

2.7. PRORAČUN GRANATIH VODOVODNIH MREŽA

2.7.1. Proračun granate vodovodne mreže sa prethodnim napornim rezervoarom

Razmotrimo na konkretnom primeru proračun magistralne granate vodovodne mreže, koja dobija vodu gravitaciono iz prethodnog napornog rezervoara.

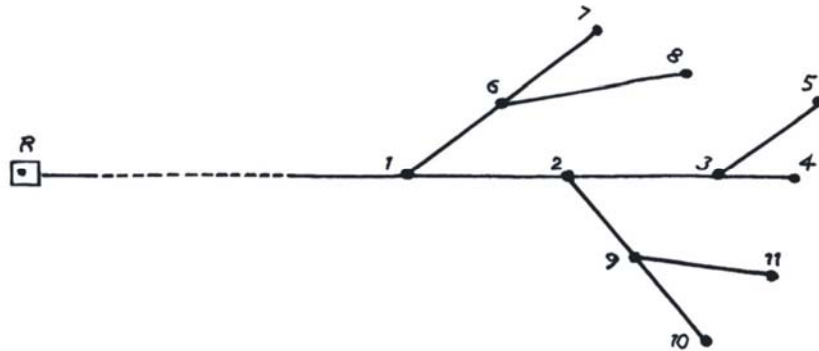
Konfiguracija magistralnih grana mreže prikazana je na sl.2.28, sa datim dužinama deonica i visinskim kotama čvorova mreže.

Protok najveće potrošnje vode je $\Sigma q_i = 0,015 \text{ m}^3 / \text{s}$ (150l/s).

Mreža snabdeva vodom stambene objekte, a gustina naseljenosti je približno jednaka na celoj teritoriji koju napaja vodovodna mreža.

Traži se da najmanji napor vode u krajnjim čvorovima mreže bude 30m (što približno odgovara natp pritisku od 2,94 bara).

Hidrauličnim proračunom određuju se prečnici cevi za sve deonice mreže i određuje se potreban napor vode u čvoru napajanja mreže (prema kojem se određuje visinska kota napornog rezervoara i prečnik napojnog cevovoda).



$L_{1,2} = 1000\text{m}, L_{2,3} = 1000\text{m}, L_{3,4} = 500\text{m}, L_{3,5} = 800\text{m}, L_{1,6} = 700\text{m},$
 $L_{6,7} = 800\text{m}, L_{6,8} = 1200\text{m}, L_{2,9} = 700\text{m}, L_{9,10} = 700\text{m}, L_{9,11} = 900\text{m},$
 $Z_1(=KČ1) = 202\text{m}, Z_2 = 198\text{m}, Z_3 = 198\text{m}, Z_4 = 193\text{m}, Z_5 = 192\text{m},$
 $Z_6 = 200\text{m}, Z_7 = 199\text{m}, Z_8 = 195\text{m}, Z_9 = 196\text{m}, Z_{10} = 195\text{m}, Z_{11} = 192\text{m},$

sl. 2.28

Napomenimo da, na sl.2.28 nije prikazana cela ulična granata mreža, već samo njene magistralne grane.

Usvajamo da cevi magistralne grane vodovodne mreže budu čelične ili od livenog gvožđa, a za izračunavanje gubitka napora u deonicama ovih cevovoda koristimo formulu Maninga (2.34), koja za $n = 0,012$ (za lako korodirale cevi) ima oblik

$$\Delta h_{i-j} = K_{i-j} \cdot Q_{i-j}^2, \quad K_{i-j} = 0,00156 \frac{L_{i-j}}{d_{i-j}^{5,33}}. \quad (2.113)$$

Napomenimo da formula (2.113), kako je u odeljku 2.1.1 objašnjeno, daje za oko 20% veće gubitke napora u odnosu na nove bitumenizirane cevi ($n = 0,011$), odnosno za oko 20% manje napore u odnosu na jako korodirale cevi.

Ukupna dužina magistralnih deonica mreže je: $\Sigma L = L_{1,2} + L_{2,3} + \dots + L_{9,11} = 8300\text{m}$.

Predpostavljajući da je gustina naseljenosti jednolika na celoj teritoriji koju napaja mreža, specifični protok potrošnje vode (po jedinici dužine) magistralnih deonica mreže je (u času najveće potrošnje):

$$q_{sp}^{(m)} = \frac{\Sigma q_i}{\Sigma L} = \frac{0,150}{8300} = 0,0000181 \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}} \left(= 0,0181 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right)$$

Protoci potrošnje vode u deonicama magistralne mreže (u času najveće potrošnje vode, koji su merodavni za proračun mreže), računaju se korišćenjem formule

$$(\Sigma q)_{i-j} = q_{sp}^{(m)} \cdot L_{i-j}, \quad (2.114)$$

gde indeksi i i j označavaju čvorove na početku i kraju deonice mreže.

Prema jednačini (2.114), za $q_{sp}^{(m)} = 0,0000181 \frac{m^3}{s \cdot m}$ i L_{i-j} , datim uz sl.2.28, dobija se:

$$\begin{aligned} (\Sigma q)_{1-2} &= 0,0181m^3 / s, & (\Sigma q)_{2-3} &= 0,0181m^3 / s, & (\Sigma q)_{3-4} &= 0,0090m^3 / s, \\ (\Sigma q)_{3-5} &= 0,0145m^3 / s, & (\Sigma q)_{1-6} &= 0,0127m^3 / s, & (\Sigma q)_{6-7} &= 0,0145m^3 / s, \\ (\Sigma q)_{6-8} &= 0,0217m^3 / s, & (\Sigma q)_{2-9} &= 0,0127m^3 / s, & (\Sigma q)_{9-10} &= 0,0127m^3 / s \\ i (\Sigma q)_{9-11} &= 0,0163m^3 / s. \end{aligned}$$

Pretpostavljajući ravnomerno odvođenje vode u magistralnim deonicama mreže, potrošnja vode u L_{i-j} deonici mreže može se fiktivno redukovati na potrošnju vode na početku (q_i) i kraju (q_j) deonice, pri čemu je, prema jednačini (2.57'), kako je u odeljku 2.4 objašnjeno,

$$q_j = \alpha \cdot (\Sigma q)_{i-j}, \quad q_i = (1 - \alpha) \cdot (\Sigma q)_{i-j}, \quad (2.115)$$

gde koeficijent α , kako je u tabeli VI dato (odeljak 2.4), zavisi od odnosa protoka koji se u deonici $i-j$ troši ($(\Sigma q)_{i-j}$) prema protoku koji tranzitno prođe kroz deonicu $i-j$.

U slučajevima kada su deonice $i-j$ krajnje deonice mreže je $\alpha = 0,60$, (kao što su deonice 3-4, 3-5, 6-7, 6-8, 9-10 i 9-11, na sl.2.28).

S obzirom na jednačinu (2.115) i podatke iz tabele VI dobija se:

$$\begin{aligned} q_4 &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{3-4} = 0,0054m^3 / s & (q_3^{(3-4)} & - \text{redukovani protok u čvoru 3, s} \\ q_3^{(3-4)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{3-4} = 0,0036m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 3-4)} \\ q_5 &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{3-5} = 0,0087m^3 / s & (q_3^{(3-5)} & - \text{redukovani protok u čvoru 3, s} \\ q_3^{(3-5)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{3-5} = 0,0057m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 3-5)} \\ q_7 &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{6-7} = 0,0087m^3 / s & (q_6^{(6-7)} & - \text{redukovani protok u čvoru 6, s} \\ q_6^{(6-7)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{6-7} = 0,0058m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 6-7)} \\ q_8 &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{6-8} = 0,0130m^3 / s & (q_6^{(6-8)} & - \text{redukovani protok u čvoru 6, s} \\ q_6^{(6-8)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{6-8} = 0,0087m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 6-8)} \\ q_{10} &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{9-10} = 0,0076m^3 / s & (q_9^{(9-10)} & - \text{redukovani protok u čvoru 9, s} \\ q_9^{(9-10)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{9-10} = 0,0051m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 9-10)} \\ q_{11} &= 0,6 \cdot (\Sigma q)_{9-11} = 0,0098m^3 / s & (q_9^{(9-11)} & - \text{redukovani protok u čvoru 9, s} \\ q_9^{(9-11)} &= 0,4 \cdot (\Sigma q)_{9-11} = 0,0065m^3 / s & \text{obzirom na potrošnju u deonici 9-11)} \\ & & \frac{(\Sigma q)_{6-7} + (\Sigma q)_{6-8}}{(\Sigma q)_{1-6}} &= 2,85, & \alpha &= 0,52 \text{ (Tabela VI)} \\ & & & & (q_6^{(1-6)} & - \text{redukovani protok u čvoru 6, s} \\ & & & & \text{obzirom na potrošnju u deonici 1-6)} \\ & & & & (q_1^{(1-6)} & - \text{redukovani protok u čvoru 1, s} \\ & & & & \text{obzirom na potrošnju u deonici 1-6)} \\ & & & & \alpha &= 0,52 \text{ (Tabela VI)} \\ & & & & (q_3^{(2-3)} & - \text{redukovani protok u čvoru 3, s} \\ & & & & \text{obzirom na potrošnju u deonici 2-3)} \end{aligned}$$

$q_2^{(2-3)}$ – redukovani protok u čvoru 2, s obzirom na potrošnju u deonici 2-3)

$$\frac{(\Sigma q)_{9-10} + (\Sigma q)_{9-11}}{(\Sigma q)_{2-9}} = 2,28, \quad \alpha = 0,52 \text{ (Tabela VI)}$$

$$q_9^{(2-9)} = 0,52 \cdot (\Sigma q)_{2-9} = 0,0066 m^3 / s$$

$$q_2^{(2-9)} = 0,48 \cdot (\Sigma q)_{2-9} = 0,0061 m^3 / s$$

$q_9^{(2-9)}$ – redukovani protok u čvoru 9, s obzirom na potrošnju u deonici 2-9)

$q_2^{(2-9)}$ – redukovani protok u čvoru 2, s obzirom na potrošnju u deonici 2-9)

$$\frac{(\Sigma q)_{2-3} + (\Sigma q)_{3-4} + (\Sigma q)_{3-5} + (\Sigma q)_{9-10} + (\Sigma q)_{9-11} + (\Sigma q)_{2-9}}{(\Sigma q)_{1-2}} = 4,6, \quad \alpha = 0,51 \text{ (Tabela VI)}$$

$$q_2^{(1-2)} = 0,51 \cdot (\Sigma q)_{1-2} = 0,0092 m^3 / s$$

$$q_1^{(1-2)} = 0,49 \cdot (\Sigma q)_{2-9} = 0,0089 m^3 / s$$

$q_2^{(1-2)}$ – redukovani protok u čvoru 2, s obzirom na potrošnju u deonici 1-2)

$q_1^{(1-2)}$ – redukovani protok u čvoru 1, s obzirom na potrošnju u deonici 1-2)

Saglasno sa napred datim redukovanim protocima potrošnje u čvorovima mreže, konačno se dobijaju:

$$q_1 = q_1^{(1-6)} + q_1^{(1-2)} = 0,0150 m^3 / s$$

$$q_2 = q_2^{(2-3)} + q_2^{(2-9)} + q_2^{(1-2)} = 0,0240 m^3 / s$$

$$q_3 = q_3^{(3-4)} + q_3^{(3-5)} + q_3^{(2-3)} = 0,0188 m^3 / s$$

$$q_4 = 0,0054 m^3 / s$$

$$q_5 = 0,0087 m^3 / s$$

$$q_6 = q_6^{(6-7)} + q_6^{(6-8)} + q_6^{(1-6)} = 0,0211 m^3 / s$$

$$q_7 = 0,0087 m^3 / s$$

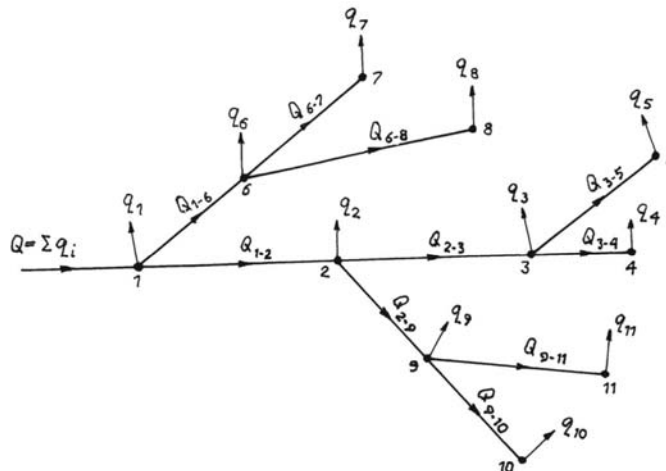
$$q_8 = 0,0130 m^3 / s$$

$$q_9 = q_9^{(9-10)} + q_9^{(9-11)} + q_9^{(2-9)} = 0,0182 m^3 / s$$

$$q_{10} = 0,0076 m^3 / s$$

$$q_{11} = 0,0098 m^3 / s$$

Na sl.2.29 prikazana je razmatrana magistralna vodovodna mreža sa fiktivno svedenim potrošačima (odvodima vode) u čvorovima mreže.



sl. 2.29

Prema napred izračunatim fiktivno redukovanim protocima odvoda vode iz čvora mreže ($q_i, i = 1, 2, \dots, 11$), korišćenjem jednačine (2.85) dobijaju se sledeći protoci u deonicama magistralne mreže:

$$\begin{aligned} Q_{3-4} = q_4 &= 0,0054m^3 / s, & Q_{9-11} = q_{11} &= 0,0098m^3 / s, \\ Q_{3-5} = q_5 &= 0,0087m^3 / s, & Q_{2-3} = q_3 + Q_{3-4} + Q_{3-5} &= 0,0330m^3 / s, \\ Q_{6-7} = q_7 &= 0,0087m^3 / s, & Q_{2-9} = q_9 + Q_{9-10} + Q_{9-11} &= 0,0355m^3 / s, \\ Q_{6-8} = q_8 &= 0,0130m^3 / s, & Q_{1-2} = q_2 + Q_{2-3} + Q_{2-9} &= 0,0925m^3 / s, \\ Q_{9-10} = q_{10} &= 0,0076m^3 / s, & Q_{1-6} = q_6 + Q_{6-7} + Q_{6-8} &= 0,0428m^3 / s, \end{aligned}$$

i radi provere,

$$Q = \Sigma q_i = q_1 + Q_{1-2} + Q_{1-6} = 0,1503 \cong 0,150m^3 / s.$$

Zanemarljivo malo odstupanje napred izračunatog protoka Q , od zadatog ($Q = 0,150 m^3/s$), posledica je zaokruživanja izračunatih protoka q_i na četvrtoj decimali.

S obzirom na napred date protoke u magistralnim deonicama mreže, prema podacima iz tabele VIII, za čelične cevi i podacima iz tabele VII ($E = 1$), za cevi od livenog gvožđa, usvajaju se, u početnom približenju, sledeći nazivni prečnici deonica mreže:

$$\begin{aligned} D_{3-4} &= 100mm (0,1m), D_{3,5} = 125mm (0,125m), D_{6-7} = 125mm (0,125m), \\ D_{6-8} &= 150mm (0,15m), D_{9-10} = 100mm (0,1m), D_{9-11} = 125mm (0,125m), \\ D_{2-3} &= 200mm (0,2m), D_{2-9} = 250mm (0,25m), D_{1-2} = 350mm (0,35m) \\ \text{i } D_{1-6} &= 250mm (0,25m). \end{aligned}$$

Nazivni prečnik čeličnih cevi daju se prema prečnicima otvora prirubnica za njihovo povezivanje i približno su jednaki unutrašnjim prečnicima cevi, $d \approx D$.

Uzimajući da je $d_{i-j} = D_{i-j}$, brzine strujanja u deonicama mreže izračunavaju se korišćenjem jednačine

$$c_{i-j} = \frac{4Q_{i-j}}{\pi \cdot d_{i-j}^2},$$

a gubici napora izračunavaju se korišćenjem formule (2.113).

U tabeli IX date su veličine izračunatih brzina i gubitka napora u deonicama mreže.

Tabela IX

deonica $i - j$	c_{i-j} [m / s]	Δh_{i-j} [m]	deonica $i - j$	c_{i-j} [m / s]	Δh_{i-j} [m]
1 - 2	0,962	3,60	6 - 7	0,709	6,15
2 - 3	1,051	9,03	6 - 8	0,736	7,79
3 - 4	0,688	5,04	2 - 9	0,724	2,23
4 - 5	0,709	6,15	9 - 10	0,968	13,48
1 - 6	0,872	3,24	9 - 11	0,799	8,78

Od čvora napajanja mreže (1) do krajnjih čvorova u mreži (4, 5, 7, 8, 10 i 11) postoje šest strujnih puteva, a prema energijskim jednačinama za svaki od ovih strujnih puteva dobijaju se sledeće jednačine za izračunavanje napora vode u čvoru napajanja mreže:

$$\begin{aligned}
H_1^{(4)} &= (Z_4 - Z_1) + H_4 + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4}, \\
H_1^{(5)} &= (Z_5 - Z_1) + H_5 + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-5}, \\
H_1^{(7)} &= (Z_7 - Z_1) + H_7 + \Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-7}, \\
H_1^{(8)} &= (Z_8 - Z_1) + H_8 + \Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-8}, \\
H_1^{(10)} &= (Z_{10} - Z_1) + H_{10} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-10}, \\
H_1^{(11)} &= (Z_{11} - Z_1) + H_{11} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-11},
\end{aligned} \tag{2.116}$$

gde su $H_4, H_5, H_7, H_8, H_{10}$ i H_{11} napori vode u krajnjim čvorovima mreže, a brojevi u zagradi iznad H_1 označavaju krajnju tačku strujnog toka za koju je jednačina postavljena.

