metod stabla otkaza koristi veoma retko, više na nivou istraživanja, i to pre svega u mašinskoj

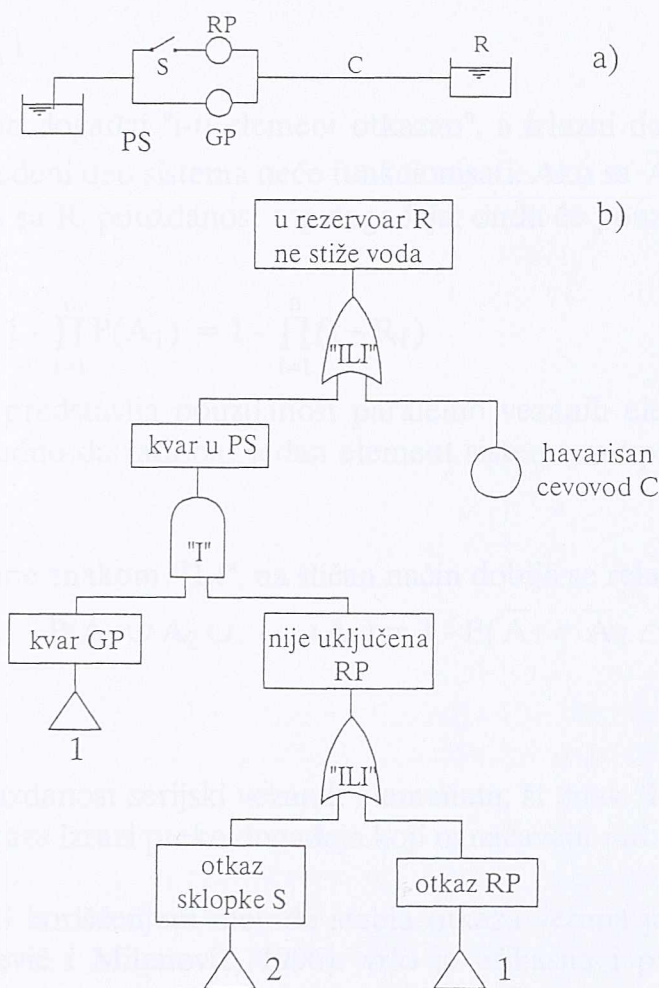
i elektromašinskoj industriji. U hidrotehnici nije korišćena, mada je to jedna od oblasti tehnike gde bi imala puno opravdanje, pošto se radi o bezbednosti veoma delikatnih sistema, sa velikim brojem elementata čija se pouzdanost mora pratiti, i sa teškim socijalnim posledicama ukoliko dođe do otkaza sistema.



Slika 4.2: Zavisnost verovatnoće otkaza elementa od odnosa raspodele napona i čvrstoće u različitim vremenskim presecima

Stabla otkaza su svojevrsni grafovi kojima se u jedinstvenu logičku strukturu dovode mogući otkazi nekog tehničkog sistema i njihovi uzročnici, pri čemu se dekompozicija mogućih uzroka može vršiti sve do onih elemenata sistema koji su značajni za kvantitativnu analizu pouzdanosti i čije se pojedinačne pouzdanosti mogu utvrditi i pratiti. Neželjeni događaj koji se analizira smešta se na vrh stabla otkaza, a zatim se taj događaj dekomponuje na potencijalne događaje / otkaze sve elementarnijih delova sistema. Čitav graf se povezuje simbolima kojima se definiše odnos između određenog događaja i događaja nižeg reda koji ga uzrokuju. Osnovni logički simboli koji se koriste su: "I", koji označava da se izlazni događaj dešava samo u slučaju kada se dešavaju svi ulazni događaji istovremeno, "ILI", koji označava da se događaj dešava ako se desi bilo koji od ulaznih događaja, isključujuće "ILI", prioritarno "I", "m od n", uslovljenost, i dr.

Na slici 4.3 dat je primer jednog jednostavnog stabla otkaza za sistem sastavljen od tri elementa, kojim se voda od izvorišta transportuje do rezervoara (R). Pumpna stanica (PS) sastoji se od dve istotipne, paralelno vezane pumpe: glavna pumpa (GP) i rezervna pumpa (RP) koju u rad uključuje automatska sklopka (S) u slučaju kada GP ne radi.



Slika 4.3: Primer formiranja stabla otkaza

Analiziran je konačan događaj "u rezervoar R ne dotiče voda". Taj se događaj može razložiti vezom "ILI" na elementarni primarni događaj "havarisan cevovod C" i događaj nižeg reda "kvar u PS". Pumpna stanica neće biti u funkciji samo ako se istovremeno dese sledeća dva događaja: "kvar GP" i "nije uključena RP", što znači da su ovi događaji vezani znakom "I". Rezervna pumpa neće biti uključena u slučaju jednog od sledeća dva događaja: "otkaz sklopke S", zbog čega nije mogla da se uključi RP ili "otkaz RP". Veze (1) i (2) date na krajevima događaja su veze za dalje dekomponovanje otkaza, pri čemu je veza (1) data za obe pumpe jer je reč o pumpama istog tipa.

Određivanje pouzdanosti na osnovu stabla otkaza obavlja se polazeći od događaja najnižeg reda (za koje je poznata pouzdanost), a vodeći računa o logici veze između

događaja pojedinih delova sistema. Za elemente (A) nekog dela sistema vezane logičkim znakom "I", verovatnoća izlaznog događaja može se definisati na sledeći način:

$$Q = P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) = P(A_1) P(A_2 | A_1) P(A_3 | A_1, A_2) P(A_n | A_1, \dots, A_{n-1})$$

U slučaju nezavisnih otkaza gornji izraz se transformiše u:

$$Q = \prod_{i=1}^n P(A_i)$$

gde je sa A_i označen događaj "i-ti element otkazao", a izlazni događaj Q predstavlja verovatnoću da određeni deo sistema neće funkcionisati. Ako sa \bar{A}_i označimo događaj "i-ti element radi", a sa R_i pouzdanost tog događaja, onda će pouzdanost razmatranog dela sistema iznositi:

$$R = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n P(A_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Ovaj izraz u stvari predstavlja pouzdanost paralelno vezanih elemenata, kada je za pravilan rad neophodno da radi bar jedan element sistema, a upravo to i predstavlja logička veza "I".

Za elemente povezane znakom "ILI", na sličan način dobija se relacija:

$$R = 1 - Q = 1 - P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = 1 - P(\bar{A}_1 \cap \bar{A}_2 \cap \dots \cap \bar{A}_n)$$

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

koja predstavlja pouzdanost serijski vezanih elemenata, št znak "ILI" i predstavlja ako se umesto preko otkaza izrazi preko događaja koji označavaju rad elementa.

Analiza pouzdanosti korišćenjem metode stabla otkaza veoma je korisna metoda iz više razloga (Đorđević i Milanović, 1996): vrlo je efikasna i pregledna za analizu uzroka otkaza sistema, obuhvataju se samo oni aspekti koji imaju važnost za praćenje pouzdanosti sistema, omogućava kvalitativnu i kvantitativnu analizu pouzdanosti, omogućava kompjuterske simulacije procesa otkaza sistema, može se širiti na sve dublje slojeve elemenata sistema, postepenom dekompozicijom na sklopove nižeg reda i dr. Kao takva, ta metodika je vrlo pogodna za analizu koja najbrže vodi ka dijagnostici kvara. Posebno je efikasna kada joj informacionu podršku pruža odgovarajući monitoring sistem. Na primeru 4.3, ako bi se cevovod C osmatrao na nekoliko lokacija, merenjem pritisaka, događaj "havarisan cevovod C" mogao bi da se razbije na više poddogađaja (havarisana deonica $C_1 - C_2$; itd.), čime bi se znatno preciznije lokalizovalo mesto otkaza.

* * *

Kao što je već istaknuto, verovatnoća otkaza elementa može se odrediti samo ako su poznate raspodele naprezanja i čvrstoće elementa. Međutim, ti parametri zavise od velikog broja različitih uticaja, koje je sve teško (gotovo nemoguće) ispitati i matematički formalizovati. Isto važi i za određivanje vremena popravke kvara, koje zavisi od različitih faktora (broja zaposlenih u javnim komunalnim preduzećima, raspoložive mehanizacije, vremenskih prilika, oskultacionog sistema i dr.). Zbog toga se verednosti srednjeg vremena između otkaza i srednjeg vremena popravke, za elemente vodoprivrednih sistema, određuju uglavnom analizom rezultata prikupljenih na postojećim (realnim) sistemima. Veličina srednjeg vremena između otkaza određuje se, uglavnom, na osnovu broja otkaza (kvarova, defekata) elemenata sistema po jedinici dužine vodovodne mreže (obično po jednom kilometru), i u nekom određenom vremenskom periodu (obično godini dana). Srednje vreme popravke obično je vreme za koje se popravi najmanje 50% uočenih (prijavljenih) kvarova, a često se ova vrednost dobija i na osnovu procene.

4.2. Ukupan broj otkaza u vodovodnim sistemima

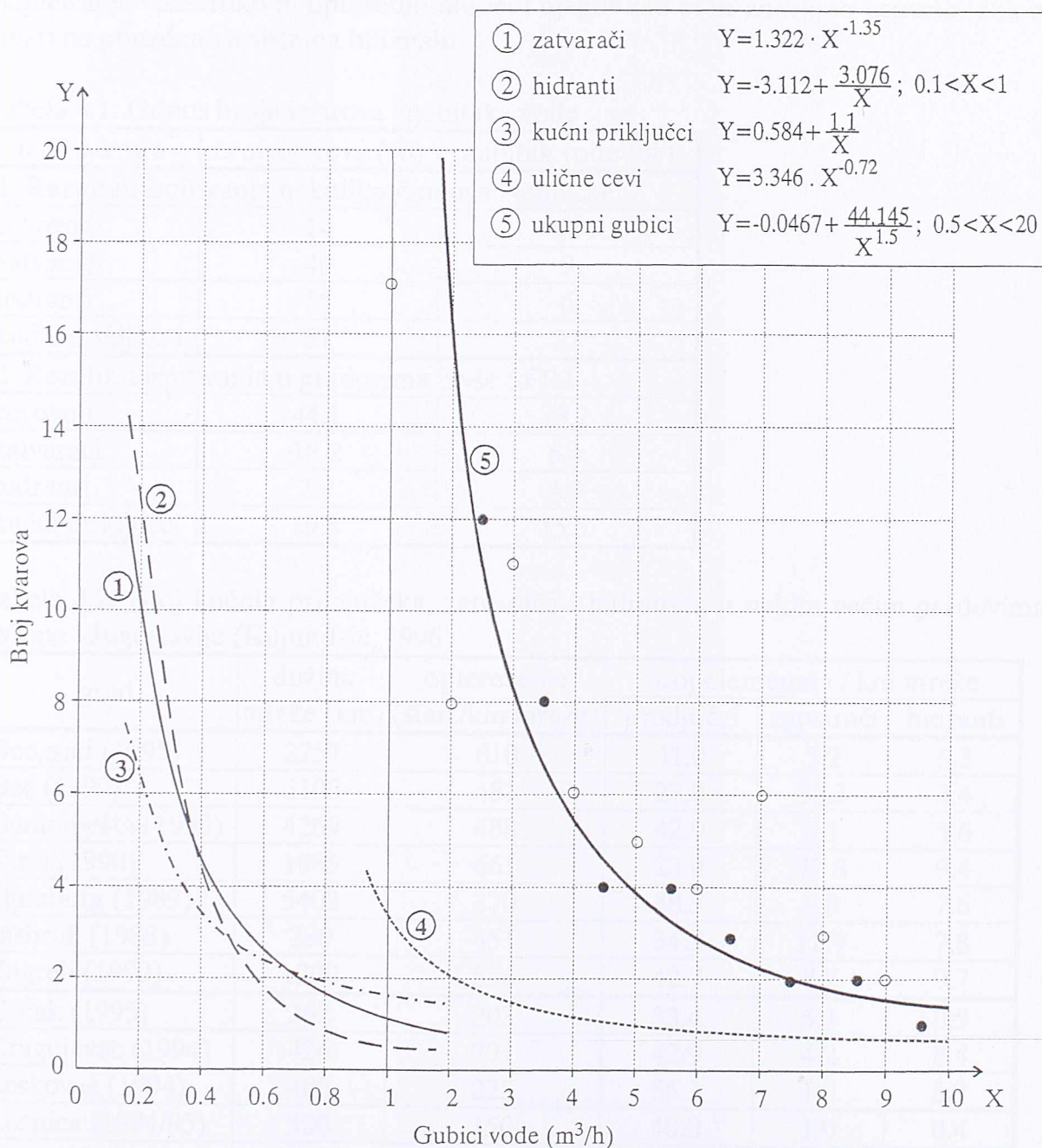
Osnovni elementi distributivnih sistema koji se uzimaju u razmatranje prilikom sprovođenja različitih hidrauličkih, optimizacionih i drugih analiza su: ulične cevi, hidranti, zatvarači i kućni priključci. U modelima analize pouzdanosti sistema navedeni elementi nemaju istu težinu. U ovim modelima se, po pravilu, kao elementi sistema razmatraju samo ulične cevi i njihove pouzdanosti. Razlog za ovakav pristup je u prvom redu kvantitativan uticaj (efekat) kvara na deficit vode u sistemu.

Obimna ispitivanja ove vrste sproveo je dr Petrašin u periodu od 1977 - 1981. godine (Petrašın, 1986). U analizi su korišćeni rezultati ispitivanja na vodovodnim sistemima nekoliko nemačkih gradova: Garmisch - Partenkirchen, Böblingen, Ulm, Trier, Basel, Essen i deo Münchena, dva grada Slovenije: Logatec i Jasenice, kao i raspoloživi podaci nekih većih gradova sa prostora bivše SFRJ. Između ostalog, merenjima su obuhvaćeni kvarovi na uličnim cevima, zatvaračima, hidrantima i kućnim priključcima, kao i gubici vode koji se javljaju pri tim kvarovima. Analizom dobijenih vrednosti došlo se do zaključka da najveći gubici vode nastaju kao posledica kvarova na uličnim cevima, a da je zavisnost između broja defekata i gubitaka vode koji pri tome nastaju izrazito hiperboličkog karaktera.

Na slici 4.4. date su krive, i njihovi analitički izrazi, broja kvarova u funkciji gubitaka vode, kao i vrednosti dobijene sprovedenim merenjima na terenu. Kao granica između gubitaka vode koji nastaju usled kvara na uličnoj cevi i ostalih kvarova izdvaja se vrednost od $1 \text{ m}^3/\text{h}$ (0.28 l/s). U zoni gubitaka od 0 do $1 \text{ m}^3/\text{h}$ preovlađuje veliki broj kvarova, sa malim gubicima vode po kvaru, dok zonu gubitaka većih od $1 \text{ m}^3/\text{h}$ karakteriše mali broj kvarova, sa velikim gubicima vode po kvaru.

Iako su gubici vode koji nastaju kao posledica kvara na zatvaraču, hidrantu i kućnom priključku relativno mali, ukupni gubici vode usled kvarova ove vrste su značajni. U

tabeli 4.4. dati su rezultati ispitivanja odnosa broja kvarova i gubitaka vode. Može se primetiti da se gubici vode koji nastaju kao posledica kvarova na zatvaračima i hidrantima kreću u granicama od 10 - 15% od ukupnih gubitaka vode, dok broj kvarova tih elemenata može biti znatno veći, i do 50% od ukupnog broja kvarova, što naravno zavisi, između ostalog, i od broja tih elemenata u sistemu.



Slika 4.4: Odnos gubitaka vode i broja kvarova za različite vrste kvarova (Petrašin, 1986)

Na osnovu navedenih vrednosti može se zaključiti da i pored značajnog udela broja kvarova na zatvaračima i hidrantima u ukupnom broju kvarova vodovodnog sistema, ovi elementi ne utiču presudno na količinu izgubljene vode u sistemu. Sa druge strane,

broj ovih elemenata u sistemu je veliki i kreće se u širokim granicama koje se razlikuju za veće i manje gradove. Prema raspoloživim podacima za neke veće gradove Evrope i Jugoslavije (tabela 4.2., Kujundžić, 1996) te vrednosti se kreću u granicama od 5 - 40 zatvarača/km mreže za veće gradove, odnosno do 10 zatvarača/km mreže za manje gradove, i do 10 hidranata/km mreže za veće gradove, odnosno do 5 hidranata/km mreže za manje gradove. S obzirom na tako veliki broj ovih elemenata, njihovo uključivanje višestruko bi opteretilo model i njegov rad bi se značajno usporio, dok bi efekti na pouzdanost sistema bili mali.

Tabela 4.1: Odnos broja kvarova i gubitaka vode

mesto kvara	broj kvarova (%)	gubitak vode (%)
1. Rezultati ispitivanja nekoliko gradova Nemačke		
cevovodi	14	58
zatvarači	40	9
hidranti	15	6
kućni priključci	31	27
2. Rezultati ispitivanja u gradovima bivše SFRJ		
cevovodi	44.1	73.2
zatvarači	18.2	6.4
hidranti	7.9	4.9
kućni priključci	29.8	15.5

Tabela 4.2: Broj kućnih priključaka, zatvarača i hidranata u nekim većim gradovima Evrope i Jugoslavije (Kujundžić, 1996)

grad	dužina mreže (km)	opterećenje (stan./km mreže)	broj elemenata / km mreže		
			priključci	zatvarači	hidranti
Beograd (1995)	2257	610	41.0	5.2	6.3
Beč (1990)	3100	481	27.0	32.3	3.4
Budimpešta (1990)	4269	488	42.9	6.1	5.6
Cirih (1990)	1085	661	23.9	37.8	9.4
Hamburg (1989)	5402	370	38.3	9.8	7.6
Insbruk (1988)	280	451	34.3	12.9	7.8
Zagreb (1990)	1200	556	42.7	8.7	9.7
Čačak (1995)	362	203	33.4	5.1	0.5
Kragujevac (1994)	426	291	42.9	4.2	8.4
Leskovac (1994)	400	225	56.3	1.0	3.7
Loznica (1994/95)	500	150	40.0	1.0	0.4
Pirot (1994)	135	333	96.4	1.3	0.9
Podgorica (1995)	320	384	48.3	3.4	1.2
Sombor (1994)	205	213	53.5	5.8	0.6
Subotica (1995)	405	274	68.7	4.4	3.7
Užice (1994)	120	572	29.2	9.2	2.9
Valjevo (1994)	152.2	526	96.3	7.3	1.4

Kvarovi na kućnim priključcima zastupljeniji su od kvarova na zatvaračima i hidrantima, a vrednosti za beogradski vodovod date su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3: Odnos vrsta kvarova za beogradski vodovod u periodu od 1984-2000

vrsta kvara	broj kvarova (%)			
	1984	1993	1995	2000
ulična cev	18.8	23.9	21.2	29.1
kućni priključak	67.5	66.2	60.4	64.5
zatvarač	9.3	4.2	11.4	4.5
hidrant	4.4	5.7	7.0	1.9

Iako su količine vode koje se gube pri pojedinačnim kvarovima ovog tipa relativno male, veliki broj ovih elemenata u sistemu, kao i velika učestalost kvarova razlog su što gubici vode koji nastaju kao posledica kvara na ovim elementima značajno utiče na veličinu ukupnih gubitaka vode u sistemu (i do 30% od ukupnih gubitaka vode), kao što se vidi iz tabele 4.1. I pored svega toga, kućni priključci se ne uvode u modele pouzdanosti, prvenstveno zbog činjenice da se ovim modelima obuhvata glavna (primarna) mreža naselja, ne razlažući sistem na tako sitne detalje kojima bi se modelirali kućni priključci. Drugi razlog proizilazi iz činjenice da je broj ovih elemenata u sistemu veoma veliki, što proračun pouzdanosti čini gotovo nemogućim.

