BIBLID 0350–1426 (2006) 35:2 p. 27–32

HIDRAULIČKI PRORAČUN SLOŽENIH MREŽA SISTEMA DALJINSKOG GREJANJA

Poznavanje raspodele protoka i pritiska u mreži sistema daljinskog grejanja u različitim pogonskim uslovima i u celom opsegu snaga proizvodnje i potrošnje toplote, neophodan je uslov za efikasan transport i distribuciju toplote od izvora do potrošača. Mreže sistema daljinskog grejanja imaju prstenastu konfiguraciju i njihov hidraulički proračun je moguć samo ukoliko se istovremeno sprovodi za sve deonice mreže. U radu je prikazana numerička metoda za hidraulički proračun sistema daljinskog grejanja koja se može primeniti na složene mreže proizvoljne konfiguracije. Metoda je zasnovana na linearizovanim bilansima promene pritisaka u okviru prstenova mreže i iterativnom rešavanju korigovanih protoka. Za razliku od standardne metode Hardy Cross, u ovde prikazanom postupku se pri formiranju bilansa promene pritiska za određeni prsten ne zanemaruje uticaj korekcija protoka susednih prstenova. Razvijena metoda omogućava brze i efikasne hidrauličke proračune na računaru i najsloženijih mreža koje se mogu javiti u inženjerskoj praksi. Primena metode je prikazana za jednu konfiguraciju toplovodne mreže koja uključuje toplanu, toplotne podstanice, pumpe i razvodne i povratne cevovode.

KLJUČNE REČI: sistem daljinskog grejanja; toplovodna mreža; hidraulika; numerički proračun

VLADIMIR STEVANOVIĆ i BRANISLAV ŽIVKOVIĆ, Mašinski fakultet, Beograd, SRĐAN NIKODIJEVIĆ, JKP „Beogradske elektrane“, Beograd, BLAŽENKA MASLOVARIĆ, SANJA PRICA, MAJA TODOROVIĆ, RADOSLAV GALIĆ, Mašinski fakultet, Beograd

HYDRAULIC CALCULATION OF COMPLEX NETWORKS IN DISTRICT HEATING SYSTEMS

Information about flow rates and pressure distribution within a district heating system under different operational conditions and in the whole range of heat production and consumption loads is the only prerequisite for efficient transport and distribution of heat from a source to consumers. District heating system networks are composed of pipeline loops and their hydraulic calculation is possiible if one simultaneously solves all system segments. This paper presents a numerical method for hydraulic calculations of district heating networks that is applicable to complex networks of different configurations. The method is based on the linearized balance of pressure changes along network closed loops and iterative solution of corrected flow rates. Compared with the standard Hardy Cross method, procedure here applied does not neglect the flow rate corrections of neighbouring loops in the pressure change balance of observed loop. The developed method enables fast and efficient hydraulic computer calculations even for the most complex networks that appear in engineering practice. The method application is demonstrated for a typical configuration of district heating system network that includes heat production plant, heat consumer substations, pumps and supply and return pipelines.

KEY WORDS: district heating system; pipelines; hydraulics; numerical calculation

1. Uvod

Postizanje energetske efikasnosti pri transportu i distribuciji toplote u okviru sistema daljinskog grejanja podrazumeva zadovoljenje čitavog niza projektnih i radnih uslova, kao što su vrsta postrojenja za proizvodnju (na primer toplana ili postrojenje za kogeneraciju), usklađenost temperature razvodne vode i protoka, način regulacije transporta toplote u okviru mreže (promenom temperature, protoka ili kombinovano), vođenje pogona u prelaznim režimima kada se menjaju potrebe potrošača i dr. Pri tome, jedan od osnovnih preduslova za zadovoljenje energetski efikasnog transporta toplote u okviru sistema daljinskog grejanja je hidrauličko uravnoteženje toplovodne mreže.

Kod mreže koja nije uravnotežena potrošači nemaju potreban komfor grejanja, često se iz izvora šalje veća količina toplote kako bi se zadovoljili kritični potrošači, ili se protoci nepotrebno prigušuju, što povećava utrošak energije za pogon pumpi. Potreba za hidrauličkim uravnoteženjem po-

sebno se javlja pri izmenama u okviru mreže, zbog priključenja novih potrošača, ili usled odvajanja delova mreže koji su u kvaru.