Projektnim zadatkom traži se da u času najveće potrošnje vode (za koji se i vrši proračun) bude $H_4 = H_5 = H_7 = H_8 = H_{10} = H_{11} = 30m$, a kako je prema podacima uz sl.2.28, $(Z_4 - Z_1) = -9m$, $(Z_5 - Z_1) = -10m$, $(Z_7 - Z_1) = -3m$, $(Z_8 - Z_1) = -7m$, $(Z_{10} - Z_1) = -7m$ i $(Z_{11} - Z_1) = -10m$, prema jednačinama (2.116') i podacima iz tabele IX dobija se:

$$\begin{aligned}
H_1^{(4)} &= -9 + 30 + 3,60 + 9,03 + 5,04 = 38,67m, \\
H_1^{(5)} &= -10 + 30 + 3,60 + 9,03 + 6,15 = 38,78m, \\
H_1^{(7)} &= -3 + 30 + 3,24 + 6,15 = 36,39m, \\
H_1^{(8)} &= -3 + 30 + 3,24 + 7,79 = 34,03m, \\
H_1^{(10)} &= -7 + 30 + 3,60 + 2,23 + 13,48 = 42,31m, \\
H_1^{(11)} &= -7 + 30 + 3,60 + 2,23 + 8,78 = 34,61m,
\end{aligned} \tag{2.116'}$$

Napor vode u čvoru napajanja mreže (H_1) je jedinstven, pa mora biti:

$$H_1^{(4)} = H_1^{(5)} = H_1^{(7)} = H_1^{(8)} = H_1^{(10)} = H_1^{(11)} = H_1, \tag{2.117}$$

a u jednačinama (2.116') date različite vrednosti služe samo da ukažu koji od strujnih tokova pruža najveći otpor za postizanje traženog napora krajnjeg potrošača, koji je merodavan za određivanje napora napajanja mreže.

Prema podacima iz jednačina (2.116'), merodavan strujni tok za određivanje napora napajanja mreže je strujnitok od čvora napajanja do krajnjeg čvora 10, pri čemu je

$$H_1 = H_1^{(10)} = 42,31m.$$

Pri ovom naporu napajanja mreže, bez promene prečnika cevovoda donica mreže, svi potrošači bi dobili tražene protoke vode, ali bi izuzimajući krajnji čvor 10, potrošači u krajnjim čvorovima dobijali vodu po većim naporima od traženih.

Napomenimo da je osnovna pretpostavka da protoci vode koji troše potrošači ne zavisi od napora (natpritiska) vode u mreži (protoci vode koju troše potrošači tretiraju se kao fiksirani protoci, u razmatranom času potrošnje vode).

Smanjivanjem prečnika cevovoda u zadnjim deonicama svih strujnih tokova od čvora napajanja (1) do krajnjih čvorova (4, 5, 7, 8 i 11), izuzimajući strujni tok 1-10 (koji je merodavan za određivanje napora napajanja mreže), svi naporji napajanja mreže dati jednačinama (2.116') mogu se svesti na $H_1 = H_1^{(10)} = 42,31m$. Da bi se ovo postiglo gubitke napora u krajnjim deonicama mreže treba, smanjivanjem prečnika dela ovih deonica, dovesti do veličine:

$$\Delta h'_{(3-4)} = \Delta h_{(3-4)} + (H_1^{(10)} - H_1^{(4)}) = 5,04 + (42,31 - 38,67) = 8,68m$$

$$\Delta h'_{(3-5)} = \Delta h_{(3-5)} + (H_1^{(10)} - H_1^{(5)}) = 6,15 + (42,31 - 38,78) = 9,68m$$

$$\Delta h'_{(6-7)} = \Delta h_{(6-7)} + (H_1^{(10)} - H_1^{(7)}) = 6,15 + (42,31 - 36,39) = 12,07m$$

$$\Delta h'_{(6-8)} = \Delta h_{(6-8)} + (H_1^{(10)} - H_1^{(8)}) = 7,79 + (42,31 - 34,03) = 16,07m$$

$$\Delta h'_{(9-11)} = \Delta h_{(9-11)} + (H_1^{(10)} - H_1^{(11)}) = 8,87 + (42,31 - 34,61) = 16,48m$$

Ako se na dužini X_{i-j} krajnje deonice strujnog toka, ukupne dužine L_{i-j} , prečnik cevovoda smanji, sa d_{i-j} , na prvi manji standardni prečnik d'_{i-j} , gubitak napora u ovoj deonici cevovoda, saglasno formuli (2.113), biće:

$$\Delta h'_{i-j} = 0,00156 \left[\frac{L_{i-j} - X_{i-j}}{d_{i-j}^{5,33}} + \frac{X_{i-j}}{(d'_{i-j})^{5,33}} \right] \cdot Q_{i-j}^2, \quad (2.117)$$

odakle sleduje sledeća formula za X_{i-j} :

$$X_{i-j} = \frac{1}{d_{i-j}^{5,33} - (d'_{i-j})^{5,33}} \left[\frac{(d_{i-j} \cdot d'_{i-j})^{5,33} \cdot \Delta h'_{i-j}}{0,00156 \cdot Q_{i-j}^2} - (d'_{i-j})^{5,33} \cdot L_{i-j} \right] \quad (2.117')$$

Za deonicu 3-4 ($L_{3-4} = 500m$, $Q_{3-4} = 0,0055m^3/s$) određen je, u prvom približenju, prečnik cevi $d_{3-4} = 0,1m$ (100mm). Prvi manji standardni prečnik cevi je $d'_{3-4} = 0,080m$ (80mm), pa se, za $\Delta h'_{(3-4)} = 8,68m$, prema jednačini (2.117') dobija $X_{3-4} = 158 \approx 160m$, što znači da u prvom delu deonice 3-4, na dužini $L_{3-4} - X_{3-4} = 500 - 160 = 340m$, treba ugraditi cev uprečniku 100mm, a u drugom delu deonice 3-4, na dužini 160m, treba ugraditi cevi prečnika 80mm.

Po sličnom proračunu dobija se da:

- U prvom delu deonice 3-5, na dužini od 600m, treba ugraditi cevi prečnika 125mm, a u drugom delu deonice, na dužini od 200m, treba ugraditi cevi prečnika 100 mm;
- U prvom delu deonice 6-7, na dužini od 460m, treba ugraditi cevi prečnika 125mm, a u drugom delu deonice, na dužini od 340m, treba ugraditi cevi prečnika 100mm;
- U prvom delu deonice 6-8, na dužini od 420m, treba ugraditi cevi prečnika 150mm, a u drugom delu deonice, na dužini od 780m, treba ugraditi cevi prečnika 125mm;
- U prvom delu deonice 9-11, na dužini od 550m, treba ugraditi cevi prečnika 125mm, a u drugom delu deonice, na dužini od 350m, treba ugraditi cevi prečnika 100mm;

Konačno utvrđeni nazivni prečnici čeličnih cevi su:

- za deonicu 1-2 : $D_{1-2} = 350mm$ ($L = L_{1-2} = 1000m$),
- za deonicu 2-3 : $D_{2-3} = 200mm$ ($L = L_{2-3} = 1000m$),
- za deonicu 3-4 : $D_{3-4} = 100mm$ ($L = 340m$) i $D'_{3-4} = 80mm$ ($L' = 160m$),
- za deonicu 3-5 : $D_{3-5} = 125mm$ ($L = 600m$) i $D'_{3-5} = 100mm$ ($L' = 200m$),
- za deonicu 1-6 : $D_{1-6} = 250mm$ ($L = L_{1-6} = 700m$),
- za deonicu 6-7 : $D_{6-7} = 125mm$ ($L = 460m$) i $D'_{6-7} = 100mm$ ($L' = 340m$),
- za deonicu 6-8 : $D_{6-8} = 150mm$ ($L = 420m$) i $D'_{6-8} = 125mm$ ($L' = 780m$),
- za deonicu 2-9 : $D_{2-9} = 250mm$ ($L = L_{2-9} = 700m$),
- za deonicu 9-10 : $D_{9-10} = 100mm$ ($L = L_{9-10} = 700m$) i
- za deonicu 9-11 : $D_{9-11} = 125mm$ ($L = 550m$) i $D'_{9-11} = 100mm$ ($L' = 350m$).

Prema napred usvojenim prečnicima određene brzine strujanja i gubici napora u deonicama razmatrane magistralne vodovodne mreže, za ukupnu potrošnju $Q = 0,150m^3/s$, kao i veličine koeficijenta karakteristika gubitka napora dati su u tabeli X.

Tabela X

deonic a i - j	$Q = 0,150m^3/s$		$K_{ij}[m/(m^3/s)^2]$	deonic a i - j	$Q = 0,150m^3/s$		$K_{ij}[m/(m^3/s)^2]$
	$c_{ij}[m/s]$	$\Delta h_{ij}[m]$			$c_{ij}[m/s]$	$\Delta h_{ij}[m]$	
1 - 2	0,962	3,60	421	6 - 7	0,709/1,108	12,07	159470
2 - 3	1,051	9,03	8292	6 - 8	0,736/1,060	16,07	95090
3 - 4	0,688/1,07 5	8,68	297660	2 - 9	0,724	2,23	1770
4 - 5	0,709/1,10 8	9,68	127890	9 - 10	0,968	13,48	233460
1 - 6	0,872	3,24	1769	9 - 11	0,799/1,248	16,48	171600

Prema energijskoj jednačini za strujni tok od napornog rezervoara (R) do čvora napajanja mreže (1) je:

$$Z_R = Z_1 + H_1 + \Delta h_{R-1}, \quad \text{odn,} \quad Z_R - Z_1 = H_1 + \Delta h_{R-1} \quad (2.118)$$

gde je H_1 – napor vode u čvoru napajanja mreže, Δh_{R-1} - gubitak napora u napojnom cevovodu, a Z_1 i Z_R su visinske kote čvora napajanja i nivoa vode u rezervoaru.

Za traženi napor $H_1 = 42,3m$ (u režimu rada vodovodnog sistema sa najvećom potrošnjom vode) je

$$Z_R - Z_1 = 42,3 + \Delta h_{R-1},$$

pa visinska kota napornog rezervoara u odnosu na visinsku kotu čvora napajanja, zbog gubitka napora u napojnom cevovodu, mora biti veća od 42,3m.

Za $Z_1 = 202m$ je $Z_R = 244,3 + \Delta h_{R-1}$, pa visinska kota napornog rezervoara mora biti veća od 244,3m.

Pretpostavimo da se, prema terenu, pogodna lokacija za naporni rezervoar nalazi na visinskoj koti $Z_R = 254m$ ($Z_R - Z_1 = 52m$), koja je, prema pogodnoj trasi za polaganje cevovoda koji povezuje rezervoar i vodovodnu mrežu, udaljena od čvora napajanja mreže 3000m ($= L_{R-1}$). Za $H_1 = 42,3m$ i $Z_R - Z_1 = 52m$ prečnik ovog cevovoda određuje se po uslovu da gubitak napora u njemu bude $\Delta h_{R-1} = (Z_R - Z_1) - H_1 = 52 - 42,3 = 9,7m$, za $Q = 0,150m^3/s$.

Za $Q = 0,150m^3/s$ i $\Delta h_{R-1} = 9,7m$, korišćenjem Manningove formule (2.113), dobija se $d_{R-1} = 0,428m \approx 0,430m$. Kako prečnik cevi od 430mm nije standardan, usvaja se da cevovod R-1 ima dve deonice, jednu prečnika $d_{R-1} = 0,450m$ (450mm) i drugu prečnika $d'_{R-1} = 0,400m$ (400mm). Korišćenjem formule (2.117) dobija se da na dužini $X = 1050m$ treba ugraditi cevi prečnika $d'_{R-1} = 0,400m$ (400mm), a da na dužini $L_{R-1} - X = 3000 - 1050 = 1950m$ treba ugraditi cevi prečnika $d_{R-1} = 0,450m$ (450mm). Deonica cevovoda prečnika 450mm stvara gubitak napora od 4,83m, dok deonica prečnika 400mm stvara gubitak napora od 4,87m, što je ukupno 9,7m. Zbog povoljnijeg oblika pijezometarske linije, prva deonica, polazeći od rezervoara, je sa cevima prečnika 450mm.

U času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s$) krajnji čvorovi mreže dobijaju vodu pod naporom od 30m (2,94 bara). Smanjivanjem potrošnje povećava se napor (natpritisak) vode u mreži.

Označimo sa Q^+ najveći protok potrošnje vode u mreži ($Q^+ = 0,150m^3/s$), a sa Q_{i-j}^+ , njemu odgovarajuće protoke u deonicama vodovodne mreže. Smanjivanjem protoka, u i-j

deonici mreže, sa (Q_{i-j}^+) na (Q_{i-j}) , smanjuje se i gubitak napora u njoj (od $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+)$ na $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j})$), a s obzirom da je $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}) = K_{i-j} \cdot Q_{i-j}^2$ i $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+) = K_{i-j} \cdot (Q_{i-j}^+)^2$, može se uspostaviti sledeća veza:

$$\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}) = \left(\frac{Q_{i-j}}{Q_{i-j}^+} \right)^2 \cdot \Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+). \quad (2.119)$$

Predpostavljajući da se protoci u deonicama mreže menjaju u istom odnostu kao i protoci ukupne potrošnje,

$$\frac{Q_{i-j}}{Q_{i-j}^+} = \frac{Q}{Q^+},$$

jednačina (2.119) svodi se na oblik:

$$\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}) = \left(\frac{Q}{Q^+} \right)^2 \cdot \Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+). \quad (2.119')$$

Za cevovod koji povezuje naporni rezervoar i vodovodnu mežu (R-1) važi jednačina

$$\Delta h_{R-1}(Q) = \left(\frac{Q}{Q^+} \right)^2 \cdot \Delta h_{R-1}(Q^+). \quad (2.119'')$$

Prema energijskim jednačinama za strujne tokove od napornog rezervoara do krajnjih čvorova mreže, napori vode u ovim čvorovima su:

$$\begin{aligned} H_4 &= (Z_R - Z_4) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4}), & \text{gde je } Z_R - Z_4 &= 61m, \\ H_5 &= (Z_R - Z_5) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-5}), & Z_R - Z_5 &= 62m, \\ H_7 &= (Z_R - Z_7) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-7}), & Z_R - Z_7 &= 55m, \\ H_8 &= (Z_R - Z_8) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-8}), & Z_R - Z_8 &= 59m, \\ H_{10} &= (Z_R - Z_{10}) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-10}), & Z_R - Z_{10} &= 59m, \\ H_{11} &= (Z_R - Z_{11}) - (\Delta h_{R-1} + \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-11}), & Z_R - Z_{11} &= 62m, \end{aligned} \quad (2.120)$$

Za $Q^+ = 0,150m^3/s$ i $\Delta h_{R-1}(Q^+) = 9,7m$, a podaci o gubicima u deonicama mreže $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+)$ dati su u tabeli X, pa se s obzirom na formule (2.119') i (2.119''), jednačina (2.120) svodi na oblik:

$$H_4(Q) = 61 - 31 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2, \quad H_5(Q) = 62 - 32 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2, \quad H_7(Q) = 55 - 25 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2, \quad (2.120')$$

$$H_8(Q) = 59 - 29 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2, \quad H_{10}(Q) = 59 - 29 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2 \quad \text{i} \quad H_{11}(Q) = 62 - 32 \cdot \left(\frac{Q}{0,15} \right)^2.$$

Prvi članovi (konstante) sa desne strane jednačine (2.120') odgovaraju hidrostatičkim naporima (hidrostatičkim natpritiscima) u odgovarajućim čvorovima mreže.

Za $Q = 0,075m^3/s$, što je polovina protoka najveće potrošnje, prema jednačini (2.120') dobijaju se sledeći napori u krajnjim čvorovima razmatrane mreže: $H_4 = 53,8m$, $H_5 = 54m$, $H_7 = 48,8m$, $H_8 = 51,8m$, $H_{10} = 51,8m$ i $H_{11} = 54m$. Napred dati napori manji su za oko 12% od hidrostatičkih napora koji odgovaraju ovim čvorovima.

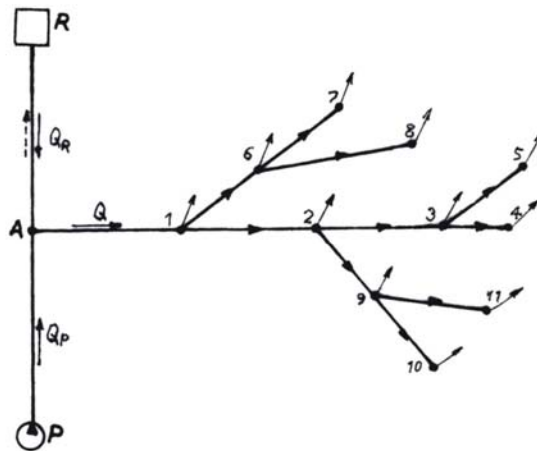
Za $Q = 0,030m^3/s$, što bi otprilike odgovaralo protoku pri najmanjoj potrošnji, prema jednačini (2.120') dobijaju se napori koji su za samo 2% manji od hidrostatičkih napora koji odgovaraju ovim čvorovima.

Zaključak je da nazivni pritisak cevi koje se ugrađuju u vodovodnu mrežu određuje prema mogućim hidrostatičkim natpritiscima u mreži ($Q = 0$).

2.7.2. Proračun granate vodovodne mreže u vodovodnim sistemima sa potisnom pumpnom stanicom i prednjim kontrarezervoarom

Kod vodovodnih sistema sa kontrarezervoarom vodovodna mreža nalazi se između potisne pumpne stanice i kontrarezervoara (napornog rezervoara, koji se, u ovom slučaju, obično, zove kontrarezervoar).

U vodovodnim sistemima sa prednjim kontrarezervoarom, kako je na sl.2.30 prikazano za jedan ovakav sistem sa granatom vodovodnom mrežom, napojni cevovod, koji polazeći od pumpne stanice (P), račva se (A) u dve grane, jednu, koja ide potrošačima (granatoj vodovodnoj mreži) i drugu, koja povezuje pumpnu stanicu sa kontrarezervoarom R (kada se rezervoar puni vodom), odnosno, povezuje kontrarezervoar sa potrošačima (kada se rezervoar prazni i u paralelnom radu sa pumpnom stanicom, ili samostalno, snabdeva potrošače vodom). Karakteristično je da napajanje vodovodne mreže (snabdevanje potrošača vodom) ide preko jedne grane (grane A-1, prema oznakama na sl.2.29), pa režim rada pumpi u pumpnoj stanici zavisi samo od protoka vode koju troše potrošači priključeni na vodovodnu mrežu. Veliko uprošćenje pri proračunu vodovodnih sistema sa prednjim kontrarezervoarom pruža činjenica da režim rada pumpe, ili paralelno povezanih pumpi, ne zavisi od karakteristike gubitka napora u vodovodnoj mreži i teritorijalnog rasporeda trenutno uključenih potrošača.



sl. 2.30

Na sl.2.30 prikazane su samo magistralne deonice granate vodovodne mreže, a potrošnja vode u ovim deonicama fiktivno je svedena na potrošače u čvorovima magistralne mreže.

Mreža se napaja na jednom mestu i smerovi strujanja u deonicama mreže jednoznačno su definisani i isti su i u režimima rada kada pumpna stanica snabdeva vodom mrežu (potrošače) i puni kontrarezervoar vodom ($Q_P = Q + Q_R$) i u režimima kada pumpna stanica i kontrarezervoar, u paralelnom radu, zajednički snabdevaju mrežu vodom ($Q_P = Q + Q_R$).