Iz svega napred navedenog može se zaključiti da će pouzdanost snabdevanja vodom naselja zavisiti prvenstveno od pouzdanosti ulične mreže cevi, kao i od konfiguracije samog sistema.

4.3. Analiza broja otkaza na uličnim cevima

Ukupan broj kvarova na uličnim cevima varira u širokim granicama, od 0.1 do 2 i više kvarova po km godišnje. U tabelama 4.4., 4.5. i 4.6. prikazan je broj kvarova na cevovodima u nekim većim gradovima Evrope, Jugoslavije, kao i podaci za Beograd u nekoliko vremenskih preseka.

Tabela 4.4: Kvarovi na uličnim cevima (Kujundžić, 1995, Petrešin, 1986)

grad	dužina mreže (km)	broj kvarova	kvarovi/km mreže
Beč (1990)	3100	1260	0.41
Budimpešta (1990)	4269	15500	3.63
Cirih (1990)	1085	669	0.62
Insbruk (1988)	280	107	0.38
Skoplje (1995)	820	710	0.87
Kopenhagen	4859	704	0.15
Ulm	446	52	0.12

Tabela 4.4. (nastavak)

grad	dužina mreže (km)	broj kvarova	kvarovi/km mreže
Trier	331	16	0.05
deo Münchena	220	10	0.05
Essen	2136	56	0.03
Čačak (1995)	362	310	0.86
Kragujevac (1994)	426	869	2.04
Leskovac (1994)	400	630	1.57
Loznica (1994/95)	500	730	1.46
Pirot (1994)	135	900	6.66
Podgorica (1995)	320	176	0.55
Sombor (1994)	205	100	0.49
Subotica (1995)	405	1100	2.72
Užice (1994)	120	400	3.33
Valjevo (1994)	152.2	384	2.52

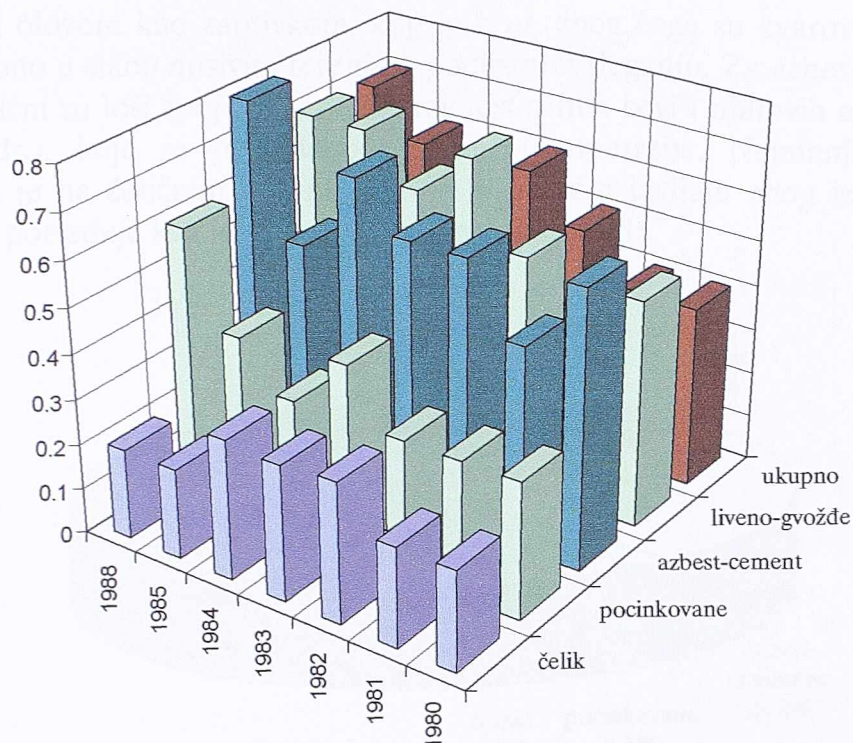
Tabela 4.5: Broj kvarova na uličnim cevima za grad Beograd

godina	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1988	1991	1993	2000
dužina mreže (km)	1615	1631	1681	1722	1757	1789	1982	2128	2180	2510
broj kvarova	718	636	807	999	949	1020	1184	2802	2890	1771
kvarovi/km mreže	0.45	0.39	0.48	0.58	0.54	0.57	0.63	1.32	1.32	0.71

Iz prikazanih rezultata može se uočiti velika razlika u broju kvarova. Takva situacija posledica je činjenice da broj otkaza na uličnim cevima zavisi, u većoj ili manjoj meri, od velikog broj različitih faktora. Najčešći od njih su: vrsta materijala od koga je cev izrađena, prečnik cevi, starost, radno opterećenje (pritisak i promene pritiska) pod kojim se nalazi cevovod, spoljašnje opterećenje, vrste zemljišta u koje je cev položena i sleganja tla, temperature, načina izrade i ugradnje cevi, zaštite cevi, održavanja i dr. Sve ove uticaje bilo bi veoma teško matematički formalizovati i međusobno povezati, pa se broj kvarova određuje na osnovu empirijskih iskustava sa sličnih sistema, ili sa postojećeg sistema (ako se određuje pouzdanost postojećeg sistema). Osnovna dva parametra za koja se obrađuju i prikazuju rezultati su: materijal od koga su cevi napravljene i prečnik cevi.

Zavisnost između broja kvarova na uličnim cevima i vrste materijala od koga su cevi napravljene

Na dijagramu 4.5 prikazani su rezultati praćenja kvarova na cevima po vrsti materijala, za beogradski vodovod, za period od 1980. do 1988. godine (Bobušić i Krstić, 1995). U tabeli 4.6. prikazane su zastupljenosti pojedinih vrsta materijala.



Slika 4.5: Broj kvarova na cevi po km mreže za razne vrste materijala

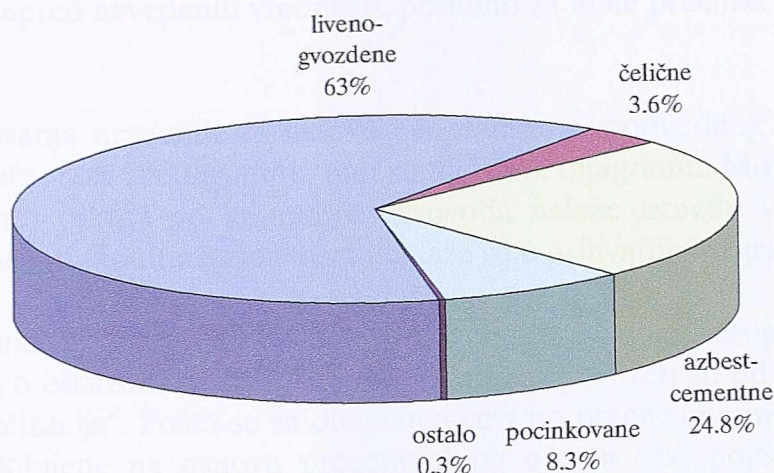
Tabela 4.6: Zastupljenost pojedinih vrsta materijala za beogradski vodovod

vrsta materijala	1980	1990	1994
liveno-gvozdene	56.7	57.8	59.4
nodularni liv	0	0.1	2.2
čelične	20.2	20	18.1
azbest-cementne	22	21	17.8
pocinkovane	0.6	0.7	2.2
armirano-betonske	0.5	0.4	0.3

Iz prikazanih rezultata vidi se da je broj kvarova liveno-gvozdenih i azbest-cementnih cevi najveći, i kreće se u granicama od 0.4 do 0.7 kvarova/km mreže za azbest-cementne cevi, odnosno od 0.4 do 0.6 kvarova/km mreže za liveno-gvozdene cevi, sa tendencijom porasta broja kvarova. Pošto su ove dve vrste cevi ujedno i najzastupljenije (sa zastupljenošću od skoro 80% od ukupne dužine mreže) broj kvarova ovih cevi u apsolutnom iznosu je daleko najveći i iznosi preko 85% od svih kvarova na cevima (slika 4.6).

Analizom mesta kvara cevi (Petrešin, 1986 i Arandelović, 1996) došlo se do zaključka da se u slučaju liveno-gvozdenih cevi najveći broj kvarova (preko 90%) javlja na spoju cevi. Najčešći spoj liveno-gvozdenih cevi, u našoj zemlji, je spoj na naglavak sa

kudeljom i olovom kao zaptivkom, koji je krut, zbog čega su kvarovi na spoju tako česti, posebno u slabo nosivim terenima podložnim sleganju. Za azbest-cementne cevi karakteristični su loši spojevi, kao i dotrajalost samih cevi i njihovih elemenata (vijci, matice i dr.), koje se postepeno izbacuju iz upotrebe. Najmanji broj kvarova registrovan je na čeličnim cevima, koji se uglavnom javljaju zbog izvođenja drugih radova, što potvrđuje kvalitet ove vrste cevnog materijala.



Slika 4.6: Prosečne zastupljenosti kvarova na cevima po vrsti materijala za beogradski vodovod (prema podacima Bobušića i Krstića, 1995)

Zavisnost između broja kvarova na uličnim cevima i prečnika cevi

Pored vrste materijala, veliki uticaj na učestalost (broj) kvarova na cevima ima i prečnik cevi. To je ujedno i parametar preko koga se najčešće određuje pouzdanost cevi. Ispitivanjem broja otkaza (kvarova) po dužnom km cevi, za cevi različitih prečnika, primećeno je da se taj broj smanjuje sa povećavanjem prečnika cevi. Za prečnika veće od 300 - 400 mm ta vrednost postaje gotovo konstantna. Analizom broja otkaza za različite gradove, došlo se do različitih rezultata (slika 4.7). Takvi rezultati posledica su različite starosti mreže, terena u kome je mreža položena, materijala, održavanja i drugih parametara navedenih u prethodnom delu teksta.

Na slici 4.7 krive Abramov1 i Abramov2 formiraju zonu otkaza cevi dobijenu na osnovu velikog broja podataka iz celog sveta, prikupljenih na IX Međunarodnom kongresu o vodosnabdevanju (Abramov, 1979). Kriva Gargano&Pianese (Gargano & Pianese, 2000) dobijena je kao rezultat analize otkaza cevi u St. Luis-u. Tom prilikom je zaključeno da se broj otkaza može aproksimirati krivom:

$$br = \frac{16192.194}{D^{3.26}} + \frac{118.015}{D^{1.3131}} + \frac{183558.095}{D^{3.5792}} + 0.0261$$

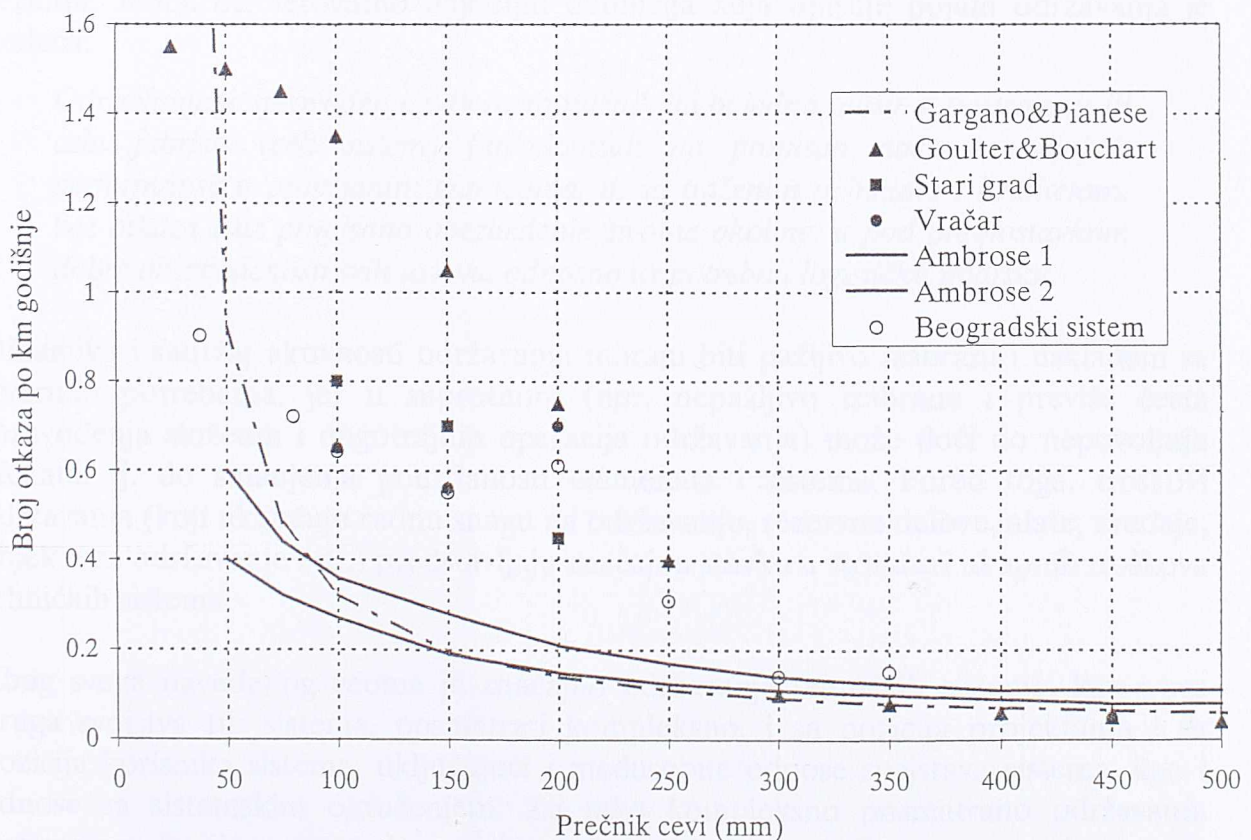
gde je D prečnik cevovoda u milimetrima, a br broj otkaza izražen kao broj otkaza po dužnom kilometru cevovoda u godini dana.

Vidi se da se vrednosti dobijene preko opisane tri krive relativno dobro slažu, posebno u zoni prečnika većih od 100 mm, koji su od interesa za modele pouzdanosti vodovodnih sistema.

Goulter & Bouchart (Goulter & Bouchart, 1990) na osnovu svojih ispitivanja predlažu vrednosti, koje su na dijagramu 4.7 date kao tačke Goulter&Bouchart, a koja odstupaju od napred navedenih vrednosti, posebno za male prečnike (prečnike manje od 300 mm).

Rezultati ispitivanja urađenih za delove beogradskog vodovodnog sistema (opštine Stari grad i Vračar), za 2000. godinu, dati su na istom dijagramu. Može se primetiti da se vrednosti broj otkaza po kilometru cevovoda nalaze između vrednosti (krivih) Gargano&Pianese i Goulter&Bouchart i nalaze se u prihvatljivim granicama.

Urađena je i analiza otkaza na nivou celog beogradskog vodovodnog sistema za 2000. godinu. Podaci o otkazima na cevima, po prečnicima preuzeti su od JKP "Beogradski vodovod i kanalizacija". Pošto se sa dužinama cevi po prečnicima nije raspolagalo, te vrednosti su dobijene na osnovu procentualnog učešća cevi pojedinih prečnika u ukupnoj dužini cevne mreže sistema, koja je za 2000. godinu iznosila 2510 km. Dobijene vrednosti prikazane su na istoj slici (slika 4.7), a slične su kao i za razmatrane dve beogradske opštine.



Slika 4.7: Dijagrami zavisnosti broja kvarova od prečnika cevi

5. ODRŽAVANJE SISTEMA

5.1. Održavanje i raspoloživost sistema

Da bi se postigla visoka funkcionalna pouzdanost sistema neophodno je još u fazi projektovanja predvideti, a u fazi eksploatacije sprovesti pravilno održavanje i obnavljanje sistema, odnosno njegovih elemenata. Ili, još eksplicitnije, jedan od ključnih zahteva pri projektovanju vodoprivrenih sistema jeste da se dispozicija sistema tako odabere i da se elementi sistema i oprema tako izaberu i rasporede u okviru objekata sistema, da sve to omogućava lako održavanje i nesmetane popravke i zamene, tokom operacija obnavljanja sistema. Ovoj problematici se poslednjih godina poklanja sve veća pažnja, pa je, kao rezultat istraživanja u toj oblasti, razvijena i nova naučna disciplina, nazvana *inženjerstvo održavanja* (Maintainability Engineering). Taj pojam se, prema IEC (International Electrotechnical Commission) definiše na sledeći način: "*Inženjerstvo održavanja je tehnička disciplina usmerena na povećanje lakoće održavanja.*"

Pod pojmom održavanja sistema podrazumevaju se aktivnosti, postupci, metode i tehnike kojima se obezbeđuje ispravan rad sistema u određenom vremenskom periodu. Jedna od verovatno najboljih definicija koja opisuje pojam održavanja je sledeća:

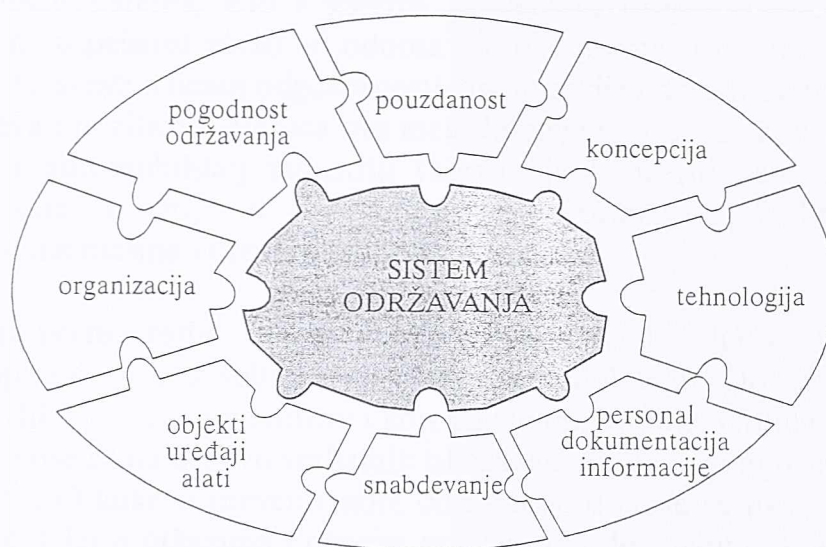
Održavanje je sprovođenje svih mera nužnih da bi jedna mašina, postrojenje ili cela fabrika (celi sistem) funkcionisali na propisan način, razvijajući performanse u propisanim granicama, tj. sa traženim učincima i kvalitetom, bez otkaza i uz propisano obezbeđenje životne okoline, a pod pretpostavkom dobre obezbeđenosti svih uslova, odnosno uz potrebnu logističku podršku.

