

Projektiranje vodoopskrbnih sustava

Najprije je potrebno provesti **analizu potrošnje vode**, koja se odnosi na definiranje potrebnih količina vode pojedinih kategorija potrošača (za stanovništvo i industrijske potrebe, te za gašenje požara).

POTROŠNJA VODE ZA STANOVNIŠTVO

Određuje se na osnovu *specifične potrošnje vode* i broja stanovnika.

Specifična potrošnja vode q_{sp} (l/st/d) definira se kao utrošak vode po jednom stanovniku po danu. Određuje se prvenstveno na osnovi iskustva dok u nekim zemljama postoje zakonski propisi u skladu s veličinom naselja i opremljenosti domaćinstava sanitarno-tehničkim uređajima.

Broj stanovnika M_k ovisi o lokalnim i općim socijalno - ekonomskim faktorima, te vremenski nije stalan.

Definira se na temelju donešenog prostornog plana za usvojeno projektno razdoblje (20 – 50 godina).

Srednja dnevna potrošnja $Q_{sr,dn}$ (l/d) vode za stanovništvo određuje se pomoću izraza:

$$Q_{sr,dn} = q_{sp} \cdot M_k$$

Kod hidrauličkog dimenzioniranja vodoopskrbnih objekata mjerodavne su sljedeće količine vode:

a) **Maksimalna dnevna potrošnja** $Q_{max,dn}$ (l/d) dobije se kao umnožak srednje dnevne potrošnje i koeficijenta neravnomjernosti najveće dnevne potrošnje:

$$Q_{max,dn} = K_d \cdot Q_{sr,dn}$$

Maksimalna dnevna potrošnja, $Q_{max,dn}$, je mjerodavna za hidrauličko dimenzioniranje:

- vodozahvata
- crpnih stanica (za sve vodoopskrbne sustave osim potisnih)
- uređaja za kondicioniranje vode
- vodosprema
- glavnih dovodnih cjevovoda koji povezuju ove objekte

b) **Maksimalna satna potrošnja** $q_{max,h}$ (l/h) u odnosu na $Q_{max,dn}$ izražava se koeficijentom neravnomjernosti najveće satne potrošnje:

$$q_{max,h} = \frac{K_h \cdot Q_{max,dn}}{24} = \frac{K_h \cdot K_d \cdot Q_{sr,dn}}{24}$$

Maksimalna satna potrošnja, $q_{max,h}$, je mjerodavna za hidrauličko dimenzioniranje:

- crpnih stanica (kod potisnih stanica)
- glavnih dovodno – opskrbnih cjevovoda
- razdjelnih mreža

Koeficijenti neravnomjernosti potrošnje vode, K_d i K_h , su u funkciji veličine naselja, odnosno broja stanovnika i u Tablici 1. su prikazani kao iskustvene vrijednosti.

Veličina naselja (potrošača)	Koeficijenti neravnomjernosti	
	K_d	K_h
Ljetovališta i toplice	1.6 do 1.7	2.5
Sela i manja naselja	1.5 do 1.6	2.0
Gradovi ispod 25 000 stanovnika	1.4 do 1.3	1.6
Gradovi od 25 000 do 50 000 stanovnika	1.3 do 1.4	1.4
Gradovi od 50 000 do 100 000 stanovnika	1.3	1.3
Gradovi preko 100 000 stanovnika	1.2	1.2

Tablica 1. Vrijednosti koeficijenata neravnomjernosti potrošnje vode

POTROŠNJA VODE ZA INDUSTRIJU

Ovisi o vrsti industrije te o primijenjenom tehnološkom procesu.

Najpreciznije određivanje provodi se anketnim ispitivanjem kod proizvodnih tehnologa.

Potrošnja vode za industriju iskazuje se kao čimbenik srednje dnevne potrošnje po stanovniku ili odvojeno kao industrijska potrošnja, Q_{ind} .

POTROŠNJA VODE ZA GAŠENJE POŽARA

Načelo određivanja potrebne količine vode za gašenje požara bitno se razlikuje od načela normiranja prethodno analiziranih potrošnji vode.