U režimu rada sa najvećim protokom potrošnje vode u mreži, koji je merodavan za određivanje prečnika cevovoda, vodovodna mreža dobija vodu i od potisne pumpne stanice (Q_P) i od kontrarezervoara (Q_R), pri čemu je

$$Q_P + Q_R = Q, \quad (2.121)$$

gde je $Q = \sum q_i$ protok vode koju troše potrošači priključeni na vodovodnu mrežu. $Q = Q_P + Q_R$

Kako se razmatrana vodovodna mreža napaja na jednom mestu, određivanje prečnika njenih deonica vrši se na isti način kao i kod vodovodne mreže sa jednim izvorom napajanja, što je, na konkretnom primeru, objašnjeno u prethodnom odeljku.

Konfiguracija mreže date na sl.2.30 ista je kao i mreže na sl.2.28, a ako su im iste i dužine deonica i visinske kote čvorova mreže, za zadato $Q = 0,150m^3 / s$ (pri približno jednakoj gustini

naseljenosti na celoj teritoriji koju pokriva vodovodna mreža) i traženim naporima u krajnjim čvorovima mreže $H_4 = H_5 = H_7 = H_8 = H_{10} = H_{11} = 30m$, dobili bi se isti prečnici cevi i potreban napor napajanja ($H_1 = 42,3m$) kao i u primeru iz prethodnog odeljka (2.7.1).

Napor vode u čvoru napajanja vodovodne mreže (H_1) zavisi od visinske kote kontrazervoara (visinske kote nivoa vode u njemu). Najmanji napor napajanja vodovodne mreže je u času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s$), kada pumpna stanica i kontrazervoar zajednički, u paralelnom radu, snabdevaју potrošače vodom ($Q = Q_P + Q_R$).

Prema energijskoj jednačini za strujni tok od kontrazervoara (R) do čvora napajanja mreže (1), za $Q = Q_P + Q_R$, dobija se

$$Z_R = Z_1 + H_1 + \Delta h_{R-A} + \Delta h_{A-1} \quad (2.122)$$

gde su Δh_{R-A} i Δh_{A-1} gubici napora u cevovodu od kontrazervoara do račve (R-A) i od račve do čvora napajanja mreže (A-1), koji se mogu izraziti formulama:

$$\Delta h_{R-A} = K_{R-A} \cdot Q_R^2 \quad \text{i} \quad \Delta h_{A-1} = K_{A-1} \cdot Q^2.$$

Za $Z_1 = 202m$ i traženo $H_1 = 42,2m$, za $Q = 0,150m^3/s$, prema jednačini (2.122) je

$$Z_R = 244,3 + \Delta h_{R-A} + \Delta h_{A-1}, \quad (2.122')$$

pa visinska kota kontrazervoara mora biti veća od 244,3m.

Pretpostavimo da se, prema terenu, pogodna lokacija za kontrazervoar nalazi na visinskoj koti $Z_R = 254m$ i da je prema trasi cevovoda $L_{R-A} = 2500m$ i $L_{A-1} = 1000m$.

Za $Z_R = 254m$ jednačina (2.122') svodi se na

$$\Delta h_{R-A} + \Delta h_{A-1} = 9,7m, \quad \text{za} \quad Q = Q_P + Q_R = 0,150m^3/s. \quad (2.123)$$

Pri određivanju prečnika cevovoda od kontrazervoara do račve treba voditi računa da jednačina (2.123) bude zadovoljena.

Visinska kota pumpne stanice i čvora A, u konkretno razmatranom primeru su $Z_P = 170m$ i $Z_A = 195m$, a prema trasi, dužina cevovoda od pumpne stanice do čvora A je $L_{P-A} = 3000m$.

Napor vode u čvoru A, prema energijskim jednačinama za strujni tok koji dolazi iz potisne pumpne stanice (P) i za strujni tok koji dolazi iz kontrazervoara (R) je:

$$H_A = H_P - (Z_A - Z_P) - \Delta h_{P-A}, \quad \text{odnosno,}$$

$$H_A = (Z_R - Z_A) - \Delta h_{R-A}$$

gde je $H_P = H_P(Q_P)$ napor pumpe (ili napor paralelno povezanih pumpi) u pumpnoj stanici, Δh_{P-A} – gubitak napora u cevovodu od pumpne stanice do račve A, Δh_{R-A} – gubitak napora u cevovodu od kontrazervoara do račve A, a Z_P , Z_R i Z_A su, redom, visinske kote pumpe (pumpi) kontrazervoara i račve A.

Kako je $H_P = H_P(Q_P)$, a gubici napora Δh_{P-A} i Δh_{R-A} se mogu izračunati korišćenjem formula

$$\Delta h_{P-A} = K_{P-A} \cdot Q_P^2 \quad \text{i} \quad \Delta h_{R-A} = K_{R-A} \cdot Q_R^2,$$

prema napred datim jednačinama za H_A , dobija se

$$H_P(Q_P) - (Z_A - Z_P) - K_{P-A} \cdot Q_P^2 = (Z_R - Z_A) - K_{R-A} \cdot Q_R^2, \quad \text{za} \quad Q = Q_P + Q_R.$$

Odnosno,

$$H_P(Q_P) = (Z_R - Z_P) + K_{P-A} \cdot Q_P^2 - K_{R-A} \cdot Q_R^2, \quad \text{za} \quad Q = Q_P + Q_R.$$

Zamenom $Q_R = Q - Q_P$, napred data jednačina se, za zadato Q ($Q = const$), svodi na oblik

$$H_P(Q_P) = F(Q_P), \quad \text{za} \quad Q > Q_P, \quad (2.124)$$

gde je

$$F(Q_p) = [(Z_R - Z_p) - K_{R-A}Q^2] - (K_{R-A} - K_{P-A})Q_p^2 + 2K_{R-A}Q \cdot Q_p \quad (2.124')$$

Radni režim pumpe, za zadato Q ($Q = const$), koje je veće od protoka pumpe, definisan je tačkom preseka grafika naporne karakteristike pumpe ($H_p(Q_p)$) i grafika funkcije $F(Q_p)$, koja se može nazvati karakteristikom usklađivanja rada pumpe i rezervoara, u slučajevima kada i pumpa (rezervoar, u paralelnom radu, zajednički snabdevaju potrošače vodom ($Q = Q_p + Q_R$)).

U slučaju da sav protok pumpe ide potrošačima ($Q = Q_p$, $Q_R = 0$), napor vode u račvi A jednak je hidrostatičkom naporu koji stvara rezervoar

$$H_A = Z_R - Z_A,$$

a kako je prema energijskoj jednačini za strujni tok od pumpe do račve A

$$H_A = H_p(Q_p) = (Z_A - Z_p) - K_{P-A} \cdot Q_p^2,$$

izjednačavanjem desnih strana napred datih jednačina za H_A , posle sređivanja, dobija se

$$H_p(Q_p) = F_o(Q_p), \quad \text{za } Q = Q_p, \quad (Q_R = 0), \quad (1.125)$$

gde je

$$F_o(Q_p) = (Z_R - Z_p) - K_{P-A} \cdot Q_p^2 \quad (1.125')$$

funkcija karakteristike usklađivanja rada pumpe i rezervoara, u slučaju kada sav protok pumpe ide potrošačima.

Radni režim pumpe, kada sav protok pumpe ide potrošačima, definisan je tačkom preseka grafika naporne karakteristike pumpe $H_p(Q_p)$ i grafika funkcije $F_o(Q_p)$, definisane jednačine (1.125').

U slučaju da potrošači troše manji protok od onog koji daje pumpa ($Q < Q_p$), višak protoka pumpe ide u rezervoar $Q_R = Q_p - Q$ (rezervoar se puni), pa se prema energijskoj jednačini, za strujni tok od pumpe do rezervoara dobija:

$$H_p(Q_p) = (Z_R - Z_p) + K_{P-A}Q_p^2 + K_{R-A}Q_R^2, \quad \text{za } Q < Q_p.$$

Zamenom $Q_R = Q_p - Q$, napred data jednačina se, za zadato Q ($Q = const$), svodi na oblik

$$H_p(Q_p) = f(Q_p), \quad \text{za } Q < Q_p, \quad (2.126)$$

gde je

$$f(Q_p) = [(Z_R - Z_p) + K_{A-R}Q^2] + (K_{A-R} + K_{P-A})Q_p^2 + 2K_{A-R}Q \cdot Q_p \quad (1.126')$$

funkcija karakteristike usklađivanja rada pumpe i rezervoara, u slučajevima kada pumpa snabdeva potrošače vodom i puni rezervoar ($Q_R = Q_p - Q$).

Radni režim pumpe, u slučajevima kada pumpa snabdeva potrošače vodom i puni rezervoar, definisan je tačkom preseka grafika karakteristike napora pumpe ($H_p(Q_p)$) i grafika funkcije $f(Q_p)$, definisan je jednačinom (1.126').

Da bi se izabrala potisna pumpa (ili potisne pumpe), potrebno je prema sličnom naselju, odrediti (predvideti) dijagram časovne potrošnje vode u danu najveće potrošnje i usvojiti vreme rada pumpne stanice u tom danu (npr. neprekidno, 24 časa) i eventualnu spoljašnju regulaciju protoka pumpi u pumpnoj stanici (u cilju smanjenja zapremine rezervoara). Spoljašnja regulacija protoka pumpi u pumpnoj stanici vrši se promenom broja paralelno uključenih pumpi, ili promenom broja obrtaja vratila pumpe.

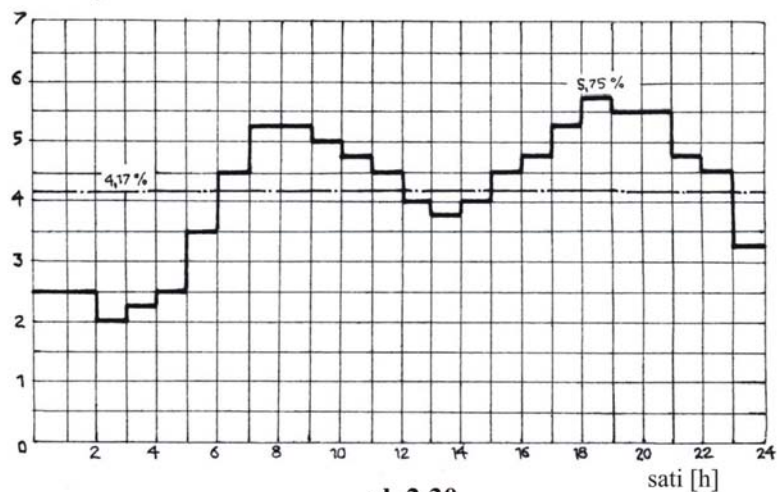
Očekivani dijagram časovne potrošnje vode u danu najveće potrošnje, za konkretno razmatrani primer vodovodne mreže, dat je na sl.2.30, gde su časovne potrošnje vode ($\dot{V}^{(h)}[m^3/h]$) svedene u procentima dnevne potrošnje vode ($\dot{V}^{(dn)}[m^3/h]$).

$$\bar{v}[\%] = \frac{\dot{V}^{(h)}}{\dot{V}^{(dn)}} \cdot 100 \quad [\% \text{ dnevne potrošnje vode }].$$

Časovna potrošnja vode svodi se na sekundni protok potrošnje vode korišćenjem formule

$$Q = \frac{\dot{V}^{(h)}}{3600}, \quad \dot{V}^{(h)}[m^3/h], \quad Q[m^3/h].$$

$$\bar{V}[\%] = \frac{\dot{V}^{(hj)}}{\dot{V}^{(dn)}} \cdot 100 \quad [\% \text{ dnevne potrošnje}] \quad (\dot{V}^{(hj)}[m^3/h], \dot{V}^{(dn)}[m^3/dan])$$



sl. 2.30

Zadatom protoku $Q = 0,150m^3/s$, u času najveće potrošnje vode, odgovara časovna potrošnja $\dot{V}^{(h)} = 3600 \cdot 0,150 = 540m^3/s$, a kako, prema dijagramu časovne potrošnje datom na slici 2.30, najveća časovna potrošnja iznosi 5,75% dnevne potrošnje, dobija se da je najveća dnevna potrošnja vode

$$\dot{V}^{(dn)} = \frac{100 \cdot 540}{5,75} = 9390m^3/s,$$

Najmanja časovna potrošnja vode u danu najveće potrošnje iznosi 2% dnevne potrošnje,

$$\dot{V}^{(h)} = \frac{2}{100} \cdot 9390 = 188m^3/s,$$

što svedeno na sekundni protok iznosi $Q = 0,052m^3/s$.

Srednja časovna potrošnja vode u toku dana je $100/24 = 4,1666... \% \approx 4,17\%$ dnevne potrošnje, pa je u danu najveće potrošnje:

$$\dot{V}_{sr.dn}^{(h)} = \frac{4,17}{100} \cdot 9390 = 392m^3/h, \quad \text{odn.} \quad Q_{sr.dn} = 0,109m^3/s.$$

Usvajajući neprekidni rad pumpe, ili paralelno povezanih pumpi, u danu najveće potrošnje vode, bez spoljašnje regulacije njihovog protoka, srednji dnevni protok pumpe ($Q_{sr.p}$) jednak je srednjem dnevnom protoku koji troše potrošači,

$$Q_{sr.p} = Q_{sr.dn} = 0,109m^3/s.$$

U vodovodnim sistemima sa prednjim kontrarezervoarom, radni režim spoljašnje neregulisane pumpe, ili paralelno povezanih pumpi, u potisnoj pumpnoj stanici, zavisi od protoka kojeg troše potrošači, priključeni na vodovodnu mrežu. Sa povećanjem potrošnje vode povećava se protok pumpe i obratno. Pumpa radi sa najvećim protokom u času najveće potrošnje vode, kada zajedno sa rezervoarom, u paralelnom vodu, snabdeva potrošače vodom ($Q = Q_p + Q_R$). U danu najveće potrošnje vode, kada je predviđeno da pumpa radi neprekidno, najmanji protok pumpe je u času najmanje potrošnje vode, kada deo protoka pumpe ide u rezervoar ($Q_R = Q_p - Q$).

Usvajajući da u času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s$) pumpa radi sa protokom koji je za 10% veći od srednjeg dnevnog protoka pumpe u danu najveće potrošnje ($Q_{sr.p} = 0,109m^3/s$),

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{sr.dn} = 1,1 \cdot 0,109 = 0,120m^3/s,$$

dobija se da iz rezervoara, u ovom času, potrošači dobijaju protok od

$$Q_R = Q_p - Q = 0,150 - 0,120 = 0,030m^3/s, \quad \text{za } Q = 0,150m^3/s.$$

Pretpostavljajući da će u času najmanje potrošnje vode u danu najveće potrošnje ($Q = 0,052m^3/s$), pumpa raditi sa protokom koji je za oko 10% manji od srednjeg protoka pumpe u ovom danu, kada je planirano da pumpa (pumpe) neprekidno radi (rade),

$$Q_p = 0,9 \cdot Q_{sr.dn} = 0,9 \cdot 0,109 = 0,098m^3/s, \quad \text{za } Q = 0,052m^3/s,$$

dobija se, da u ovom času u rezervoar odlazi voda protoka

$$Q_R = Q_p - Q = 0,098 - 0,052 = 0,046m^3/s, \quad \text{za } Q = 0,052m^3/s.$$

Protok $Q_p = 0,120m^3/s$ (120 l/s) merodavan je za određivanje prečnika cevovoda od pumpne stanice do račve A, dok je protok $Q_R = 0,046m^3/s$ (46 l/s) merodavan za određivanje prečnika cevovoda od račve A do rezervoara. Za određivanje prečnika cevovoda od račve A do čvora napajanja vodovodne mreže, merodavan je protok najveće potrošnje vode $Q = 0,150m^3/s$ (150 l/s). Prema napred datim protocima i podacima iz tabele VIII, za čelične cevi, usvajaju se sledeći prečnici cevi za ove cevovode:

$$d_{P-A} = 0,350m \text{ (350mm)}, \quad d_{A-R} = 0,250m \text{ (250mm)} \quad \text{i} \quad d_{A-1} = 0,400m \text{ (400mm)},$$

Napomenimo da prečnik 350 mm nije naveden u tabeli VIII, ali je standardan prečnik čelične cevi, a protoku od 120 l/s, u tabeli VIII, odgovaraju prečnici cevi između 300 i 400mm.

Koristeći Manningovu formulu (2.133) za izračunavanje koeficijenta karakteristike gubitka napora u cevovodu sa čeličnim cevima, dobija se, u prvom približenju:

$$K_{P-A} = 1260m / (m^3/s)^2, \quad \text{za } d_{P-A} = 0,350m \quad \text{i} \quad L_{P-A} = 3000m,$$

$$K_{A-R} (= K_{R-A}) = 6310m / (m^3/s)^2, \quad \text{za } d_{A-R} = 0,250m \quad \text{i} \quad L_{A-R} = 2500m,$$

$$\text{i} \quad K_{A-1} = 206m / (m^3/s)^2, \quad \text{za } d_{A-1} = 0,400m \quad \text{i} \quad L_{A-1} = 1000m.$$

S obzirom na napred date koeficijente karakteristika gubitka napora i formule

$$\Delta h_{i-j} = K_{i-j} \cdot Q_{i-j}^2,$$

gubici napora u cevovodu P-A, R-A i A-1, u času najveće potrošnje vode ($Q_p = 0,120m^3/s$, $Q_R = 0,030m^3/s$, $Q = 0,150m^3/s$), izračunati u prvom približenju, iznose:

$$\Delta h_{P-A} = K_{P-A} Q_p^2 = 1260 \cdot 0,12^2 = 18,1m,$$

$$\Delta h_{R-A} = K_{R-A} Q_R^2 = 6310 \cdot 0,03^2 = 5,7m \quad \text{i}$$

$$\Delta h_{A-1} = K_{A-1} Q^2 = 206 \cdot 0,15^2 = 4,6m.$$

Zbog uslova datog u jednačini (2.123), $\Delta h_{R-A} + \Delta h_{A-1} = 9,7m$, za $Q = 0,150m^3/s$, gubitak napora Δh_{R-A} treba smanjiti,

$$\Delta h_{R-A} = 9,7 + \Delta h_{A-1} = 9,7 - 4,6 = 5,1m$$

povećavajući prečnik cevi u jednom delu cevovoda R-A.