Dinamika i sadržaj aktivnosti održavanja moraju biti pažljivo izabrani i usklađeni sa stvarnim potrebama, jer u suprotnom (npr. nepažljivo izabrana i previše česta sprovođenja složenih i dugotrajnih operacija održavanja) može doći do nepovoljnih efekata, tj. do smanjenja pouzdanosti elemenata i sistema. Pored toga, troškovi održavanja (koji uključuju radnu snagu na održavanju, rezervne delove, alate, uređaje, objekte za održavanje i dr.) predstavljaju značajnu stavku u strukturi ukupnih troškova tehničkih sistema.

Zbog svega navedenog veoma je značajno održavanje tehničkih sistema, kao i sva druga svojstva tih sistema, posmatrati kompleksno, i sa pozicija projektanta i sa pozicija korisnika sistema, uključujući i međusobne odnose svojstava sistema, kao i odnose sa sistemskim okruženjem. Za tako kompleksno posmatrano održavanja sistema uveden je u upotrebu pojam *sistem održavanja*, koji se može definisati na sledeći način:

Sistem održavanja predstavlja skup elemenata koji omogućavaju da se potrebni postupci održavanja tehničkih sistema sprovode na zahtevan ili propisan način, u datim uslovima i datom intervalu vremena.

Iz navedene definicije jasno je da elementi sistema održavanja mogu biti različiti, a jedna moguća struktura prikazana je na slici 5.1 (Todorović, 1994).



Slika 5.1: Šematski prikaz strukture sistema održavanja

Kao posledica velikog značaja održavanja na pouzdanost sistema, razvijaju se različite metodologije održavanja, koje koriste različite prilaze i "filozofije" održavanja. Najveću pažnju danas privlače sledeće tri metodologije (Minić i Arsenić, 1998):

1) **Održavanje prema pouzdanosti** - zasniva se na poznavanju karakteristika pouzdanosti sistema. Odluke o dinamici i načinu održavanja sistema donose kompetentni (posebno obučeni) radnici, na osnovu trenutnog stanja pouzdanosti sistema, prethodnih stanja i prognoze budućeg stanja pouzdanosti. Prema tome, da bi se ova metodologija mogla primeniti, neophodno je detaljno izučavanje razmatranog sistema, identifikovanje zakonitosti pojave otkaza u sistemu, permanentno osmatranje stanja sistema, kao i posedovanje (formiranje) složenog informacionog sistema, koji korisniku može obezbediti sve potrebne informacije. Za sve vitalne elemente sistema vodi se evidencija o tzv. resursu vremena dozvoljenog korišćenja elementa, pa se zamena elementa obavlja na bazi tog pokazatelja, što podrazumeva postojanje odgovarajućeg informacionog sistema, koji upozorava kada kom elementu ističe propisan resurs vremena. Naravno, to podrazumeva i postojanje zalihe rezervnih delova, koji omogućavaju zamenu bez ikakvih ograničenja. Iz svega navedenog može se zaključiti da je ova metodologija skupa i relativno kruta, pa se uglavnom primenjuje za kapitalna postrojenja, kod kojih neophodna visoka pouzdanost (obezbeđenost) opravdava velika ulaganja u održavanje sistema (vazduhoplovstvo, hemijska industrija, nuklearna energija, energetika i slično).

2) **Totalno produktivno održavanje** - bazira se na širokom i detaljnom uvidu u trenutno stanje sistema, bez potrebe poznavanja prethodnih stanja ili pouzdanosti sistema. Zbog toga je ova metodologija znatno jednostavnija i jeftinija od prethodne, a odluke o održavanju zasnivaju se u velikoj meri na iskustvu donosioca odluke. Suština metodologije je da svi radnici, koji su u kontaktu sa sistemom, imaju pravo i obavezu da prate rad sistema i zaključuju o potrebi eventualnog održavanja. Zbog takvih svojih osobina, ovu metodologiju moguće je, za razliku od prethodne, primeniti za održavanje novih sistema, kao i sistema sa velikim brojem različitih elemenata. Međutim, njena uspešnost zavisi od odnosa radnika prema sistemu, radne discipline, etičkih kvaliteta, svesti o ličnoj odgovornosti, organizacije i drugih faktora. Zbog svojih dobrih svojstava i pozitivnih efekata ova metodologija se sve više razvija i primenjuje, a koristi se u automobilske industriji (koriste je koncerni kao što su Renault, Yamaha, Nissan i dr.), u fabrikama koje proizvode elektroniku, razne visokosofisticirane mašine i uređaje i slično.

3) **Održavanje prema radu*** - je metodologija koja predstavlja kompromis između prethodno opisanih, međusobno suprotnih, metodologija. Donošenje odluke o održavanju razlikuje se za preventivno i korektivno održavanje. Odluke o korektivnom održavanju donose se na osnovu verbalnih iskaza, zapažanja o stanju sistema, kao i na osnovu iskustva. Odluke o preventivnom održavanju donose se na osnovu statistički obrađenih podataka o otkazima i drugim relevantnim događajima koji su se odigrali tokom čitavog "životnog ciklusa" sistema, što znači da je neophodno posedovanje (formiranje) informacionog sistema o radu i održavanju sistema, kao i na osnovu zakonitosti pouzdanosti za vitalne elemente, uređaje i podsisteme (za šta je takođe neophodno posedovanje informacionog sistema) uz uvažavanje iskustva i zapažanja bilo kog subjekta vezanog za sistem. Donosioci odluke o održavanju, prema ovoj metodologiji, su kompetentni radnici i rukovodioci. Razvijena je za potrebe održavanja motornih vozila u velikim voznim parkovima, a može se primeniti i na sve slične tehničke sisteme. Ova metodologija je najpogodnija kao pristup održavanju složenih vodoprivrednih sistema.

Sa stanovišta koncepcije sistema održavanja (odnosno, principa na osnovu kojeg se donose odluke o sprovođenju postupaka održavanja) postoje dva osnovna rešenja: preventivno i korektivno održavanje.

Pod **preventivnim održavanjem** podrazumeva se održavanje koje omogućava smanjenje verovatnoće pojave slučajnih otkaza, ili, drugim rečima, održavanje koje treba da spreči ili odloži pojavu otkaza. Prema ovoj koncepciji postupci održavanja sprovode se pre pojave otkaza, tj. u vremenu kada je sistem u radu, a obuhvataju sledeće aktivnosti: periodična ispitivanja, planske servise i održavanje, nadzor tokom eksploatacije, kontrole, provere i dr.

* Metodologija "Održavanje prema radu" idejno je definisana i na njenom razvoju se radi u CESiL-u - Centru za efektivnost sistema i logistiku Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Pod **korektivnim održavanjem** podrazumevaju se postupci koji se sprovode ukoliko dođe do kvara, odnosno otkaza elementa sistema. Korektivnim održavanjem sistem se iz stanja u otkazu vraća u stanje rada. Ovaj vid održavanja obuhvata aktivnosti vezane za otkrivanje, dijagnostiku i popravku kvara, verifikaciju ispravnosti nakon popravke i dr.

Najvažnije kategorije ove dve koncepcije sistema održavanja, one koje su bitne za planiranje sistema, još od faze njihovog projektovanja, su sledeće (Đorđević, 1990):

- Srednje aktivno vreme korektivnog održavanja (\overline{M}_C)

$$\overline{M}_C = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \overline{M}_{Ci}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

gde su: λ_i - intenzitet otkaza i-tog elementa sistema, \overline{M}_{Ci} - srednje aktivno vreme korektivnog održavanja kada otkaze i-ti element. Srednje aktivno vreme korektivnog održavanja često se naziva i srednje vreme popravke, i označava se sa MTTR.

- Srednje aktivno vreme preventivnog održavanja (\overline{M}_P)

$$\overline{M}_P = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \overline{M}_{Pi}}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

gde je: f_i - frekvencija (učestalost) preventivnog održavanja i-tog elementa sistema, \overline{M}_{Pi} - srednje aktivno vreme preventivnog održavanja i-tog elementa.

- Srednje aktivno vreme korektivnog i preventivnog održavanja (\overline{M})

$$\overline{M} = \frac{\lambda \cdot \overline{M}_C + f \cdot \overline{M}_P}{\lambda + f}$$

pri čemu je:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad f = \sum_{i=1}^n f_i$$

- Srednje vreme između održavanja (MTBM) se definiše kao srednje vreme između svih akcija preventivnog i korektivnog održavanja:

$$MTBM = \frac{1}{\lambda + f}$$

Osnovne karakteristike preko kojih se opisuju i ocenjuju sistemi održavanja su raspoloživost, gotovost i pogodnost održavanja.

Raspoloživost predstavlja verovatnoću da će sistem u određenom vremenskom trenutku zadovoljavajuće funkcionisati, tj. da će biti u radu, ili će biti potpuno raspoloživ da primi opterećenje, ukoliko se nalazi u ulozi operativne, hladne rezerve sistema. U zavisnosti od načina definisanja srednjeg vremena rada i srednjeg vremena održavanja sistema razlikuju se tri vrste raspoloživosti sistema: sopstvena, dostignuta i operativna raspoloživost.

- **Sopstvena raspoloživost** (A_i) je verovatnoća da će sistem uz idealnu organizaciju (nema zastoja zbog rezervnih delova, osoblja, administracije, preventivnog održavanja i dr.) ispunjavati svoju funkciju u datom vremenskom trenutku. Drugim rečima, sopstvenu raspoloživost karakterišu samo unutrašnja tehnička svojstva sistema i ne zavisi od organizacije korišćenja sistema, pa se definiše relacijom

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + \overline{M}_C}$$

gde je MTBF - srednje vreme rada između otkaza.

- **Dostignuta raspoloživost** (A_a) je verovatnoća da će sistem zadovoljavajuće funkcionisati u datom vremenskom trenutku, uz idealnu organizaciju, vodeći računa samo o zastojima zbog preventivnog održavanja sistema.

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}}$$

- **Operativna raspoloživost** (A_o) je verovatnoća da će sistem obavljati svoje funkcije u datom vremenskom trenutku, u realnim eksploatacionim uslovima. To znači da su u ovoj raspoloživosti obuhvaćene sve subjektivne i objektivne nesavršenosti, uključujući i logističko i administrativno vreme čekanja.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT}$$

gde je sa MDT označeno srednje vreme svih zastoja u sistemu: aktivno vreme preventivnog i korektivnog održavanja, srednje logističko vreme čekanja, čekanje na dopremu delova, dolazak ekipe i srednje administrativno vreme čekanja.

Gotovost je karakteristika sistema koja predstavlja isto što i raspoloživost, ali definisana za sisteme koji se ne koriste neprekidno.

$$A_G = \frac{MTBM + RT}{MTBM + RT + MDT}$$

gde je sa RT označeno vreme kada je sistem bio potpuno spreman za rad (korišćenje), ali nije bio uključeno u rad, nego je čekao u ulozi hladne rezerve.

Pogodnost održavanja predstavlja verovatnoću da će se odgovarajući postupci održavanja obaviti do određenog vremena, pod određenim uslovima. Funkcija pogodnosti održavanja definiše se preko kumulativne verovatnoće izražene u funkciji vremena zastoja:

$$P_o(t) = \int_0^t f(t_o) dt_o$$

gde je t_o - vreme trajanja postupka održavanja, a $f(t_o)$ - funkcija gustine verovatnoće vremena trajanja održavanja.

5.2. Preventivno održavanje

Kao što je već ranije istaknuto, pod preventivnim održavanjem se podrazumevaju aktivnosti kojima se smanjuje verovatnoća pojave slučajnog otkaza i sprovodi se dok se sistem nalazi u radu. Ovom vidu održavanja poslednjih godina poklanja se sve veća pažnja, a posebno se ubrzano razvijaju modeli optimizacije sistema preventivnog održavanja.

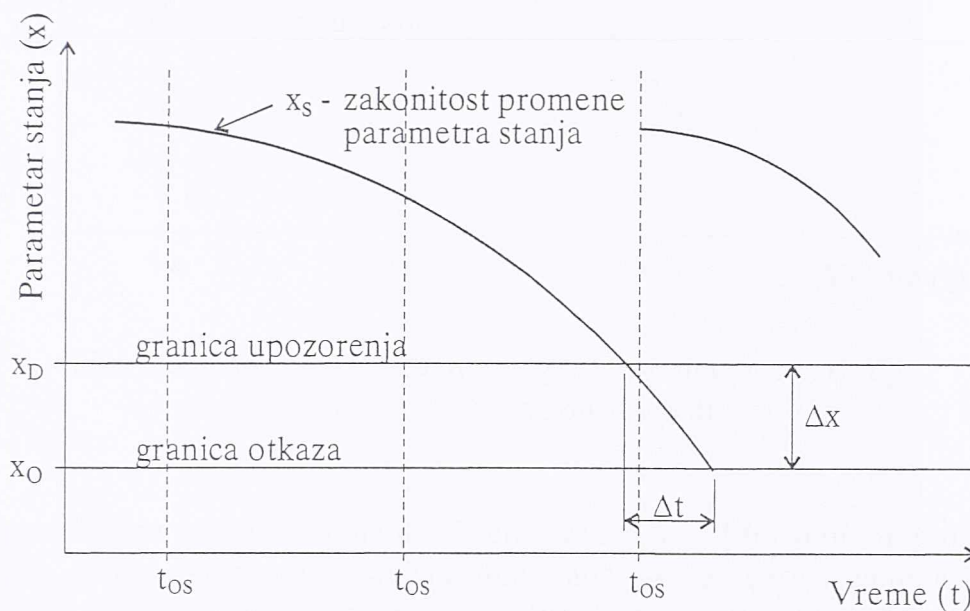
Razvijeni su različiti koncepti preventivnog održavanja, a gotovo svi se zasnivaju na metodologiji održavanja prema pouzdanosti: održavanje po vremenu, održavanje prema stanju, preventivna zamena, osnovno održavanje i dr. U praksi se najčešće koriste koncepti preventivnog održavanja po vremenu i stanju.

Preventivno održavanje po vremenu zasniva se na analizi pouzdanosti sistema i njegovih elemenata, na osnovu kojih se određuju dinamika i postupci preventivnog održavanja, kojima se pouzdanost sistema održava iznad zahtevanog nivoa. Preventivno održavanje po vremenu može se sprovoditi u fiksnim vremenskim intervalima, ili se vremenski interval između njih može menjati u zavisnosti od stanja sistema utvrđenog pri prethodnom pregledu. Važna osobina preventivnog održavanja po vremenu je da se u određenim vremenskim intervalima sprovede utvrđeni postupci održavanja ili zamene elementa, bez obzira na stvarno (konstatovano) stanje elementa.

Preventivno održavanje prema stanju zasniva se na stalnom i sistematskom posmatranju sistema. Nakon analize osmotrenog stanja donosi se odluka o sprovođenju preventivnog održavanja ili o nastavljanju rada do sledeće provere sistema. U zavisnosti od vrste analize na osnovu koje se donose odluke o održavanju razlikuju se dve varijante preventivnog održavanja prema stanju:

- Preventivno održavanje prema stanju sa proverom parametara stanja podrazumeva da se prilikom osmatranja sistema (t_{OS} , slika 5.2) prati neki pokazatelj stanja koji reprezentuje stanje sistema, ili nekog njegovog elementa. Na osnovu dobijenih vrednosti o stanju tog parametra (x_S) i njegove dozvoljene vrednosti (x_D), donosi se odluka o sprovođenju postupka preventivnog održavanja ili nastavku rada sistema.

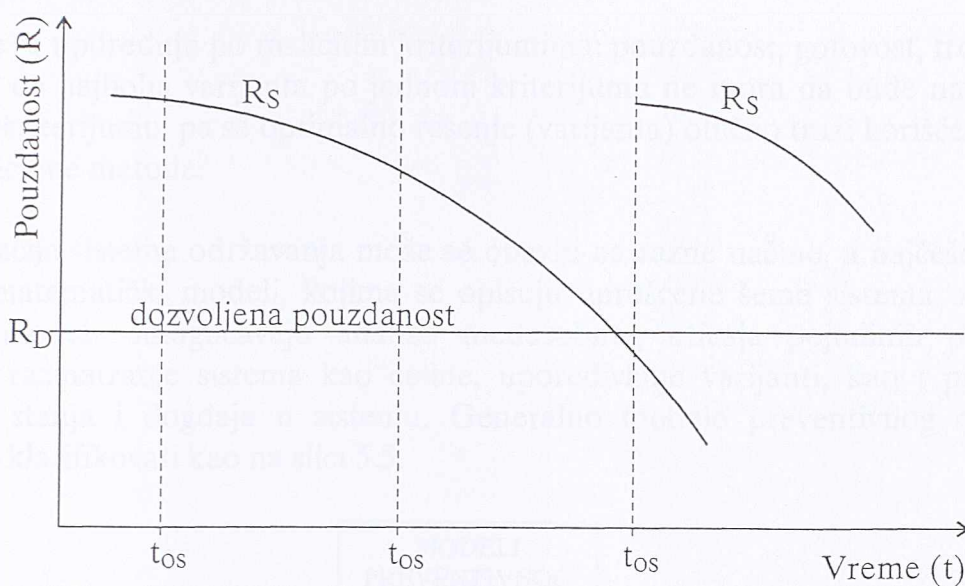
Za svaki parametar stanja definišu se: granica upozorenja, odnosno dozvoljeno stanje parametra pre otkaza (predotkazni nivo) (x_D) i granica otkaza (x_O). Stanja između x_D i x_O definišu signalizacionu toleranciju Δx (slika 5.2), što znači da postoji određeni vremenski period Δt za sprovođenje mera (aktivnosti) preventivnog održavanja.



Slika 5.2: Konceptija preventivnog održavanja prema stanju sa praćenjem parametara stanja

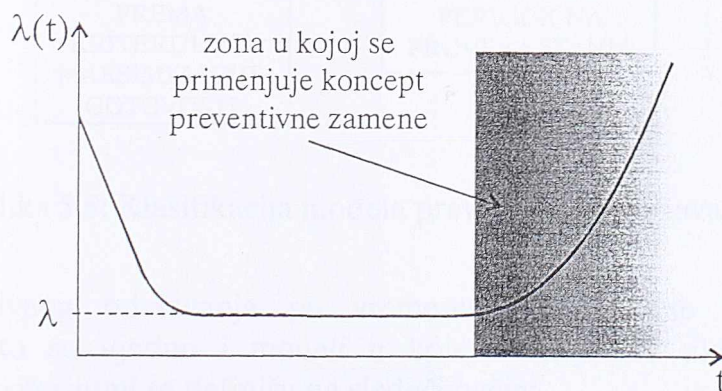
- Preventivno održavanje prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti podrazumeva da se prilikom osmatranja sistema analitički određuje njegova pouzdanost. Kao kriterijum za sprovođenje ili nesprovođenje preventivnog održavanja je ustanovljeni nivo pouzdanosti (R_S , slika 5.3), koga treba ovim postupcima održavati iznad nekog dozvoljenog nivoa (R_D). Drugim rečima, ako se prilikom sprovođenja kontrole nivoa pouzdanosti (osmatranja) (t_{OS}) ustanovi da je pouzdanost sistema, odnosno njegovih delova manja od dozvoljene $R_S < R_D$ preduzimaju se odgovarajuće mere kojima se nivo pouzdanost povećava iznad dozvoljenog nivoa (slika 5.3).