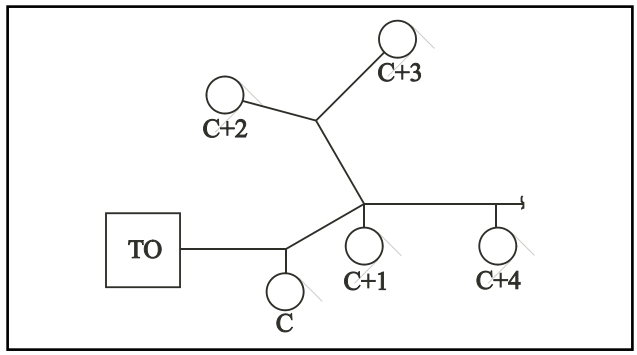
Cevne mreže sistema daljinskog grejanja imaju prstenastu konfiguraciju, tako da je njihov hidraulički proračun moguće sprovesti samo istovremeno za sve segmente koji uključuju cevovode, pumpe i pumpne stanice, toplotne podstanice i postrojenje izvora toplote. Najčešće korišćeni numerički postupak za proračun prstenastih mreža je metoda Hardy Cross [1 i 2]. Ova metoda je zasnovana na linearizovanim bilansima promene pritisaka u okviru prstenova mreže i iterativnom određivanju korigovanih protoka za svaki prsten, sve dok pad pritiska po zatvorenoj konturi u svakom prstenu ne bude manji od zadate greške. Pri tome se zanemaruje uticaj korekcije protoka okolnih prstenova na onaj prsten za koji se računa korigovani protok. Pod prstenom se podrazumeva strujni krug, odnosno svaka zatvorena kontura koju obrazuje cevna mreža.

U ovom radu je prikazana numerička metoda za hidraulički proračun složenih mreža sistema daljinskog grejanja koja je zasnovana na modifikovanom metodu Hardy Cross. Postupak formiranja linearizovanih bilansa promene pritiska u okviru prstenova mreže je isti kao kod metode Hardy Cross, ali se uticaj korekcije protoka susednih prstenova ne zanemaruje. Na taj način se postiže brža konvergencija iterativnog rešavanja. Međutim, takav pristup zahteva simultano rešavanje celog sistema bilansnih jednačina po korekcijama protoka svih segmenata. Kod standardne metode Hardy Cross korekcije protoka se rešavaju od prstena do prstena, što pojednostavljuje algoritam proračuna i ne zahteva simulatno numeričko rešavanje sistema linearnih algebarskih jednačina. S obzirom da sistemi daljinskog grejanja obuhvataju toplotne podstanice, pumpe ili pumpne stanice i postrojenja za proizvodnju toplote, u razvijeni numerički metod su uključeni i tačkasti modeli navedenih komponenti. Primenljivost modela je pokazana na jednom primeru.

Razvoj i primena navedenog numeričkog postupka je prvi korak u okviru projekta "Optimizacija rada sistema daljinskog grejanja primenom numeričkih modela za simulaciju transporta toplote u složenim toplovodnim mrežama u stacionarnim i prelaznim režimima", koji je podržan od Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije u okviru Nacionalnog programa energetske efikasnosti. Sledeće etape u okviru ovog projekta su primena navedenog modela na odabrani realni sistem daljinskog grejanja u okviru JKP "Beogradske elektrane", poboljšanje energetske efikasnosti putem uravnoteženja mreže i korekcija hidrauličkih režima rada, kao i razvoj modela i optimizacija prelaznih režima rada.