Ako se na dužinu X deonice cevovoda R-A, ukupne dužine $L_{R-A}(=L_{A-R})$, prečnik cevovoda poveća na $d'_{R-A}(=d'_{A-R})$ gubitak napora u cevovodu R-A (ili A-R), saglasno Maningovoj formuli (2.113), iznosi:

$$\Delta h_{R-A}(= \Delta h_{A-R}) = 0,00156 \left[\frac{L_{R-A} - X}{d_{R-A}^{5,33}} + \frac{X}{(d'_{R-A})^{5,33}} \right] \cdot Q_R^2, \quad (2.127)$$

odakle sleduje formula za X :

$$X = \frac{1}{(d'_{R-A})^{5,33} - d_{R-A}^{5,33}} \cdot \left[(d'_{R-A})^{5,33} \cdot L_{R-A} - \frac{(d_{R-A} \cdot d'_{R-A})^{5,33} \cdot \Delta h_{R-A}}{0,00156 \cdot Q_R^2} \right]. \quad (2.127')$$

Za $d_{R-A}(=d_{A-R})=0,250m$, $d'_{R-A}(=d'_{A-R})=0,300m$, $L_{R-A}(=L_{A-R})=2500m$ i traženi gubitak napora $\Delta h_{R-A}=5,1m$, korišćenjem jednačine (2.127') dobija se $X=410m$.

Prema ovome, u cevovodu R-A (A-R), na dužini $X=410m$ treba ugraditi cevi prečnika $d'_{R-A}(=d'_{A-R})=0,300m$ (300mm), a na dužini $L_{R-A}-X=2090m$ ugrađuju se cevi prečnika $d_{R-A}(=d_{A-R})=0,250m$ (250mm). Koeficijent karakteristike gubitka napora u ovakvom cevovodu je

$$K_{R-A}(=K_{A-R})=5670m/(m^3/s)^2,$$

a gubitak napora u njemu je $\Delta h_{R-A}=5,1m$, za $Q_R=0,030m^3/s$.

Koeficijent K_{P-A} i K_{A-1} iz prvog približenje ($K_{P-A}=1260m/(m^3/s)^2$ i $K_{A-1}=206m/(m^3/s)^2$) se ne menjaju.

Zbog povoljnijeg položaja pijezometarske linije pri gravitacionom isticanju vode iz rezervoara, cevi prečnika 300mm, na dužini od 410m, treba ugraditi kod rezervoara.

Pretpostavimo da pri gravitacionom isticanju vode iz rezervoara, pijezometarska linija, za $Q_R=0,030m^3/s$, ne seče trasu cevovoda R-A, čime su napred dati prečnici cevi (250 i 300mm) koje se ugrađuju u ovaj cevovod konačno određeni.

Protok $Q=0,052m^3/s$ odgovara najmanjoj časovnoj potrošnji vode u danu najveće potrošnje, kada je planirano da pumpa, ili paralelno povezane pumpe u pumpnoj stanici budu nepekidno uključene (24 časa). Očekivani najmanji protok potrošnje vode je $Q=0,026m^3/s$, ali kako on nastaje u danu manje potrošnje, velika je verovatnoća da će ovu potrošnju gravitaciono pokrivati sam rezervoar, sa isključenim pumpama u pumpnoj stanici. Zbog mogućnosti da, zbog niskog nivoa vode u rezervoaru, najmanja potrošnja ($Q=0,026m^3/s$) nastane sa isključenim pumpama, u daljem tekstu se razmatra i režim rada pumpe pri ovoj potrošnji, uz napomenu da protoci vode kojim se pri ovome puni rezervoar (a koji su veći od $Q_R=0,046m^3/s$) nisu merodavni za određivanje prečnika cevovoda A-R.

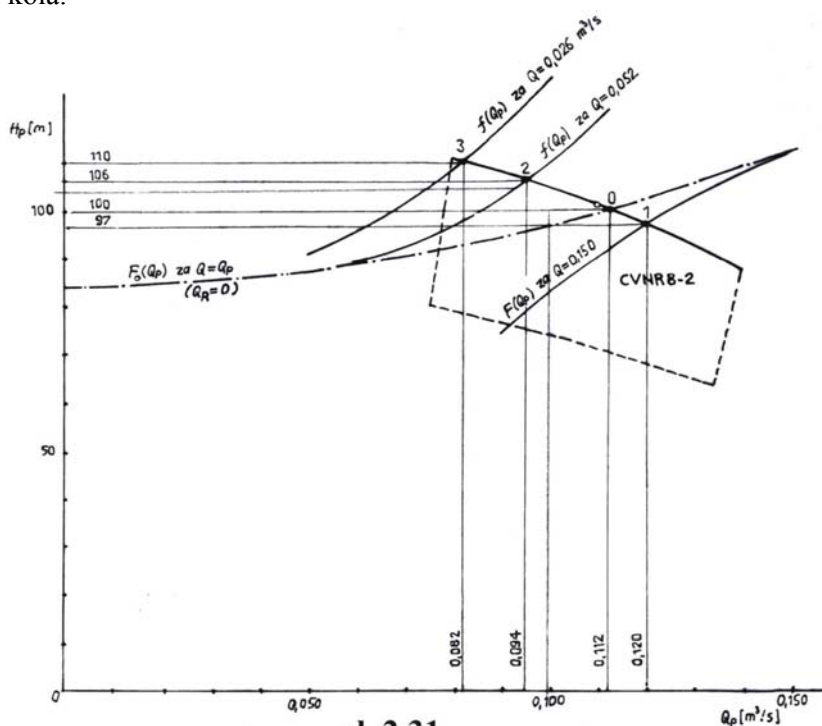
Za $Q=0,150m^3/s$ i, za ovu potrošnju, u prvom približenju, usvojenim $Q_P=0,120m^3/s$ i $Q_R=0,030m^3/s$ i konstante $Z_R-Z_P=254-170=84m$, $K_{R-A}=5670m/(m^3/s)^2$ i $K_{P-A}=1260m/(m^3/s)^2$, korišćenjem jednačina (2.124) i (2.124') dobija se da je traženi napor pumpe

$$\begin{aligned} H_P &= [84 - 5670 \cdot 0,15^2] - (5670 - 1260)Q_P^2 + 2 \cdot 5670 \cdot 0,15 \cdot Q_P = \\ &= -43,6 - 4410 \cdot Q_P^2 + 1701 \cdot Q_P = 97m \end{aligned}$$

$$\text{za } Q_P = 0,120m^3/s.$$

Zbog promene protoka pumpe u zavisnosti od protoka kojeg troše potrošači, protok pumpe $Q_p = 0,120m^3/s$ najveći je protok sa kojim bi pumpa radila. Prema ovome, pumpu, ili dve paralelno povezane pumpe, treba birati tako da radni režim $Q_p = 0,120m^3/s$ i $H_p = 97m$, na $H_p(Q_p)$ karakteristici pumpe, ili paralelno povezanih pumpi, bude malo desno od nominalnog radnog režima pumpe (ili paralelno povezanih pumpi), kako bi pri potrošnji vode manjoj od maksimalne ($Q = 0,150m^3/s$), pumpa (pumpe) radila u užoj okolini nominalnog režima pumpe.

Radnim parametrima $Q_p = 0,120m^3/s$ (120 l/s) i $H_p = 97m$, prema $H_p(Q_p)$ karakteristici, odgovara dvostepena centrifugalna pumpa tipa CVNR8-2, iz proizvodnog programa fabrike pumpi „Jastrebac“ iz Niša. Na sl.2.31 data je $H_p(Q_p)$ karakteristika ove pumpe, u oblasti ekonomičnog rada (oblasti rada sa visokim stepenom koristnosti). Nominalni režim rada ove pumpe je $Q_p^+ = 0,110m^3/s$ ($H_p^+ = 101m$), što je na sl.2.31 označeno kružićem. Isprekidanim linijama označena je na sl.2.31, oblast $H_p - Q_p$ karakteristika, koju, u ekonomičnom radu, pokriva ova pumpa sa odgovarajućim podrezivanjem (smanjivanjem) prečnika radnih kola.



sl. 2.31

Tačkom 1, na $H_p(Q_p)$ karakteristici pumpe, datoj na sl.2.31, označen je režim rada pumpe pri najvećoj potrošnji vode, $Q = 0,150m^3/s$. Prema ovom radnom režimu pumpa je i izabrana, a na slici je, kao ilustracija, dat i grafik funkcije usklađivanja rada pumpe i rezervoara za $Q = 0,150m^3/s$,

$$F(Q_p) = -43,6 + 4410 \cdot Q_p^2 - 1701 \cdot Q_p, \quad \text{za } Q_p < 0,150m^3/s$$

Za $Z_R - Z_P = 84m$ i $K_{P-A} = 1260m/(m^3/s)^2$ funkcija $F_0(Q_p)$, definisana jednačinom (2.125') glasi

$$F_0(Q_p) = 84 + 1260 \cdot Q_p^2,$$

a njen grafik, dat na sl.2.31, seče grafik naporne karakteristike pumpe u tački 0 ($Q_p = 0,112m^3/s$, $H_p = 100m$), koja definiše režim rada pumpe u slučaju da sav protok pumpe ide potrošačima ($Q = Q_p$).

Protoke $Q > 0,112m^3/s$ potrošačima daju pumpa i rezervoar ($Q = Q_p + Q_R$). Za $0,112m^3/s < Q \leq 0,150m^3/s$, kada potrošače zajednički, u paralelnom radu, snabdevaju vodom pumpa i rezervoar, režim rada pumpe menja se u oblasti ograničenoj tačkama 0 i 1 na $H_p(Q_p)$ karakteristici pumpe.

Pri potrošnji $Q < 0,112m^3/s$ pumpa snabdeva potrošače vodom i puni rezervoar ($Q_R = Q_p - Q$), a režim rada pumpe nalazi se, na $H_p(Q_p)$ karakteristici, levo od tačke 0.

Funkcija $f(Q)$, definisana jednačinom (2.126'), za $Q = 0,052m^3/s$ (najmanjoj časovnoj potrošnji u danu najveće potrošnje, kada je planirano da pumpa neprekidno radi) glasi

$$f(Q_p) = 99,3 + 6930 \cdot Q_p^2 - 590 \cdot Q_p, \quad \text{za } Q_p > 0,150m^3/s \quad (Q = 0,052m^3/s)$$

i njen grafik, dat na sl.2.31, seče grafik naporne karakteristike pumpe u tački 2 ($Q_p = 0,094m^3/s$, $H_p = 106m$), koja definiše režim rada pumpe. Protok vode kojom se, pri ovoj potrošnji, puni rezervoar je:

$$Q_R = Q_p - Q = 0,094 - 0,052 = 0,042m^3/s$$

Režim rada pumpe, u danu najveće potrošnje vode, kada je planirano da pumpa neprekidno radi, menja se, na $H_p(Q_p)$ karakteristici pumpe, u oblasti ograničenoj tačkama 1 i 2.

U danima manje potrošnje vode pumpa ne radi neprekidno. Pumpa se isključuje kada nivo vode u rezervoaru dostigne gornji regulacioni nivo (da se voda ne bi izlivala (prelivala) iz rezervoara), a uključuje se kada nivo vode u rezervoaru opadne na donju regulacionu granicu. Donji regulacioni nivo vode u rezervoaru određuje se tako da rezervoar zadrži vodu za protivpožarnu zaštitu i rezervu vode za neplanirano isključenje pumpe (zbog nestanka električne energije).

Najmanja očekivana potrošnja je $Q = 0,026m^3/s$ (duplo manja od najmanje časovne potrošnje vode u danu najveće potrošnje). Ovu potrošnju će najverovatnije pokriti sam rezervoar (sa isključenom pumpom), a pumpa će biti uključena samo u slučaju da je nivo vode u rezervoaru na donjoj regulacionoj granici.

Za $Q = 0,026m^3/s$ funkcija $f(Q_p)$, definisana jednačinom (2.126'), dobija oblik

$$f(Q_p) = 87,8 + 6930 \cdot Q_p^2 - 295 \cdot Q_p, \quad \text{za } Q_p > 0,026m^3/s,$$

a njen grafik, dat na sl.2.31, seče grafik $H_p(Q_p)$ karakteristike pumpe u tački 3 ($Q_p = 0,082m^3/s$, $H_p = 110m$), koja definiše režim rada pumpe. U rezervoar, u ovom slučaju, odlazi protok $Q_R = Q_p - Q = 0,082 - 0,026 = 0,056m^3/s$.

U slučajevima kada je pumpa uključena, prema energijskoj jednačini za strujni tok od pumpe do čvora napajanja mreže (1), napor vode u ovom čvoru je

$$H_1 = H_p(Q_p) - (Z_1 - Z_p) - K_{p-A} Q_p^2 - K_{A-1} Q^2$$

odnosno,

$$(2.128)$$

$$H_1 = H_p(Q_p) - 32 - 1260 \cdot Q_p^2 - 206 \cdot Q^2$$

Za $Q = 0,150m^3/s$, kada je $Q_p = 0,120m^3/s$ i $H_p = 97m$, prema jednačini (2.128) dobija se $H_1 = 42,3m$, što je bio i uslov (da krajnji čvorovi mreže dobiju vodu pod naporom od $30m$) prema kojem je određen prečnik cevovoda A-R, a kasnije i izabrana pumpa.

Sa smanjivanjem potrošnje vode (Q) smanjuje se protok pumpe, a raste njen napor, pa prema jednačini (2.128) sleduje da napor napajanja mreže raste, a samim tim raste i napor u krajnjim čvorovima mreže.

U danima manje potrošnje vode pumpa nije stalno uključena. Sa isključenom pumpom, rezervoar gravitaciono snabdeva potrošače vodom, a prema energijskoj jednačini za strujni tok od rezervoara do čvora napajanja mreže, napor vode u ovom čvoru je

$$H_1 = (Z_R - Z_1) - (K_{R-A} - K_{A-1})Q^2, \quad \text{za } Q = Q_R, (Q_P = 0),$$

odnosno,

$$H_1 = 52 - 5860 \cdot Q^2, \quad \text{za } Q = Q_R, (Q_R = 0),$$
(2.129)

U slučaju da najmanju očekivanu potrošnju ($Q = 0,026m^3/s$) pokriva sam rezervoar (sa isključenom pumpom), prema jednačini (2.129) dobija se $H_1 = 48m$, pa krajnji čvorovi mreže dobijaju vodu pod naporom koji je, kako će se u daljem tekstu pokazati, skoro dva puta veći od traženog minimalnog napora. U slučaju da je u času najmanje očekivane potrošnje uključena pumpa (jer je nivo vode u rezervoaru na donjoj regulacionoj granici), kada je $Q_P = 0,082m^3/s$ i $H_P = 110m$, prema jednačini (2.128) dobija se $H_1 = 69,4m$, pa će potrošači, kako će se u daljem tekstu pokazati, dobijati vodu pod naporom koji je za više od dva puta veći od minimalno potrebnog napora za ispravno funkcionisanje svih potrošača priključenih na mrežu.

Prema energijskim jednačinama za strujne tokove od čvora napajanja mreže (1) do krajnjih čvorova (4, 5, 7, 8, 10 i 11), kako je na sl.2.29 prikazano, napori vode u krajnjim čvorovima razmatrane vodovodne mreže su:

$$\begin{aligned} H_4 &= H_1 + (Z_1 - Z_4) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4}), \quad \text{gde je } Z_1 - Z_4 = 9m, \\ H_5 &= H_1 + (Z_R - Z_5) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-5}), \quad Z_1 - Z_5 = 10m, \\ H_7 &= H_1 + (Z_1 - Z_7) - (\Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-7}), \quad Z_1 - Z_7 = 3m, \\ H_8 &= H_1 + (Z_1 - Z_8) - (\Delta h_{1-6} + \Delta h_{6-8}), \quad Z_1 - Z_8 = 7m, \\ H_{10} &= H_1 + (Z_R - Z_{10}) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-10}), \quad Z_1 - Z_{10} = 7m, \\ H_{11} &= H_1 + (Z_R - Z_{11}) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-9} + \Delta h_{9-11}), \quad Z_1 - Z_{11} = 10m, \end{aligned}$$
(2.130)

Gubici napora u deonicama razmatrane magistralne granate vodovodne mreže, za $Q = 0,150m^3/s$, isti su kao i u primeru razmatranom u prethodnom odeljku i iznose (tabela X):

$$\begin{aligned} \Delta h_{1-2} &= 3,60m, & \Delta h_{2-3} &= 9,03m, & \Delta h_{3-4} &= 8,68m, & \Delta h_{3-5} &= 9,68m, & \Delta h_{1-6} &= 3,24m, \\ \Delta h_{6-7} &= 12,07m, & \Delta h_{6-8} &= 16,07m, & \Delta h_{2-9} &= 2,23m, & \Delta h_{9-10} &= 13,48m & \text{ i } & \Delta h_{9-11} &= 16,48m. \end{aligned}$$

Prema napred datim veličinama gubitka napora u deonicama mreže, za $Q = 0,150m^3/s$, kada je $H_1 = 42,3m$, korišćenjem jednačina (2.130) dobija se da je napor vode u svim krajnjim čvorovima $30m$, što je bio i uslov koji je korišćen pri određivanju prečnika cevovoda i izboru pumpe.

Smanjivanjem potrošnje vode povećava se napor vode u čvorovima mreže.

Označavajući sa Q^+ najveći protok potrošnje vode ($Q^+ = 0,150m^3/s$), a sa Q_{i-j}^+ , njemu odgovarajuće protoke u deonicama vodovodne mreže i pretpostavljajući, da se pri smanjenju protoka potrošnje, protoci u deonicama mreže menjaju u istom odnosu kao i protoci ukupne potrošnje,

$$\frac{Q_{i-j}}{Q_{i-j}^+} = \frac{Q}{Q^+},$$

postavljena je jednačina (2.119'),

$$\Delta h_{i-j}(Q_{i-j}) = \left(\frac{Q}{Q^+} \right)^2 \cdot \Delta h_{i-j}(Q_{i-j}^+),$$

koja daje vezu između gubitka napora u deonicama mreže pri protocima ukupne potrošnje Q i Q^+ .

Za $Q^+ = 0,150m^3/s$ i napred date brojčane podatke $\Delta h_{i-j}(Q_{i-j})$, korišćenjem formule (2.119') jednačine (2.130) svode se na oblike:

$$\begin{aligned} H_4(Q) &= H_1(Q) + 9 - 21,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2, & H_5(Q) &= H_1(Q) + 10 - 22,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2, \\ H_7(Q) &= H_1(Q) + 3 - 15,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2, & H_8(Q) &= H_1(Q) + 7 - 19,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2, & (2.130') \\ H_{10}(Q) &= H_1(Q) + 7 - 19,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2 & \text{i } H_{11}(Q) &= H_1(Q) + 10 - 22,3 \cdot \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2, \end{aligned}$$

gde je $H_1(Q)$ napor u čvoru napajanja mreže, koji se izračunava korišćenjem jednačine (2.128) ili (2.129), u zavisnosti da li se protok Q , kojeg troše potrošači, ostvaruje sa uključenom ili isključenom pumpom.

