



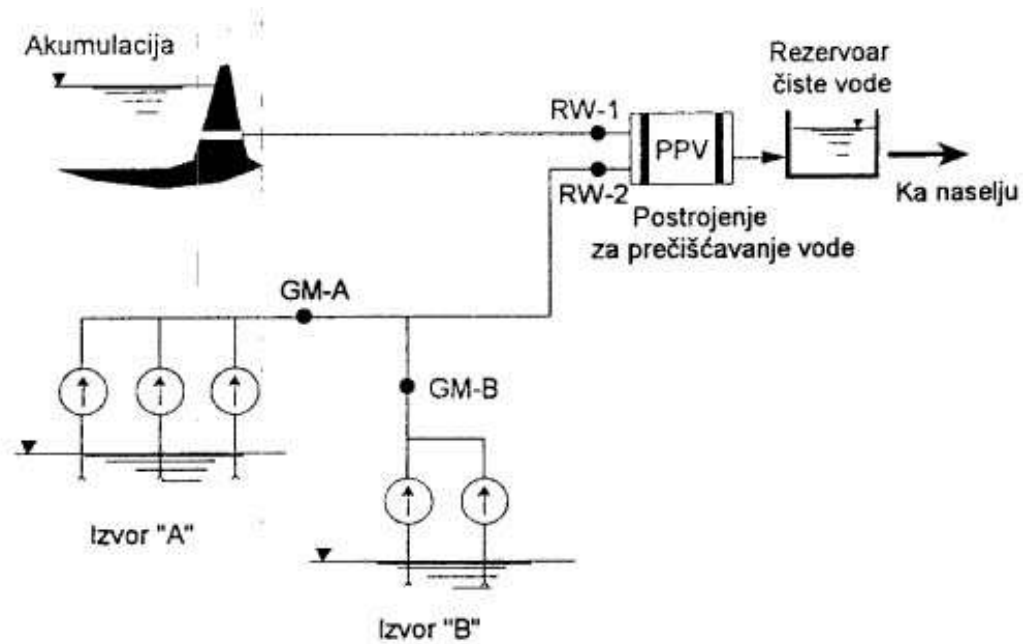
UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
KATEDRA ZA AUTOMATIKU I UPRAVLJANJE SISTEMIMA

Primer: vodovod

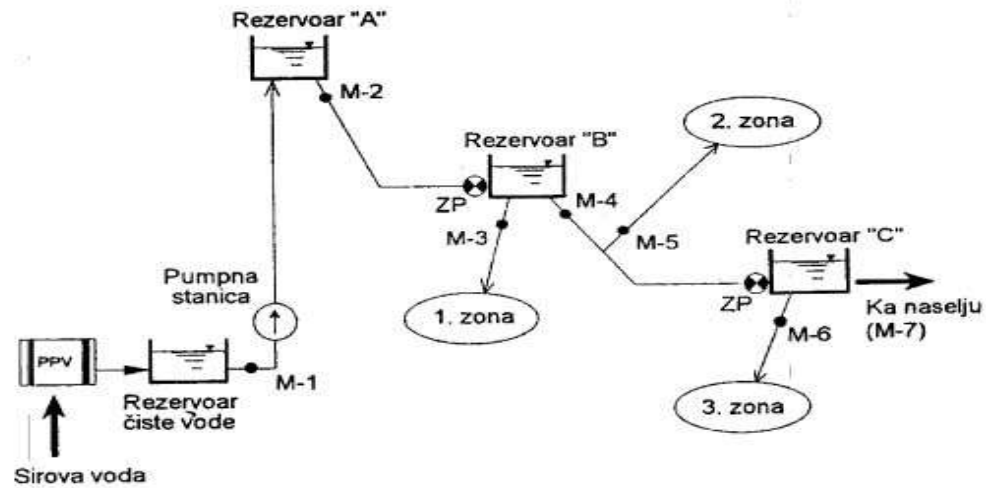
Modeliranje i simulacija sistema



Vodovodni sistem



Vodovodni sistem (2)



Softverski paketi za simulaciju vodovodnih mreža

- Softverski paketi:
EPANET, MIKENET, WESNET, 3D-NET, InfoWorks, NEPLAN, ...
- Osnovna funkcionalnost – simulacije promena pritiska i protoka u mreži
- Sadrže kvazi-stacionaran model mreže
 - Jednačine kontinuiteta za čvorove i
 - (modifikovane) Bernulijeve jednačine za cevi
 - U funkciji pritiska u čvorovima
 - Uračunavaju gubitke
 - Usled trenja fluida (vode) pri strujanju u cevima
 - Lokalne gubitke pojedinih elemenata mreže (ventili, zatvarači, ...)
- Sistem jednačina se rešava numeričkim metodama
 - U zadatim vremenskim intervalima

Napredne mogućnosti simulacionih paketa

- Grafički korisnički interfejs
 - Različiti pogledi na mrežu
 - GIS podrška
- Jednostavan unos podataka o modelu
- Povezivanje sa uređajima za telemetriju i data-logger-ima
- Interpretacija rezultata simulacije
- Razmena podataka sa drugim aplikacijama
- Dinamički model kvaliteta vode
- Autokalibracija modela
- Višejezičnost

Model distributivne vodovodne mreže

Osobine modela:

- Vremenski kontinualan sa kontinualnim stanjima
 - Pritisci i protoci su kontinualne veličine
- Statički model
 - Posmatraju se veličine u ustaljenom stanju
 - Kvazi-dinamički model – promena ustaljenih stanja se posmatra u više trenutaka u danu
- Nelinearan model
- Deterministički model
 - Nema slučajnih promenljivih
- Model sa stanjem (memorijom)
 - Promene veličina zavise od akumulacije vode – nivoa u rezervoarima

Kretanje fluida

- Kretanje fluida – brzine se razlikuju na pojedinim mestima
- Stacionarno strujanje – brzina se na istom mestu ne menja sa vremenom
- Posmatra se nestišljiv fluid

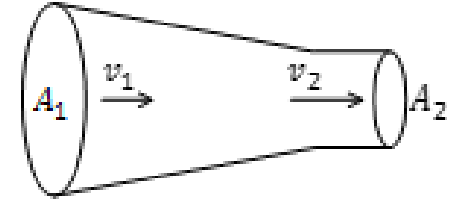
Osnovne zakonitosti:

- Jednačina kontinuiteta
- Bernulijeva jednačina

Jednačina kontinuiteta

- Definisana za cev

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{const}$$

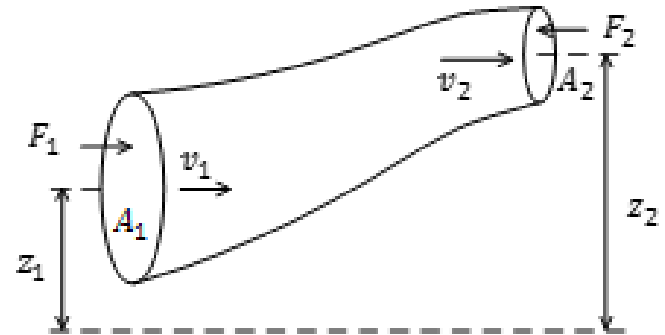


- Mi ćemo upotrebiti jednačinu kontinuiteta definisanu za tačku gde se spaja više cevi.

Bernulijeva jednačina

- Bernulijeva jednačina za stacionarno strujanje idealnog nestišljivog fluida

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const}$$



- U realnim uslovima postoje gubici (deo energije fluida tokom strujanja se nepovratno gubi)

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \sum_i h_i g$$

gde su h_i gubici lokalnih otpora (h_{li}) i usled trenja u cevima (h_{fi})

$$h_i \cdot g = (h_{li} + h_{fi}) \cdot g$$

Gubici usled lokalnih otpora

- Nastaju na mestima gde fluidna struja menja pravac, smer ili intenzitet strujanja:
 - mlaznice, difuzori, kolena, račve, zatvarači, ...

$$h_{li} = \xi_i \frac{v^2}{2}$$

- Koeficijent lokalnog otpora ξ_i određuje se eksperimentalno

Gubici usled otpora trenja

- Računanje gubitaka nije jednostavno!
- Koriste se empirijski obrasci:
 - Npr. Hejzen-Vilijamsov obrazac (Hazen-Williams):

$$h_{fi} = 10.67 \frac{L}{c^{1.85} D^{4.87}} q^{1.85}$$

- D – unutrašnji prečnik cevi
- q – protok
- L – dužina cevi
- c – koeficijent zavisan od materijala

– ...

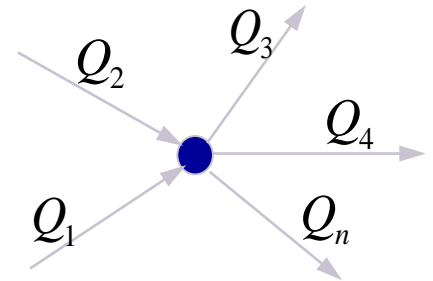
Model vodovodne mreže

- Vodovodna mreža se može predstaviti grafom
- Cevi su grane
 - Pumpa se odnosi na granu
- Cevi se završavaju (povezuju) u čvorovima
 - Potrošnja čvora
 - Zadržavanje vode u čvoru – rezervoar
 - Razmatraju se i rezervoari velike površine - akumulacija

Matematički model - Metoda čvorova

- Posmatra se pritisak u svakom čvoru i protok u svakoj cevi
- Za svaki čvor se vezuje jednačina kontinuiteta

$$\sum_j Q_{ij} + Q_{ii} = 0$$



- Za svaku cev se piše Bernulijeva jednačina proširena gubicima

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h(q)$$

cev je konstantnog poprečnog preseka pa je svuda jednaka brzina.

- Ili

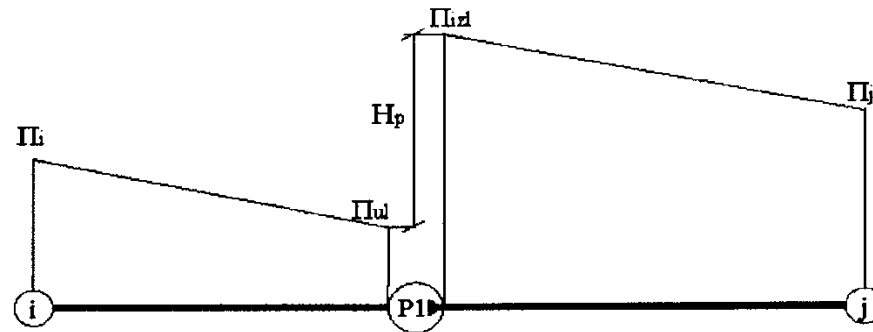
$$P_1 - P_2 - h(q) = 0$$

gde su P_1 i P_2 pijezometarske kote na krajevima cevi, a h gubici.