2. Hidraulički model sistema daljinskog grejanja

Primer sistema daljinskog grejanja je prikazan na slici 1. Sagorevanjem fosilnog goriva u toplani (označenoj sa TO na slici 1) oslobađa se toplota koja se razvodnim cevovodom transportuje do potrošača koji su obeleženi sa C, C+1, C+2 itd. Na osnovu uprošćenog šematskog prikaza na slici 1 određeni su prsteni cevne mreže koji su prikazani na slici 2. Takođe, na slici 2 su ucrtane i pumpe. Konfiguracija mreže je određena prstenovima, segmentima i čvorovima (račvama). Neki od prstenova na slici 2 su obeleženi sa *L-1, L, L+1, L+2*. Segmenti su cevovodi, pumpe, toplotne podstanice i toplotni izvor. Deonice cevovoda koje obrazuju prsten *L* obeležene su sa *i, j, j-2, k, l-2, l.* Pumpa u okviru prstena L obeležena je sa *i-1*, a toplotne podstanice sa *j-1* i *l-1*. Kao što se može videti na slici 2, usvojeno je da se segmenti koji su po dva u spoju obeležavaju opadajućim nizom prirodnih brojeva u pretpostavljenom smeru strujanja. Ukoliko je ukupan broj segemanta *n*, tada oznaka segmenta *s* pripada skupu $s \in \{1,2,...,n\}$. Neki od čvorova na slici 2 obeleženi su sa *J-2, J-1, J, J+1, J+2, J+3*. Ukoliko je ukupan broj čvorova JN, tada je oznaka čvora element skupa $J \in \{1,2,...,JN\}$. U okviru metode Hardy Cross, za svaki prsten definisana je korekcija protoka, tako je prstenu *L* pridružena korekcija protoka Δm_L, prstenu *L+1* korekcija protoka Δm_{L+1} itd. (slika 2). U cilju određivanja uticaja korekcija protoka na promenu pritiska u segmentu *s* potrebno je svakom segmentu mreže pridružiti primarni i sekundarni prsten u vidu matrice R (jednačina 1).

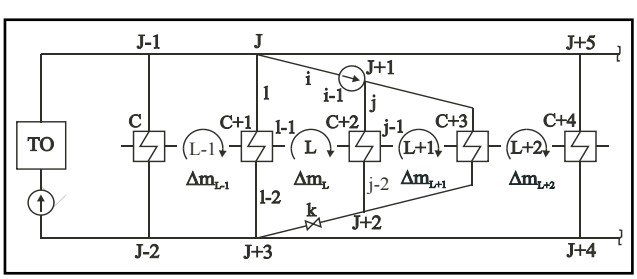


Slika 1. Šematski prikaz sistema daljinskog grejanja

$$R(s,t) = \begin{bmatrix} R(1,1) & R(1,2) \\ R(2,1) & R(2,2) \\ \vdots & \\ R(s,1) & R(s,2) \\ \vdots & \\ R(n,1) & R(n,2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

u kojoj prvi indeks *s* člana R(s,t) označava segment, a drugi indeks *t* označava da li *R(s,t)* sadrži vrednost primarne *t = 1* ili sekundarne petlje *t = 2*. Tako, na primer, segment *s = i* može imati primarnu petlju *L* a sekundarnu *L+2*, dakle *R(s,1) = L* i *R(s,2) = L+2*. Ukoliko segment nema sekundarni prsten (na primer segment između čvorova *J-1* i *J*), vrednost člana druge kolone matrice je *R(s,2) = 0*. U cilju potpunog definisanja konfiguracije mreže potrebno je još definisati matricu G čiji članovi određuju granične uslove svakog segmenta, kao i matricu K, čiji članovi određuju eventualni spoj početka ili kraja segmenta sa čvorom. Matrica G je:

$$G(s,t) = \begin{bmatrix} G(1,1) & G(1,2) \\ G(2,1) & G(2,2) \\ \vdots & \\ G(s,1) & G(s,2) \\ \vdots & \\ G(n,1) & G(n,2) \end{bmatrix} \quad (2)$$



Slika 2. Prstenasta konfiguracija sistema daljinskog grejanja

gde članovi prve kolone *G(s,1)* označavaju granični uslov za početak segmenta *s*, dok članovi druge kolone označavaju granični uslov kraja segmenta *s*, pri čemu su usvojene vrednosti kao u tabeli 1.

Tabela 1. Oznake graničnih uslova početka i kraja segmenta

Granični uslov	G(s,t)
Cev	1
Pumpa	2
Podstanica ili toplana	3
Čvor	4

Matrica K ima oblik:

$$K(s,t)=\begin{bmatrix} K(1,1) & K(1,2) \\ K(2,1) & K(2,2) \\ \vdots & \\ K(s,1) & K(s,2) \\ \vdots & \\ K(n,1) & K(n,2) \end{bmatrix} \tag{3}$$

gde članovi prve kolone označavaju redni broj čvora sa kojim je početak segmenta u spoju, dok članovi druge kolone označavaju redni broj čvora sa kojim je kraj segmenta u spoju (ukoliko početak ili kraj cevi nije u spoju sa čvorom, vrednost člana je *K(s,t) = 0*). Vrsta segmenta je određena zadatom dužinom segmenta prema tabeli 2.