Kako je ranije određeno, pri najmanjoj očekivanoj potrošnji vode $Q = 0,026m^3/s$, sa isključenom pumpom je $H_1 = 48m$, a sa uključenom pumpom je $H_1 = 69,4m$ (kada pumpa puni i rezervoar protokom $Q_R = 0,056m^3/s$, koji je za više od dva puta veći od protoka koji ide potrošačima). Sa isključenom pumpom, kada rezervoar gravitaciono snabdeva potrošače vodom ($H_1 = 48m$), korišćenjem jednačine (2.130'), dobijaju se sledeći napori u krajnjim čvorovima magistralne vodovodne mreže: $H_4 = 56,4m$, $H_5 = 57,3m$, $H_7 = 50,5m$, $H_8 = 54,4m$, $H_{10} = 54,4m$ i $H_{11} = 57,3m$ (koji su za oko 8% manji od hidrostatičkih napora u odgovarajućim čvorovima ($Z_R - Z_k$, $k = 4, 5, 7, 8, 10$ i 11)). Sa uključenom pumpom je $H_1 = 69,4m$, pa se prema jednačinama (2.130'), dobijaju sledeći napori u krajnjim čvorovima razmatrane vodovodne mreže: $H_4 = 77,8m$, $H_5 = 78,3m$, $H_7 = 71,9m$, $H_8 = 75,8m$, $H_{10} = 75,8m$ i $H_{11} = 78,5m$, koji su za oko $26 \div 30\%$ veći od hidrostatičkih napora. Prema napred rečenom, zaključak je, da nazivni pritisak cevi koje se ugrađuju u vodovodnoj mreži sa prednjim kontrarezervoarom treba odrediti prema režimu rada sa najmanjom potrošnjom i uključenom pumpom.

Najmanji napor vode ima u krajnjem čvoru 7, pa je ovaj čvor merodavan za određivanje najvećeg protoka kojeg sam rezervoar može da da potrošačima pri uslovu da napor vode u krajnjim čvorovima mreže ne bude manji od $30m$.

Prema jednačini (2.130'), za čvor 7, dobija se

$$H_1 = H_7 - 3 + 15,3 \left(\frac{Q}{0,15}\right)^2 = H_7 - 3 + 680 \cdot Q^2,$$

dok je prema jednačini (2.129) $H_1 = 52 - 5860 \cdot Q^2$,

pa se izjednačavanjem desnih strana napred datih jednačina, posle sređivanja dobija

$$6540 \cdot Q^2 = 55 - H_7,$$

Za $H_7 = 30m$, prema napred datoj jednačini ($6540 \cdot Q^2 = 25$), odnosno $Q = 0,062m^3/s$.

Protok $Q = 0,062m^3/s$ najveći je protok kojeg, sa isključenom pumpom, potrošači mogu da dobiju iz rezervoara, a da napor u krajnjim čvorovima mreže ne bude manji od $30m$. Prema jednačini (2.129) je $H_1 = 29,5m$, za $Q = 0,062m^3/s$, pa se prema jednačinama (2.130') dobijaju sledeći napori u krajnjim čvorovima mreže: : $H_4 = 34,9m$, $H_5 = 35,7m$, $H_7 = 30m$, $H_8 = 33,2m$, $H_{10} = 33,2m$ i $H_{11} = 35,7m$.

Upravljački signal da pumpa mora biti uključena pri potrošnji vode veće od $Q = 0,062m^3/s$, kako napor vode u krajnjim čvorovima mreže ne bi opao ispod $30m$, ima prioritetniji značaj od sigala da se pumpa isključi jer je nivo vode na gornjoj granici rezervoara, pa može doći i do izlivanja (prelivanja) vode iz rezervoara. Ovo se može izbeći sa pumpom

stanicom u kojoj će u danu najveće potrošnje vode neprekidno raditi dve paralelno povezane pumpe, a ovome se govori u daljem tekstu (drugoj varijanti pumpne stanice).

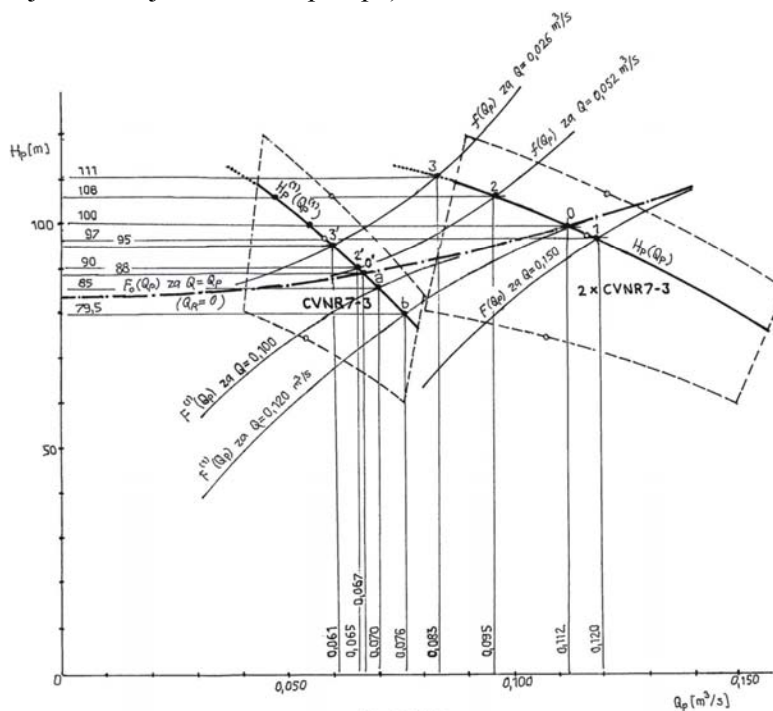
Protok $Q_p = 0,120 m^3 / s$ i napor $H_p = 97 m$ bili su, pri maksimalnoj potrošnji vode ($Q = 0,150 m^3 / s$), radni parametri pumpe CVNR8-2, u prethodnoj varijanti pumpne stanice (sa jednom radnom pumpom). Dve paralelno povezane pumpe, istih karakteristika, bi ovaj radni režim ostvarile ukoliko bi pojedinačno radile u radnim režimima sa

$$Q_p^{(1)} = \frac{Q_p}{2} = 0,060 m^3 / s \quad \text{i} \quad H_p^{(1)} = H_p = 97 m,$$

prema kojima ih treba i izabrati, s tim da ovaj radni režim bude desno od nominalnog radnog režima.

Napred date karakteristike zadovoljavaju trostepene centrifugalne pumpe tipa CVNR7 (CVNR7-3) čije su pojedinačne ($H_p^{(1)}(Q_p)$) i zbirne ($H_p^{(1+1)}(Q_p) = H_p(Q_p)$) date na sl.2.32. Isprekidanim linijama ograničena je oblast napornih karakteristika, u oblasti ekonomičnog rada, sa nepodrežanim i najviše dopušteno podrežanim radnim kolima. Punom linijom $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ označena je karakteristika napora pumpe CVNR7-3, naručene za garantovane radne parametre $Q_p^{(1)} = 0,060 m^3 / s$ (60 l/s) i $H_p^{(1)} = 97 m$ (koje proizvođač pumpi ostvaruje odgovarajućim podreživanjem radnih kola), dok je linijom $H_p(Q_p)$ označena zbirna karakteristika dve ovakve paralelno povezane pumpe. Naminalni režimi rada pumpi označeni su kružićima $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ i $H_p(Q_p)$ karakteristikama pumpi.

Izborom da u danu najveće potrošnje vode neprekidno rade dve paralelno povezane pumpe pruža se mogućnost da se u danima manje potrošnje vode vrši dvostepena regulacija protoka pumpi (uključivanjem u rad jedne ili dve pumpe).



sl. 2.32

Na sl.2.32 nacrtani su i grafici funkcija:

- $F_0(Q_p)$, za $Q = Q_p$ ($Q_R = 0$),
- $F(Q_p)$, za $Q = 0,150 m^3 / s$ (najveća potrošnja),
- $f(Q_p)$, za $Q = 0,052 m^3 / s$ (najmanja potrošnja u danu najveće potrošnje),
- $f(Q_p)$, za $Q = 0,026 m^3 / s$ (najmanja očekivana potrošnja),

čiji preseki sa graficima napornih karakteristika $H_p(Q_p)$, ili $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$, definišu režime rada paralelno povezanih pumpi, ili režimi rada samo jedne uključene pumpe.

U danu najveće potrošnje vode, kada paralelno povezane pumpe neprekidno rade, njihov režim rada se menja u oblasti koja je, na $H_p(Q_p)$ karakteristici paralelno povezanih pumpi, ograničena tačkama 1 ($Q_p = 0,120m^3/s$, $H_p = 97m$, za $Q = 0,150m^3/s$) i 2 ($Q_p = 0,095m^3/s$, $H_p = 108m$, za $Q = 0,052m^3/s$). Pri potrošnji $Q = 0,150m^3/s$, protok pumpe $Q_p = 0,120m^3/s$ dopunjuje rezervoar potokom $Q_R = Q - Q_p = 0,030m^3/s$, a pri potrošnji $Q = 0,052m^3/s$ deo protoka pumpe, $Q_R = Q - Q_p = 0,095 - 0,052 = 0,043m^3/s$, odlazi u rezervoar. Tačka 0 ($Q_p = 0,112m^3/s$, $H_p = 100m$), na $H_p(Q_p)$ karakteristici, odgovarao bi režimu rada paralelno povezanih pumpi u kojem bi sav njihov protok odlazio potrošačima ($Q = Q_p = 0,112m^3/s$, $Q_R = Q$).

Kako je za dve paralelno povezane pumpe (istih karakteristika) ($Q_p = 2 \cdot Q_p^{(1)}$ i $H_p = H_p^{(1)}$), režimima rada definisanih tačak 1 i 2 na $H_p(Q_p)$ karakteristici, odgovaraju pojedinačni režimi rada pumpi koji se nalaze u tačkama preseka grafika $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ i horizontala povučениh iz tačaka 1 i 2.

U danu najveće potrošnje vode, kada je planirano da paralelno povezane pumpe neprekidno rade (24 sata), minimalni protok kojeg troše potrošači je $Q = 0,052m^3/s$, a ovoj potrošnji odgovara režim rada pumpi označen tačkom 2 na $H_p(Q_p)$ karakteristici paralelno povezanih pumpi, datoj na sl.2.32. U danu najveće potrošnje vode režim rada pumpe se menja, zavisno od trenutne potrošnje vode i nalazi se između graničnih tačaka 1 i 2 na $H_p(Q_p)$ karakteristici, pa u ovom danu pumpe stalno rade u ekonomičnoj (preporučenoj) oblasti.

Zapremina kontrarezervoara određuje se prema planiranom neprekidnom radu dve paralelno povezane pumpe u danu najveće potrošnje vode i očekivanom dijagramu časovne potrošnje vode u tom danu, datom na sl.2.30.

Najmanji očekivani protok potrošnje vode ($Q = 0,026m^3/s$) javlja se u danu manje potrošnje vode, kada paralelno povezane pumpe ne moraju neprekidno da rade. Ako je pri ovoj potrošnji uključena samo jedna pumpa, njen radni režim odgovara tački 3' na $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ karakteristici pumpe, kojoj odgovaraju $Q_p = Q_p^{(1)} = 0,061m^3/s$ i $H_p = H_p^{(1)} = 95m$. Protok vode kojom se puni rezervoar je $Q_R = Q_p - Q = 0,035m^3/s$. Osim što pumpa radi skoro u nominalnom radnom režimu, prednost rada samo jedne pumpe pri minimalnoj potrošnji vode ogleda se i u smanjenom prekoračenju napora (natpritiska) u mreži, u odnosu na potreban napor za ispravno funkcionisanje svih potrošača.

Za $Q = 0,026m^3/s$, $Q_p = 0,061m^3/s$ i $H_p = 95m$, prema jednačini (1.126) dobija se $H_1 = 58,2$, pa bi uz pad pritiska u mreži ($0,4m$), krajnji potrošači dobijali vodu pod naporom od $57,8m$ ($5,67$ bara). U slučaju da pri minimalnoj potrošnji vode rade obe pumpe, krajnji potrošači bi dobijali vodu pod naporom od $69,8m$ ($6,85$ bara).

Tački 2' na $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ karakteristici, datoj na sl.2.32, definiše režim rada samo jedne uključene pumpe pri potrošnji vode od $Q = 0,052m^3/s$ ($Q_p = Q_p^{(1)} = 0,065m^3/s$ i $H_p = H_p^{(1)} = 90m$, a u rezervoar ide protok $Q_R = Q_p - Q = 0,013m^3/s$). Napomenimo, odmah, da je u danu najveće potrošnje vode planirano da obe, paralelno povezane pumpe neprekidno rade (24 sata), pa i u času najmanje potrošnje vode u tom danu, kada je protok potrošnje $Q = 0,052m^3/s$. Samo jedna pumpa može biti uključena u danima manje potrošnje vode, kada je i planirano da obe pumpe ne rade neprekidno, kako se voda ne bi prelivala iz kontrarezervoara.

Samo jedna uključena pumpa bez dopune protoka iz rezervoara ($Q_R = 0$), može da zadovolji potrošnju od $Q = Q_P^{(1)} = 0,067m^3/s$, koja odgovara radnom režimu pumpe označenim tačkom 0' na $H_P^{(1)}(Q_P^{(1)})$ karakteristici pumpe, datoj na sl.2.32. Pumpa u ovom režimu radi sa naporom $H_P = H_P^{(1)} = 88m$, pa se korišćenjem jednačine (2.126) dobija da je napor vode u čvoru napajanja mreže $H_1 = 49,4m$. Zanemarujući visinske razlike između čvora napajanja i krajnjih čvorova u mreži, prema jednačini (2.127) dobija se da je gubitak napora u mreži $\Delta h_{mr} = 2,5m$, pa krajnji čvorovi u mreži dobijaju vodu pod naporom $H_K = H_1 - \Delta h_{mr} = 49,4 - 2,5 = 46,9m$ (što je iznad minimalno traženog napora od $30m$).

Režim rada samo jedne uključene pumpe, koja uz pomoć protoka iz kontrarezervoara obezbeđuje potrošnju veću od $0,067m^3/s$ ($Q = Q_P + Q_R$), definisan je tačkom preseka grafika $H_P^{(1)}(Q_P^{(1)})$ karakteristike pumpe i grafika funkcije $F(Q_P)$, definisane jednačinom (2.124'), koju formalno označavamo $F^{(1)}(Q_P)$ (jer za protoke $Q < 0,120m^3/s$ ne važi za dve paralelno uključene pumpe).

Za $Q = 0,100m^3/s$ i $Q = 0,120m^3/s$ ove funkcije su:

$$F^{(1)}(Q_P) = 27,3 - 4410 \cdot Q_P^2 + 1134 \cdot Q_P^2, \text{ za } Q = 0,100m^3/s \text{ } (Q_P < Q)$$

$$F^{(1)}(Q_P) = 2,4 - 4410 \cdot Q_P^2 + 1361 \cdot Q_P^2, \text{ za } Q = 0,120m^3/s \text{ } (Q_P < Q),$$

a delovi grafika ovih funkcija dati su na sl.2.32. Tačke preseka ovih grafika sa grafikom $H_P^{(1)}(Q_P^{(1)})$ karakteristike pumpe označene su na sl.2.32, tačkama a i b, koje definišu radne režime pumpe. Za $Q = 0,100m^3/s$ radni parametri pumpe su $Q_P = 0,070m^3/s$ i $H_P = 85m$, a protok koji se dopunjuje iz rezervoara je $Q_R = Q - Q_P = 0,030m^3/s$. Za $Q = 0,120m^3/s$ dobija se $Q_P = 0,076m^3/s$, $H_P = 79,5m$ i $Q_R = 0,044m^3/s$.

Pri potrošnji vode protoka $Q = 0,120m^3/s$, u slučaju da je uključena samo jedna pumpa ($Q_P = 0,076m^3/s$, $H_P = 79,5m$), napor vode u čvoru napajanja mreže je $H_1 = 37,2m$ (prema jednačini (2.126)), a zanemarujući visinsku razliku između čvora napajanja i krajnjih čvorova u mreži, gubitak napora u mreži je $\Delta h_{mr} = 7,9m$ (prema jednačini (2.127)), pa u krajnjim čvorovima mreže voda dolazi sa naporom $H_K = H_1 - \Delta h_{mr} = 29,3m$, što je zanemarljivo malo manje (za 2,3%) od minimalno traženog napora u krajnjim čvorovima mreže ($H_K = 30m$, $k = 4, 5, 7, 8, 10$ i 11 , prema oznakama čvorova mreže date na sl.2.29). S obzirom na traženi minimalni napor vode u krajnjim čvorovima mreže, razmatrani vodovodni sistem može da radi sa samo jednom uključenom pumpom, pri protocima potrošnje vode do $Q = 0,120m^3/s$.

Napred razmatrane potrošnje vode protoka $Q = 0,100m^3/s$ i $Q = 0,120m^3/s$, koje se sa uključenom samo jednom pumpom ostvaruju uz pomoć protoka koji se dobija iz rezervoara (kada se rezervoar prazni), sa uključene dve paralelno povezane pumpe, ostvaruju same pumpe, puneći pri tome i rezervoar.

Zavisno od potrošnje vode, sa uključenom samo jednom pumpom troši se $40 \div 45\%$ manje snage, u odnosu na snagu koju troše dve uključene pumpe. U danima manje potrošnje vode, u određenim periodima, zavisno od nivoa vode u rezervoaru, može biti uključena samo jedna pumpa, što posmatrano na godišnjem nivou, može značajno smanjiti utrošak električne energije.

U odnosu na prvu varijantu pumpne stanice, sa jednom radnom pumpom veće snage, prema eksploatacionim karakteristikama prednost ima druga varijanta pumpne stanice, sa dve radne paralelno povezane pumpe manje snage.

Pri istim časovima potrošnje vode, u danu najveće potrošnje, pumpe bi u obe razmatrane pumpne stanice, radile sa istim ili skoro istim protocima, pa izabrana varijanta pumpne stanice praktično ne utiče na veličinu zapremine kontrarezervoara.

Pumpna stanica sa jednom radnom pumpom mora imati još jednu istu (ili sličnu) rezervnu pumpu. Obe pumpe su paralelno povezane, ali se u rad uključuje samo jedna pumpa. Radi sigurnosti u pogonu, naizmenično se uključuju obe pumpe, pa pumpe naizmenično menjaju uloge radne i rezervne pumpe.