Pumpa

- Napor pumpe – povećanje pritiska potisa u odnosu na usis pumpe

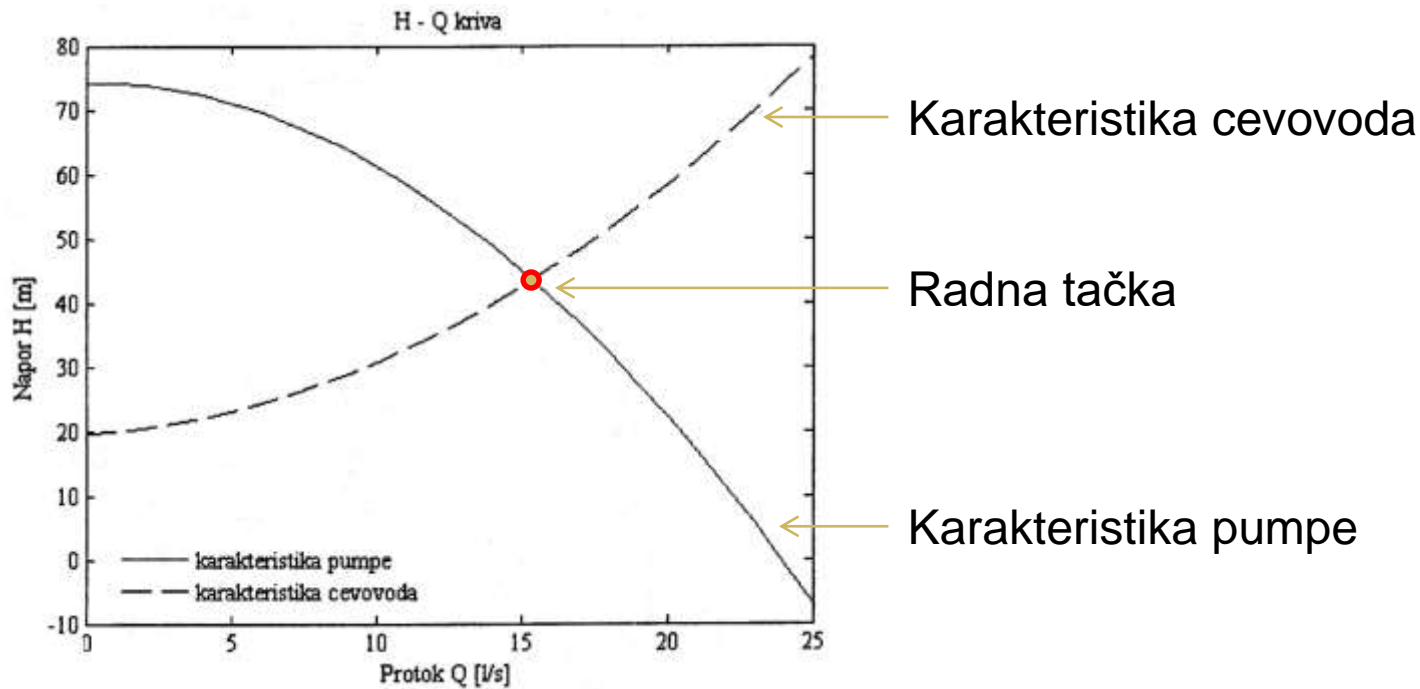
$$H_p = \frac{P_{izl} - P_{ul}}{\rho g} = \Pi_{izl} - \Pi_{ul}$$



- Cev sa pumpom

$$P_1 - P_2 - h(q) + H_p(q) = 0$$

Karakteristika pumpe



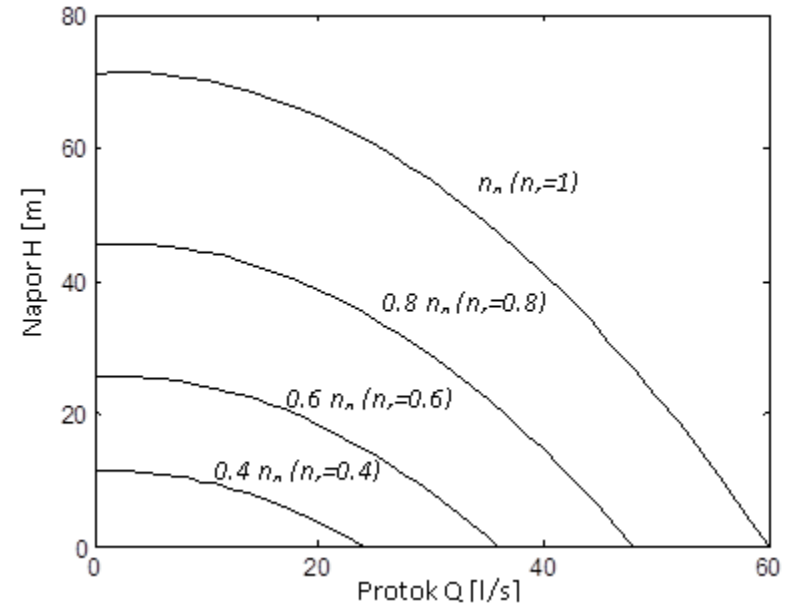
- Radna kriva pumpe - aproksimacija parabolom