Tabela 2. Definisanje vrste segmenta

Segment	L_s (m)
Cev	>0
Pumpa	0
Podstanica ili toplana	–1

Pored dužine, svakom segmentu se pridružuje i odgovarajući prečnik, gustina i kinematska viskoznost fluida. Svakoj cevi se pridružuje geodetska visina početka h(s, 1) i kraja h(s, 2). Pumpama se pridružuje odgovarajuća radna karakteristika u obliku:

$$\Delta p(m_p)=K_{p1}m_p^2+K_{p2}m_p+K_{p3} \tag{4}$$

pri čemu u slučaju pumpne stanice sa više redno ili paralelno povezanih pumpi prethodni izraz predstavlja ekvivalentnu radnu karaktersitiku. Cevovodima, podstanicama i toplotnom izvoru pridružuje se suma svih koeficijenata lokalnih otpora.

Pad pritiska usled trenja u cevi se određuje prema:

$$\Delta p_s=f_s\frac{\rho_s u_s^2}{2}\frac{L_s}{D_{hs}}+\zeta_s\frac{\rho_s u_s^2}{2}= =\left(f_s\frac{L_s}{2D_{hs}\rho_s A_s^2}+\zeta_s\frac{1}{2\rho_s A_s^2}\right)m_s^2=a_s m_s^2 \tag{5}$$

gde se koeficijent trenja *f* određuje prema odgovarajućem hidraulučkom obrascu, recimo Altšulovom obrascu za turbulentno strujanje u hrapavim cevima [3]. Zbirni koeficijent lokalnog otpora je označen sa ζ. Maseni protok je određen proizvodom:

$$m_s=\rho_s|u_s|A_s \tag{6}$$

a hidraulički prečnik je:

$$D_{hs}=\frac{4A_s}{S_s} \tag{7}$$

Pad pritiska u podstanici ili toplotnom izvoru se određuje prema:

$$\Delta p_s=\zeta_s\frac{\rho_s u_s^2}{2}=\zeta_s\frac{m_s^2}{2\rho_s A_s^2}=a_s m_s^2 \tag{8}$$

Bilans promene pritiska po segmentima u okviru zatvorene konture prstena *L* u opštem slučaju ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned}&\sum_{\substack{s\\R(s,1)=L}}\Big\{sign(m_s^*)\,a_s\Big[m_s+sign(m_s^*)\,\Delta m_L-sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(s,2)}\Big]^2+\\&\quad+sign(m_s^*)\,\rho_s g\,(h_{s2}-h_{s1})\Big\}\\&+\sum_{\substack{s\\R(s,2)=L}}\Big\{-sign(m_s^*)\,a_s\Big[m_s+sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(s,1)}-sign(m_s^*)\,\Delta m_L\Big]^2-\\&\quad-sign(m_s^*)\,\rho_s g\,(h_{s2}-h_{s1})\Big\}\\&+\sum_{\substack{p\\R(p,1)=L}}-sign(m_s^*)\Big\{K_{p1}\Big[m_p+sign(m_s^*)\,\Delta m_L-sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(p,2)}\Big]^2\\&\quad+K_{p2}\Big[m_p+sign(m_s^*)\,\Delta m_L-sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(p,2)}\Big]+K_{p3}\Big\}\\&+\sum_{\substack{p\\R(p,2)=L}}sign(m_s^*)\Big\{K_{p1}\Big[m_p+sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(p,1)}-sign(m_s^*)\,\Delta m_L\Big]^2+\\&\quad+K_{p2}\Big[m_p+sign(m_s^*)\,\Delta m_{R(p,1)}-sign(m_s^*)\,\Delta m_L\Big]+K_{p3}\Big\}=0\end{aligned} \tag{9}$$

U jednačini (9) znak protoka *sign(m*)* je određen u odnosu na pozitivan matematički smer obrtanja koji je naznačen na slici 2, pri čemu je:

$$m_s^*=\rho_s u_s A_s \tag{10}$$

Indeks *s* u jednačini (9) označava cev, podstanicu ili toplotni izvor, dok indeks *p* označava pumpu ili pumpnu stanicu. Protoci m_s i m_p su na početku proračuna pretpostavljeni tako da zadovoljavaju bilans mase u svim spojevima segmenata, odnosno čvorovima. Da bi bio zadovoljen bilans promene pritiska po zatvorenoj konturi prstena, uvode se korekcije protoka za svaki prsten Δm čiji se znak takođe određuje u odnosu na pozitivan matematički smer obrtanja.