Koncept preventivnog održavanja prema stanju omogućava bolje iskorišćenje radnog veka elementa, nego koncept preventivnog održavanja po vremenu, uz istovremeno manje ukupne troškove održavanja.



Slika 5.3: Konceptija preventivnog održavanja prema stanju sa kontrolom nivoa pouzdanosti

Koncept **preventivne zamene** elementa sistema važan je vid preventivnog održavanja, ali ga treba sprovoditi samo u slučajevima kada se zamenom elementa sigurno doprinosi povećanju pouzdanosti sistema. Zbog toga se ovaj vid preventivnog održavanja sprovodi za one elemente koji su prošli period stabilnog rada i prešli u zonu poznih otkaza (slika 5.4).



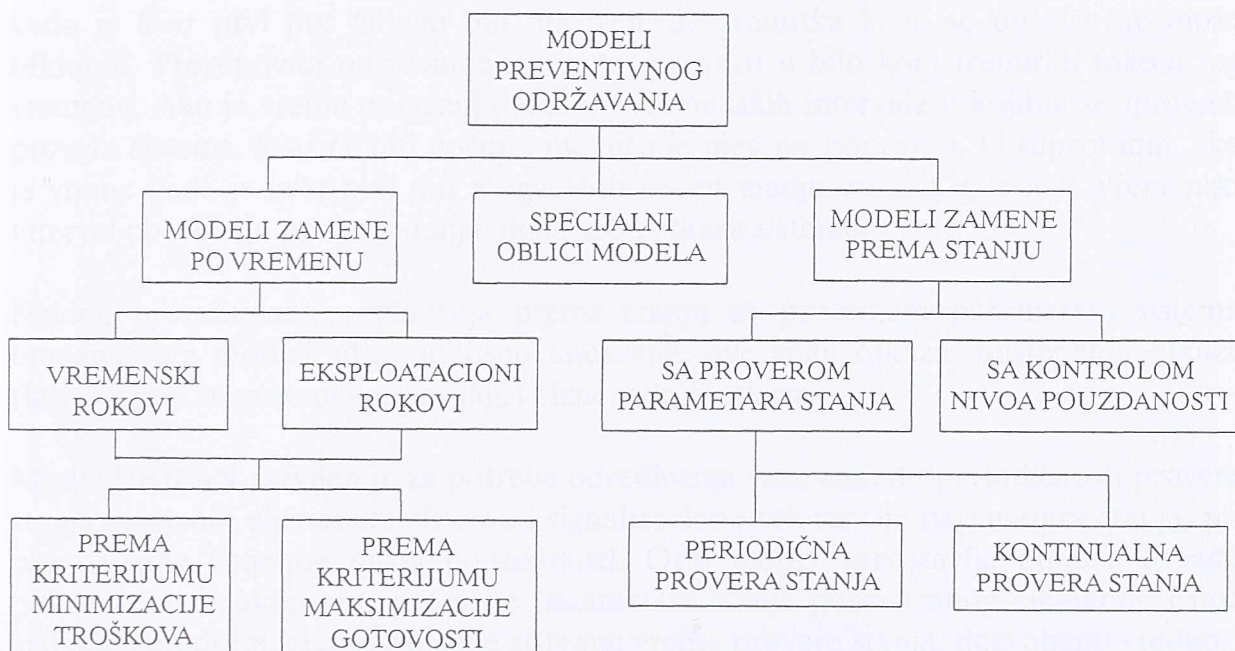
Slika 5.4: Zona primene koncepta preventivne zamene

Osnovno održavanje obuhvata postupke koje, po pravilu, obavlja sam rukovaoc uređajem, bez nekih posebnih tehnoloških zahteva, sa standardnom opremom za održavanje, bez specijalnih alata i uređaja.

Sistem preventivnog održavanja određenog tehničkog sistema može biti rešen na različite načine, korišćenjem različitih konceptija i primenom različitih tehnologija i organizacija održavanja. To podrazumeva da postoji više varijanti rešenja sistema održavanja. Izbor varijante koja će se koristiti u konkretnom slučaju nije lak zadatak -

varijante se upoređuju po različitim kriterijumima: pouzdanost, gotovost, troškovi i dr. Jasno je da najbolja varijanta po jednom kriterijumu ne mora da bude najbolja i po drugom kriterijumu, pa se optimalno rešenje (varijanta) obično traži korišćenjem neke optimizacione metode.

Optimizacija sistema održavanja može se obaviti na razne načine, a najčešće se za to koriste matematički modeli, kojima se opisuju uprošćene šeme sistema održavanja. Ovakvi modeli omogućavaju analizu međusobnog uticaja pojedinih parametara sistema, razmatranje sistema kao celine, upoređivanje varijanti, kao i predviđanje budućih stanja i događaja u sistemu. Generalno modele preventivnog održavanja možemo klasifikovati kao na slici 5.5.



Slika 5.5: Klasifikacija modela preventivnog održavanja

Modeli preventivnog održavanja po vremenu zasnivaju se na pokazateljima pouzdanosti, a to su ujedno i modeli u koje se najčešće uključuju kriterijumi optimizacije. Ti kriterijumi se definišu na sledeći način:

- zadatak maksimizacije pouzdanosti uz troškove kao ograničenje (troškovi moraju biti manji od zadatih),
- zadatak minimizacije troškova uz pouzdanost koja se definiše kao kriterijumsko ograničenje (pouzdanost mora biti veća od neke unapred zadate vrednosti).

U modelima preventivnog održavanja po vremenu određuju se trenuci ili rokovi u kojima se sprovode postupci preventivnog održavanja. Ti rokovi mogu biti izraženi kao kalendarsko vreme od početka eksploatacije sistema (u časovima, danima, mesecima), ili kao eksploatacioni (u pređenim kilometrima ili u vremenu operativnog angažovanja uređaja, tj. preko utroška resursa vremena i sl.). U zavisnosti od

zahtevanog nivoa pouzdanosti i troškova održavanja primenjuju se različite strategije zamene elemenata, a najčešće su: zamena posle određenog vremena (element se menja posle t časova rada od prethodne zamene) i blok-zamena (element se menja na svakih t časova rada bez obzira na to da li je u međuvremenu dodatno menjan).

Modeli preventivnog održavanja prema stanju zasnivaju se na proverama stanja sistema, odnosno njegovih elemenata, pri čemu se odluka o održavanju donosi na osnovu vrednosti određenih reprezentativnih parametara stanja elementa ili na osnovu utvrđenog nivoa pouzdanosti. Razvijen je veliki broj različitih modela ove vrste preventivnog održavanja. DELAY TIME model je jedan od najčešće korišćenih. Prema ovom modelu provere se mogu obavljati u diskretnim vremenskim presecima ili kontinualno, a vreme odlaganja (h) se definiše kao vreme koje protekne od trenutka kada je kvar prvi put mogao biti otkriven, do trenutka kada se on više ne može otkloniti. Preventivno održavanje može se sprovesti u bilo kom trenutku tokom tog vremena. Ako je vreme odlaganja veće od vremenskih intervala u kojima se sprovodi provera sistema, kvar će biti uočen i moguća je njegova popravka. U suprotnom, ako je vreme kada je kvar prvi put mogao biti uočen manje od T-h, gde je T vremenski interval obavljanja provere stanja, doći će do otkaza sistema.

Modeli preventivnog održavanja prema stanju sa praćenjem parametara sistema omogućavaju modeliranje, odnosno uočavanje dve vrste otkaza: postepenih otkaza (kvarovi koji se postepeno razvijaju) i iznenadnih otkaza.

Model EKRAN razvijen je za potrebe određivanja veze između periodičnosti provere stanja sastavnih elemenata sistema i signalizacione tolerancije parametara stanja, pri obezbeđenju željenog nivoa pouzdanosti. Ovaj model uspostavlja odnose između pouzdanosti i zakonitosti promene parametara stanja posmatranog elementa, i ima zadatak da odredi izlazne funkcije sistema: vreme provere stanja, dozvoljenu vrednost parametara stanja i signalizacionu toleranciju parametara stanja u čijim je granicama neophodno sprovesti postupke preventivnog održavanja da bi se sprečila pojava stanja u otkazu.

U modele preventivnog održavanja često se uključuju i elementi fazi logike. Naime, određivanje vremena potrebnih za sprovođenje pojedinih operacija preventivnog održavanja ne mogu se predvideti precizno. Te vremenske intervale proenjuju eksperti (poslovođe u održavanju ili šefovi održavanja), na osnovu iskustva i/ili intuicije. Svoje procene eksperti iskazuju određenim intervalima poverenja, što se može predstaviti određenim fazi brojevima. Sabiranjem fazi brojeva pojedinačnih vremena može se doći do fazi broja ukupnog vremena preventivnog održavanja. Pri tome se određenim fazi previlima definišu odnosi pojedinih operacija, određene operacije mogu se delimično ili u potpunosti preklapati, dok se određene operacije mogu sprovesti tek nakon završetka prethodne operacije.

5.3. Korektivno održavanje

Pod korektivnim održavanjem podrazumevaju se popravke sistema, tj. njegovih elemenata, koje se sprovode tek kada dođe do otkaza sistema, odnosno da bi se sistem vratio iz stanja u otkazu u stanje u radu. Održavanjem prema ovom konceptu u potpunosti se koristi radni vek elementa, ali u sistemu dolazi do zastoja. To znači da se na taj način ne obezbeđuje zahtevani nivo probabilističke efektivnosti sistema.

Sa stanovišta vodoprivrednih sistema ovaj vid održavanja je veoma značajan, jer je sa operativnog stanovišta kritično ono vreme koje je potrebno za sprovođenje pojedinih operacija korektivnog održavanja. Zbog toga sistem mora biti dispoziciono tako rešen da se sve operacije korektivnog održavanja mogu obaviti u određenom vremenskom periodu, što se postiže ugradnjom određenih havarijskih i remontnih zatvarača, obilaznih cevovoda, rezervoara određene zapremine i sl.

Modeli korektivnog održavanja manje su razvijeni od modela preventivnog održavanja, jer se njima ne rešava problem optimizacije sistema održavanja, nego se samo omogućava sprovođenje postupka korektivnog održavanja sa minimalnim troškovima ili u što kraćem vremenu. Srednja vrednost troškova održavanja po jedinici rada sistema (C_o), može se definisati na sledeći način:

$$C_o = \frac{C_\Sigma}{T_o}$$

gde je:

C_Σ - ukupna (srednja) vrednost troškova održavanja, koja se sastoji od:

$$C_\Sigma = C_{rd} + C_{rs} + C_{em} + C_{po}$$

C_{rd} - troškovi rezervnih delova

C_{rs} - troškovi radne snage

C_{em} - troškovi ostalih energetske i materijalne resursa utrošene tokom održavanja

C_{po} - troškovi koji se javljaju kao posledice otkaza

T_o - matematičko očekivanje dužine rada sistema bez otkaza koje se izražava u jedinicama rada sistema: vreme, kilometri i dr.

Iz prethodno izloženog se može zaključiti da je u slučaju vodoprivrednih sistema srednje vreme trajanja korektivnog održavanja, odnosno vreme popravke kvara, ključni parametar od koga, pored intenziteta otkaza, zavisi raspoloživost celog sistema. Vreme korektivnog održavanja elemenata vodovodnih sistema, odnosno cevovoda, kao njegovih osnovnih elemenata, sastoji se od sledećih komponenti vremena:

- vreme otkrivanja, lociranja i dijagnostike kvara,
- logističko vreme (nalaženje delova opreme, okupljanje ekipe za popravku i transport materijala i ljudstva do mesta popravke),

- vreme popravke kvara,
- vreme verifikacije ispravnosti i puštanja u rad.

Vreme otkrivanja i lociranja kvara

Vreme otkrivanja i lociranja kvara u vodovodnim sistemima, za razliku od nekih drugih sistema, kao što su npr. mašinski sistemi, značajno učestvuje u ukupnom vremenu korektivnog održavanja. Ovo vreme razlikuje se za regionalne i gradske distributivne sisteme, a u velikoj meri zavisi od oskultacionog sistema. Kada je reč o kvarovima na cevovodu mogu se generalno izdvojiti dve vrste kvarova:

- trenutni kvar, koji nastaje pri pucanju cevi,
- postepeni razvoj kvara, koji postepeno smanjuje performanse sistema, do potpunog otkaza, npr. širenje pukotine na cevi.

Navedene dve vrste kvara uočavaju se na različite načine, pri čemu je, naravno, vreme potrebno za uočavanje trenutnih kvarova manje od vremena potrebnog za uočavanje kvarova koji se postepeno razvijaju.

Kod velikih regionalnih sistema neophodno je pažljivo projektovanje oskultacionog sistema, kao i sistema zatvarača, kako bi se za popravku izolovao što kraći segment cevovoda. Veći broj zatvarača omogućava pražnjenje, a nakon popravke kvara, dezinfekciju i punjenje cevovoda manje dužine, što naravno smanjuje vreme potrebno za sprovođenje tih operacija. Od načina projektovanja oskultacionog sistema presudno zavisi brzina otkrivanja kvara, s obzirom da je reč o linijskim sistemima velike dužine (cevovodi su dužine i po nekoliko stotina kilometara). Naravno, neki kvarovi su takvi da se lako uočavaju na terenu - pucanjem cevi regionalnog sistema dolazi do izlivanja velike količine vode, što se, u slučajevima kada cevovod prolazi pored prometnih saobraćajnica ili naseljenih mesta, može uočiti. Međutim, u slučaju kada cevovodi prolaze kroz malo prometne predele, dalje od saobraćajnica i naselja, kvarovi se teško detektuju vizuelno, već se to može pravovremeno ostvariti samo ako postoji odgovarajući merno-informacioni sistem, koji signalizira promenu uobičajenih radnih performansi sistema. Osmatranje složenih vodoprivrednih sistema biće detaljnije razmatrano u delu 5.4.

U gradskim distributivnim sistemima situacija je znatno složenija, zbog postojanja velikog broja cevi malih prečnika, gušće mreže i dr. Kvarovi se u ovim sistemima uglavnom uočavaju tek sa pojavom vode na površini terena. Početne faze razvoja kvara obično nije moguće uočiti, ili ako se određenim hidrauličkim analizama ustanove zone u kojima se javljaju gubici, lociranje kvara obavlja se samo za zone sa najvećim gubicima i to manuelno, testiranjem i metodama koje se zasnivaju na zvuku i korelaciji šumova procurivanja. Takav način lociranja kvara je zahtevan proces i po vremenu i po količini angažovane radne snage, pa troškovi više puta premašuju troškove zbog gubitaka vode, zbog čega se popravci pristupa uglavnom tek nakon potpunog razvoja kvara, odnosno pucanja cevi. (Praksa eksploatacije vodovodnih sistema u velikim naseljima pokazuje da se ne može mnogo računati na operativnost

građana u prijavi kvara. Građani kvarove prijavljuju sa zakašnjenjem, računajući da za javljanje ima "pozvanijih" od njih. Interveniraju tek kada je kvar takav da se odrazio na njihovo vlastito snabdevanje. Zbog toga je vreme prijave i detekcije kvara čak i u velikim sistemima dosta dugo - ukoliko ne postoji monitoring sistem za praćenje ponašanja sistema u realnom vremenu.)

Navedeno, čisto ekonomsko, stanovište dovelo je do relativno visokog nivoa gubitaka. Oni se često smatraju prihvatljivim ako su do 15 - 20% od ukupnih količina isporučene vode. Tako su npr. gubici u 10 najvećih vodovodnih kompanija u Velikoj Britaniji iznosili 30%. U tabeli 5.1 dat je pregled gubitaka vode u vodovodnim sistemima nekih većih evropskih gradova i gradova Jugoslavije.

Zbog sve manjih količina dostupne kvalitetne vode i sve većih potreba za vodom, voda postaje ograničavajući faktor razvoja ljudskog društva, a njena cena sve više raste, odnosno postaje ekonomska kategorija, kao svaka druga roba. U takvim okolnostima, pred vodovodne sisteme se postavljaju sve strožiji zahtevi raspoloživosti i efektivnosti, što dalje zahteva smanjenje gubitaka vode, smanjenje vremena korektivnog održavanja i slično. Da bi se ovi zahtevi mogli ispuniti neophodno je postojanje savremenog, pažljivo projektovanog oskultacionog sistema (sistema nadzora), koji će omogućiti smanjenje vremena potrebnog za uočavanje i lociranje kvara.

Tabela 5.1: Gubici vode (u odnosu na ukupnu potrošnju) zabeleženi tokom devedesetih godina u nekim većim gradovima Evrope i Jugoslavije (Kujundžić, 1996)

grad	gubici vode (%)
Amsterdam (1990)	22
Beč (1990)	12
Budimpešta (1990)	11.7
Cirih (1990)	7.1
Hamburg (1989)	3.8
Insbruk (1988)	7.5
London (1988)	19
Pariz (1990)	9
Rim (1987)	25
Štokholm (1990)	21
Beograd (1987)	22
Zagreb (1987)	22.6
Ljubljana (1987)	30.7

grad	gubici vode (%)
Beograd (1995)	26.2
Čačak (1995)	36
Kragujevac (1994)	30
Leskovac (1994)	16.8
Loznica (1994/95)	25
Pančevo (1995)	20
Pirot (1994)	20
Podgorica (1995)	34.5
Sombor (1994)	28
Subotica (1995)	19
Užice (1994)	36
Valjevo (1994)	32
Zaječar (1994)	20

Praksa je pokazala da je pogodno sistem za nadzor operativno organizovati na više nivoa. Smatra se da je sistem monitoringa vodovodnih sistema pogodno organizovati na četiri nivoa (slika 5.6) (Obradović, 1999).

I) Sistem za alarm i opšti nadzor pokriva najvažnije objekte u sistemu i pokazuje da li vodovod u celini radi dobro. Broj instrumenata je relativno mali (u odnosu na ostale nivoe) i iznosi oko 20 - 100 instrumenata. Vreme odziva na ovom nivou je kratko (1 - 15 minuta). U slučaju ispada nekog elementa upozorava se osoblje vodovoda - od dežurnog operatera do direktora, zavisno od ozbiljnosti krize.

II) Sistem za bilansiranje količine vode omogućava stalni uvid u proizvodnju i potrošnju vode, kao i stanje u rezervoarima. Bilans se radi na nivou celog sistema, ali i za pojedine delove sistema. Broj instrumenata je nešto veći nego na prethodnom nivou (100 - 300), a vreme odziva sistema je od 6 do 24 časa.