Pumpna stanica sa dve paralelno povezane radne pumpe, zbog male verovatnoće da se obe pumpe istovremeno pokvare, ima i treću rezervnu pumpu. Sve tri pumpe su paralelno povezane, a u rad se uključuju dve, a u određenom periodu samo jedna pumpa.

Pojedinačne snage pumpi koje treba instalirati u drugoj varijanti pumpne stanice su oko 55% pojedinačnih snaga pumpi koje treba instalirati u prvoj varijanti pumpne stanice. S obzirom na broj pumpi i njihovu snagu, investicioni troškovi bi bili približno isti, ili nešto malo veći u drugoj varijanti pumpne stanice, što bi se brzo kompenziralo uštedom električne energije, pa u svakom slučaju prednost treba dati drugoj varijanti pumpne stanice.

Napomenimo da su u obe varijante pumpnih stanica pumpe birane po uslovu da, u danu najveće potrošnje vode, rade neprekidno (24 sata), bez spoljašnje regulacije njihovog režima rada.

Sa promenom potrošnje vode režim rada pumpi se menja, kao rezultat samousaglašavanja (usklađivanja) zajedničkog rada pumpi, kantrarezervoara i vodovodne mreže. Da bi se odredila zapremina kontrarezervoara potrebno je, prema očekivanom dijagramu časovne potrošnje vode, u danu najveće potrošnje (sl.2.30), odrediti protoke koje daju pumpe, odnosno odrediti časovne protoke pumpi.

Za čas najveće potrošnje (od 18 do 19 h) i čas najmanje potrošnje (od 2 do 3 h) režimi rada pumpi su već određeni i na $H_p(Q_p)$ karakteristici paralelno povezanih pumpi, datoj na sl.2.32, označeni su tačkom 1 ($Q_p = 0,120m^3/s$ i $H_p = 97m$, za $Q = 0,150m^3/s$) i 2 ($Q_p = 0,095m^3/s$ i $H_p = 106m$, za $Q = 0,052m^3/s$).

Po istom principu određeni su i protoci pumpi pri svim potrošnjama vode datim dijagramom časovne potrošnje (sl.2.30), kakav se očekuje u danu najveće potrošnje. Rezultati su dati u tabeli XIV.

U danu manje potrošnje vode, kada pumpe ne moraju da budu neprekidno uključene, potrošnju $Q = 0,052m^3/s$ može pokriti i sam rezervoar, sa isključenim pumpama (kada se rezervoar prazni), a ako je pri ovoj potrošnji uključena samo jedna pumpa, njen radni režim je definisan tačkom 2' ($Q_p = Q_p^{(1)} = 0,065m^3/s$, $H_p = H_p^{(1)} = 90m$), na $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ karakteristici pumpe datoj na sl.2.32. Pri ovoj potrošnji, sa jednom uključenom pumpom rezervoar se puni protokom $Q_R = Q_p - Q = 0,065 - 0,052 = 0,013m^3/s$.

Najmanju očekivanu potrošnju $Q = 0,026m^3/s$ pokriće, najverovatnije sam rezervoar, a pumpa će biti uključena samo u slučaju da je nivo vode u rezervoaru na donjoj regulacionoj granici. Samo jedna uključena pumpa radiće, pri ovoj potrošnji, u radnom režimu koji je na $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ karakteristici, datoj na sl.2.32, označen tačkom 3' ($Q_p = Q_p^{(1)} = 0,061m^3/s$, $H_p = H_p^{(1)} = 95m$), koja je blizu tačke nominalnog radnog režima pumpe (koja je označena kružićem na $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ karakteristici pumpe). Protok vode koja odlazi u rezervoar je $Q_R = Q_p - Q = 0,061 - 0,026 = 0,035m^3/s$.

Pri najmanje očekivanoj potrošnji nelogično je uključivati dve paralelno povezane pumpe, pa je radni režim označen tačkom 3 na $H_p(Q_p)$ karakteristici paralelno povezanih pumpi (sl.2.32) dat samo formalno.

Kako su časovne potrošnje ($\dot{V}^{(h)}[m^3/h]$), u dijagramu na sl.2.30, date u % dnevne potrošnje vode ($\dot{V}^{(dn)}[m^3/h]$),

$$\bar{v}[\%] = \frac{\dot{V}^{(h)}}{\dot{V}^{(dn)}} \cdot 100,$$

prosečan sekundni protok potrošnje vode ($Q[m^3/s]$), u posmatranoj jednosatnoj potrošnji, izračunava se korišćenjem formule:

$$Q = \frac{\dot{V}^{(h)}}{3600} = \frac{\bar{v}[\%]}{3,6 \cdot 10^5} \dot{V}^{(dn)}$$

Časovni protoci pumpi, svedeni na % dnevne potrošnje vode, izračunavaju se korišćenjem formule,

$$\bar{v}_p[\%] = \frac{\dot{V}^{(h)}}{\dot{V}^{(dn)}} \cdot 100 = \frac{3,6 \cdot 10^5}{\dot{V}^{(dn)}} \cdot Q_p,$$

gde je $Q_p[m^3/s]$ prosečni sekundni protok pumpe, u posmatranoj jednosatnoj potrošnji vode.

Časovni dotok vode u rezervoar, sveden u % dnevne potrošnje vode, koji se daje u tabeli XIII, je:

$$\bar{v}_R[\%] = \bar{v}_p[\%] - \bar{v}[\%].$$

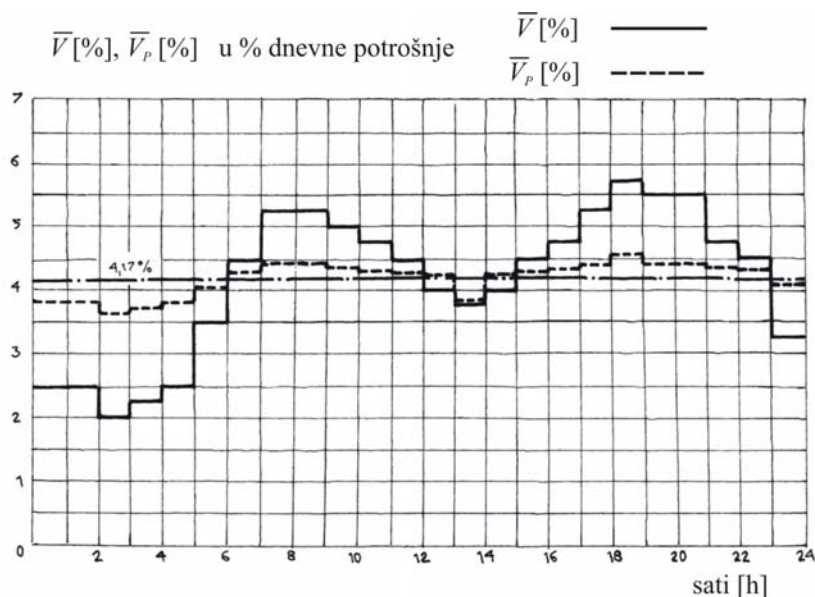
U tabeli XIV daju se i kumulativne veličine $\Sigma \bar{v}_R[\%]$, u svakom satu potrošnje, koje su merodavne za određivanje zapremine kontrazervoara.

Za najveću potrošnju vode $\dot{V}^{(dn)} = 9391 m^3/dan$, napred date formule za Q i $\bar{v}_p[\%]$, dobijaju oblik: $Q = 0,0261 \cdot \bar{v}_p[\%]$ i $\bar{v}_p[\%] = 38,33 \cdot Q_p$,

Tabela XIV

vreme [h]	potrošnja vode		protok pumpi		rezervoar	
	$\bar{v}[\%]$	$Q[m^3/s]$	$Q_p[m^3/s]$	$\bar{v}_p[\%]$	punjenje (+) pražnjenje (-) $\bar{v}_R[\%]$	$\Sigma \bar{v}_R[\%]$
1	2	3	4	5	6	7
0 – 1	2,5	0,065	0,099	3,79	1,29	1,29
1 – 2	2,5	0,065	0,099	3,79	1,29	2,58
2 – 3	2	0,052	0,095	3,64	1,64	4,22
3 – 4	2,25	0,059	0,096	3,68	1,43	5,65
4 – 5	2,5	0,065	0,099	3,79	1,29	6,94
5 – 6	3,5	0,091	0,106	4,06	1,56	<u>7,50</u>
6 – 7	4,5	0,117	0,112	4,29	- 0,21	7,29
7 – 8	5,5	0,143	0,116	4,44	- 1,06	6,23
8 – 9	5,5	0,143	0,116	4,44	- 1,06	5,17
9 – 10	5	0,130	0,114	4,37	- 0,63	4,54
10 – 11	4,75	0,124	0,113	4,33	- 0,42	4,12
11 – 12	4,5	0,117	0,112	4,29	- 0,21	3,91
12 – 13	4	0,104	0,111	4,25	0,25	4,16
13 – 14	3,75	0,098	0,100	3,83	0,08	4,24
14 – 15	4	0,104	0,111	4,25	0,25	4,49
15 – 16	4,5	0,017	0,112	4,29	- 0,21	4,28
16 – 17	4,75	0,124	0,113	4,33	- 0,42	3,86
17 – 18	5,25	0,137	0,115	4,41	- 0,84	3,02
18 – 19	5,75	0,150	0,120	4,60	- 1,15	1,87
19 – 20	5,5	0,143	0,116	4,44	- 1,06	0,81
20 – 21	5,5	0,143	0,116	4,44	- 1,06	- 0,25
21 – 22	4,75	0,124	0,113	4,33	- 0,42	- 0,67
22 – 23	4,5	0,117	0,112	4,29	- 0,21	<u>- 0,88</u>
23 – 24	3,25	0,085	0,107	4,10	0,85	- 0,03 ≈ 0
	$\Sigma = 100\%$			$\Sigma = 100,47$ $\approx 100\%$		

Na sl.2.33 dat je dijagram časovne potrošnje vode u danu najveće potrošnje, na kojem je, prema podacima iz kolone 5 tabele XIV, isprekidanom linijom dat i dijagram časovnih protoka paralelno povezanih pumpi u potisnoj pumpnoj stanici. Časovna potrošnja i časovni protoci pumpi dati su u % dnevne potrošnje (\bar{v} [%] i \bar{v}_p [%]), a crta tačka linijom (4,17%) označena je srednja časovna potrošnja, u % dnevne potrošnje.



sl. 2.33.

Kako se sa grafika datom na sl.2.33 može zaključiti, promena protoka pumpe je takva da po karakteru prati časovnu potrošnju vode. Pri manjoj potrošnji vode manji je i protok pumpe i obratno, pri većoj potrošnji vode veći je i protok pumpe. U odnosu na srednji časovni protok pumpe (4,17% dnevne potrošnje), protok pumpe, u konkretno razmatranom primeru, osciluje u granicama od +10% (u času najveće potrošnje) do -15% (u času najmanje potrošnje).

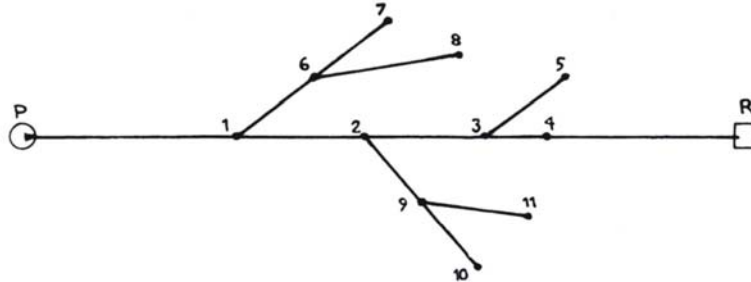
Radna zapremina kontrarezervoara jednaka je razlici najveće i najmanje zapremine iz kolone 7 u tabeli XIII, a to je $7,50 - (-0,88) = 8,38\%$ najveće dnevne potrošnje.

$$\text{Za } \dot{V}^{(dn)} = 9391 m^3 / \text{dan} \text{ je } \bar{v}_R = 0,0838 \cdot 9391 = 787 \approx 790 m^3.$$

Za isti dijagram časovne potrošnje vode, u danu najveće potrošnje i neprekidni rad pumpe u vodovodnom sistemu sa prethodnim napornim rezervoarom, zapremina rezervoara bi bila 11,14% dnevne potrošnje vode, što je za 25% više, u odnosu na napred razmatran sistem sa prednjim kontrarezervoarom.

2.7.3. Proračun granate vodovodne mreže u vodovodnom sistemu sa potisnom pumpnom stanicom i zadnjim kontrarezervoarom

Kod vodovodnih sistema sa zadnjim kontrarezervoarom vodovodna mreža se nalazi između potisne pumpne stanice i napornog rezervoara – kontrarezervoara. Jedan ovakav vodovodni sistem, sa granatom mrežom, prikazan je na sl.2.34.



$$L_{1-2} = 1000m, L_{2-3} = 1000m, L_{3-4} = 500m, L_{3-5} = 800m, L_{1-6} = 700m, \\ L_{6-7} = 800m, L_{6-8} = 1200m, L_{2-9} = 700m, L_{9-10} = 700m, L_{9-11} = 900m, \\ Z_1 = 202m, Z_2 = 205m, Z_3 = 210m, Z_4 = 212m, Z_5 = 210m, \\ Z_6 = 204m, Z_7 = 208m, Z_8 = 208m, Z_9 = 210m, Z_{10} = 212m, Z_{11} = 210m,$$

sl. 2.34

Na sl.2.34. date su samo magistralne grane vodovodne mreže.

Konfiguracija mreže ista je kao u primerima razmatranim u odeljcima 2.7.1 i 2.7.2, sa razlikom visinskih kota, datih uz sl.2.34. Visinska kota pumpne stanice je $Z_P = 170m$, a visinsku kotu kontrarezervoara treba odrediti po uslovu da napor vode u krajnjim čvorovima mreže ne bude manji od $30m$ (što odgovara natpritisku od 2,94 bara). Dužina cevovoda od pumpne stanice do čvora napajanja mreže je $L_{P-1} = 4000m$. Visinska kota kontrarezervoara mora biti za više od $30m$ iznad kote čvora 4 i pretpostavimo da je, prema terenu, lokacija kontrarezervoara na mestu koje je sa čvorom 4 povezuje cevovodom dužine $L_{4-R} (= L_{R-4}) = 2500m$.

Usvaja se da su cevovodi od čeličnih cevi i da se gubitak napora u njima računa korišćenjem Maningove formule (2.113).

Protok najveće potrošnje vode je $0,150m^3/s$ ($150 l/s$), a gustina naseljenosti je približno jednaka na celoj teritoriji koju napaja vodovodna mreža. Kako su dužine deonice magistralnih grana iste kao i u primeru razmatranom u odeljku 2.7.1, a isti je i najveći protok potrošnje vode, fiktivno redukovani protoci odvoda vode iz čvorova magistralne mreže su (isti kao u razmatranom primeru u odeljku 2.7.1):

$$q_1 = 0,0150m^3/s, q_2 = 0,0240m^3/s, q_3 = 0,0188m^3/s, q_4 = 0,0054m^3/s, q_5 = 0,0086m^3/s, \\ q_6 = 0,0210m^3/s, q_7 = 0,0086m^3/s, q_8 = 0,0130m^3/s, q_9 = 0,0182m^3/s, \\ q_{10} = 0,0076m^3/s \quad \text{i} \quad q_{11} = 0,0098m^3/s.$$

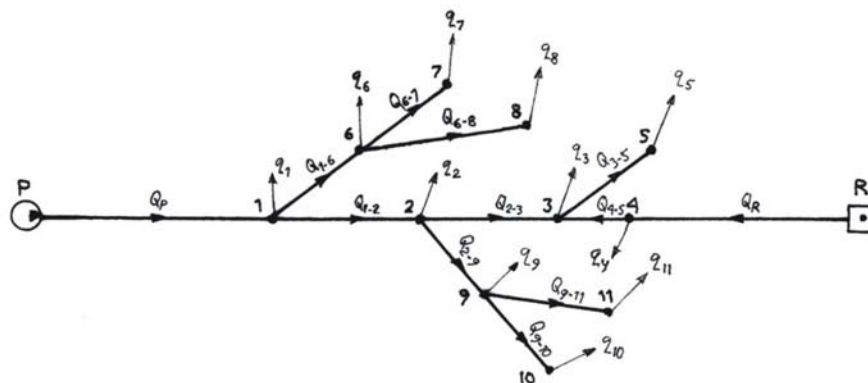
U danu najveće potrošnje vode predviđeno je da pumpe rade neprekidno, bez spoljašnje regulacije režima rada. Dijagram časovne potrošnje vode, u danu najveće potrošnje, isti je kao i u prethodno razmatranom primeru i dat je na sl.2.30.

Očekivani najmanji protok potrošnje vode je $\min Q = 0,026m^3/s$, isti kao i u prethodno razmatranom primeru u odeljku 2.7.2 (duplo manji od protoka najmanje potrošnje u danu najveće potrošnje vode ($Q = 0,052m^3/s$)).

Potrošnja vode u danu najveće potrošnje $\dot{V}^{(dn)} = 9391m^3/dan$, a srednja časovna potrošnja u toku dana je $\dot{V}_{sr,dn}^{(h)} = 391m^3/s$, ($Q_{sr,dn} = 0,109m^3/s$).

Zavisno od časovne potrošnje vode protok pumpe (ili paralelno povezanih pumpi) osciluje oko protoka srednje časovne potrošnje ($Q_{sr.dn} = 0,109m^3/s$). U časovima veće potrošnje vode protok pumpe je veći i obrnuto, u časovima manje potrošnje vode i protok pumpe je manji.

