

UDK: 628.171

Mr **Željka Ostojić**, dipl.ing., Srbijaprojekt, Beograd  
 Dr **Dejan Ljubisavljević**, redovni profesor, Građevinski fakultet, Beograd  
**Bojan Milovanović**, asistent, Građevinski fakultet, Beograd

## MODEL GENERATOR POTREBA ZA VODOM I HIDRAULIČKI SIMULACIONI MODEL VODOVODNE MREŽE

**APSTRAKT:** U radu je prikazan razvoj modela za generisanje potreba za vodom u vodovodu koji je u stanju da verno predstavi sve osobine načina zadovoljavanja potreba za vodom. Ovako razvijen model je povezan sa hidrauličkim simulacionim modelom vodovodne mreže i ovakvom vezom je omogućena statistička analiza sistemskih promenljivih u vodovodnoj distributivnoj mreži. U radu su naznačeni pravci i mogućnosti koje pružaju razvijeni model i dat primer njegove primene.

**KLJUČNE REČI:** potrebe za vodom, generisanje, hidraulički simulator

### MODEL GENERATOR OF WATER CONSUMPTION AND HYDRAULIC SIMULATION MODEL IN WATERSUPPLYING NETWORK

**ABSTRACT:** Research and development of random sampling procedures in creating model generator of water demand time patterns is shown. Also a composite package combining stochastic nature of water demand and hydrodynamic simulation is provided. Conclusions and recommendation based on developed models and their applicability in watersupplying network systems are done.

**KEY WORDS:** water demand, generator, hydraulic simulator

## 1 UVOD

### 1.1 Potrebe za vodom grupe domaćinstava kao slučajan proces

Podaci o protocima i/ili zapreminama vode utrošenim na zadovoljavanje potreba za vodom grupe domaćinstava u unapred definisanim vremenskim intervalima vremena se mogu tretirati kao vremenska serija podataka  $X_t$ , pa se u određenim vremenskim momentima  $t$ , bez razdvajanja determinističke i stohastičke komponente dobijaju nizovi nezavisnih slučajnih promenljivih.

Na ovako definisane nizove slučajnih promenljivih može se primeniti istraživački pristup u okvi-

ru statističkog modeliranja koji podrazumeva najbliže i najjednostavnije podražavanje osobina pojave koju modeliramo.

Ukupno utrošena zapremina vode grupe domaćinstava pokazuje periodičnost u okviru godine, sezone, meseca, sedmice, časa tokom dana. Upotreba pojedinih sanitarnih uređaja kojom se ostvaruje zadovoljavanje potreba za vodom se realizuje na mahove, sa određenim intenzitetom, u određenim vremenskim trenucima, sa određenom učestalošću u predefinisanim vremenskim intervalima, što ukazuje da je pri definisanju skupa elementarnih događaja pri podražavanju osobina slučajnog procesa zadovoljavanja potreba za vodom neophodno korišćenje diskretnih slučajnih promenljivih.

## 1.2 Analiza potreba za vodom grupe domaćinstava sa nivoa grupe sanitarnih pribora istog tipa

Analizom potreba za vodom grupe domaćinstava sa nivoa grupe sanitarnih pribora istog tipa se dobijaju potrebne količine vode, koje se uvek razlikuju od utrošenih količina vode, korišćenih količina vode i tražnje za vodom.

Osnovni događaj koji se analizira je da li tokom predefinisano vremenskog intervala sanitarni uređaj iz određene grupe sanitarnih uređaja istog tipa troši vodu ili ne.

Verovatnoća osnovnog događaja zavisi od više promenljivih od kojih su najznačajnije koeficijenti mesečne, nedeljne, sezonske neravnomernosti, broj stanovnika u domaćinstvu, pripadnost grupe domaćinstava određenoj kategoriji potrošača.

Ovako generisanim potrebama za vodom se dodeljuje uloga čvorne potrošnje u hidrauličkom simulacionom modelu vodovodne mreže i time se ostvaruje veoma značajna veza između stohastičkih ulaznih veličina i determinističkog hidrauličkog simulacionog modela distributivne mreže.