Tabela 3. Ulazni podaci za hidraulički proračun mreže sa slika 3 i 4

Dozvoljena greška po prstenu [Pa]	10
Relativna hrapavost cevi	$2e^{-4}$
Ukupan broj deonica	27
Ukupan broj čvorova	6
Ukupan broj petlji	5

Razvojem jednačine (9) i njenom linearizacijom putem zanemarivanja članova sa kvadratom ili proizvodom dve korekcije protoka dobija se:

$$A_{LL}\Delta m_L + \sum_{\substack{s \\ R(s,1)=L}} A_{LR(s,2)}\Delta m_{R(s,2)} + \sum_{\substack{s \\ R(s,2)=L}} A_{LR(s,1)}\Delta m_{R(s,1)} + \sum_{\substack{p \\ R(p,1)=L}} A_{LR(p,2)}\Delta m_{R(p,2)} + \sum_{\substack{p \\ R(p,2)=L}} A_{LR(p,1)}\Delta m_{R(p,1)} = b_L \tag{11}$$

Formiranjem jednačine (11) za svaki prsten mreže dobija se sistem linearnih algebarskih jednačina koji u matričnom obliku glasi:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \tag{12}$$

gde su:

$$A_{LL} = \sum_{\substack{s \\ R(s,1)=L}} A_s m_s + \sum_{\substack{s \\ R(s,2)=L}} A_s m_s - 0.5 \sum_{\substack{p \\ R(p,1)=L}} (2K_{p1}m_p + K_{p2}) - 0.5 \sum_{\substack{p \\ R(p,2)=L}} (2K_{p1}m_p + K_{p2}) \tag{13}$$

$$A_{LR(s,2)} = A_{R(s,1)R(s,2)} = -a_s m_s \tag{14}$$

$$A_{LR(s,1)} = A_{R(s,2)R(s,1)} = -a_s m_s \tag{15}$$

$$A_{LR(p,2)} = A_{R(p,1)R(p,2)} = 0.5\,(2K_{p1}m_p + K_{p2}) \tag{16}$$

$$A_{LR(p,1)} = A_{R(p,2)R(p,1)} = 0.5\,(2K_{p1}m_p + K_{p2}) \tag{17}$$

$$b_L = 0.5\left[- \sum_{\substack{s \\ R(s,1)=L}} sign\,(m_s^*)\, a_s m_s^2 + \sum_{\substack{s \\ R(s,2)=L}} sign\,(m_s^*)\, a_s m_s^2 + \sum_{\substack{s \\ R(s,1)=L \vee \\ R(s,2)=L}} \rho_s g \left(h_{s2} - h_{s1}\right) + \sum_{\substack{p \\ R(p,1)=L}} sign\,(m_s^*)\,\Delta p\,(m_p) - \sum_{\substack{p \\ R(p,2)=L}} sign\,(m_p^*)\,\Delta p\,(m_p) \right] \tag{18}$$

Matrica A je simetrična s obzirom na jednakosti (14) i (15), odnosno (16) i (17). Koeficijenti b_L, odnosno izraz u zagradi na desnoj strani jednačine (18) predstavlja promenu pritiska duž zatvorene konture prstena *L* koja treba da bude manja od zadate greške proračuna.

Sistem linearnih jednačina (12) se rešava po korekcijama protoka primenom Croutovog metoda [4]. Pretpostavljeni protoci iz m-tog iterativnog koraka se koriguju prema:

$$m_s^{m+1} = m_s^m + sign\,(m_s^{*,m})\,\Delta m_L - sign\,(m_s^{*,m})\,\Delta m_{R(s,2)} \tag{19}$$

odnosno:

$$m_s^{m+1} = m_s^m + sign\,(m_s^{*,m})\,\Delta m_{R(s,1)} - sign\,(m_s^{*,m})\,\Delta m_L \tag{20}$$

zavisno od toga da li je prsten *L* primarni (jednačina 19) ili sekundarni (jednačina 20) za segment *s*.