$$H_p = H_0 + AQ_p^2 + BQ_p$$

Pumpa sa promenljivim brojem obrtaja

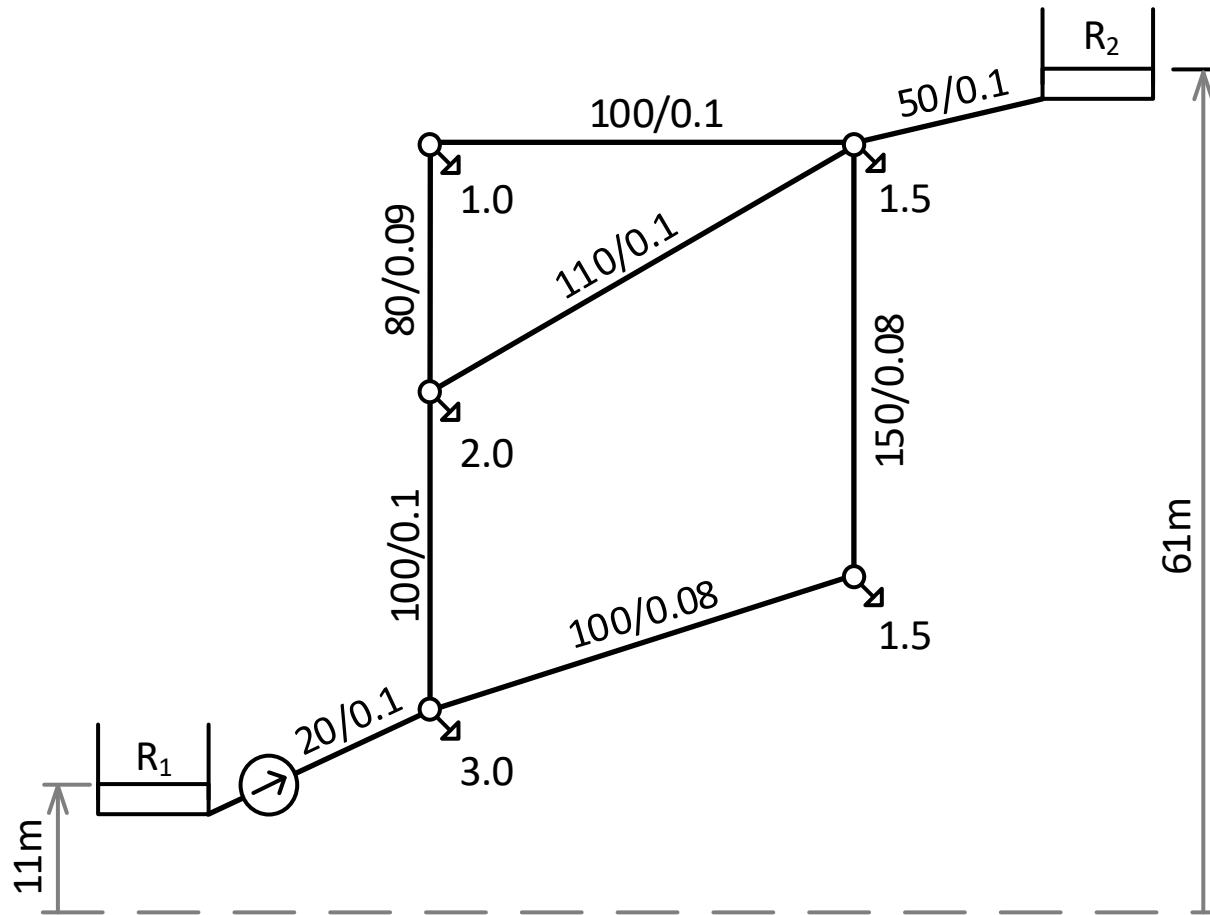
$$\frac{n}{n_n} = n_r = \frac{Q}{Q_n}$$

$$\frac{n^2}{n_n^2} = n_r^2 = \frac{H}{H_n}$$



$$H_p = n_r^2 (H_0 + A Q_p^2 + B Q_p)$$

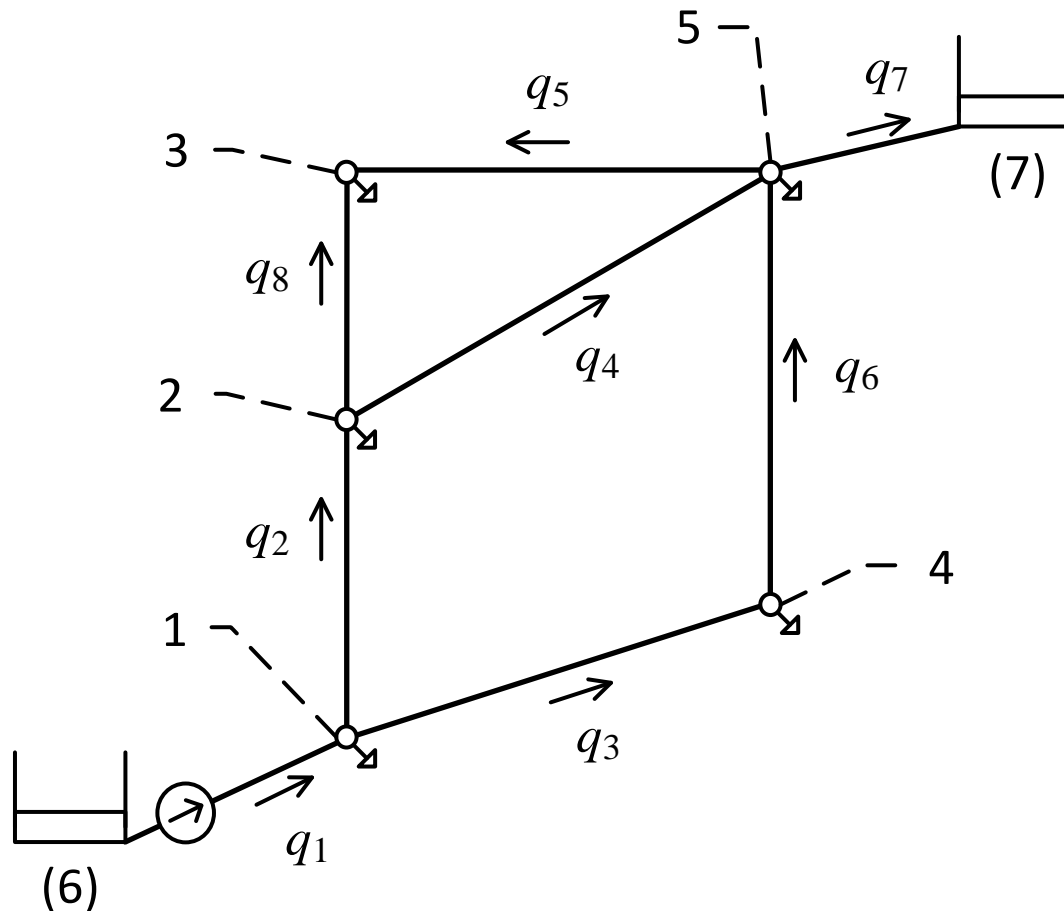
Model jednostavne mreže



- rezervoari imaju veliku površinu
- pumpa je stalno uključena $H_p(q) = -0.12037q^2 - 0.19444q + 74$
- gubici su samo u trenju.

Model

- Model sa 13 promenljivih:
 - 5 čvorova = 5 pritisaka
 - 8 grana = 8 protoka



Model (2)

$$H_6 - P_1 - h_1(q_1) + H_p(q_1) = 0$$

$$P_1 - P_2 - h_2(q_2) = 0$$