## 2 MODEL GENERATOR POTREBA ZA VODOM

### 2.1 Razvoj modela generatora potreba za vodom

Prilikom razvoja stohastičkog modela za generisanje potreba za vodom sa nivoa sanitarnih pribora korišćeni su ulazni podaci Pregleda sanitarnih pribora (Deo studije " Zlatnih 100 ") koja je rađena u okvirima American Water Society.

Razvijen je program u Visual Basicu za generisanje dijagrama dnevnih potreba za vodom domaćinstava u intervalima diskretizacije vremena od 6 – 60 minuta . Ulazni podaci za ovakav proračun su:

- pripadnost grupe domaćinstava određenoj socioekonomskoj grupi u skladu sa klasifikacijom American Water Society /A/B/C/D/E/F /
- ukupan broj sanitarnih pribora određenog tipa kojima su opremljena domaćinstva razmatrane grupe domaćinstava
- prosečan broj stanovnika po domaćinstvu određene grupe domaćinstava

- verovatnoće da sanitarni pribor određenog tipa troši vodu tokom proizvoljnih 15 minuta određenog sata tokom dana
- mesec kome pripada dan za koji se određuje dijagram dnevnih potreba za vodom.

U cilju obezbeđivanja fleksibilnosti razvijenog modela i sagledavanja njegovih mogućnosti originalni podaci preuzeti iz Pregleda upotrebe sanitarnih pribora su modifikovani uvođenjem koeficijenata popravki osnovne tablice verovatnoća K1, K2, K3, K4 kojima se obračunavaju uticaj prosečnog broja stanovnika nekog domaćinstva, pripadnost domaćinstva određenoj kategoriji potrošača, uticaj sezonske i uticaj dnevne neravnomernosti.

U modelu se svaki tip sanitarnog pribora predstavlja posebnom promenljivom, čija maksimalna vrednost odgovara ukupnom broju ugrađenih sanitarnih uređaja određenog tipa / N / u okviru posmatrane grupe domaćinstava. Vrednostima N se daje smisao broja ponovljenih " opita " u predefinisano vremenskom intervalu. Ishod svakog opita je slučajna nezavisna događaj sa samo dva moguća ishoda, poštujući pretpostavku da svi sanitarni pribori troše vodu pod istim uslovima. Mogući ishodi su:

A – sanitarni pribor troši vodu u predefinisano vremenskom intervalu

Ā – sanitarni pribor ne troši vodu u predefinisano vremenskom intervalu.

Ako od rezultata ponovljenih opita sastavimo niz dužine N maksimalan broj ovako sastavljenih nizova iznosi  $2^N$ , i svaki ovakav niz možemo tretirati kao rezultat novog opita.

Slučajnu promenljivu  $X_n$  definišemo kao broj opita u jednom nizu od N opita u kojima se realizovao događaj A. Ovako definisana slučajna promenljiva ima smisao broja sanitarnih pribora određenog tipa koji troše vodu tokom predefinisano intervala vremena tokom dana. Slučajna promenljiva  $X_n$  je diskretnog tipa i njena raspodela je binomna. Ona uzima vrednosti iz skupa  $\{0, 1, 2, \dots, N\}$  a verovatnoća da je vrednost promenljive  $X_n = k$  iznosi

$$P(X_n = k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (1)$$

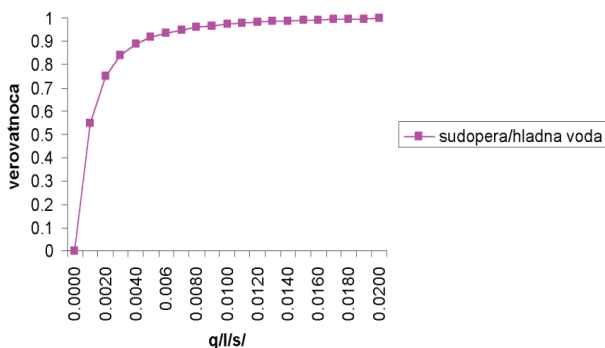
Protoci trajanja 15 minuta za sve tipove ugrađenih sanitarnih pribora se određuje na osnovu unapred poznatih kumulativnih krivih raspodele

protoka koje su preuzete iz Studije "Zlatnih 100".