Procedura proračuna sastoji se iz sledećih osnovnih koraka:

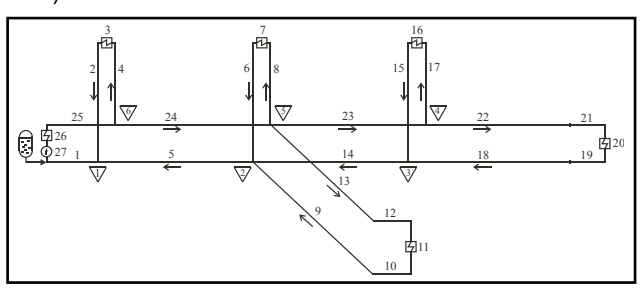
1. pretpostaviti protoke kroz svaki segment u mreži tako da bude zadovoljena jednačina kontinuiteta u svim čvorovima mreže;
2. odrediti korekcije protoka za svaki prsten rešavanjem sistema jednačina (12);
3. ponavljati drugi korak sve dok pad pritiska zatvorene konture u svim prstenovima mreže ne bude manji od zadate greške.

Napominje se da ukoliko se u jednačini (11) na levoj strani zanemare svi članovi sem prvog, postupak proračuna se svodi na metod Hardy Cross.

Na osnovu izloženog postupka proračuna razvijen je kompjuterski program u FORTRAN-u.

3. Rezultati proračuna

Primena razvijenog numeričkog postupka prikazana je na primeru magistralnog toplovoda kojim se toplota transportuje od izvora toplote do toplana kao krajnjih potrošača (slika 3).



Slika. 3. Šematski prikaz sistema daljinskog grejanja za koji je sproveden hidraulički proračun

Potrebni elementi za definisanje konfiguracije mreže su prikazani na slici 4. Ulazni podaci za proračun su dati u tabelama 3 i 4, a rezultati proračuna u tabeli 5. Rezultati pokazuju da je zadovoljen bilans mase za svaki čvor, kao i da je bilans promene pritiska u okviru zatvorene konture svakog prstena jednak nuli. U algoritmu proračuna je usvojeno da se mesto regulacije pritiska u okviru mreže nalazi na kraju segmenta 1, tako da je vrednost pritiska na tom mestu zadata. Ulazni podaci za sprovedeni proračun su odabrani tako da ilustruju primenu razvijenog numeričkog postupka i da istaknu uticaj pojedinih projektnih rešenja na radne parametre, tako da ne moraju odgovarati optimalnom projektnom rešenju.

Minimalni pritisci se dobijaju na spoju povratnih cevovoda 14 i 15 koji se nalazi na najvećoj nadmorskoj visini od 90 m. Zona minimalnog pritiska ukazuje na mesto moguće pojave kavitacije. Zone maksimalnog pritiska ukazuju na potrebne projektne pritiske u mreži.

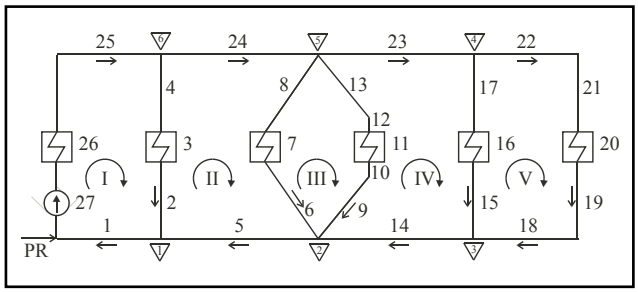
Na osnovu sračunatih protoka i poznatih temperatura vode u razvodnom i povratnom cevovodu mogu se izračunati količine toplote predate pojedinim potrošačima.