III) Sistem za kontrolu gubitaka se sastoji od većeg broja instrumenata (1000 - 5000) koji mere potrošnju vode u manjim delovima distribucionog sistema, kao i kod većih potrošača. Na osnovu izmerenih podataka i podataka o stvarnoj potrošnji moguće je odrediti gubitke u sistemu. Vreme odziva ovog sistema je od 7 do 30 dana.

IV) Sistem za merenje individualne potrošnje je najnižeg nivoa, ali obuhvata sve potrošače. Broj instrumenata zavisi od veličine sistema (20000 - 1 milion), a vreme odziva je od 1 do 6 meseci.



Slika 5.6: Organizacija sistema monitoringa vodovodnih sistema

Svaki vodovod ima sva četiri sistema osmatranja, a razlike se javljaju u metodama rada i raspoloživoj tehnologiji. Najveća pažnja poslednjih godina, kada je reč o gradskim distributivnim sistemima, usmerena je na treći nivo - sistem kontrole gubitaka, odnosno na projektovanje instrumenata i konfiguracije sistema ovog nivoa tako da odgovore postavljenim zahtevima. Slično je i sa sistemima osmatranja najvišeg nivoa "alarm i nadzor", koji se u poslednje vreme sve rigoroznije projektuju i eksploatišu, a od posebnog su značaja za regionalne vodovodne sisteme.

Vreme pražnjenja cevovoda i popravke kvara

Vreme pražnjenja cevovoda u najvećoj meri zavisi od načina projektovanja sistema zatvarača. Ovo je posebno značajno za regionalne sisteme, kod kojih se zapažaju

deonice dužine i po nekoliko desetina kilometara. Kod ovih cevovoda, kao što je već ranije istaknuto, veći broj zatvarača, odnosno smanjenje dužine deonice cevovoda koja može da se isključi, utiče na smanjenje vremena pražnjenja, ali isto tako i vremena potrebnog za dezinfekciju i ponovno punjenje cevovoda, što može značajno uticati na smanjenje ukupnog vremena korektivnog održavanja sistema.

Vreme popravke kvara zavisi od obučenosti ekipe koja kvar popravlja, ali i od rezervnih delova, lakoće pristupa kvaru (posebno značajno za regionalne sisteme), raspoložive mehanizacije i dr.

5.4. Sistemi osmatranja vodovodnih sistema

Pravilno upravljanje i održavanje velikih vodovodnih sistema danas je gotovo nemoguće bez dobro projektovanog i efikasnog oskultaciono-informacionog sistema. Ovi sistemi imaju zadatak da prikupe podatke o stanjima određenih parametara u sistemu (najčešće su to protoci, pritisci i nivoi), da te podatke obrade i prenesu u bazu podataka gde se trajno čuvaju i iz koje se preuzimaju u čitavom procesu upravljanja sistemom. Za opisane sisteme obično se koriste termini: telemetrijski sistemi, sistemi daljinskog upravljanja (SDU) ili SADA sistemi (Systems Control And Data Acquisition).

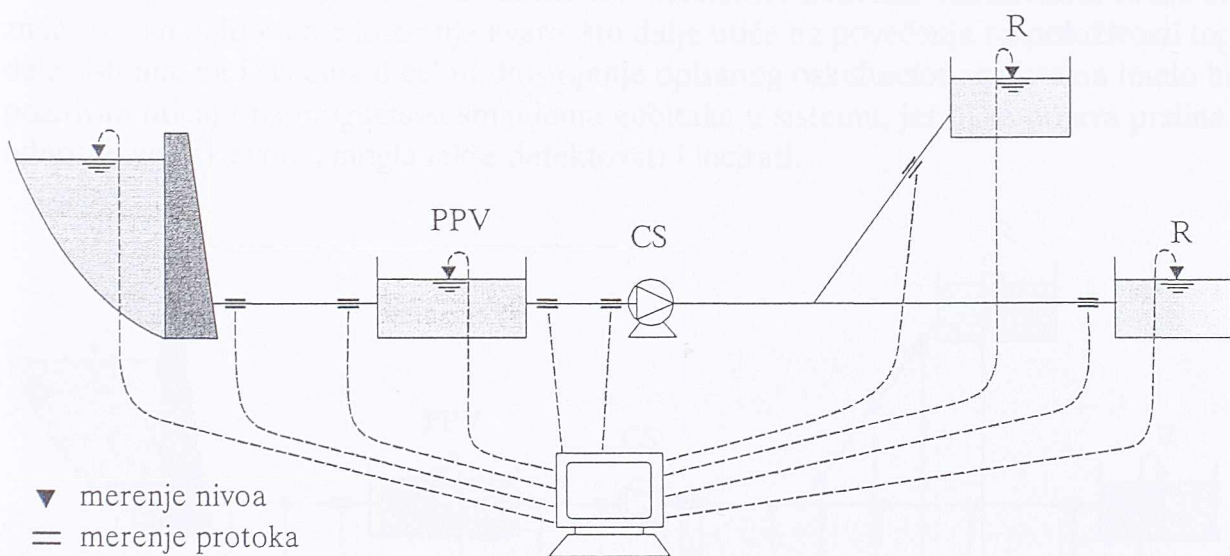
Osnovu navedenih sistema predstavljaju dobro formirani sistemi merenja, sa digitalnim instrumenata visokog kvaliteta, kojima se pokrivaju svi važniji elementi sistema i sa kontinualnim osmatranjem svih relevantnih parametara sistema: protoci i brzina vode, pritisci u mreži, nivoi vode u rezervoarima i bunarima, snaga pumpi, kvalitet vode, i slično. Prikupljeni podaci prosleđuju se informacionom sistemu gde se, nakon obrade podataka, dobijaju informacije o stvarnom stanju sistema i pojedinih njegovih delova. Opisani oskultaciono-informacioni sistem može se povezati i sa drugim sistemima iz svog okruženja, kao što su geografski informacioni sistema (GIS), laboratorijski informacioni sistem (LIS) koji obezbeđuje podatke o kvalitetu vode, poslovni sistemi, i drugi sistemi.

U osavremenjavanje i modernizaciju vodovodnih sistema krenulo se još pre tridesetak godina, ali se poslednjih desetak godina ovoj oblasti poklanja posebna pažnja. Osnovni razlog je sve izraženija kriza vode u svetu, koja se javlja kao posledica nesklada između raspoloživih kvalitetnih vodenih resursa i potreba za vodom. U takvim uslovima voda postaje roba, koja ima svoju cenu, na žalost sve veću. Pored toga, vodovodni sistemi, kao i svi drugi tehnički sistemi, prolaze kroz fazu ubrzanog tehničkog i tehnološkog razvoja, prerastajući u preduzeća visoke tehnologije i informatike, gde je ostvareni profit jedan od osnovnih kriterijuma. Zbog svega toga vodovodni sistemi moraju da zadovolje osnovna tri zahteva, koja se pred njih postavljaju: ekonomičnost, efikasnost i pouzdanost. Osnovni preduslov za postizanje navedenih ciljeva je posedovanje savremenog oskultacionog sistema, bez koga je praktično nemoguće pratiti stanja i

ponašanja sistema, adekvatno upravljati sistemom, smanjivati gubitke, locirati kvarove u sistemu, posebno na cevovodu, i dr.

U našoj zemlji se problematika osmatranja vodovodnih (i drugih vodoprivrednih) sistema razvijala dosta sporo. U elemente velikih regionalnih vodovodnih sistema ugrađuju se uređaji za merenje određenih parametara sistema. Međutim, ovi instrumenti ugrađuju se uglavnom samo u blizini nekih većih elemenata sistema (rezervoari, pumpne stanice) i to isključivo u cilju prikupljanja podataka neophodnih za pravilno upravljanje sistemom.

Na slici 5.7 data je uprošćena šema jednog regionalnog vodovodnog sistema. Kao što se vidi, merno regulacioni blokovi (MRB), čiji je osnovni zadatak regulisanje i merenje protoka, nalaze se ispred rezervoara i crpnih stanica. Podaci se sa mernog mesta prosleđuju direktno informacionom sistemu. Opisani način osmatranja omogućava pravovremeno regulisanje protoka, odnosno upravljanje sistemom, ali ne i efikasnu lokalizaciju mesta na kome se javljaju kvarovi, odnosno gubici vode. Naime, čitavi delovi sistema, cevovodi, koji su obično dugi i po više desetina kilometara, ostaju neosmotreni.



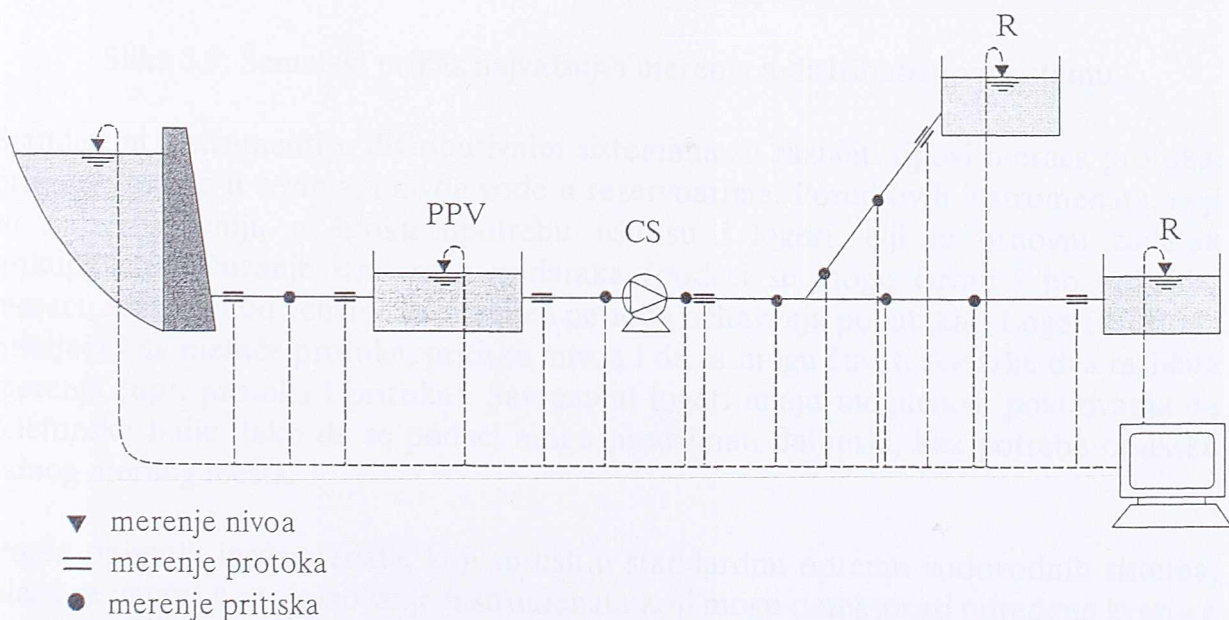
Slika 5.7: Šema uobičajenog sistema osmatranja dela vodovodnog sistema

Sa stanovišta pouzdanosti cevovodi su upravo najosetljiviji delovi sistema, jer su sastavljeni od velikog broja serijski vezanih elemenata (dužina jednog elementa cevi obično iznosi oko 10 m). U takvim podsistemima pouzdanost, odnosno verovatnoća otkaza može biti značajna, čak i ako je pouzdanost pojedinih elemenata relativno velika. Na cevovod deluju i različiti spoljašnji uticaji: temperatura, sleganje tla, odroni, pomeranje zemljišta, podzemne vode, hemijski sastav tla i dr. Neizvesnost ovih podsistema povećava i činjenica da se elementi cevovoda ugrađuju na licu mesta, što znači da kvalitet spoja, pa time i dela sistema, zavisi od različitih spoljnjih uticaja, kao i ljudskog faktora.

Zbog svega navedenog može se zaključiti da su, sa stanovišta pouzdanosti, cevovodi obično kritični elementi u velikim vodovodnim sistemima. Da bi se povećala raspoloživost tih delova sistema, kao popravljivih elemenata, neophodno je vreme popravke kvara svesti na najmanju moguću meru.

Pored toga što su veoma dugački, cevovodi regionalnih vodovodnih sistema često prolaze kroz teško prohodne predele, koji ne omogućavaju pristup motornim vozilima. Lokalizacija kvara u takvim uslovima može biti vremenski veoma zahtevna operacija, jer je često neophodno obići delove cevovoda (pešice) dužine i do nekoliko desetina kilometara. Ovo se posebno odnosi na slučajeve delimičnog otkaza cevi, kada se na osnovu bilansa količina vode utvrdi da se u sistemu gubi određena količina vode (obično se količina veća od 5%, smatra nezanemarljivom količinom za regionalne sisteme), i za veoma propusne terene, kada se zbog velike vodopropusnosti voda ne pojavljuje na površini terena.

Da bi se vreme lociranja kvara što više smanjilo neophodno je formiranje oskultacionog sistema duž trase cevovoda, koji bi služio za prikupljanje podataka o protocima (pritiscima) na određenim mernim mestima u sistemu (slika 5.8). Smanjivanjem rastojanja između tih mernih mesta, na nekoliko kilometara, može se značajno smanjiti vreme lociranja kvara, što dalje utiče na povećanje raspoloživosti tog dela sistema, pa i sistema u celini. Postojanje opisanog oskultacionog sistema imalo bi pozitivan uticaj i na mogućnost smanjenja gubitaka u sistemu, jer bi se pojava prslina, odnosno gubitka vode, mogla lakše detektovati i locirati.

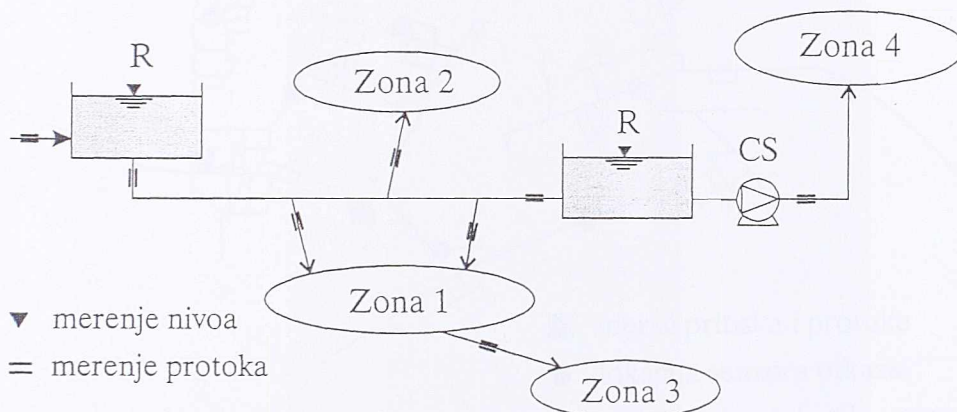


Slika 5.8: Šema sistema osmatranja dela vodovodnog sistema

Ugrađivanje zatvarača na pojedinim mestima na trasi cevovoda, koji bi imali karakter remontnih zatvarača, dodatno bi smanjilo vreme popravke kvara, jer bi se, zbog

moгуćnosti isključenja kraće deonice cevovoda, smanjilo vreme potrebno za pražnjenje, dezinfekciju i ponovno punjenje cevovoda.

U gradskim distributivnim sistemima, osnovni podaci koji se uobičajeno mere su: dotok vode u glavni rezervoar, iz regionalnog sistema ili lokalnog izvorišta, nivoi vode u gradskim rezervoarima i protoci kroz pumpnu stanicu. Poslednjih godina se, kao što je istaknuto u prethodnom delu, najveća pažnja usmerava na borbu protiv gubitaka, koji mogu biti značajni. Zbog toga se distributivni sistemi, koji su obično veoma složenih konfiguracija, dele na veći broj manjih zona potrošnje (slika 5.9), čije je stanje lakše pratiti i kontrolisati. Ove zone potrošnje obično predstavljaju zatvorene celine, kojima se kontroliše dotok i eventualno protok vode prema drugim zonama, kao i naravno potrošnja vode od strane korisnika. Na ovaj način, pored lakšeg upravljanja, moguće je lakše lokalizovati gubitke i kvarove u sistemu.

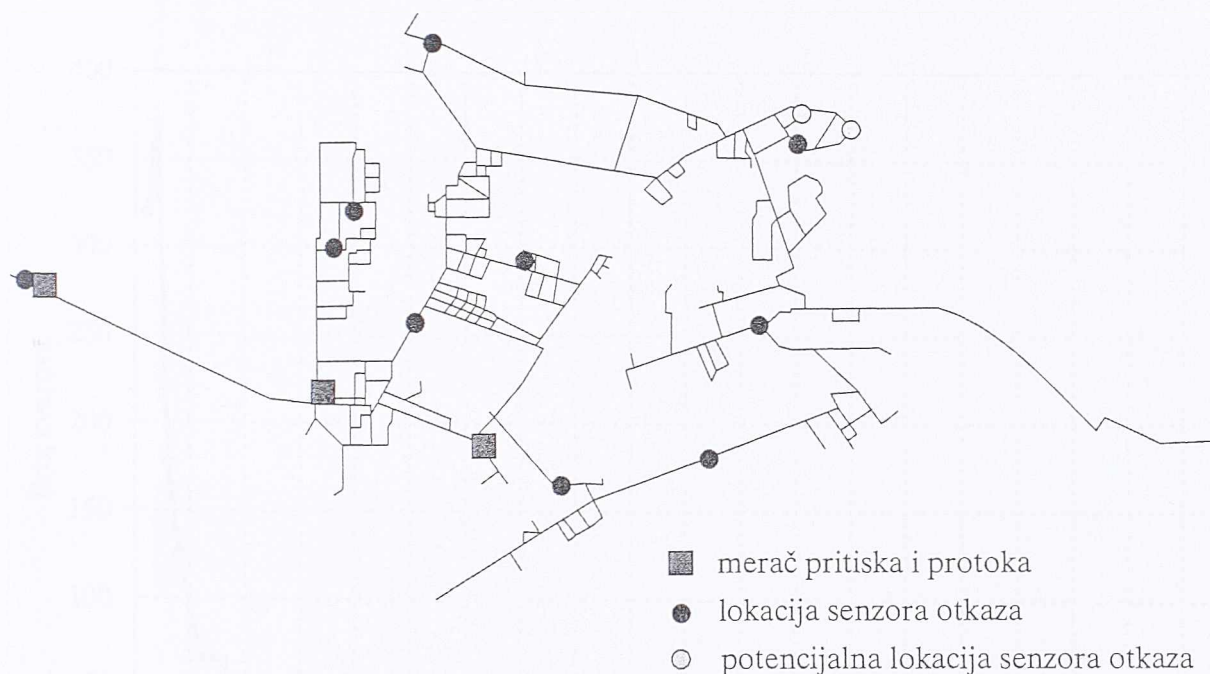


Slika 5.9: Šematski prikaz najvažnijih merenja u distributivnom sistemu

Standardni instrumenti u distributivnim sistemima su različiti tipovi merača protoka, pritiska i brzine u cevima, i nivoa vode u rezervoarima. Pored ovih instrumenata, koji su najzastupljeniji, u široku upotrebu ušli su i logeri, čiji je osnovni zadatak prikupljanje i čuvanje izmerenih podataka (podaci se mogu čuvati i po nekoliko meseci, što zavisi od veličine memorije i perioda očitavanja podataka). Logeri se mogu priključiti na merače protoka, pritiska, nivoa i dr., a mogu čuvati podatke dva različita merenja (npr. protoka i pritiska). Savremeni logeri imaju mogućnost povezivanja na telefonske linije, tako da se podaci mogu preuzimati daljinski, bez potrebe obilaska samog mernog mesta.