Kao primer navodimo primer funkcije koja predstavlja najbolju ocenu empirijske funkcije raspodele protoka na bateriji za hladnu vodu sudopere i koja glasi

$$y = \frac{bx^c}{a + x^c} \quad (2)$$

x – promenljiva koja predstavlja realizovan protok  
 y -promenljiva koja predstavlja verovatnoću pojave protoka  
 a, b, c – empirijski koeficijenti a = 0.000116,  
 b = 1.016, c = 1.29



Slika 1. Kumulativna kriva raspodele verovatnoće za protok na bateriji hladne vode sudopere u trajanju od 15 minuta

Verovatnoća da sanitarni pribor određenog tipa troši vodu tokom tekućih 15 minuta određenog sata se računa po formuli

$$p_{0-1,1n} = p_{0-1,1n,osn} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (3)$$

Pseudoslučajni brojevi koji se generišu prate niz binomnih raspodela kojih ima za svaku vrstu ugrađene sanitarnih pribora 24, jer se osnovne verovatnoće u tablici verovatnoća menjaju na bazi osnovne podele vremena od 1 sata. Svaki generisani slučajni broj po određenoj binomnoj raspodeli ima smisao broja trenutno aktivnih sanitarnih pribora određenog tipa tj. neke od mogućih realizacija diskretnih slučajnih promenljivih  $X_{1n,0-1}, X_{1n,0-1}, \dots, X_{0n, 23-24}$ , a postupak generisanja slučajnih brojeva koji prate unapred definisane binomne raspodele ima smisao slučajnog eksperimenta.

Kako broj vremenskih intervala od po 15 minuta iznosi 4 u okviru jednog sata, broj istovremeno generisanih pseudoslučajnih brojeva po određenoj binomnoj raspodeli iznosi 4 u osnov-

noj postavci modela. Programom je ostavljena mogućnost podele časa na vremenske intervale kraćeg ili dužeg trajanja, od 6 minuta do 60 minuta. Promena vremenskog intervala za generisanje podrazumeva i intervencije na drugim ulaznim podacima u tablici osnovnih verovatnoća i tablici protoka koji se realizuju po pojedinim grupama sanitarnih pribora, kao i promenu broja istovremeno generisanih pseudoslučajnih brojeva prema predefinisanim binomnim raspodelama.

Proizvodi tekućih vrednosti slučajnih promenljivih  $X_{1n,0-1}, X_{1n,0-1}, \dots, X_{0n, 23-24}$  i protoka  $q_{1n}, q_{1n}, \dots, q_{0n}$  predstavljaju sabirke u slučajnim zbirovima koji predstavljaju dijagrame dnevnog utroška vode grupe domaćinstava.

Izlazni rezultati razvijenog modela za generisanje potreba za vodom grupe domaćinstava su:

- proizvoljan broj dijagrama realizovanih protoka i/ili ostvarenih zapremina grupe domaćinstava tokom dana po intervalima diskretizacije vremena koji su određeni modelom
- ukupno utrošena zapremina tokom svakog od dana, specifična potrošnja  $q$  / l/stan/dan/, maksimalan i srednji protok tokom svakog od dana  $q_{max}$  i  $q_{sred}$  / l/s/, bezdimenzioni koeficijenti maksimalnog protokaza  $k_{max}$  -statistički pokazatelji / srednja vrednost, standardno odstupanje, minimum, maksimum, intervali poverenja / za  $q_{max}, q_{sr}, k_{max}$  u predefinisanim vremenskim intervalima

## 2.2 Analiza osetljivosti razvijenog modela na promenu parametara ulaza

Izlazni rezultati dobijeni razvijenim modelom za generisanje potreba za vodom su ispitivani za različite kombinacije parametara ulaza.