$$P_1 - P_4 - h_3(q_3) = 0$$

$$P_2 - P_5 - h_4(q_4) = 0$$

$$P_5 - P_3 - h_5(q_5) = 0$$

$$P_4 - P_5 - h_6(q_6) = 0$$

$$P_5 - H_7 - h_7(q_7) = 0$$

$$P_2 - P_3 - h_8(q_8) = 0$$

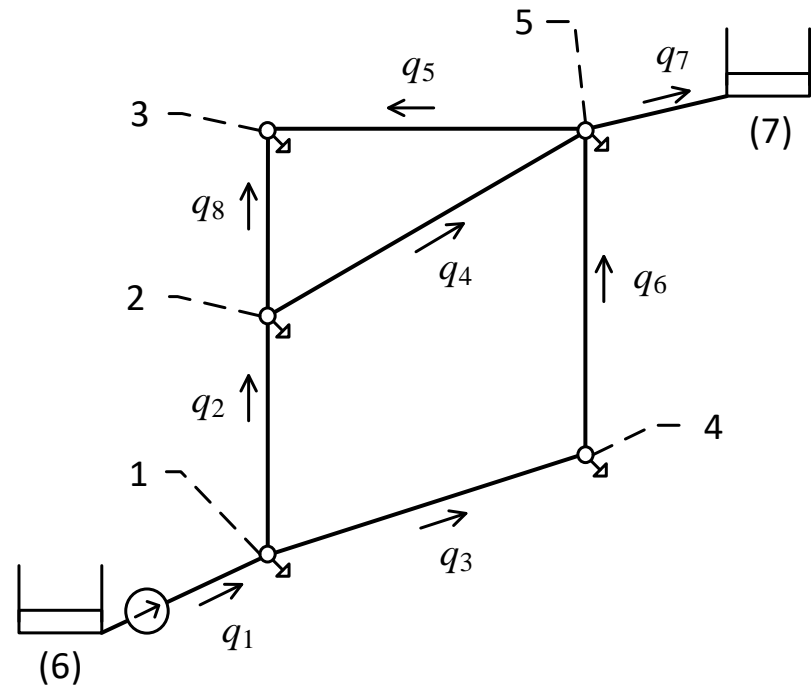
$$q_1 - q_2 - q_3 - 3 = 0$$

$$q_2 - q_4 - q_8 - 2 = 0$$

$$q_5 + q_8 - 1 = 0$$

$$q_3 - q_6 - 1.5 = 0$$

$$q_4 - q_5 + q_6 - q_7 - 1.5 = 0$$



Statički model
nelinearan

$$h_i(q) = 10.67 \frac{L_i}{c_i^{1.85} D_i^{4.87}} q^{1.85}$$

Problem i rešenje

- Problem je poznat - sistem nelinearnih algebarskih jednačina:

$$f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

...