Tabela 4. Ulazni podaci za svaki segment (prema sl. 3 i 4)

BC	D (m)	L (m)	PP	SP	G1	G2	H1	H2	m (kg/s)	Ro (kg/m^3)	Ni (m^2/s)	Y1	Y2	K_{p1}	K_{p2}	K_{p3}	Z
1	0,7	1000	1	0	4	2	1	0	1000	978	4.10E-07	0	0	0	0	0	0
2	0,4	500	1	2	3	4	0	1	200	978	4.10E-07	0	0	0	0	0	0
3	0,4	–1	1	2	1	1	0	0	200	961	3.30E-07	0	0	0	0	0	700
4	0,4	500	1	2	4	3	6	0	200	943	2.50E-07	0	0	0	0	0	0
5	0,7	10000	2	0	4	4	2	1	800	978	4.10E-07	50	0	0	0	0	0
6	0,4	500	2	3	3	4	0	2	200	978	4.10E-07	50	50	0	0	0	0
7	0,4	–1	2	3	1	1	0	0	200	961	3.30E-07	50	50	0	0	0	400
8	0,4	500	2	3	4	3	5	0	200	943	2.50E-07	50	50	0	0	0	0
9	0,25	4000	3	4	1	4	0	2	200	978	4.10E-07	40	50	0	0	0	0
10	0,25	500	3	4	3	1	0	0	200	978	4.10E-07	40	40	0	0	0	0
11	0,25	–1	3	4	1	1	0	0	200	961	3.30E-07	40	40	0	0	0	5
12	0,25	500	3	4	1	3	0	0	200	943	2.50E-07	40	40	0	0	0	0
13	0,25	4000	3	4	4	1	5	0	200	943	2.50E-07	50	40	0	0	0	0
14	0,5	8000	4	0	4	4	3	2	400	978	4.10E-07	90	50	0	0	0	0
15	0,3	500	4	5	3	4	0	3	200	978	4.10E-07	90	90	0	0	0	0
16	0,3	–1	4	5	1	1	0	0	200	961	3.30E-07	90	90	0	0	0	250
17	0,3	500	4	5	4	3	4	0	200	943	2.50E-07	90	90	0	0	0	0
18	0,3	6000	5	0	1	4	0	3	200	978	4.10E-07	60	90	0	0	0	0
19	0,3	500	5	0	3	1	0	0	200	978	4.10E-07	60	60	0	0	0	0
20	0,3	–1	5	0	1	1	0	0	200	961	3.30E-07	60	60	0	0	0	5
21	0,3	500	5	0	1	3	0	0	200	943	2.50E-07	60	60	0	0	0	0
22	0,3	6000	5	0	4	1	4	0	200	943	2.50E-07	90	60	0	0	0	0
23	0,5	8000	4	0	4	4	5	4	400	943	2.50E-07	50	90	0	0	0	0
24	0,7	10000	2	0	4	4	6	5	800	943	2.50E-07	0	50	0	0	0	0
25	0,7	1000	1	0	3	4	0	6	1000	943	2.50E-07	0	0	0	0	0	0
26	0,7	–1	1	0	2	1	0	0	1000	961	3.30E-07	0	0	0	0	0	100
27	0	0	1	0	1	3	0	0	1000	978	4.10E-07	0	0	–3,2	408,0	2.56E+06	0