Ispitivane su promene bezdimenzionog koeficijenta maksimalne potrošnje  $k_{max}$  i specifične potrošnje  $q$  / l/stan/dan/ kao slučajnih promenljivih u zavisnosti od pripadnosti određene grupe domaćinstava konkretne socioekonomske grupi, primenjenog koeficijenta sezonske neravnomernosti, prosečnog broja stanovnika u domaćinstvu, broja domaćinstava za koji se vrši generisanje potreba za vodom, broja generisanih histograma, izabranog intervala vremena u kome se vrši generisanje potreba za vodom.

Sastav sanitarnih pribora pri sprovođenju ovakvih analiza u domaćinstvima nije menjan i za

## Modeliranje potrošnje vode

**Odrejivanje krive raspodele protoka grupe domaćinstava - Generisanje histograma ~vorne potrošnje**

Broj domaćinstava: N = 200  
 Prosečan broj članova u domaćinstvu: ns/N = 1  
 Teleski koeficijent za broj članova domaćinstva: k<sub>1</sub> = 0.545  
 Socioekonomska grupa domaćinstava: Grupa: a  
 Teleski koeficijent za socioekonomsku grupu: k<sub>2</sub> = 0.679  
 Koeficijent sezonske neravnomernosti: k<sub>3</sub> = 1

Raspodela dnevne verovatnoće uključivanja sanitarnog pribora po broju članova domaćinstva

	0	1	2	3	4	5
0.000	0.030	0.043	0.055	0.065	0.095	
0.000	0.545	0.782	1.000	1.182	1.545	

Raspodela verovatnoće uključivanja sanitarnog pribora po socioekonomskoj grupi kojoj pripadaju domaćinstva:

	A	B	C	D	E	F
0.038	0.056	0.100	0.050	0.080	0.020	
0.679	1.000	1.786	0.893	1.429	0.357	

Reprezentativna grupa: ns<sub>a</sub> = 3 Grupa = B  
 Tabela verovatnoća uključivanja pojedinih grupa sanitarnog pribora

^as	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00
1n	0.00200	0.00200	0.00300	0.00300	0.00500	0.10000	0.15000	0.17000	0.10000	0.10000	0.13000
2n	0.00190	0.00190	0.00285	0.00285	0.00475	0.09500	0.14250	0.16150	0.09500	0.09500	0.12350
3n	0.00180	0.00180	0.00270	0.00270	0.00450	0.10000	0.12000	0.08000	0.10000	0.09000	0.12000
4n	0.00170	0.00170	0.00255	0.00255	0.00430	0.09500	0.11750	0.07500	0.09500	0.08500	0.11750
5n	0.00160	0.00160	0.00240	0.00240	0.00410	0.09000	0.11500	0.07000	0.09000	0.08000	0.11000
6n	0.00150	0.00150	0.00225	0.00225	0.00390	0.08500	0.11250	0.06500	0.08500	0.07500	0.10500
7n	0.00140	0.00140	0.00210	0.00210	0.00370	0.08000	0.11000	0.06000	0.08000	0.07000	0.10000
8n	0.00130	0.00130	0.00195	0.00195	0.00350	0.07500	0.10750	0.05500	0.07500	0.06500	0.09500
9n	0.00120	0.00120	0.00180	0.00180	0.00330	0.07000	0.10500	0.05000	0.07000	0.06000	0.09000
0n	0.00110	0.00110	0.00165	0.00165	0.00310	0.06500	0.10250	0.04500	0.06500	0.05500	0.08500