$$f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

$$f_1(\mathbf{x}) = 0 \quad \leftarrow \text{kraće}$$

$$f_2(\mathbf{x}) = 0$$

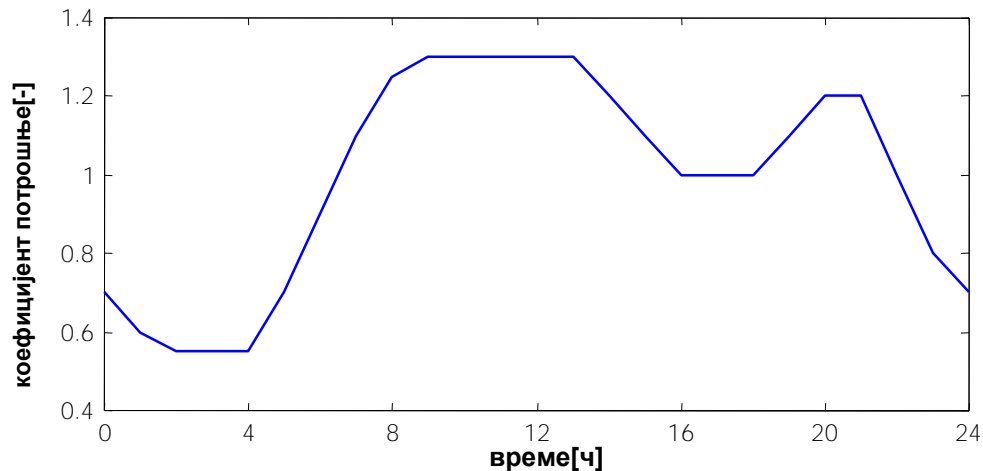
...

$$f_n(\mathbf{x}) = 0$$

- Numeričko rešenje
 - Njutnova metoda
 - Njutn-Rapsonov postupak
 - Gaus-Njutnov postupak
 - ...

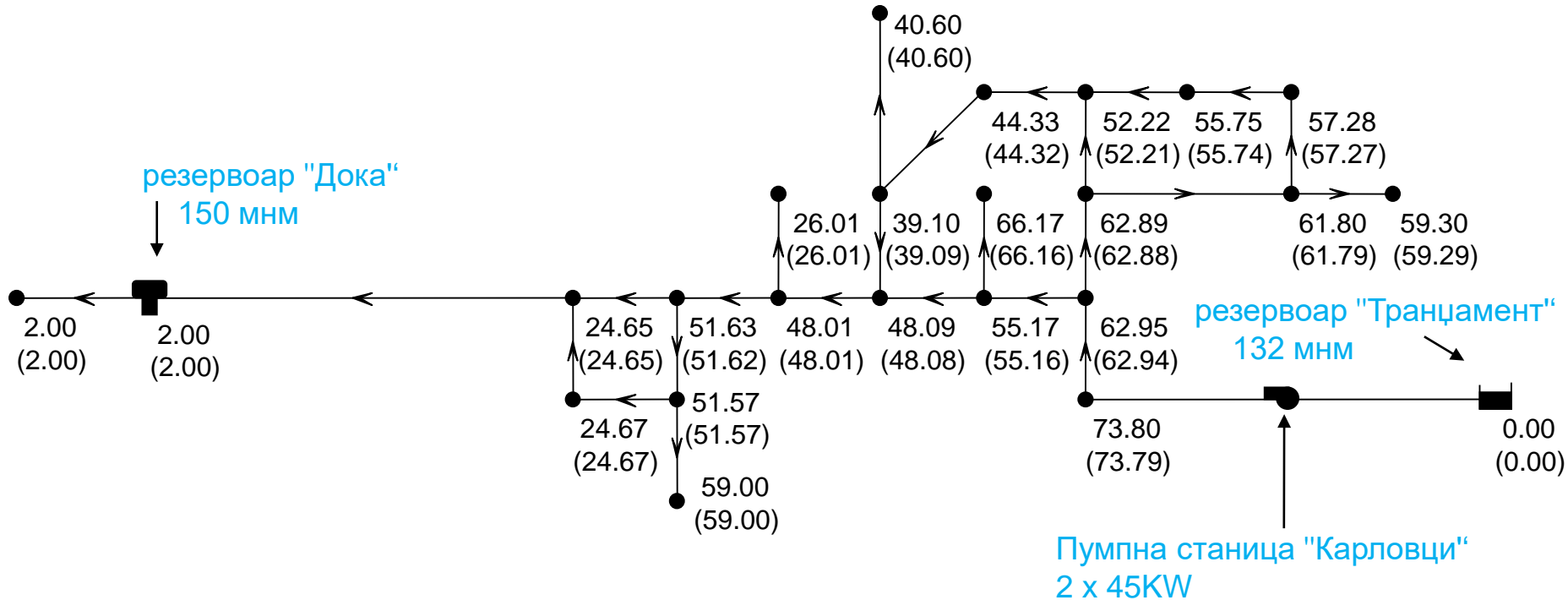
Simulacija vodovoda Sremski Karlovci

- Brdsko naselje (77 – 165 m.n.v.)
- Mreža cevi prečnika 80, 100, 150, 200 i 250 mm
- Izvršeno grupisanje manjih potrošača
- Aproksimirana čvorna potrošnja na osnovu broja stanovnika napajanih iz čvora (prosečna dnevna potrošnja 120 litara po stanovniku)
- Zavisnost potrošnje vode od doba dana