Pored opisanih instrumenata, koji su ušli u standardnu opremu vodovodnih sistema, ulažu se naponi u projektovanje instrumenata koji mogu detektovati određene kvarove - prsline (pukotine) na cevima. Iako veoma korisni, ovi uređaji još uvek nisu ušli u širu upotrebu jer su relativno skupi, a za adekvatno osmatranje potreban je veliki broj tih uređaja (nekoliko puta veći od broja merača protoka i pritiska), odnosno dobra prostorna pokrivenost osmatranog dela sistema (slika 5.10). Međutim, pretpostavlja se da će se, s obzirom na brz razvoj tehnike, brzo naći rešenje za opisane probleme. Već sada je u probnom radu uređaj "senzor otkaza", čije su glavne karakteristike mali

troškovi proizvodnje, jednostavna ugradnja i pouzdanost u radu (Khan et al., 2002). Princip rada "senzora otkaza" zasniva se na merenju mutnoće vode, odnosno na pretpostavci da iznenadni otkazi (pucanje) cevi utiču na samu vodu u cevi, odnosno na njenu mutnoću, koja se verovatno javlja kao posledica pokretanja sedimenta u cevi. Iz svega navedenog jasno se može zaključiti da postojanje dobro projektovanog oskultacionog sistema sa savremenim instrumentima, kao i adekvatne programske podrške, važan su preduslov za dobro upravljanje vodovodnim sistemom.



Slika 5.10: Primer rasporeda senzora otkaza u delu distribuionog sistema

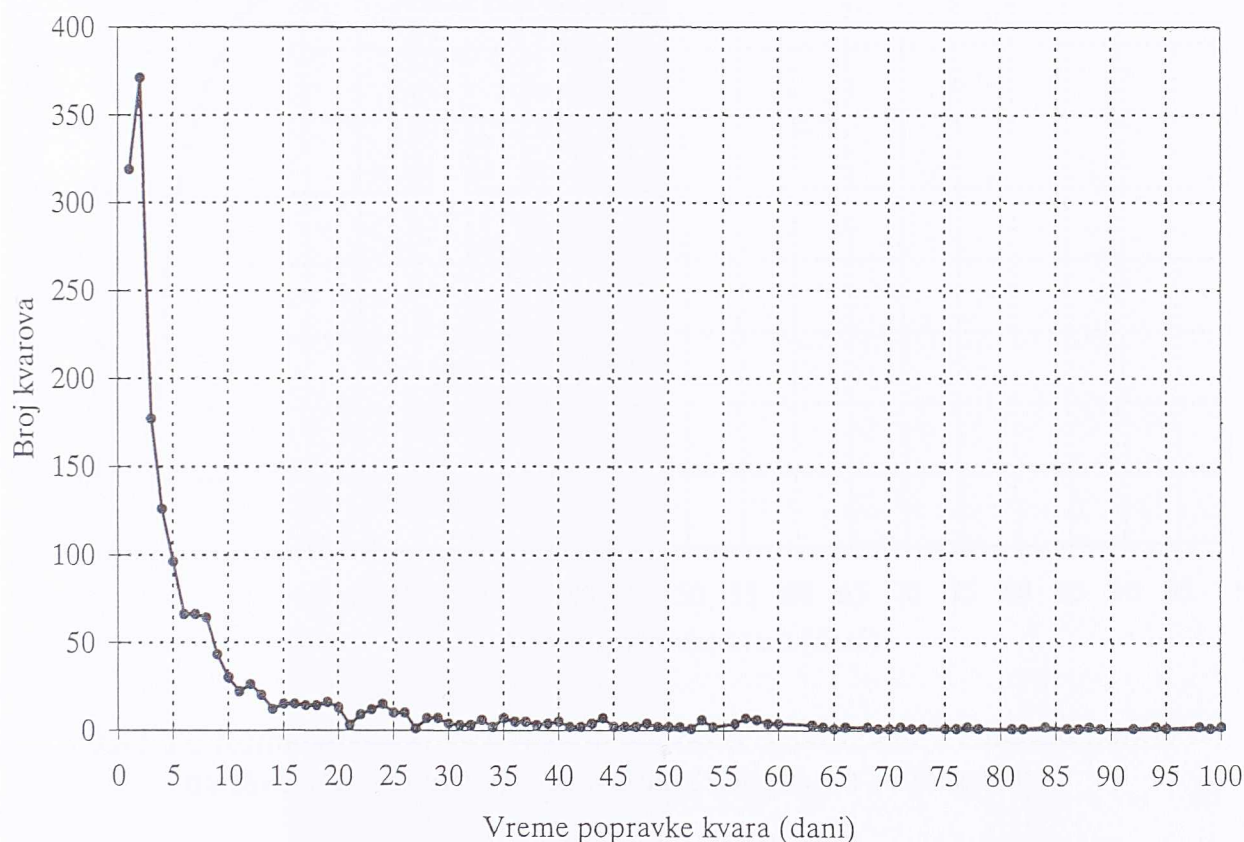
* * *

Analiza vremena korektivnog održavanja urađena je za beogradski vodovodni sistem, za 2000. godinu. Obradeni su podaci o kvarovima na cevima (ukupno 1771 kvar), sa aspekta vremena koje je bilo potrebno za popravku tih kvarova. Prosečan dnevni broj prijavljenih kvarova za razmatranu godinu iznosio je oko 5 kvarova/dan. Najveći broj kvarova javljao se u letnjim mesecima. Maksimalna vrednost zabeležena je u mesecu avgustu (oko 7 kvarova/dan), sa najvećom dnevnom vrednošću od 13 kvarova/dan (27. i 29. 08. 2000.). Od februara do maja uočava se smanjenje broja kvarova, sa srednjom mesečnom vrednošću od oko 3.5 kvarova/dan, sa najmanjim brojem prijavljenih kvarova u aprilu (3.2 kvara/dan).

Na slici 5.11 prikazan je dijagram broja popravljenih kvarova za određeni vremenski period, odnosno broj kvarova po dužini trajanja korektivnog održavanja. Usvojen je vremenski korak diskretizacije od jednog dana, što znači da je npr. za trajanje korektivnog održavanja od tri dana, kvar popravljen u vremenskom intervalu od 48 -

72 sata. Primećuje se da je najveći broj kvarova popravljen za dva dana (20.9% kvarova), zatim za jedan (18%) i tri (10%) dana.

Na slici 5.12 data je kumulativna kriva vremena popravke, izražena u procentima popravljenih kvarova za određeno vreme, sa koje se jasno vidi da se za period od tri dana popravi oko 50% prijavljenih kvarova. Vremenski period od tri dana se najčešće u literaturi uzima kao vreme korektivnog održavanja, odnosno srednje matematičko očekivanje vremena popravke kvara. Za beogradski vodovodni sistem ova vrednost je znatno veća (iznosi oko 11 dana).

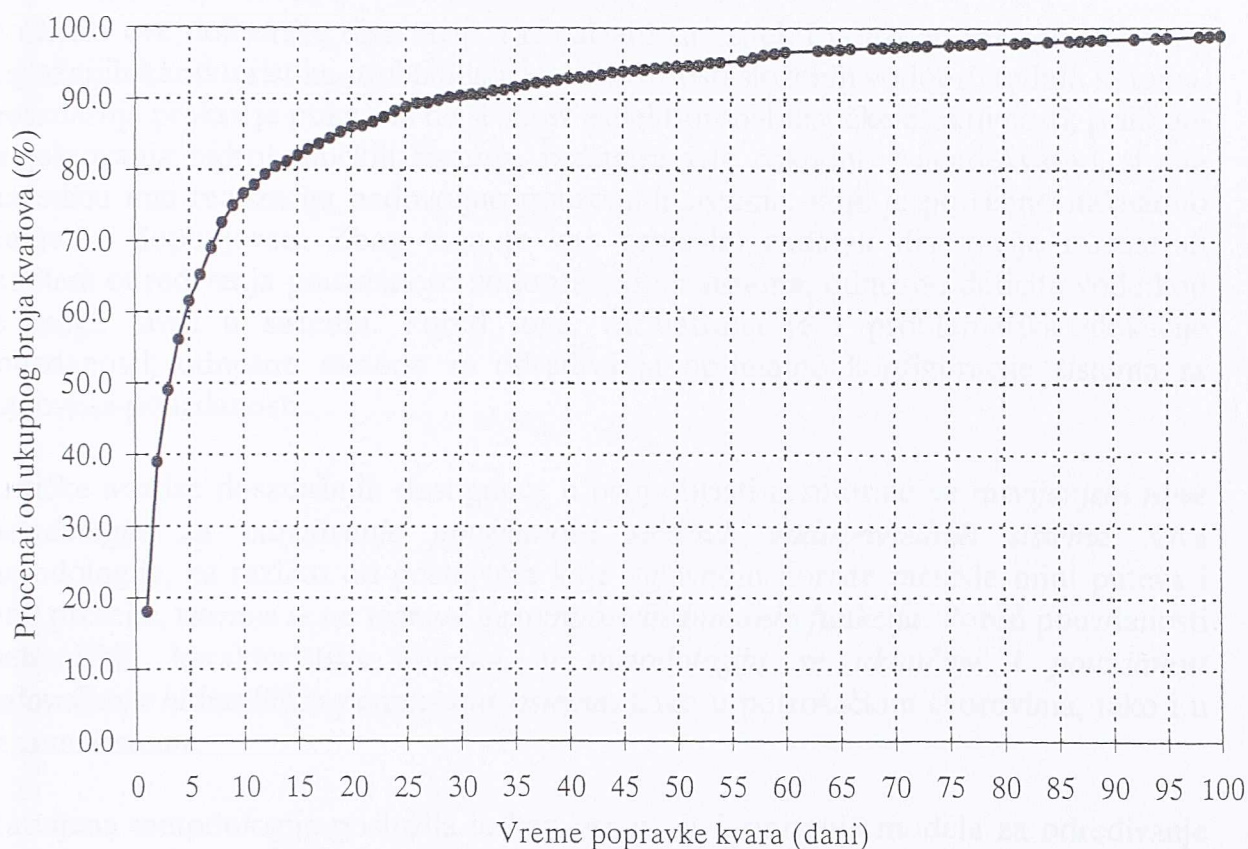


Slika 5.11: Dijagram broja izvršenih popravki za određeni vremenski period na cevima beogradskog vodovodnog sistema, za 2000. godinu

Treba naglasiti da je sprovedena analiza obuhvatila kvarove na cevima beogradskog vodovodnog sistema svih prečnika. Međutim, proračuni pouzdanosti rade se za osnovnu mrežu, što znači da su prečnici cevi gotovo uvek veći od 100 mm (obično su 300 mm i više, što zavisnosti od veličine sistema), pa je vreme korektivnog održavanja nešto manje. Za beogradski sistem, za sve prečnike preko 100 mm, iznosi oko 9 dana, a procenat popravljenih kvarova u prva tri dana je preko 55%.

Prilikom analize podataka o vremenu popravke kvarova na cevima beogradskog vodovodnog sistema za 2000. godinu, treba imati na umu i činjenicu da je razmatrana godina bila specifična (godina posle NATO bombardovanja), jer se na popravku kvara

čekalo zbog nedovoljnih sredstava za nabavku goriva, zbog nedostatka rezervnih delova kako za mehanizaciju, tako i za samu popravku kvara i mnogih drugih neuobičajenih događaja.



Slika 5.12: Kumulativna kriva izvršenih popravki za određeni vremenski period na cevima beogradskog vodovodnog sistema, za 2000. godinu

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

U okviru ove doktorske disertacije razmatrani su aspekti pouzdanosti kao jedne od najvažnijih karakteristika probabilističke efektivnosti složenih vodoprivrednih sistema. Dosadašnja praksa je pokazala da se čitav aspekt probabilističke efektivnosti, prilikom projektovanja hidrotehničkih sistema, razmatra vrlo oskudno i neadekvatno, što za posledicu ima realizaciju nedovoljno pouzdanih sistema, koje je potrebno naknadno menjati i dopunjavati. Zbog toga je kao centralni zadatak disertacije razmatran problem određivanja pouzdanosti vodoprivrednih sistema, odnosno deficita vode koji se mogu javiti u sistemu. Pored toga, razmatrana je i problematika alokacije pouzdanosti, odnosno metode za određivanja optimalne konfiguracije sistema sa stanovišta pouzdanosti.

Kritičke analize dosadašnjih dostignuća u ovoj oblasti rezultirale su *razvijanjem nove metodologije za određivanje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema*. Ova metodologija, za razliku od postojećih koje uglavnom koriste metode mini puteva i mini preseka, *zasniva se na teoremi dekompozicije binarnih funkcija*. Pored pouzdanosti mehaničkih karakteristika sistema, u *metodologiju se uključuje i pouzdanost zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema*, kako u potrošačkim čvorovima, tako i u vezama sistema.

Razvijena metodologija poslužila je kao osnov za formiranje modela za određivanje pouzdanosti NETREL i 2PFREL. *Razvijeni modeli su opšteg karaktera i omogućavaju:*

- određivanje stvarnih vrednosti pouzdanosti sistema, odnosno vremenskog deficita vode (NETREL);
- određivanje pouzdanosti vodoprivrednih sistema različitih konfiguracija, od regionalnih sistema pretežno granate strukture, do gradskih distributivnih sistema sa velikim brojem zatvorenih (prstenastih) struktura;
- 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.;
- određivanje ukupne pouzdanosti za različite tipove ograničavajućih hidrauličkih parametara, kao i za različite vrednosti tih parametara, čime se omogućava sveobuhvatnije (kompletnije) sagledavanje parametara pouzdanosti;
- korišćenje razvijenih modela za određivanje pouzdanosti drugih tehničkih sistema.

Vrednosti pouzdanosti dobijene korišćenjem razvijenih modela analizirana su za sisteme različitih konfiguracija. Pokazalo se da u *granatim sistemima* (kakvi su uglavnom regionalni vodovodni sistemi) *pouzdanost prvenstveno zavisi od mehaničkih*

karakteristika elemenata (intenziteta otkaza i intenziteta popravke), odnosno cevi, kao najzastupljenijih elemenata. Sa povećanjem broja zatvorenih struktura u sistemu, povećava se uticaj hidrauličkih parametara, tako da *pouzdanost gradskih distributivnih sistema nije opravdano određivati bez uključivanja pouzdanosti zadovoljenja hidrauličkih parametara sistema*. Uticaj ovih parametara povećava se sa udaljavanjem od izvorišnih čvorova, kao i sa povećanjem broja redundantnih veza čvora (broj veza kojima je čvor povezan sa ostalim delom sistema).

Uvođenje pretpostavke da u sistemu istovremeno mogu da otkazu najviše dve veze (model 2PFREL) ne utiče značajnije na dobijenu vrednost pouzdanosti čvorova i sistema, a značajno povećava brzinu proračuna. Zbog toga je ovu metodu preporučljivo koristiti za određivanje pouzdanosti složenih sistema, sa velikim brojem veza i čvorova, kao i za uključivanje u optimizacione modele.

Poboljšavanje radnih performansi sistema, odnosno njegove pouzdanosti, moguće je ostvariti samo ako se aspekti pouzdanosti razmatraju još u fazi projektovanja sistema, i ako se oni ugrade i u fizički deo sistema (zatvarači i prateći elementi za pražnjenje i punjenje delova sistema) i u upravljački deo sistema (merni uređaji za automatsku akviziciju podataka o stanju sistema, sistem prenosa i obrade podataka, itd.). Postojanje takvog savremenog oskultaciono - informacionog sistema omogućava brže lociranje kvara, kao i detekciju delimičnih otkaza (prslina), čija popravka zahteva kraće vreme, a moguće je sprovesti u za to najpovoljnijim uslovima.

Drugi deo disertacije bavi se problemom raspoređivanja (alokacije) pouzdanosti, odnosno problemom određivanja optimalne konfiguracije sistema sa stanovišta pouzdanosti. Sistematizovane su metode koje se koriste za rešavanje tog problema, a najveća pažnja posvećena je metodama evolucionog algoritma. Reč je o metodama globalne optimizacije koje se zasnivaju na principima evolucione strategije živog sveta. *Ova, relativno nova metodologija, koja se u ovoj disertaciji prvi put koristi za analizu i optimizaciju pouzdanosti sistema, pokazala se kao veoma efikasna za rešavanje opisanog optimizacionog zadatka. Do optimalnog rešenja dolazi se relativno brzo, a dobijeno rešenje predstavlja globalni otimum zadatka, ili mu je veoma blisko*.

Upoređivanjem nekoliko različitih tipova genetskog algoritma došlo se do zaključka da je, za izbor optimalne konfiguracije sistema sa stanovišta zahtevane pouzdanosti, uputnije koristiti modele koji u populaciji zadržavaju najbolja rešenja, odnosno modifikovane forme genetskog algoritma. Pored toga, *metode kod kojih se ocena pogodnosti obavlja na osnovu ranga, a ne stvarne vrednosti kriterijumske funkcije daju bolja rešenja*, pošto se smanjuje mogućnost izrazite dominacije jednog rešenja, a time i mogućnost preuranjene konvergencije.

Veliki uticaj na konvergenciju metode ima i način definisanja kaznene funkcije, čije vrednosti ne bi smele biti ni previše male, zbog nedovoljnog 'kažnjavanja' rešenja sa pouzdanošću manjom od zahtevane, i mogućnosti pojave preuranjene konvergencije,

ni previše velike, zbog mogućnosti odbacivanja jedinki koje u sebi nose potencijalno 'dobre' gene, već u početnim fazama proračuna, a zbog nepovoljnih vrednosti kriterijumske funkcije. Vrednost ove funkcije se definiše i ispituje u svakom konkretnom optimizacionom zadatku, kao što je to pokazano u primeru 5 (pog. 3). *Kaznene funkcije definisane kao funkcije odstupanja stvarne vrednosti pouzdanosti od neke zahtevane vrednosti imaju prednost nad kaznenim funkcijama definisanim kao konstantne vrednosti*, jer se u procesu rangiranja uzimaju u obzir i stvarna odstupanja od zahtevane vrednosti pouzdanosti.

Nove metodologije za određivanje, optimizaciju i alokaciju pouzdanosti, razvijene u okviru ove doktorske disertacije pokazale su se kao veoma efikasne u radu i pouzdane u pogledu dobijenih rezultata, što ih čini veoma pogodnim za praktičnu primenu. Time je, prema mišljenju autora ove disertacije, dat doprinos naučnoj oblasti teorije vodoprivrednih sistema. Ove metodologije omogućavaju pouzdanije projektovanje vodoprivrednih sistema i najsloženijih konfiguracija, koji se planiraju u Srbiji. Zbog toga bi trebalo nastaviti sa poboljšavanjem i usavršavanjem ovih metodologija.