U času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s$) pumpa i rezervoar (kontrarezervoar), zajednički, u paralelnom radu, snabdeavaju potrošače vodom. Pretpostavimo da je protok pumpe za oko 10% veći od protoka srednje časovne potrošnje $Q_P \approx 1,10 \cdot Q_{sr.dn} = 0,120m^3/s$. Prema ovome bi traženi protok $Q = 0,150m^3/s$, sa $Q_R = 0,030m^3/s$ dopunjavao rezervoar. Za razmatranje rada vodovodnog sistema u času najveće potrošnje vode, karakterističan je čvor mreže koji dobija vodu i od pumpe i iz rezervoara. Prema napred datim srednjim protocima potrošnje u čvorovima mreže, čvor 3 dobija vodu i od pumpe i iz rezervoara, kako je na sl.2.35 prikazano.



sl. 2.35

Prema napred datim svedenim protocima potrošnje vode u čvorovima magistralne mreže ($q_i, i = 1, 2, \dots, 11$), protoci vode u deonicama bočnih grana mreže su:

$$\begin{aligned} Q_{6-7} = q_7 = 0,0086m^3/s, & \quad Q_{9-10} = q_{10} = 0,0076m^3/s, \\ Q_{6-8} = q_8 = 0,0130m^3/s, & \quad Q_{9-11} = q_{11} = 0,0098m^3/s, \\ Q_{1-6} = q_6 + Q_{6-7} + Q_{6-8} = 0,0426m^3/s, & \quad Q_{2-9} = q_9 + Q_{9-10} + Q_{9-11} = 0,0356m^3/s, \\ Q_{3-5} = q_5 = 0,0086m^3/s, & \end{aligned}$$

za $Q_P = 0,120m^3/s$ i $Q_R = 0,030m^3/s$ ($Q = Q_P + Q_R = 0,150m^3/s$), protoci u deonicama magistralne mreže koje povezuju pumpu i kontrarezervoar su:

$$\begin{aligned} Q_{1-2} &= Q_P - q_1 - Q_{1-6} = 0,0624m^3/s, \\ Q_{2-3} &= Q_{1-2} - q_2 - Q_{2-9} = 0,0028m^3/s \text{ i} \\ Q_{4-3} &= Q_R - q_4 = 0,0246m^3/s. \end{aligned}$$

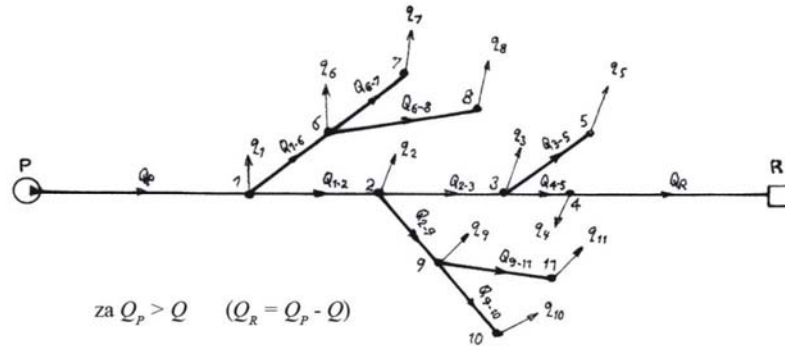
Protok koji od pumpe dolazi u čvor 3 ($Q_{2-3} = 0,0028m^3/s$), u razmatranom primeru, mnogo je manji od protoka koji u ovaj čvor dolazi iz rezervoara ($Q_{4-3} = 0,0246m^3/s$).

Napred dati protoci u deonicama bočnih grana magistralne mreže najveći su protoci u ovim deonicama i merodavni su za određivanje njihovih prečnika. Prema ovim protocima i podacima iz tabele VIII usvajaju se, u prvom približenju, sledeći prečnici cevi ovih deonica:

$$\begin{aligned} d_{6-7} &= 0,125m \text{ (125mm)}, & d_{9-10} &= 0,100m \text{ (100mm)}, \\ d_{6-8} &= 0,150m \text{ (150mm)}, & d_{9-11} &= 0,125m \text{ (125mm)} \text{ i} \\ d_{1-6} &= 0,250m \text{ (250mm)}, & d_{2-9} &= 0,250m \text{ (250mm)}. \\ d_{3-5} &= 0,125m \text{ (125mm)}, & & \end{aligned}$$

U deonicama mreže koji povezuju pumpnu stanicu i rezervoar (1-2-3-4), napred dati protoci (Q_{1-2} , Q_{2-3} i Q_{3-4}), nisu najveći, iako odgovaraju najvećoj potrošnji vode.

Najmanjoj časovnoj potrošnji vode, u danu najveće potrošnje vode, odgovara protok $Q = 0,052m^3/s$. Kako je planirano da u ovom danu pumpe neprekidno rade, njihov srednji dnevni protok jednak je srednjem protoku dnevne potrošnje $Q_{sr.p} = Q_{sr.dn} = 0,109m^3/s$. Pretpostavljajući da u času najmanje potrošnje vode, u ovom danu, pumpa radi sa protokom $Q_P = 0,85 \cdot Q_{sr.p} = 0,093m^3/s$, sleduje da u rezervoara odlazi voda protoka $Q_R = Q_P - Q = 0,093 - 0,052 = 0,041m^3/s$. Samo ovaj tranzitni protok u deonicama 1 - 2 - 3 - 4 veći je od napred datih protoka Q_{1-2} , Q_{2-3} i Q_{3-4} , za čas najveće potrošnje vode. Smerovi strujanja u deonicama mreže 1 - 2, 2 - 3 i 3 - 4 su kao na sl.2.36, a tranzitni protok u ovim deonicama (Q_R) ide u rezervoar.



sl. 2.36

Protoci u deonicama magistralne mreže kroz koje tranitno prolazi protok koji ide u rezervoar, prema oznakama na sl.2.36, su:

$$\begin{aligned} Q_{3-4} &= Q_R + q_4, \\ Q_{2-3} &= Q_{3-4} + (q_3 + q_5) \text{ i} \\ Q_{1-2} &= Q_{2-3} + (q_2 + q_9 + q_{10} + q_{11}). \end{aligned}$$

Odnos najveće i najmanje časovne potrošnje, u danu najveće potrošnje vode je $0,150/0,52=2,885$. Pretpostavljajući da se potrošnja vode u svim deonicama magistralne mreže menja u istom odnosu, protoci q_i ($i = 1, 2, \dots, 11$), u času najmanje potrošnje, biće 2,885 puta manji od ranije datih protoka q_i u času najveće potrošnje.

Prema napred rečenom, za $Q = 0,052m^3/s$ i, u prvom približenju određenom $Q_R = 0,046m^3/s$ ($Q_P = 0,098m^3/s$), dobija se:

$$\begin{aligned} Q_{3-4} &= 0,041 + \frac{0,0054}{2,885} = 0,0428m^3/s, (47,9 \text{ l/s}), \\ Q_{2-3} &= 0,0474 + \frac{0,0188 + 0,0086}{2,885} = 0,0524m^3/s, (57,4 \text{ l/s}) \text{ i} \\ Q_{1-2} &= 0,0569 + \frac{0,0240 + 0,0182 + 0,0076 + 0,0098}{2,885} = 0,0731m^3/s, (78,1 \text{ l/s}). \end{aligned}$$

S obzirom na napred date protoke i tabelle VIII, usvajaju se sledeći prečnici cevi za 1 - 2, 2 - 3 i 3 - 4:

$$d_{1-2} = 0,300m (300mm), \quad d_{2-3} = 0,250m (250mm) \quad \text{i} \quad d_{3-4} = 0,250m (250mm).$$

Prečnik cevovoda koji povezuje pumpnu stanicu i vodovodnu mrežu (P - 1) određuje se prema najvećem protoku pumpi, koji se postiže pri najvećoj potrošnji vode i u prvom približenju je određen kao $Q_P = 0,120m^3/s$, za $Q = 0,150m^3/s$. Za protok od 120 l/s ($= 0,120m^3/s$) prema

podacima iz tabele VIII odgovarao bi prečnik cevi između 300 i 400m, pa se usvaja standardan prečnik za čelične cevi $d_{P-1} = 0,350m$ (350mm).

U danu najveće potrošnje vode, protok $Q_R = 0,030m^3/s$, koji iz rezervoara dolazi potrošačima (dopunjujući do $Q = 0,150m^3/s$, protok pumpe $Q_P = 0,120m^3/s$), manji je od protoka $Q_R = 0,041m^3/s$, koji u času najmanje potrošnje odlazi u rezervoar, pa je ovaj drugi merodavan za određivanje prečnika cevovoda koji povezuje vodovodnu mrežu i rezervoar. Prema podacima iz tabele VIII, protoku $Q_R = 0,041m^3/s$ (41 l/s) odgovara prečnik cevovoda $d_{4-R}(=d_{R-4}) = 0,250m$ (250mm).

Prema Maningovoj formuli (2.113) izračunati koeficijenti karakteristike gubitka napora u cevovodima P - 1, 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4 (4 - 3) i 4 - R (R - 4) su:

$$K_{P-1} = 1680m/(m^3/s)^2, K_{1-2} = 955m/(m^3/s)^2, K_{2-3} = 2524m/(m^3/s)^2,$$

$$K_{3-4} = K_{4-3} = 1262m/(m^3/s)^2, K_{4-R} = K_{R-4} = 6320m/(m^3/s)^2,$$

dok su koeficijenti karakteristika gubitka napora u deonicama bočnih grana mreže, određeni u prvom približenju, sledeći:

$$K_{3-5} = 81224m/(m^3/s)^2, K_{1-6} = 1767m/(m^3/s)^2, K_{6-7} = 81224m/(m^3/s)^2,$$

$$K_{6-8} = 46104m/(m^3/s)^2, K_{2-9} = 1767m/(m^3/s)^2, K_{9-10} = 233465m/(m^3/s)^2$$

$$\text{i } K_{9-11} = 91377m/(m^3/s)^2.$$

U času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s$) određeno je, u prvom približenju, da čvor 3 dobija vodu i od pumpe i od rezervoara, kako je na sl.2.35 prikazano.

Napor vode u krajnjim čvorovima mreže najmanji je u času najveće potrošnje, a kako napor vode zavisi od visinske kote kontrarezervoara (Z_R), ova kota se može odrediti korišćenjem energijske jednačine za strujni tok od rezervoara do čvora 5,

$$Z_R = Z_5 + H_5 + K_{R-4}Q_R^2 + K_{4-3}Q_{4-3}^2 + K_{3-5}Q_{3-5}^2 \quad (2.131)$$

i traženog napora u čvoru $H_5 = 30$ m.

Za $Z_5 = 210m$, $H_5 = 30m$, $Q_R = 0,030m^3/s$, $Q_{4-3} = 0,0246m^3/s$, $Q_{3-5} = 0,0086m^3/s$ i napred date numeričke vrednosti za K_{R-4} , K_{4-3} i K_{3-5} , korišćenjem jednačine (2.131) dobija se $Z_R = 252,4m$.

Pretpostavimo da se, prema terenu, pogodna lokacija za kontrarezervoar nalazi na visinskoj koti $Z_R = 254m$. Sa ovim položajem kontrarezervoara napor vode u čvoru 5 je $H_5 = 31,6m$, što je malo iznad 30m (za oko 5%), pa je nepotrebno ovaj napor svoditi na 30m prigušivanjem deonice 3 - 5.

Pri potrošnje $Q > Q_P$, pumpa i rezervoar zajednički snabdeavaju potrošače vodom ($Q = Q_P + Q_R$), a jedan čvor mreže dobija vodu i od pumpe i od rezervoara.

Pretpostavljajući da je to čvor 3 (v.sl.2.35), prema energijskim jednačinama za strujne tokove od pumpe do čvora 3 i od rezervoara do čvora 3,

$$Z_3 + H_3 = Z_P + H_P(Q_P) - K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{2-3}Q_{2-3}^2 \text{ i}$$

$$Z_3 + H_3 = Z_R - K_{R-4}Q_R^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2,$$

može se postaviti sledeća jednačina uslađivanja (uravnoteženja) rada pumpe i rezervoara:

$$Z_P + H_P(Q_P) - K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{2-3}Q_{2-3}^2 = Z_R - K_{R-4}Q_R^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2,$$

koja se posle sređivanja svodi na oblike:

$$H_P(Q_P) = (Z_R - Z_P) + K_{P-1}Q_P^2 - K_{R-4}Q_R^2 + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 + K_{2-3}Q_{2-3}^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2).$$

Kako je $Q_R = Q - Q_P$, napred data jednačina dobija oblik:

$$H_P(Q_P) = [(Z_R - Z_P) + K_{R-4}Q^2] - (K_{R-4} - K_{P-1})Q_P^2 + 2K_{R-4}Q \cdot Q_P + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 + K_{2-3}Q_{2-3}^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2)$$

Za zadato Q ($Q = const$), uz pretpostavku da čvor 3 dobija vodu i od pumpe i od rezervoara (v.sl.2.35), napred data jednačina može da se piše i kao:

$$H_P(Q_P) = \Phi(Q_P), \quad (2.132)$$

gde je

$$\Phi(Q_P) = [(Z_R - Z_P) + K_{R-4}Q^2] - (K_{R-4} - K_{P-1})Q_P^2 + 2K_{R-4}Q \cdot Q_P + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 + K_{2-3}Q_{2-3}^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2) \quad (2.133)$$

za $Q > Q_P$

$$\begin{aligned} i \quad Q_{1-2} &= Q_P - (q_1 + q_6 + q_7 + q_8), \\ Q_{2-3} &= Q_{1-2} - (q_2 + q_9 + q_{10} + q_{11}) = \\ &= Q_P - (q_1 + q_2 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + q_{11}) \end{aligned} \quad (2.134)$$

$$Q_{4-3} = Q_R - q_4 = Q - Q_P - q_4. \quad Q = \sum_{i=1}^{11} q_i$$

Za zadato Q , uz pretpostavku da čvor 2 dobija vodu i od pumpe i od rezervoara, dobilo bi se:

$$\Phi(Q_P) = [(Z_R - Z_P) + K_{R-4}Q^2] - (K_{R-4} - K_{P-1})Q_P^2 + 2K_{R-4}Q \cdot Q_P + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{3-2}Q_{3-2}^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2) \quad (2.133')$$

za $Q > Q_P$

$$\begin{aligned} i \quad Q_{1-2} &= Q_P - (q_1 + q_6 + q_7 + q_8), \\ Q_{3-2} &= Q_R - (q_3 + q_4 + q_5) = Q - Q_P - (q_3 + q_4 + q_5) \\ Q_{4-3} &= Q_R - q_4 = Q - Q_P - q_4. \end{aligned} \quad (2.134')$$

Kako je ($Q = \sum_{i=1}^{11} q_i$), lako je pokazati da je $Q_{3-2} = -Q_{2-3}$, pa bi prema jednačini (2.134) dobijeno $Q_{2-3} < 0$ bio znak da čvor zajedničkog napajanja nije 3 već 2. Ako se prema jednačini (2.134) dobije $Q_{4-3} < 0$ znak je da čvor zajedničkog napajanja nije 3 već 4 ($Q_{3-4} = -Q_{4-3} > 0$), a ako se prema jednačini (2.134') dobije $Q_{1-2} < 0$ znak je da čvor zajedničkog napajanja nije 2 već 1 ($Q_{2-1} = -Q_{1-2} > 0$). $K_{i-j}Q_{i-j}^2$

U maloj zagradi dati članovi $K_{i-j}Q_{i-j}^2$ funkcije $\Phi(Q_P)$ imaju pozitivne predznake za tokove koji dolaze od pumpe, a negativne predznake za tokove koji dolaze iz rezervoara. S obzirom na ovo jednačine (2.133) i (2.134) se mogu primeniti kao opšte jednačine, s tim da se za, prema jednačini (2.134), dobijeno $Q_{i-j} < 0$, menja predznak člana $K_{i-j}Q_{i-j}^2$, koji figuriše u jednačini (2.133).

Radni režim pumpe, za zadato Q ($Q > Q_P$), definisan je, saglasno jednačini (2.132), tačkom preseka grafika naporne karakteristike pumpe ($H_P(Q_P)$), i grafika funkcije $\Phi(Q_P)$, koju možemo nazvati karakteristikom usklađivanja (uravnoteženja) rada pumpe, rezervoara i mreže, u

slučajevima kada pumpa i rezervoar zajednički, u paralelnom radu, snabdevaaju potrošače vodom ($Q = Q_p + Q_R$).

Članovi $K_{i-j}Q_{i-j}^2$ dati umaloj zagradi jednačine (2.133), koja definiše funkciju $\Phi(Q_p)$, a koji odgovaraju gubicima napora u magistralnim deonicama mreže koje povezuju pumpu i rezervoar, saglasno jednačinama (2.134), zavise od veličine protoka q_i , odnosno od teritorijalnog rasporeda uključenih potrošača, jer isto ($Q = \sum q_i$) može biti ostvareno u različitim varijantama protoka q_i .

Za $Q > Q_p$, kada pumpa snabdeva potrošače vodom puni rezervoar ($Q_R = Q - Q_p$), prema energijskoj jednačini za strujni tok od pumpe do rezervoara (v.sl.2.36),

$$Z_p + H_p(Q_p) - K_{p-1}Q_p^2 - K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{2-3}Q_{2-3}^2 - K_{3-4}Q_{3-4}^2 - K_{4-R}Q_R^2 = Z_R,$$

dobija se

$$H_p(Q_p) = (Z_R - Z_p) + K_{p-1}Q_p^2 + K_{4-R}Q_R^2 + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 + K_{2-3}Q_{2-3}^2 + K_{3-4}Q_{3-4}^2).$$

Zamenjujući $Q_R = Q_p - Q$, napred data jednačina se svodi se, za $Q = const$ ($Q < Q_p$), na oblik

$$H_p(Q_p) = \varphi(Q_p) \quad (2.135)$$

gde je

$$\begin{aligned} \varphi(Q_p) = & [(Z_R - Z_p) + K_{4-R}Q^2] + (K_{p-1} + K_{4-R})Q_p^2 + 2K_{4-R}Q \cdot Q_p + \\ & + (K_{1-2}Q_{1-2}^2 + K_{3-2}Q_{3-2}^2 + K_{4-3}Q_{4-3}^2) \end{aligned} \quad \text{za } Q < Q_p, \quad (2.136)$$

i

$$\begin{aligned} Q_{1-2} &= Q_p - (q_1 + q_6 + q_7 + q_8), \\ Q_{2-3} &= Q_{1-2} - (q_2 + q_9 + q_{10} + q_{11}) = \\ &= Q_p - (q_1 + q_2 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + q_{11})^2 \\ Q_{3-4} &= Q_{2-3} - (q_3 + q_5) = \\ &= Q_p - (q_1 + q_2 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + q_{11})^2 \end{aligned} \quad (2.137)$$

gde je ($Q = \sum_{i=1}^{11} q_i$).

Za zadato Q ($Q < Q_p$), režim rada pumpe definisan je, saglasno jednačini (2.125), tačkom preseka grafika naporne karakteristike pumpe ($H_p(Q_p)$), i grafika funkcije $\varphi(Q_p)$, koju možemo nazvati karakteristikom usklađivanja rada pumpe, mreže i rezervoara, u slučajevima kada pumpa snabdeva potrošače vodom i puni rezervoar.