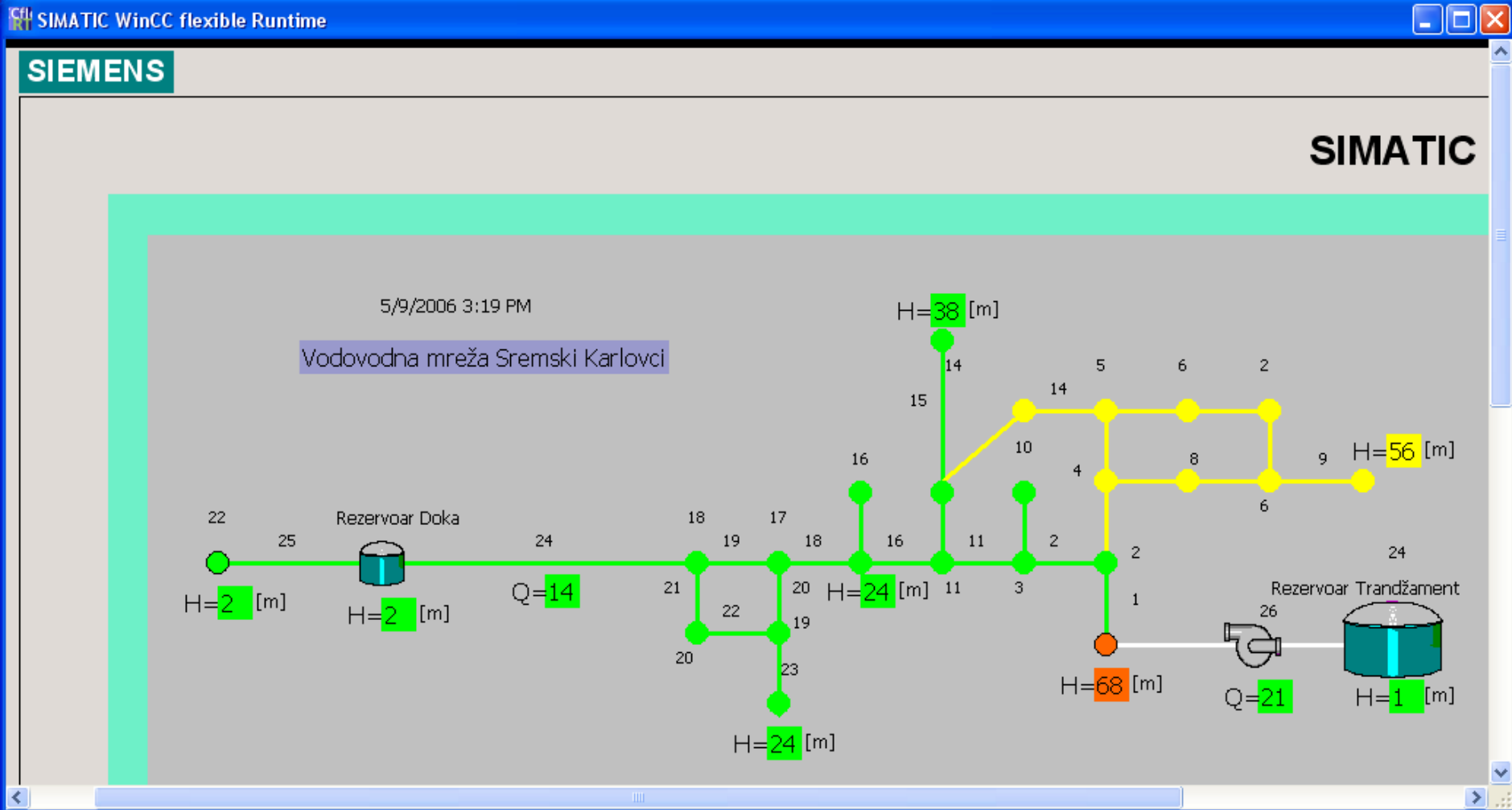
Model mreže – Sremski Karlovci

- Poređenje rezultata Matlab simulacionog rešenja sa EPANET-om



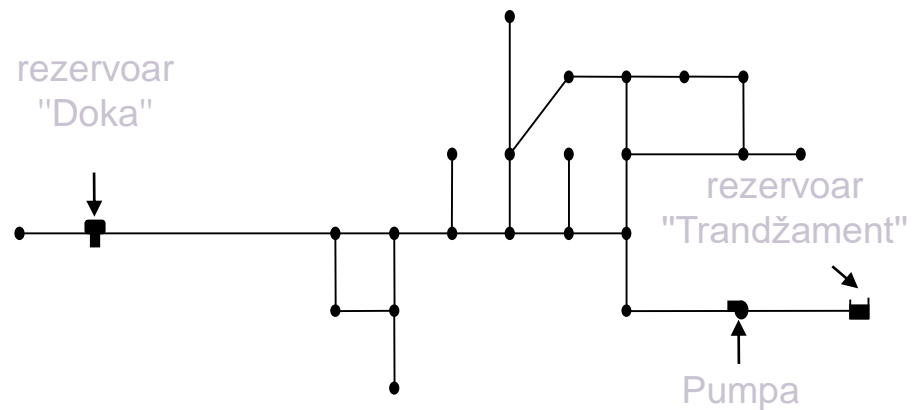
SIEMENS WinCC SCADA klijent

prikaz simulacionih rezultata



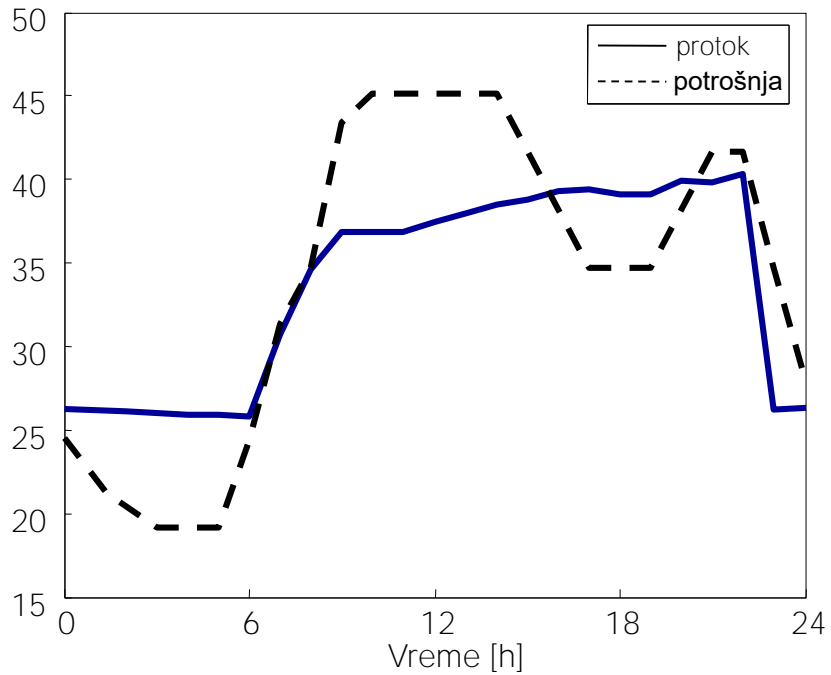
Simulacija optimalnog upravljanja 45kW pumpom

- Cilj: odrediti optimalnu brzinu obrtanja pumpe tokom 24h
- Kriterijum optimalnosti: minimum utroška el. energije