Broj podela po satu: 4  
 Δt = 15 min

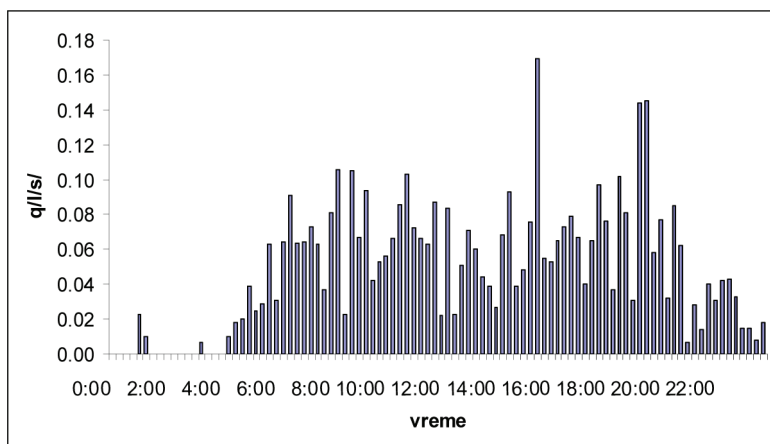
Raspodela promenljivih: B  
 Usvajane raspodele: Bnorms B(n,p)

Redni broj histograma: 100  
 Ukupan broj histograma: 100

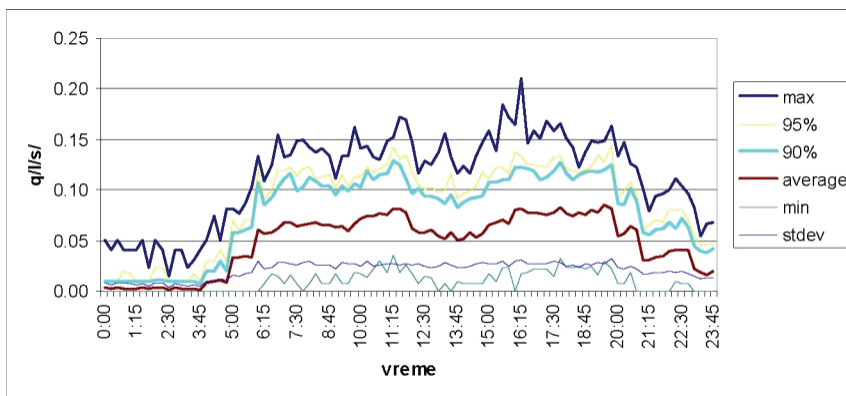
Brisanje  
 Histogram  
 n-Histograma

počet:  
 Quk = 0.6828 l/s  
 qmax = 0.6828 l/s  
 qsr = 0.2680 l/s  
 kmax = 2.1748  
 N D-int = 5

Slika 2. Maska realizovanog programa



Slika 3. Dijagram generisanih protoka tokom jednog dana za 10 domaćinstava sa 2 stanovnika /domaćinstvu socioekonomska grupa a u intervalima 15 minuta

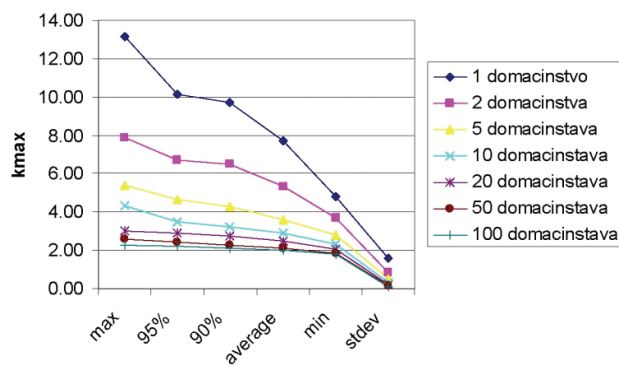


Slika 4. Dijagram statističkih pokazatelja generisanih protoka tokom dana za 10 domaćinstava sa 2 stanovnika/domaćinstvu socioekonomska grupa a u intervalima 15 minuta

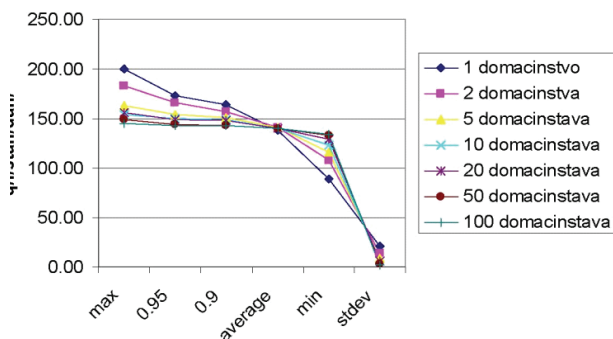


jedno domaćinstvo se računa da su priključeni umivaonik, sudopera, tuš kada, toalet i veš mašina. Rezultati sprovedenih analiza su očekivani.