Za $Z_R - Z_p = 84m$ i $K_{p-1} = 1680$, $K_{1-2} = K_{2-1} = 955$, $K_{2-3} = K_{3-2} = 2524$, $K_{3-4} = K_{4-3} = 1262$ i $K_{4-R} = K_{R-4} = 6320$, sa dimenzijama $K_{i-j} = [m/(m^3/s)^2]$, jednačine (2.133) i (2.136) dobijaju oblik:

$$\begin{aligned} \Phi(Q_p) = & [84 - 6320 \cdot Q^2] - 4640 \cdot Q_p^2 + 12640 \cdot Q \cdot Q_p + \\ & + (955 \cdot Q_{1-2}^2 + 2524 \cdot Q_{3-2}^2 - 1262 \cdot Q_{4-3}^2) \end{aligned} \quad \text{za } Q > Q_p, \quad (2.138)$$

i

$$\begin{aligned} \varphi(Q_p) = & [84 + 6320 \cdot Q^2] + 8000 \cdot Q_p^2 - 12640 \cdot Q \cdot Q_p + \\ & + (955 \cdot Q_{1-2}^2 + 2524 \cdot Q_{3-2}^2 + 1262 \cdot Q_{4-3}^2) \end{aligned} \quad \text{za } Q < Q_p.$$

Za najveću potrošnju $Q = 0,150m^3/s$ i u prvom približenju usvojenom $Q_p = 0,120m^3/s$ i $Q_R = 0,030m^3/s$ dobijeno je, kako je prethodnom tekstu već dato, $Q_{1-2} = 0,0624m^3/s$, $Q_{2-3} = 0,0028m^3/s$ i $Q_{4-3} = 0,0246m^3/s$, prema jednačini (2.132) i prvoj formuli (2.138), dobija se napor pumpe $H_p = 106m$.

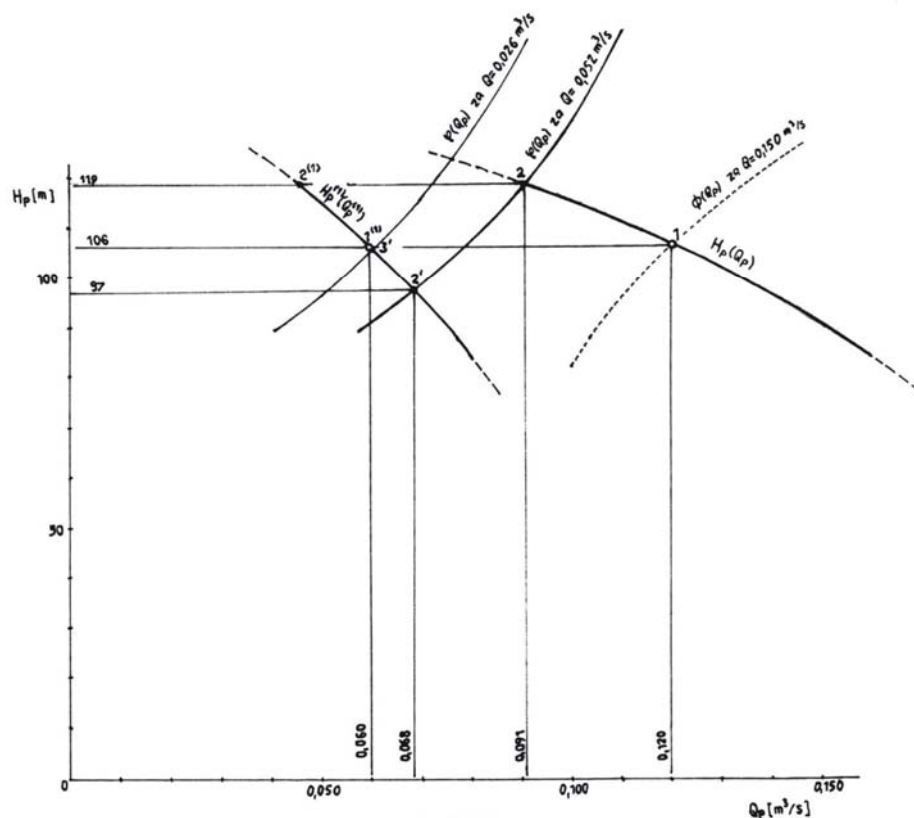
Birajući varijantu pumpne stanice u kojoj će, u danu najveće potrošnje vode, neprekidno raditi dve paralelno povezane pumpe istog tipa (istih radnih karakteristika), pumpe se biraju po uslovu, da u času najveće potrošnje vode, pojedinačni radni parametri pumpi budu

$$Q_p^{(1)} = \frac{Q_p}{2} = 0,060m^3/s (=60 l/s) \quad \text{i} \quad H_p = H_p^{(1)} = 106m.$$

s tim, da zbog promene radnog režima pumpe sa promenom potrošnje vode, ovaj radni režim, po mogućnosti, bude malo desno od nominalnog režima rada.

Izborom da u danu najveće potrošnje vode rade dve pumpe, postoji mogućnost da se u danima manje potrošnje vode (kada obe pumpe ne moraju da rade) vrši dvostepena regulacija protoka pumpi, uključivanjem jedne ili dve pumpe u rad.

Trostepena centrifugalna pumpa tipa CVNR7-3, iz proizvodnog programa fabrike pumpi „Jastrebac“ iz Niša, radni režim $Q_p^{(1)} = 0,060m^3/s$ i $H_p^{(1)} = 106m$ ostvaruje (v.sl.2.32) sa nepodrežanim radnim kolima i to u nominalnom radnom režimu. Na sl.2.37 data je pojedinačna $H_p^{(1)}(Q_p^{(1)})$ i zbirna $H_p(Q_p)$ karakteristika dve paralelno povezane pumpe. Punim linijama su date naporne karakteristike u oblasti ekonomičnog (preporučenog) rada, a kružićima su označeni nominalni režimi rada pumpe / pumpi. Radni režim paralelno povezanih pumpi, u času najveće potrošnje vode ($Q = 0,150m^3/s (=540 m^3/h)$) označen je na $H_p(Q_p)$ karakteristici tačkom 1 ($Q_p = 0,120m^3/s$ i $H_p = 106m$), koja je u nominalnom režimu rada pumpe. Na sl.2.37, zbog ilustracije, nacrtan je i grafik funkcije $\Phi(Q_p)$, za $Q = 0,150m^3/s$.



sl. 2.37

Drugi karakterističan režim rada paralelno povezanih pumpi je pri najmanjoj časovnoj potrošnji u danu najveće potrošnje vode ($Q = 0,052m^3/s$), kada pumpe snabdevaju potrošače vodom i pune rezervoar.

Odnos najveće i najmanje časovne potrošnje u danu najveće potrošnje vode je $0,150 / 0,052 = 2,885$. Pretpostavljajući da se potrošnja vode u svim deonicama magistralne mreže menja u istom odnosu, svedeni protoci potrošnje u čvorovima mreže q_i ($i = 1, 2, \dots, 11$) pri potrošnji $Q = 0,052m^3/s$ manji su za 2,885 puta od ranije datih za $Q = 0,150m^3/s$ i iznose $4m^3/s$:

$$q_1 = 0,0052, \quad q_2 = 0,0083, \quad q_3 = 0,0065, \quad q_4 = 0,0019, \quad q_5 = 0,0030, \quad q_6 = 0,0073, \quad q_7 = 0,0030, \\ q_8 = 0,0045, \quad q_9 = 0,0063, \quad q_{10} = 0,0026 \quad \text{i} \quad q_{11} = 0,0034.$$

Prema ovim protocima i jednačinama (2.137) je

$$Q_{1-2} = Q_P - 0,0200, \quad Q_{2-3} = Q_P - 0,0406 \quad \text{i} \quad Q_{3-4} = Q_P - 0,0501,$$

a druga jednačina (2.138), za Q , dobija oblik:

$$\varphi(Q_P) = 101 + 8000 \cdot Q_P^2 - 657,3 \cdot Q_P + (955 \cdot Q_{1-2}^2 + 2524 \cdot Q_{2-3}^2 + 1262 \cdot Q_{3-4}^2)$$

U tabeli XV date su, prema napred datim jednačinama izračunati protoci Q_{1-2} , Q_{2-3} i Q_{3-4} i funkcije $\varphi(Q_P)$, za proizvoljno izabrane protoke Q_P .

Tabela XV

$Q_P = [m^3/s]$	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100	0,110
$Q_{1-2} = [m^3/s]$	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700	0,0800	0,0900
$Q_{2-3} = [m^3/s]$	0,0194	0,0294	0,0394	0,0494	0,0594	0,0694
$Q_{3-4} = [m^3/s]$	0,0099	0,0199	0,0299	0,0399	0,0499	0,0599
$\varphi(Q_P) [m]$	93	99,2	108,2	119,4	133,4	150

Prema podacima iz tabele XV nacrtan je, na sl.2.37, grafik funkcije $\varphi(Q_P)$, a tačka preseka ovog grafika sa grafikom $H_P(Q_P)$ karakteristike paralelno povezanih pumpi, koja određuje njihov režim rada, označena je sa 2 ($Q_P = 0,091m^3/s$ i $H_P = 119m$). Tačka 2 se nalazi na samoj granici ekonomičnog rada pumpi (kada pumpe rade sa stepenom korisnosti od oko 60%).

Za $Q_P = 0,091m^3/s$ je $Q_R = 0,091 - 0,052 = 0,039m^3/s$, a protoci u magistralnim deonicama mreže koje povezuju pumpu i rezervoar su $Q_{1-2} = 0,071m^3/s$, $Q_{2-3} = 0,0504m^3/s$ i $Q_{3-4} = 0,0409m^3/s$. Ovi protoci se malo razlikuju od ranije određenih protoka u prvom približenju, pa nije potrebno vršiti korekciju prečnika cevi d_{1-2} , d_{2-3} , d_{3-4} i d_{4-R} , koji se određuju prema ovim protocima.

U danu najveće potrošnje vode, kada je, planirano da dve paralelno povezane pumpe neprekidno rade (24 sata), režim rada pumpe se menja u oblasti koja je na $H_P(Q_P)$ karakteristici pumpe ograničena tačkama 1 i 2 (za Q_P od $0,120m^3/s$ do $0,091m^3/s$ i H_P od $106m$ do $119m$).

U danima manje potrošnje vode, potrošnja protoka $Q = 0,052m^3/s$ može se obezbediti i sa jednom uključenom pumpom, čiji je radni režim označen tačkom 2' na $H_P^{(1)}(Q_P^{(1)})$ karakteristici pumpe ($Q_P = Q_P^{(1)} = 0,068m^3/s$, $H_P = H_P^{(1)} = 97m$). Deo protoka pumpe koji, u ovom slučaju, ide u rezervoar je $Q_R = 0,068 - 0,052 = 0,016m^3/s$.

Pri najmanjoj očekivanoj potrošnji $Q = 0,026m^3/s$, pumpa će biti uključena (i to samo jedna) u slučaju da je voda u rezervoaru na donjem regulacionom nivou. Režim rada, u ovom

$$\begin{aligned}
H_5 &= (Z_R - Z_5) - K_{R-4}Q_R^2 - K_{4-3}Q_{4-3}^2 - K_{3-5}Q_{3-5}^2 = \\
&= 44 - 6320 \cdot 0,030^2 - 1262 \cdot 0,0246^2 - 81224 \cdot 0,0086^2 = \underline{31,5m}
\end{aligned}$$

Prema energijskim jednačinama za strujne tokove od pumpe do čvorova 7, 8, 9 i 10, napori vode u ovim čvorovima su:

$$\begin{aligned}
H_7 &= H_P - (Z_7 - Z_P) + K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-6}Q_{1-6}^2 - K_{6-7}Q_{6-7}^2 = \\
&= 106 - 38 - 1680 \cdot 12^2 - 1767 \cdot 0,0426^2 - 81224 \cdot 0,0086^2 = \underline{34,6m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_8 &= H_P - (Z_8 - Z_P) + K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-6}Q_{1-6}^2 - K_{6-8}Q_{6-8}^2 = \\
&= 106 - 38 - 1680 \cdot 12^2 - 1767 \cdot 0,0426^2 - 46104 \cdot 0,013^2 = \underline{32,8m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{10} &= H_P - (Z_{10} - Z_P) + K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{2-9}Q_{2-9}^2 - K_{9-10}Q_{9-10}^2 = \\
&= 106 - 38 - 1680 \cdot 12^2 - 955 \cdot 0,0624^2 - 1767 \cdot 0,0356^2 - 233465 \cdot 0,0076^2 = \underline{20,3m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{11} &= H_P - (Z_{11} - Z_P) + K_{P-1}Q_P^2 - K_{1-2}Q_{1-2}^2 - K_{2-9}Q_{2-9}^2 - K_{9-11}Q_{9-11}^2 = \\
&= 106 - 38 - 1680 \cdot 12^2 - 955 \cdot 0,0624^2 - 1767 \cdot 0,0356^2 - 91377 \cdot 0,0098^2 = \underline{27,1m}
\end{aligned}$$

Napori vode u čvorovima 10 i 11 manji su od minimalno traženog napora (30m). Povećanje ovih napora može se ostvariti smanjivanje gubitka napora (povećavanjem prečnika) u deonicama 2 – 9 (koji je zajednički za oba čvora), 9 – 10 i 9 – 11. Gubitak napora u deonici 2 – 9 je 2,2m, a povećavanjem prečnika cevi sa 250 na 300mm gubitak napora bi opao na 0,85m, što je smanjenje za samo 1,35 m. Zbog malog smanjenja napora, a značajnog povećanja cene cevi ($L_{2-9} = 700m$) odustaje se od povećanja prečnika cevi u ovoj deonici mreže.

Gubitak napora u deonici mreže 9 – 10 ($d_{9-10} = 0,100m$, $L_{9-10} = 700m$, $Q_{9-10} = 0,0076m^3/s$) je $\Delta h_{9-10} = K_{9-10} \cdot Q_{9-10}^2 = 233465 \cdot 0,0076^2 = 13,5m$. Da bi se napor u čvoru 10 povećao sa 20,3 na 30m (za 9,7m), gubitak napora u deonici 9 - 10 treba smanjiti za 9,7m, pa prečnik cevi u ovoj deonici treba potražiti po uslovu da gubitak napora u njoj $\Delta h'_{9-10} = 13,5 - 9,7 = 3,8m$.

Povećavajući prečnik cevi u deonici 9 – 10 na $d_{9-10} = 0,125m$, prema Maninogovoj formuli se dobija $K_{9-10} = 71071m/(m^3/s)^2$, pa gubitak napora postaje 4,1m. Da bi se gubitak napora smanjio na 3,8m, na jednom delu ove deonice treba ugraditi cevi prečnika 150mm ($\Delta h'_{9-10} = 0,15m$). Korišćenjem formule (2.125'), u kojoj se indeksi R - A zamenjuju indeksima 9 - 10, za $d_{9-10} = 0,125m$, $d'_{9-10} = 0,150m$, $L_{9-10} = 700m$ i $\Delta h'_{9-10} = 3,8m$, dobija se $X = 83 \approx 100m$, što znači da na 100m ove deonice treba ugraditi cevi prečnika 150mm, a na ostalih 600m cevi prečnika 100mm. Prema formuli (2.125) koeficijent karakteristike gubitka napora u deonici 9 – 10 je $K_{9-10} = 64760m/(m^3/s)^2$, pa je gubitak napora u njoj $\Delta h_{9-10} = 3,75m$, a napor vode u čvoru je $H_{10} = 30m$.

Gubitak napora u deonici mreže 9-11 ($d_{9-11} = 0,125m$, $L_{9-11} = 900m$, $Q_{9-11} = 0,0098m^3/s$) je $\Delta h_{9-11} = K_{9-11} \cdot Q_{9-11}^2 = 91377 \cdot 0,0098^2 = 8,8m$. Da bi se napor u čvoru 11 povećao sa 27,1 na 30m (za 2,9m), gubitak napora u deonici 9 – 11 treba smanjiti za 2,9m i svesti ga na $\Delta h'_{9-11} = 8,8 - 2,9 = 5,9m$, što se može ostvariti ugradnjom cevi prečnika 150mm na jednom delu ove deonice. Korišćenjem formule (2.125'), za $d_{9-11} = 0,125m$, $d'_{9-11} = 0,150m$, $L_{9-11} = 900m$ i $\Delta h'_{9-11} = 5,9m$, dobija se $X = 474 \approx 500m$, što znači da na dužini 500m ove deonice treba ugraditi cevi prečnika 150mm, a na ostalih 400m cevi prečnika 125mm. Koeficijent karakteristike

gubitka napora u deonici 9 - 11 je $K_{9-10} = K_{9-11} = 59822m/(m^3/s)^2$, pa se dobija $\Delta h_{9-11} = 5,75m$ i $H_{11} = 30,15m$.

Napori vode u čvorovima 5, 7 i 8 veći su od traženog minimalnog potrebnog napora za ispravno funkcionisanje potrošača (30m). Smanjenje ovih napora na 30m može se izvršiti smanjivanjem prečnika cevi ugrađenih u deonicama 3 - 5, 6 - 7 i 6 - 8 (povećanjem gubitka napora u njima), što je praćeno smanjivanjem investicionih ulaganja.

Da bi se napor u čvoru 7 smanjio sa 34,6 na 30m, gubitak napora u deonici 6 - 7 treba povećati za 4,6m. Sa cevima prečnika 125mm ugrađenim u ovu deonicu, gubitak napora je 6m, a ako se u delu ove deonice ugrade cevi prečnika 100mm, gubitak napora se može povećati na traženih $\Delta h_{6-7} = 6 + 4,6 = 10,6m$. Korišćenjem formule (2.117), za $d_{6-7} = 0,125m$, $d'_{6-7} = 0,100m$, $L_{6-7} = 800m$ i $\Delta h_{6-7} = 10,6m$, dobija se $X = 268 \approx 250m$, što znači da na dužini 250m treba ugraditi cevi prečnika 100mm, a na ostalih 550m cevi prečnika 125mm, kada je $K_{6-7} = 139222m/(m^3/s)^2$, $\Delta h_{6-7} = 10,6m$ i $H_7 = 30,3m$. Logično je, da posmatrano nizvodno, prvo ide deonica prečnika cevi 125m.

Po sličnom principu dobilo bi se da u deonici 6 - 8 na dužini 950m treba ugraditi cevi prečnika 150mm, a na ostalih 250m cevi prečnika 100mm ($K_{6-8} = 61882m/(m^3/s)^2$, $\Delta h_{6-8} = 10,5m$ i $H_8 = 30,1m$).

Za deonicu 3 - 5 dobija se da na dužini 720m treba ugraditi cevi prečnika 125mm, a na ostalih 80m cevi prečnika 100mm ($K_{3-5} = 99783m/(m^3/s)^2$, $\Delta h_{3-5} = 7,4m$ i $H_5 = 30,1m$).