- Ograničenja:
 - Pritisak u svakom čvoru u zadatim granicama [$\min P$, $\max P$]
 - Nivo vode u rezervoaru u zadatim granicama [$\min H$, $\max H$] i
 - zahteva se da se tokom dana rezervoar napuni i isprazni.
- Proračun urađen u MATLAB-u ...

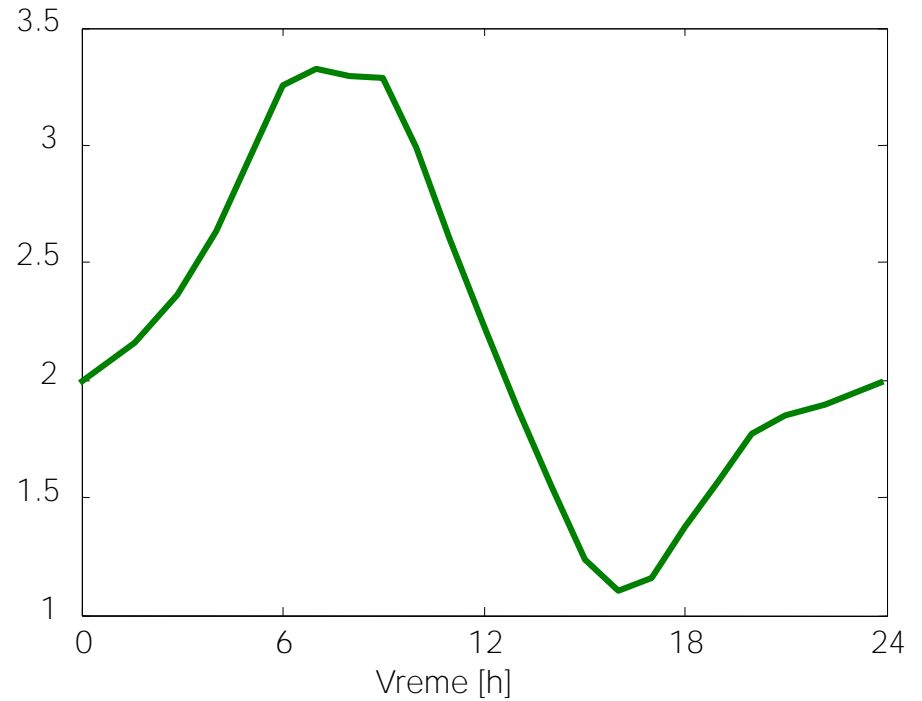


Rezultati optimizacije

Protok / potrošnja [l/s]



Nivo vode u rezervoaru [m]



Model vodovodne mreže: Novi Sad

Day 1, 12:00 AM