Tabela 5. Rezultati hidrauličkog proračuna mreže sa slika 3 i 4

BC	m (kg/s)	U (m/s)	TT	f	Dpf	Dpg	P1 (bar)	P2 (bar)
1	695,80	1,849	0	1,46E-02	0,3477	0	8,8477	8,5000
2	207,66	1,690	0	1,68E-02	0,2928	0	9,1405	8,8477
3	207,66	1,720	0	0,00E+00	9,9458	0	19,0863	9,1405
4	207,66	1,752	0	1,66E-02	0,3013	0	19,3876	19,0863
5	488,14	1,297	–0,286	1,47E-02	1,7239	–4,7971	5,7745	8,8477
6	222,69	1,812	0	1,68E-02	0,3363	0	6,1108	5,7745
7	222,69	1,844	0	0,00E+00	6,5355	0	12,6463	6,1108
8	222,69	1,879	0	1,66E-02	0,3462	0	12,9924	12,6463
9	69,75	1,453	0,143	1,89E-02	3,1262	0,9594	9,8601	5,7745
10	69,75	1,453	0	1,89E-02	0,3908	0	10,2509	9,8601
11	69,75	1,479	0	0,00E+00	0,0525	0	10,3034	10,2509
12	69,75	1,507	0	1,88E-02	0,4016	0	10,7050	10,3034
13	69,75	1,507	–0,143	1,88E-02	3,2126	–0,9251	12,9924	10,705
14	195,70	1,019	–0,286	1,61E-02	1,3053	–3,8377	3,2422	5,7745
15	120,86	1,748	0	1,80E-02	0,4488	0	3,6910	3,2422
16	120,86	1,779	0	0,00E+00	3,8026	0	7,4935	3,6910
17	120,86	1,813	0	1,79E-02	0,4619	0	7,9554	7,4935
18	74,85	1,083	0,286	1,82E-02	2,0886	2,8783	8,2090	3,2422
19	74,85	1,083	0	1,82E-02	0,1740	0	8,3830	8,2090
20	74,85	1,102	0	0,00E+00	0,0292	0	8,4122	8,3830
21	74,85	1,123	0	1,80E-02	0,1783	0	8,5905	8,4122
22	74,85	1,123	–0,286	1,80E-02	2,1402	–2,7752	7,9554	8,5905
23	195,70	1,057	0,286	1,59E-02	1,3367	3,7003	12,9924	7,9554
24	488,14	1,345	0,286	1,45E-02	1,7697	4,6254	19,3876	12,9924
25	695,80	1,917	0	1,45E-02	0,358	0	19,7455	19,3876
26	695,80	1,881	0	0,00E+00	1,7008	0	21,4463	19,7455
27	695,80	0	0	0,00E+00	12,9463	0	8,5	21,4463



Slika 4

4. Zaključak

U radu je prikazan model za definisanje konfiguracije mreže i hidraulički proračun sistema daljinskog grejanja, kao i numerički postupak rešavanja modela. Postupak je zasnovan na linearizovanim bilansima promene pritiska u okviru zatvorenih kontura prstenova mreže i iterativnom određivanju protoka u svim segmentima. Rezultati proračuna obuhvataju raspodelu pritisaka i protoka u okviru posmatrane mreže. Primenljivost postupka je pokazana na primeru sistema daljinskog grejanja. Razvijeni postupak je pouzdan i efikasan. Dalji rad na razvoju modela će obuhvatiti uključivanje nestacionarnih bilansnih jednačina energije koje će omogućiti predviđanje temperatura nosioca toplote u svim deonicama toplovoda u sistemu daljinskog grejanja, kao i kretanje temperaturskih talasa u prelaznim režimima rada.

Zahvalnica

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije u okviru Nacionalnog programa energetske efikasnosti (EE-242008).

Legenda

BC – redni broj cevi
PP – primarna petlja posmatrane cevi
SP – sekundarna petlja posmatrane cevi (ako je 0 onda je nema)
L – dužina posmatrane cevi (m)
D – prečnik posmatrane cevi (m)
m – maseni protok kroz posmatranu cev (kg/s)
U – brzina strujanja kroz posmatranu cev (m/s)
Dpf – pad pritiska usled trenja u posmatranoj cevi (bar)
Dpg – pad pritiska usled razlike geodetskih visina (bar)
Ro – gustina fluida u posmatranoj cevi (kg/m^3)
Ni – kinematska viskoznost (m^2/s)
Kp – koeficijent radne karakteristike pumpe
Z – suma lokalnih otpora
f – koeficijent trenja u posmatranoj cevi sračunat po Altšulovom obrascu
TT – ugao nagiba cevi u stepenima
G1 – vrsta diskontinuiteta na početku cevi
G2 – vrsta diskontinuiteta na kraju cevi
H1 – čvor kome pripada početak cevi
H2 – čvor kome pripada kraj cevi
Y1 – geodetska visina početka cevi (m)
Y2 – geodetska visina kraja cevi (m)
P1 – apsolutni pritisak na početku cevi (bar)
P2 – apsolutni pritisak na kraju cevi (bar)

Literatura

[1] **Cross, H.,** *Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors,* University of Illinois, Bulletin No. 286, novembar 1936.
[2] **Šašić, M.,** *Transport fluida cevima*, Mašinski fakultet, Beograd, 1982.
[3] **Sokolov, J. J.,** *Toplifikacija i toplotne mreže*, Građevinska knjiga, Beograd, 1985.
[4] **Menđaš, I., P. Milutinović, D. Ignjatijević,** *100 najkorisnijih FORTRAN-skih programa*, Mikro knjiga, Beograd, 1991.

kgh