Sa povećanjem broja domaćinstava za koje se vrši generisanje potreba za vodom, i/ili prosečnog broja stanovnika po domaćinstvu dolazi do smanjivanja bezdimenzionog koeficijenta maksimalnog protoka i specifične potrošnje po stanovniku / l/stan/dan /, što znači da se troši ukupno veća količina vode, ali tokom dužeg vremenskog perioda, pa se koeficijent maksimalnog protoka smanjuje, a smanjivanje specifične potrošnje po stanovniku znači da je model za generisanje potreba za vodom u stanju da delimično uvaži činjenicu da su na nivou domaćinstva određene potrebe za vodom zajedničke.



Slika 5. Zavisnost statističkih pokazatelja koeficijenta maksimalnog protoka od broja priključenih domaćinstava



Slika 6. Zavisnost statističkih pokazatelja specifične potrošnje q/l/stan/dan/ od broja priključenih domaćinstava

### 3 HIDRAULIČKI MODEL DISTRIBUTIVNE MREŽE SA STOHAŠTIČKIM ULAZOM

#### 3.1 Razvoj stohastičkog simulacionog hidrauličkog modela distributivne mreže vodovoda


Hidraulički model distributivne mreže sa stohastičkim ulazom služi za analizu sistemskih promenljivih distributivne mreže / protoka po pojedinim cevovodima i pritisaka po čvorovima / i realizovan je kao dopuna razvijenog modela za generisanje potreba za vodom. Generisani dijagrami dnevnih potreba za vodom su kao čvorna potrošnja, bez obračunatih gubitaka povezani sa programskim paketom EPANET i predstavljaju demand time pattern ulaznog fajla.

Za svaki potrošački čvor se generiše različit dijagram potrošnje, bazna potrošnja je jednaka jedinici, a u koeficijentima neravnomernosti za koje programski paket omogućava proizvoljni interval diskretizacije po vremenu se nalaze generisani dijagrami potreba za vodom.

Ograničenje ovog simulacionog modela predstavlja činjenica da se u okviru jednog dijagrama neravnomernosti može naći maksimum 2000 podataka, što znači da su simulacija i njeni rezultati povezani sa analizom 2000 vremenskih intervala trajanja od 6 do 60 minuta. Drugi ograničavajući faktor ovog modela predstavlja činjenica da je ulazni fajl za EPANET zamišljen kao jedan excel worksheet. Ova ograničenja se mogu prevazići ponavljanjem simulacija.

Način na koji je ostvarena veza između stohastičkog ulaza i hidrauličkog modela se može sagledati iz sledeće maske programa

Statistička obrada izlaznih rezultata hidrauličkog simulatora / protoka, pritisaka, jediničnih gubitaka se radi u excelu. Analiziraju se srednje vrednosti, standardna odstupanja, minimalne, maksimalne realizovane vrednosti protoka po pojedinim cevovodima distributivne mreže i pritisaka po pojedinim čvorovima. Kako ulazni podaci o generisanim potrebama za vodom imaju smisao ponavljanja eksperimenta na modelu određivanje statističkih pokazatelja i funkcija raspodele promenljivih distributivnih mreža ima smisao određivanja eksperimentalnih raspodela slučajnih promenljivih. Eksperimentalne raspodele ovih promenljivih su različite za svaki cevo-

Ukupna dnevna potrožnja:	Q <sub>uk</sub> =	4437.88	l/dan
Maksimalni dnevni proticaj:	q <sub>max</sub> =	0.1026	l/s
Srednji dnevni proticaj:	q <sub>sr</sub> =	0.0514	l/s
Koeficijent neravnomernosti:	k <sub>max</sub> =	1.9974	
Broj intervala bez potrožnje:	N <sub>0-int</sub>	2	
Redni broj modela:	n <sub>rb,mod</sub> =	4	
Broj podela po satu :	n <sub>pod</sub> =	1	
			
	n <sub>int</sub> =	24	
	n <sub>hist</sub> =	50	
	n <sub>pos</sub> =	1200	

Slika 7. Maska dela programa za povezivanje stohastičkog generatora potreba za vodom i hidrauličkog simulacionog modela

vod i/ili čvor distributivne mreže, ali se u zavisnosti od konfiguracije mreže i položaja cevovoda, odnosno čvora sa potrošnjom mogu pretpostaviti različite teorijske raspodele.