Jedan od pravaca daljih istraživanja trebalo bi usmeriti na uključivanje parametara kvaliteta vode, kao jedne od najznačajnijih karakteristika vodovodnih sistema, u određivanje ukupne pouzdanosti tih sistema. Parametre kvaliteta, kao što su: rezidualni hlor, trihalometali, joni gvožđa i dr., koji se mogu simulirati standardnim programskim paketima, posebno je značajno uključiti u određivanje pouzdanosti regionalnih sistema, odnosno sistema sa dugim cevovodima.

7. REFERENTNA LITERATURA

1. Абрамов Н. Н.: *Надежность систем водоснабжения*, Стройиздат, 1979.
2. Arandžević V.: *Gubici u distribucionom sistemu vodovoda Užice i mere za njihovo otklanjanje*, Zbornik radova: Gubici u sistemima za vodosnabdevanje i racionalizacija potrošnje vode, Beograd, 1996.
3. 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.
4. Bobušić M. i Krstić M.: *Statistika kvarova u distributivnoj vodovodnoj mreži*, Zbornika radova: Akumulacije kao izvorišta za snabdevanje vodom, Leskovac, 1995.
5. Bouchart F. and Goulter I.: *Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location*, Water Resources Research, Vol. 27, No. 12, 1991.
6. Dandy G., Simpson A. R., Murphy L. J.: *An improved genetic algorithm for pipe network optimization*, Water Resources Research, Vol.32, No. 2, 1996.
7. Dhillon B. S. and Singh C.: *Engineering reliability, new techniques and applications*, A Wiley-Interscience, 1981.
8. Duan N., Mays L. W., Lansey K. E.: *Optimal Reliability-based design of pumping and distribution systems*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 2, 1990.
9. Đorđević B.: *Vodoprivredni sistemi*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
10. Đorđević B.: *Cybernetis in water resources management*, WRP, Fort Collins, 1992.
11. Đorđević B. i Milanović T.: *Sigurnost složenih vodoprivrednih sistema i mogućnosti njene alokacije u fazi planiranja*, Vodoprivreda, 153-155, (1-3/1995), Beograd, 1995.
12. Đorđević B. i Milanović T.: *Stabla otkaza kao efikasna metoda za analizu pouzdanosti složenih hidrotehničkih sistema*, Vodoprivreda, 159-160 (1-2/1996), Beograd, 1996.
13. Đorđević B.: *Ugrađivanje pouzdanosti i pogodnosti održavanja u projekte hidrotehničkih sistema*, Vodoprivreda, 169-170(5-6/1997), Beograd, 1997.
14. Fujiwara O. and De Silva A. U.: *Algorithm for reliability-based optimal design of water networks*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990.
15. Gargano R. and Pianese D.: *Reliability as tool for hydraulic network planning*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 5, 2000.
16. Goulter I. C. and Coals V.: *Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks*, Journal of Transport Engineering Division, Vol. 112, No. 3, 1986.
17. Goulter I. C. and Bouchart F.: *Reliability-constrained pipe network model*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No. 2, 1990.
18. Henley E. J. and Kumamoto H.: *Reliability engineering and risk assessment*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1981.

19. Hobbs B. and Beim G.: *Analytical simulation of water system capacity reliability, 1. Modified frequency-duration analysis*, Water Resources Research, Vol. 24, No.9, 1988.
20. Jacobs P. and Goulter I.: *Evaluation of methods for decomposition of water distribution networks for reliability analysis*, Civil Engineering Systems, Vol. 5, 1988.
21. Khan A., Widdop P. D., Wood A. J., Mounce S. R., Mahell J.: *Low-cost failure sensor design and development for water pipeline distribution systems*, Water Science and Technology, Vol. 45, No. 4-5, 2002.
22. Krstić M.: *Uticaj defekta na veličinu vodnog gubitka u vodovodnoj mreži*, Zbornik radova: Gubici u sistemima za vodosnabdevanje i racionalizacija potrošnje vode, Beograd, 1996.
23. Kujundžić B.: *Veliki vodovodni sistemi*, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, 1996.
24. Lansey K. E., Duan N., Mays L. W., Tung Y-K.: *Water distribution system design under uncertainties*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 115, No. 5, 1989.
25. Mays L. W.: *Methodologies for reliability analysis of water distribution systems*, in *Reliability and Uncertainty Analyses in Hydraulic Design*, edited by: Yen B. C. and Tung Y-K., ASCE, 1993.
26. Milojević M.: *Snabdevanje vodom i kanalisanje naselja*, Građevinski fakultet i Naučna knjiga, Beograd, 1990.
27. Minić S. i Arsenić Ž.: *Modeli održavanja tehničkih sistema*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1998.
28. Nahman J. M.: *Dependability of engineering systems - modeling and evaluation*, Springer, 2002.
29. Obradović D.: *Savremeni vodovodi, informatika i operativno upravljanje*, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo, Beograd, 1999.
30. Petrešin E.: *Doprinos metodologiji analize hidrauličkih parametara, projektovanju i eksploataciji vodovodnih sistema*, Doktorska disertacija, Beograd, 1986.
31. Reinschke K.: *Modelle zur zuverlässigkeits und empfindlichkeitsanalyse von systemen*, (prevod na ruski jezik, u izdanju "Mir", Moskva), 1979
32. Røstum J., Sægrov S., Vatn J., Hansen G.K.: *AquaRel - a computer program for water network reliability analysis combining hydraulic, reliability and failure time models*, In proceedings: CWS2000 Water Network Modelling for Optimal Design and Management, Woodbury Park, Exeter, UK, 2000.
33. Sipper M.: *A brief introduction to genetic algorithms*, Scientific American, 1992.
34. Su Y. C., Mays L. W., Duan N., Lansey K. E.: *Reliability based optimisation model for water distribution systems*, Journal of Hydraulic Engineering Division, Vol. 114, No. 12, 1987.
35. Todorović J.: *Održavanje tehničkih sistema - nauka ili veština?*, Zbornik radova SYM-OP-IS' 94, Kotor, 1994.
36. Vujošević M.: *Operaciona istraživanja*, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 1999.

37. Yang S., Hsu N-S., Louie P., Yeh W.: *Water distribution network reliability: connectivity analysis*, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 2, No. 2, 1996.
38. Yang S., Hsu N-S., Louie P., Yeh W.: *Water distribution network reliability: stochastic simulation*, Journal of Infrastructure Systems, Vol. 2, No. 2, 1996.
39. Wagner J., Shamir U., Marks D.: *Water distribution reliability: analytical methods*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 3, 1988.
40. Wagner J., Shamir U., Marks D.: *Water distribution reliability: simulation methods*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 3, 1988.
41. Walski T. M.: *Practical aspects of providing reliability in water distribution systems*, Reliability Engineering and System Safety, Vol.42, 1993.
42. Whitley D.: *A genetic algorithm tutorial*, Computer Science Department, Colorado State University, 1993.

8. KORIŠĆENA LITERATURA

1. Batinić B.: *Hidraulika*, Građevinski fakultet, Beograd, 1994.
2. Dandy C.G., Simpson R.A., Murphy J.L.: *An improved genetic algorithm for pipe network optimization*, Water Resources Research, Vol.32, No.2, 1996.
3. Goulter I. C.: *Systems analysis in water-distribution network design: from theory to practice*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 118, No. 3, 1992.
4. Hajdin G.: *Hidraulička preglednost hidrotehničkog sistema kao preduslov za njegov zadovoljavajući rad*, Vodoprivreda, 3-4, 1986.
5. Hamberg D. and Shamir U.: *Schematic models for distribution systems design. I: Combination concept*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 2, 1988.
6. Hamberg D. and Shamir U.: *Schematic models for distribution systems design. II: Continuum approach*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 2, 1988.
7. Ivetić M.: *Računska hidraulika: tečenje u cevima*, Građevinski fakultet, Beograd, 1996.
8. Jovanović S., Bonacci O., Anđelić M.: *Merenja nivoa vode, merenja brzina vode, merenje pada vodenog ogledala, merenje dubina vode, merenje proticaja vode*, Građevinski kalendar 1976, Savez građevinskih inženjera i tehničara Jugoslavije, Beograd, 1976.
9. Kreyszig E.: *Advanced engineering mathematics*, John Wiley, 1988.
10. Lansey E.K. and Basnet C.: *Parameter estimation for water distribution networks*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 117, No. 1, 1991.
11. Leconte R., Hughes C.T., Narayanan R.: *Estimating cost model of dual water supply systems*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 114, No. 5, 1988.
12. Ljubisavljević D., Babić B., Đukić A., Jovanović B.: *Komunalna hidrotehnika - primeri iz teorije i prakse*, Beogradsko mašinsko-grafičko preduzeće i Građevinski fakultet, Beograd, 2001.
13. Maksimović Č.: *Preduslovi za rekonstrukcije, dogradnje i modernizacije vodovodnih sistema - informatička podrška, racionalizacija ili improvizacija*, Vodoprivreda, 156-157 (4-5/1995), Beograd, 1995.
14. Maksimović Č., Prodanović D., Šotić A.: *Upravljanje radom sistema za snabdevanje vodom*, Savetovanje: Voda za žedne gradove, Beograd, 1996.
15. Maksimović Č. i Ivetić M.: *Savremene metode projektovanja i upravljanja radom vodovodnih sistema na akumulacijama*, Simpozijum: Akumulacije kao izvorišta za snabdevanje vodom, Leskovac, 1996.
16. Milojević M.: *Rad crpnih stanica u vodovodnim i kanalizacionim sistemima*, Voda i sanitarna tehnika, 5-6, Beograd, 1991.

17. Milojević M.: *Izbor crpki u vodovodu sa napajanjem iz više tačaka*, Voda i sanitarna tehnika, 1993.
18. Milojević M.: *Hidrauličke osnove za proračun vodovodnih mreža*, Seminar: Modeliranje i automatizacija vodovodnih sistema i praćenje rada vodomera - YTVSI, 1994.
19. Opricović S.: *Optimizacija sistema*, Građevinski fakultet i Naučna knjiga, Beograd, 1992.
20. Opricović S.: *Optimizacija sistema - zadaci iz vodoprivrede i hidrotehnike*, Građevinski fakultet, Beograd, 1995.
21. Ormsbee L. and Kessler A.: *Optimal upgrading of hydraulic-network reliability*, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 116, No. 6, 1990.
22. Radić Z., Ninkov T., Stišović B.: *Primena geografskih informacionih sistema u građevinarstvu*, Građevinski kalendar 1996, Savez građevinskih inženjera i tehničara Jugoslavije, Beograd, 1996.
23. Radić Z.: *Hidrologija juče, danas, sutra*, Razvoj nauke u oblasti građevinarstva i geodezije u Srbiji, Građevinska knjiga, Beograd, 1996.
24. Radojević D.: *Soft computing (SC) - Ilustrativni primeri*, Zbornik radova SYM-OP-IS'94, Kotor, 1994.
25. Radojković M. i Klem N.: *Primena računara u hidrotehnici*, Građevinska knjiga, Beograd, 1989.
26. Radojković M., Obradović D., Maksimović Č.: *Računari u komunalnoj hidrotehnici*, Građevinska knjiga, Beograd, 1989.
27. Rana S., Howe A. E., Whitley L. D., Mathias K.: *Comparing heuristic, evolutionary and local search approaches to scheduling*, Research report, Computer Science Department, Colorado State University, 1995.
28. Rossman L.A.: *EPANET - users manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1993.
29. Shneider R.C., Haimes Y.Y., Li D., Lambert H.J.: *Capacity reliability of water distribution networks and optimum rehabilitation decision making*, Water Resources Research, Vol. 32, No. 7, 1996.
30. Solomatine D.P.: *Application of global optimization to models calibration*, Paper presented at the seminar Methods and Software for Estimation of Large Scale Spatial Interaction Models, Hague, 1995.
31. Stanić M. i Avakumović D.: *Primena genetskog algoritma za optimizaciju distributivnih mreža u sistemima za navodnjavanje*, Vodoprivreda 159-160 (1-2/1996), Beograd, 1996.
32. Yevdjevic V.: *Risk and uncertainty in design of hydraulic structures*, Int. Symposium on Stochastic Hydraulics, Lund, 1977.

BIOGRAFIJA

Tina Dašić (rođ. Milanović) rođena je 12. 05. 1970. godine u Dubrovniku. Osnovnu i srednju školu matematičko - fizičke struke završila je u Trebinju 1988. godine. Iste godine upisala se na Građevinski fakultet u Beogradu, Odsek za hidrotehniku. Diplomirala je 1994. godine. Za diplomski rad pod naslovom "*Modeliranje ekoloških procesa u akumulacijama*" dobila je nagradu iz fonda Milutina J. Maksimovića, koju dodeljuju Savez građevinskih inženjera i tehničara i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Poslediplomske studije, Odsek za hidrotehniku, smer Vodoprivreda i vodoprivredni sistemi upisala je 1994. godine, a magistarsku tezu pod naslovom "*Informatička i modelska podrška upravljanju sistemom brana - akumulacija*" odbranila je 1998. godine. Doktorsku disertaciju pod nazivom "*Razvoj modela za planiranje pouzdanosti složenih vodoprivrednih sistema*" prijavila je 1999. godine.

Na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu Tina Dašić je zaposlena od 1994. godine, najpre kao inženjer-saradnik, a od 1995. god. kao asistent pripravnik na predmetima *Korišćenje vodnih snaga* i *Vodoprivredni sistemi*. U zvanje asistenta za tu grupu predmeta izabrana je 1998. godine.

Autor je ili koautor u preko 30 publikovanih radova, koji obuhvataju različite oblasti vodoprivrede: pouzdanost sistema, kvalitet vode u akumulacijama, informacione i ekspertne sistemi, i dr., koji su objavljeni u stručnim časopisima i izloženi na naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Autor je monografije pod naslovom "*Kvalitet vode u akumulacijama - modeliranje, ocenjivanje, praćenje*", koja je izašla u ediciji Biblioteka Academia, u izdanju Zadužbine Andrejević.

Tina Dašić je učestvovala u izradi većeg broja naučno istraživačkih projekata koji su finansirani od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije i Saveznog ministarstva za nauku i tehnologiju: "Razvoj metoda planiranja i upravljanja u vodoprivredi", "Poboljšanje performansi rada hidroenergetskih i termoenergetskih postrojenja", "Razvoj metoda upravljanja u vodoprivredi", "Savremene metode u hidrotehnici", "Optimalno korišćenja hidropotencijala sliva reke Drine". Bila je član projektantskih timova pri izradi različitih studija i projekata, od kojih se izdvajaju: "Vodoprivredna osnova Republike Srbije", "Uticao akumulacije Bogovina na ekološko okruženje" i "Metodologija za proračun garantovanih minimalnih proticaja". Tehnički je urednik časopisa "Vodoprivreda".

Član je međunarodnog društva IEMSs (International Environmental Modeling and Software Society) i radne grupe za Integralno modeliranje, kao i Stručnog odbora za izučavanje uticaja brana i akumulacija na okolinu, pri Jugoslovenskom društvu za visoke brane.

Tabela P.1. Karakteristika izvora vode za regionalni sistem "Boka"

Redni broj izvora	Naziv izvora	Vrsta izvora	Vrsta izvora	Karakteristika izvora		Redni broj izvora	Naziv izvora	Vrsta izvora	Vrsta izvora
				Ukupni kapacitet (m ³ /s)	Ukupni kapacitet (m ³ /s)				
1	1	...	...	...
2	2	...	...	...
3	3	...	...	...
4	4	...	...	...
5	5	...	...	...
6	6	...	...	...
7	7	...	...	...
8	8	...	...	...
9	9	...	...	...
10	10	...	...	...
11	11	...	...	...
12	12	...	...	...
13	13	...	...	...
14	14	...	...	...
15	15	...	...	...
16	16	...	...	...
17	17	...	...	...
18	18	...	...	...
19	19	...	...	...
20	20	...	...	...

PRILOZI

Tabela P.2. Karakteristika izvora vode za regionalni sistem "Boka"

Redni broj izvora	Naziv izvora	Vrsta izvora	Vrsta izvora	Karakteristika izvora		
				Ukupni kapacitet (m ³ /s)	Ukupni kapacitet (m ³ /s)	Ukupni kapacitet (m ³ /s)
1	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.00000	0.00000	0.00000
4	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.00000	0.00000	0.00000
6	0.00000	0.00000	0.00000
7	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000
11	0.00000	0.00000	0.00000
12	0.00000	0.00000	0.00000
13	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00000	0.00000	0.00000
15	0.00000	0.00000	0.00000
16	0.00000	0.00000	0.00000
17	0.00000	0.00000	0.00000
18	0.00000	0.00000	0.00000
19	0.00000	0.00000	0.00000
20	0.00000	0.00000	0.00000

Tabela P1.1: Karakteristike čvorova i veza za regionalni sistem "Boka"

čvor	$Q_{\max, \text{dn}}$ (l/s)	$Q_{\text{sr, god}}$ (l/s)	z (mm)	V (m ³)	$T_{\max, \text{dn}}$ (h)	$T_{\text{sr, god}}$ (h)	veza	od čvora	do čvora	L (km)	D (mm)
1	99	54.9	56	3000	8.4	15.2	1	11	12	16.5	1000
2	278	127.9	60	8500	8.5	18.5	2	12	4	0.5	900
3	196	131.5	64	6000	8.5	12.7	3	12	13	9.5	1000
4	46	28.9	69.5	1500	9.1	14.4	4	11	16	9	1000
5	114	72.9	77	4000	9.7	15.2	5	16	6	0.15	900
6	43	26.3	68	1500	9.7	15.8	6	16	17	2.25	1000
7	513	346.1	63	16000	8.7	12.8	7	13	17	0.5	1000
8	54	23	58.5	2000	10.3	24.2	8	13	14	4.5	1000
9	9	5	57.5	500	15.4	27.8	9	14	3	0.55	900
							10	14	15	11	900
							11	15	2	0.2	700
							12	15	1	3.8	450
							13	17	18	5.25	1000
							14	18	7	0.5	900
							15	18	19	9.5	450
							16	19	8	0.4	300
							17	19	9	10.65	250
							18	5	11	0.35	1000

Tabela P1.2: Pouzdanosti veza za regionalni sistem "Boka"

veza	0.05 otkaza/km·god			0.01 otkaza/km·god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1	0.99324	0.98876	0.98430	0.99865	0.99774	0.99684
2	0.99979	0.99966	0.99952	0.99996	0.99993	0.99990
3	0.99610	0.99351	0.99093	0.99922	0.99870	0.99818
4	0.99631	0.99385	0.99140	0.99926	0.99877	0.99828
5	0.99994	0.99990	0.99986	0.99999	0.99998	0.99997
6	0.99908	0.99846	0.99784	0.99982	0.99969	0.99957
7	0.99979	0.99966	0.99952	0.99996	0.99993	0.99990
8	0.99815	0.99692	0.99569	0.99963	0.99938	0.99914
9	0.99977	0.99962	0.99947	0.99995	0.99992	0.99989
10	0.99549	0.99249	0.98950	0.99910	0.99850	0.99789
11	0.99992	0.99986	0.99981	0.99998	0.99997	0.99996
12	0.99844	0.99740	0.99636	0.99969	0.99948	0.99927
13	0.99784	0.99641	0.99498	0.99957	0.99928	0.99899
14	0.99979	0.99966	0.99952	0.99996	0.99993	0.99990
15	0.99610	0.99351	0.99093	0.99922	0.99870	0.99818
16	0.99967	0.99945	0.99923	0.99984	0.99973	0.99962
17	0.99128	0.98551	0.97976	0.99563	0.99273	0.98984
18	0.99986	0.99976	0.99966	0.99997	0.99995	0.99993

Tabela P2.1: Karakteristike čvorova i veza za regionalni sistem "Rzav"

čvor	Q _{sr,god} (l/s)	Q _{proj} (l/s)	z (mnm)	V (m ³)	T _{sr,god} (h)	T _{proj} (h)
1			339.75			
2			375.3	8450	4.5	2.0
3	30.6	100	368.5	2000	18.2	5.6
4	54.6	200	362.9	1500	7.6	2.1
5	50.3	150	348	2000	11.0	3.7
6	125.7	250	293	5000	11.0	5.6
7	167.2	350	291.4	8000	13.3	6.3
8			265.6	1000		
13	86.2	150	377	3300	10.6	6.1

veza	od čvora	do čvora	L (km)	D (mm)
1	1	9	0.278	1200
3	10	2	2.570	1200
4	2	11	0.456	500
5	11	3	2.588	300
6	2	12	8.739	1200
7	12	4	5.454	800
8	12	13	6.442	1000
9	13	5	2.043	500
10	13	14	18.563	1100
11	14	15	3.080	1000
12	15	6	3.647	800
13	15	16	5.262	1000
14	16	7	0.387	1000
15	16	17	11.686	650
17	18	8	6.691	600

Tabela P2.2: Pumpe i njihove karakteristike (regionalni sistem "Rzav")

veze	od čvora	do čvora	R	karakteristika
20				PSV
21				
22	9	10	0.9543	
23				
24				
160				PCV
161	17	18	0.9543	
162				

karakteristika	Q (l/s)	H (m)
PSV	120	56
	160	55
	200	52.4
	240	48.8
	280	43.5
PCV	80	158
	100	144
	120	125
	132	104

Tabela P2.3: Pouzdanosti veza za regionalni sistem "Rzav"

veza	0.05 otkaza/km·god			0.01 otkaza/km·god		
	3 dana	5 dana	7 dana	3 dana	5 dana	7 dana
1	0.99989	0.99981	0.99973	0.99998	0.99996	0.99995
3	0.99894	0.99824	0.99754	0.99979	0.99965	0.99951
4	0.99981	0.99969	0.99956	0.99996	0.99994	0.99991
5	0.99787	0.99863	0.99504	0.99894	0.99823	0.99752
6	0.99641	0.99403	0.99165	0.99928	0.99880	0.99833
7	0.99776	0.99627	0.99478	0.99955	0.99925	0.99895
8	0.99736	0.99560	0.99384	0.99947	0.99912	0.99877
9	0.99916	0.99860	0.99804	0.99983	0.99972	0.99961
10	0.99240	0.98736	0.98235	0.99848	0.99746	0.99645
11	0.99873	0.99789	0.99705	0.99975	0.99958	0.99941
12	0.99850	0.99750	0.99651	0.99970	0.99950	0.99930
13	0.99784	0.99640	0.99496	0.99957	0.99928	0.99899
14	0.99984	0.99973	0.99963	0.99997	0.99995	0.99993
15	0.99521	0.99203	0.98885	0.99904	0.99840	0.99776
17	0.99725	0.99543	0.99360	0.99945	0.99908	0.99872

Tabela P3.1: Karakteristike čvorova i veza za sistem A

čvor	Q (l/s)	veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	Pouzdnost veze
1	6.1	1	1	2	710	200	0.99766
2	9.0	2	2	3	795	150	0.99608
3	11.19	3	1	4	500	350	0.99917
4	11.21	4	3	4	495	100	0.99674
5	12.63	5	3	5	280	100	0.99815
6	11.74	6	5	6	410	100	0.9973
7	13.42	7	4	6	430	300	0.99929
8	8.17	8	5	7	425	100	0.9972
9	15.12	9	7	8	645	200	0.99788
10	12.9	10	6	8	555	300	0.99908
11	18.52	11	8	9	305	200	0.999
		12	9	10	605	100	0.99601
		13	6	10	505	125	0.99709
		14	10	11	580	100	0.99618
		15	4	11	500	200	0.99835
		16	12	1	500	400	0.99917
		17	13	8	700	400	0.99884

Tabela P3.2: Rezultati proračuna pouzdanosti sistema A za $Q_{\max, dn}$ ($p \geq 25$ m)

čvor	varijanta 1		varijanta2	
	R	T (sati)	R	T (sati)
1	0.99917	7.3	≈ 1	0
2	0.9983	14.9	0.99996	0.4
3	0.99759	21.1	0.99996	0.4
4	0.99834	14.5	≈ 1	0
5	0.99757	31.3	0.99995	0.4
6	0.99763	20.8	≈ 1	0
7	0.9946	47.3	0.99788	18.6
8	0.99672	28.7	≈ 1	0
9	0.99572	37.5	0.999	8.8
10	0.99759	21.1	0.99997	0.3
11	0.9967	28.9	0.99835	14.5
Rsis	0.99191	70.7	0.99519	42.1
R1	0.9946	47.3	0.99788	18.6
R2	0.99727	23.9	0.99955	3.9
R3	0.99692	27	0.99926	6.5

Tabela P3.3: Rezultati proračuna pouzdanosti sistema A za $Q_{\max, dn}$ ($p \geq 15$ m)

čvor	varijanta 1		varijanta2	
	R	T (sati)	R	T (sati)
1	0.99917	7.3	≈ 1	0
2	0.99832	14.7	0.99998	0.2
3	0.99832	14.7	0.99998	0.2
4	0.99834	14.5	≈ 1	0
5	0.99761	20.9	0.99998	0.2
6	0.99763	20.8	≈ 1	0
7	0.99669	29	0.99997	0.3
8	0.99672	28.7	≈ 1	0
9	0.9967	28.9	0.99998	0.2
10	0.99762	20.8	0.99999	0.1
11	0.9967	28.9	0.99835	14.4
Rsis	0.99502	43.6	0.99829	15
R1	0.9967	28.9	0.99835	14.4
R2	0.99762	20.8	0.99984	1.4
R3	0.99732	23.5	0.9996	3.5

Tabela P3.4: Pouzdanosti veza sistema A za različite vrednosti povećanja broja otkaza

veza	20%	50%	100%	200%
1	0.9972	0.9965	0.99533	0.99299
2	0.99451	0.99411	0.99215	0.98822
3	0.999	0.99876	0.99835	0.99753
4	0.9961	0.99511	0.99347	0.99019
5	0.99778	0.99723	0.9963	0.99444
6	0.99676	0.99594	0.99459	0.99187
7	0.99915	0.99894	0.99858	0.99788
8	0.99664	0.9958	0.99439	0.99157
9	0.99745	0.99682	0.99575	0.99363
10	0.99781	0.99863	0.99817	0.99726
11	0.9988	0.99849	0.998	0.99698
12	0.99522	0.99402	0.99202	0.98802
13	0.99651	0.99563	0.99417	0.99125
14	0.99542	0.99427	0.99235	0.98851
15	0.99803	0.99753	0.99671	0.99506
16	0.999	0.99876	0.99835	0.99753

Tabela P4.1: Karakteristike čvorova i veza za sistem B

čvor	Z (m)	Q (l/s)	veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	C	Pouzdnost veze
10	3.05		2	20	70	3658	406.4	70	0.98167
20	6.1	31.5	4	20	30	3658	304.8	120	0.98167
30	15.24	12.6	6	20	110	3658	304.8	70	0.98167
40	15.24	12.6	8	30	70	2743	304.8	70	0.98619
50	15.24	37.9	10	70	100	1829	304.8	70	0.99075
60	15.24	31.5	12	70	90	1829	254.0	70	0.99075
65	65.53		14	60	70	1829	304.8	70	0.99075
70	15.24	31.5	16	60	90	1829	254.0	70	0.99075
80	15.24	31.5	18	60	80	1829	304.8	70	0.99075
90	15.24	63.1	20	80	90	1829	254.0	70	0.99075
100	15.24	31.5	22	90	150	1829	254.0	70	0.99075
110	15.24	31.5	24	90	100	1829	254.0	70	0.99075
120	36.58	25.2	26	100	150	1829	304.8	70	0.99075
130	36.58	25.2	28	80	150	1829	254.0	70	0.99075
140	24.38	25.2	30	30	60	1829	254.0	120	0.99075
150	36.58	25.2	32	30	40	1829	254.0	120	0.99075
160	36.58	63.1	34	30	50	2743	254.0	120	0.99075
165	65.53		36	40	50	1829	254.0	120	0.99075
170	36.58	25.2	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

Tabela P4.2: Karakteristične kote rezervoara za sistem B

čvor	Z_{\min} (m)	Z_{\max} (m)
65	68.6	76.2
165	68.6	76.2

Tabela P4.3: Karakteristike 3 paralelno vezane pumpe (sistem B)

Protok (l/s)	Napor (m)	n (%)
0	91.4	0
126.2	89.0	50
252.4	82.3	65
378.5	70.1	55
504.7	55.2	40

Tabela P5.1: Jedinična ulaganja za čiščenje i ugradnju novih cevi

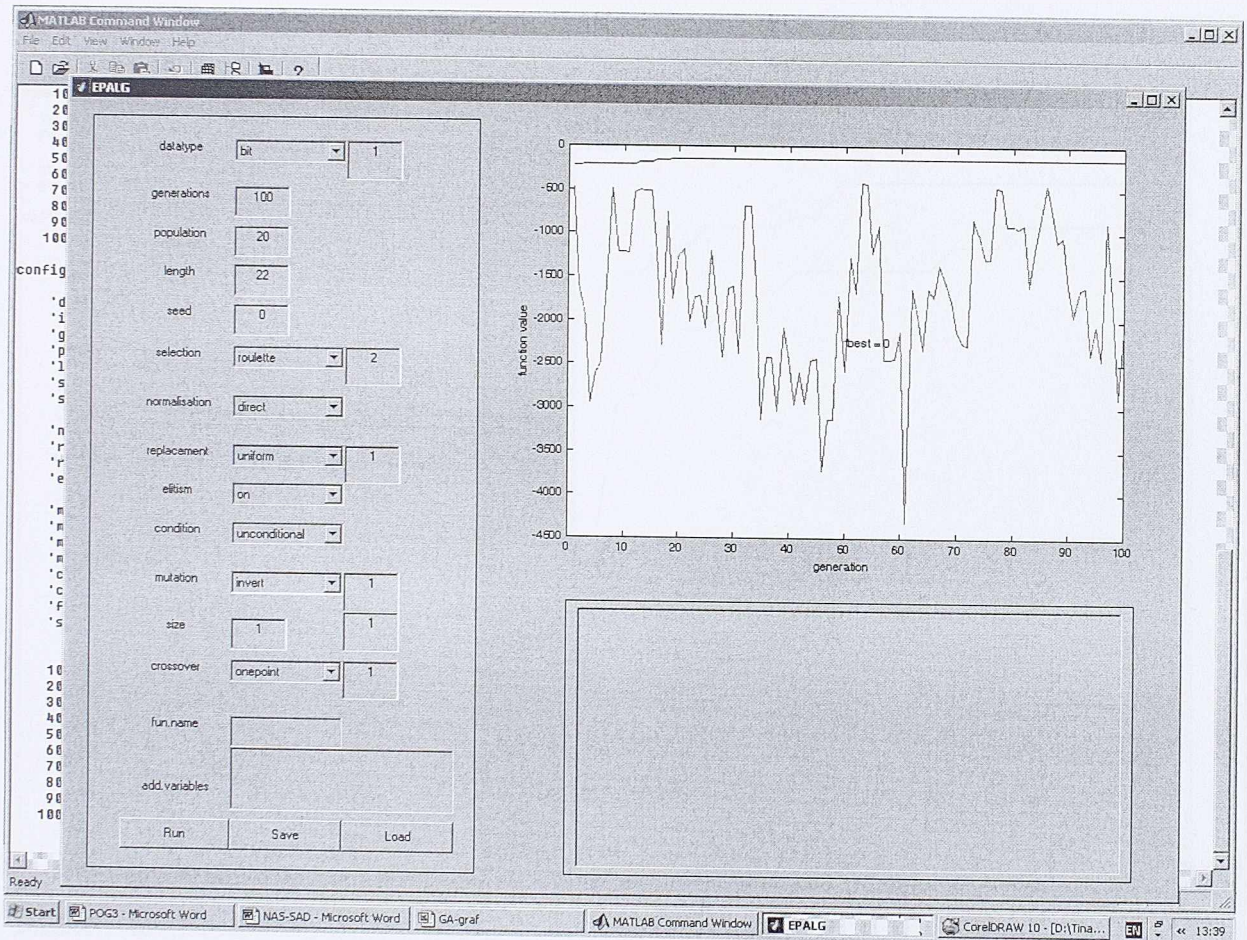
Prečnik (mm)	Čiščenje cevi (\$/m)	Nova cev (\$/m)
100	39.4	42.0
200	39.4	58.4
300	42.7	95.8

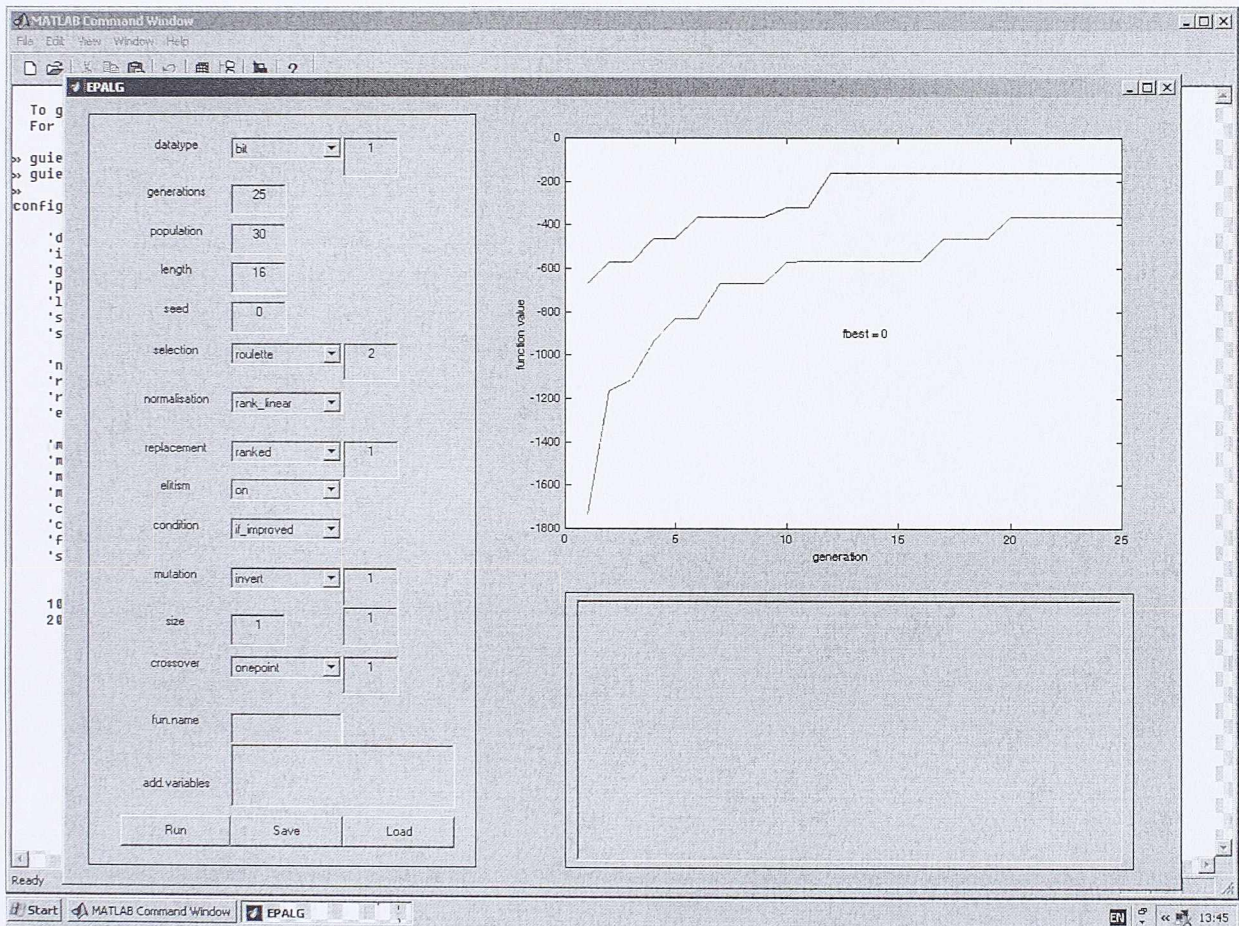
Tabela P5.2: Karakteristike dodatnih veza za sistem A

veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	Pouzdnost veze	Cena ugradnje nove cevi (\$)
20	12	11	500	300	0.99714	47900
21	1	3	1065	200	0.9965	62196
22	4	10	770	200	0.99747	44968
23	4	5	580	200	0.99809	33872
24	6	9	640	200	0.99789	37376
25	6	7	850	200	0.9972	49640

Tabela P6.1: Karakteristike dodatnih i revitalizovanih veza za sistem B

veza	od čvora	do čvora	L (m)	D (mm)	Pouzdnost veze	C	Cena investicije (10 ³ \$)
2	20	70	3658	304.8	0.98167	125	237.77
6	20	110	3658	304.8	0.98167	125	204.12
8	30	70	2743	304.8	0.98619	125	153.06
10	70	100	1829	304.8	0.99075	125	102.06
12	70	90	1829	254.0	0.99075	125	102.06
14	60	70	1829	304.8	0.99075	125	102.06
16	60	90	1829	254.0	0.99075	125	102.06
18	60	80	1829	304.8	0.99075	125	102.06
20	80	90	1829	254.0	0.99075	125	102.06
22	90	150	1829	254.0	0.99075	125	102.06
24	90	10	1829	254.0	0.99075	125	102.06
26	100	150	1829	304.8	0.99075	125	102.06
28	80	150	1829	254.0	0.99075	125	102.06
48	100	110	1829	203.2	0.99075	125	102.06
54	120	160	2743	203.2	0.98619	130	160.19
68	160	170	2743	203.2	0.98619	130	160.19







РД 18073



300126060

COBISS