### 3.2 Uticaj stohastičkog generisanja potreba za vodom na sistemske promenljive distributivne mreže

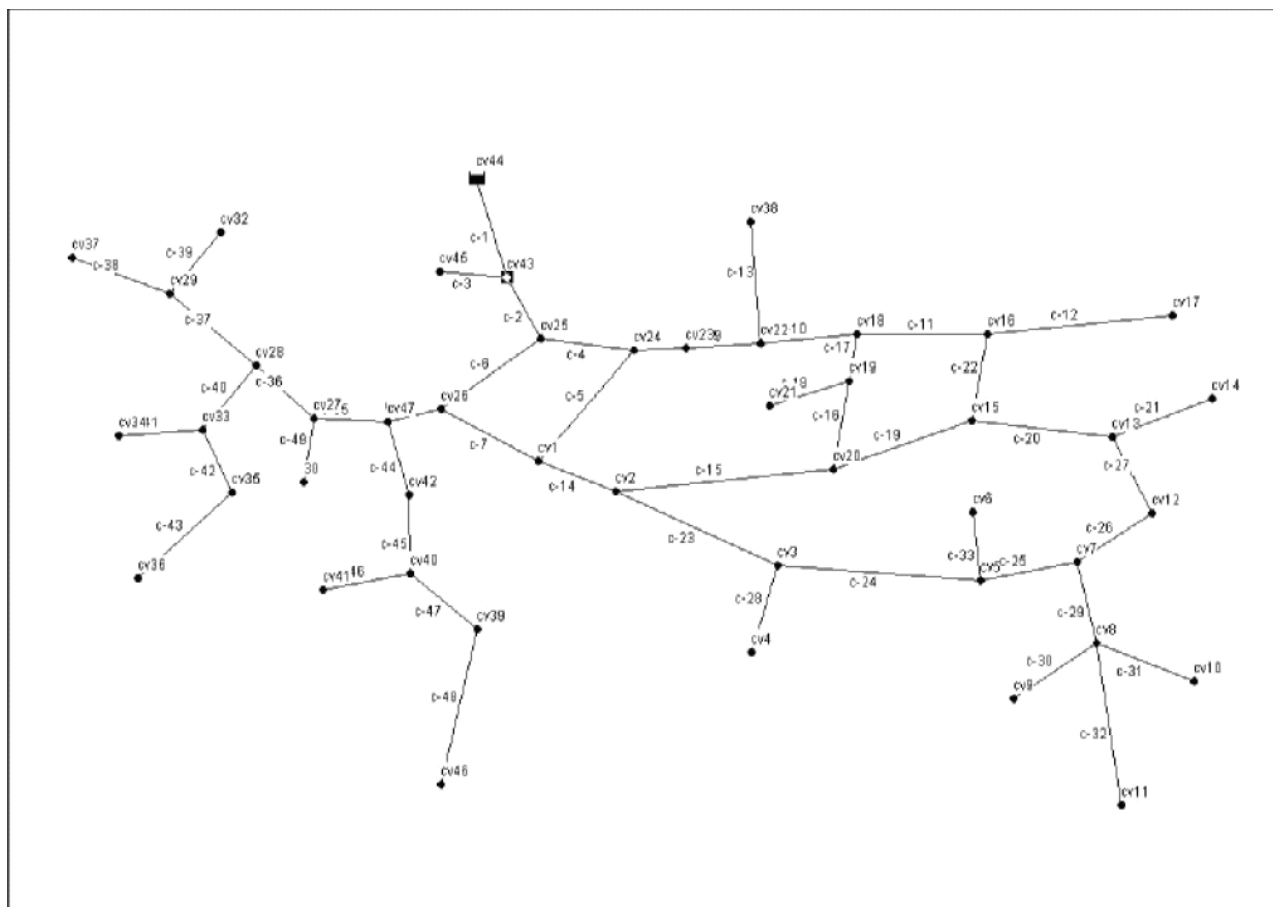
Kao primer za ilustrovanje uticaja primene stohastički generisane čvorne potrošnje na hidrauliku vodovodne mreže uzeta je novoprojektovana vodovodna mreža naselja Kolari, za koju je izvor snabdevanja rezervoar III visinske zone Smedereva, a razvodna mreža je mešovita: u centru su formirana dva prstena, a na perifernim delovima naselja mreža je granata. Urađene su dve varijante za vremensku raspodelu protoka po potrošačkim čvorovima. U prvoj, stohastičkoj varijanti za svaki potrošački čvor je zadata stohastička raspodela protoka dobijena modelom za generisanjem za socioekonomsku grupu e, prosečno 4 stanovnika/domaćinstvu, uobičajen sastav sanitarije, koeficijentom sezonske neravnomernosti 1,0, sa intervalom za diskretizaciju od 1 sata. U drugoj varijanti primenjen je standardan dijagram raspodele protoka, karakterističan za naselje ovakvog tipa, a osnovna potrošnja po čvorovima mreže je dobijena tako što je sopstvena potrošnja deonica razdeljena između čvorova, srazmerno dužini cevovoda. U obe varijante period simulacije iznosi 30 dana.

Analizirani rezultati statističkih pokazatelja pritiska po čvorovima i protoka po cevovodima ukazuju na sledeće:

- u varijanti 2 cevovod 16 je uvek neaktivan, a u varijanti 1 kroz njega postoji protok u svim vremenskim intervalima
- u varijanti 2 u cevovodima koji čine jedan od unutrašnjih prstenova mreže nema promena u smerovima tečenja, a u varijanti 1 je prisutna promena smera tečenja u svim ovim cevovodima
- najveće razlike u realizovanim jediničnim gubicima, pritiscima, protocima se ostvaruje u cevovodima c-3, c-12, c-13, c-26,c-28, c-31, c-28 , c-31, c-38, c41, c-42, c-43, c-49 koji predstavljaju delove granate mreže i najudaljeniji su od izvora snabdevanja.

## 4 ZAKLJUČAK

Razvijeni modeli generatora stohastičkog ulaza i njegovo povezivanje sa hidrauličkim simulatorom omogućavaju procenu uticaja koju stohastička priroda potreba za vodom kao izvor neodređenosti unosi u distributivnu mrežu, kao i procenu neodređenosti izlaznih podataka. Mogućnost prilagođavanja različitih empirijskih raspodela sistemskih promenljivih teorijskim raspodelama po svim cevovodima i čvorovima sistema je dragocena u analizi pouzdanosti sistema, određivanju kontrolnih granica i granica



Slika 8. Projektovana razvodna mreža naselja Kolari

alarma u operativnom upravljanju, praćenju analize prostiranja neodređenosti kroz distributivnu mrežu idr.

Ovaj rad je deo projekta "Racionalizacija potrošnje vode u vodovodnim sistemima", ev. Br. NPV -35, u okviru nacionalnog programa uređenja, zaštite i korišćenja voda u Srbiji, koji je finansiran od strane Ministarstva nauke i životne sredine.

## LITERATURA

- [1] Radojković M., Obradović D., Maksimović Č., (1989), Računari u komunalnoj hidrotehnici, Građevinska knjiga, Beograd
- [2] Janković Nišić B. (2002), Uncertainty Management for On-line Monitoring and Burst Detection in Water Distribution Networks, a thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London.
- [3] WRc (1994), Managing Leakage reports, UK Water Industry, WRc, UK.
- [4] Studija "Golden 100 properties", Pregled SoDoCon pregleda American Water Society (1999)