Kod suvremenih sustava za gašenje požara predviđa se njegovo gašenje (a) *vanjskom hidrantskom mrežom* i (b) *unutarnjom hidrantskom mrežom*.

Zahtjevi za hidrantske mreže za gašenje požara i slučajevi u kojima se za zaštitu požara obvezatno primjenjuje hidrantska mreža za gašenje požara propisano je *Pravilnikom o hidrantskoj mreži za gašenje požara* ("Narodne novine RH", broj 8/06).

Ovime se pravilnikom, između ostaloga, propisuju tri temeljna parametra za gašenje požara hidrantskom mrežom:

- (1) potrebna količina vode (protok) za gašenje požara hidrantskom mrežom, koja je u funkciji *specifičnog požarnog opterećenja*,
- (2) najmanji tlak kod potrebne protupožarne količine vode,
- (3) najmanje trajanje za koje je potrebno osigurati propisani protok i tlak.

Specifično požarno opterećenje, P_{sp} [J m^{-2}], je izraženo topline koja se može razviti u nekoj elementarnoj jedinici - prostoriji (npr. sobi, hali, skladištu), svedeno na 1 [m^2] tlocrtne površine te prostorije. Određuje se sukladno HRN U. J1. 030, ovisno o osobinama gorivih materijala od kojih je izvedena i opremljena građevina, te materijala za koje je zgrada namjenski izgrađena.

Potrebna količina vode za gašenje požara hidrantskom mrežom mora se osigurati neovisno o drugim potrošačima koji se opskrbljuju vodom iz istog izvora (vodospreme).

(a) **Vanjska hidrantska mreža** za gašenje požara izvodi se izvan građevine i/ili prostora koji se štite, a završava (a1) *nadzemnim* ili (a2) *podzemnim hidrantom*.

Za zaštitu građevine i/ili prostora vanjskom hidrantskom mrežom za gašenje požara potrebno je osigurati najmanje protok, ovisno o specifičnom požarnom opterećenju i tlocrtnoj površini objekta koji se štiti, čije su vrijednosti prikazane u tablici 1.3::III, a u trajanju od najmanje 2 [h].

Specifično požarno opterećenje, [MJ m^{-2}]	Najmanji protok, [l s^{-1}], ovisno o tlocrtnoj površini objekta, [m^2], koji se štiti							
	≤ 100	101 do 300	301 do 500	501 do 1 000	1 001 do 3 000	3 001 do 5 000	5 001 do 10 000	$> 10 000$
≤ 200	10	10	10	10	10	10	10	15
≤ 500	10	10	10	10	15	20	20	25
$\leq 1 000$	10	10	10	15	20	20	25	30
$\leq 2 000$	10	10	15	20	25	30	35	*
$> 2 000$	10	15	20	30	30	35	*	*

Legenda: * - potrebno proračunati protok za svaki pojedini objekt

Tablica 1.3::III Potrebna količina vode za gašenje požara vanjskom hidrantskom mrežom

Za propisani minimalni protok i trajanje, najmanji tlak na izlazu iz bilo kojeg nadzemnog ili podzemnog hidranta ne smije biti manji od 2.5 [bara].

Pri navedenom tlaku i trajanju, za zaštitu naseljenih mjesta vanjskom hidrantskom mrežom za gašenje požara, potrebno je osigurati protok od najmanje 10 [l s⁻¹].

(b) **Unutarnja hidrantska mreža** za gašenje požara izvodi se u objektu koji se štiti, a završava (b1) *bubnjem s namotanim cijevima stalnog presjeka i mlaznicom* ili (b2) *vatrogasnom cijevi sa spojnicama i mlaznicom*.

Na najnepovoljnijem mjestu svakog požarnog sektora unutarnja hidrantska mreža za gašenje požara mora imati najmanje protok, ovisno o specifičnom požarnom opterećenju, prema tablici 1.3::IV, a u trajanju od minimum 1 [h].

Specifično požarno opterećenje, [MJ m ⁻²]	≤ 300	≤ 400	≤ 500	≤ 600	≤ 700	≤ 800	≤ 1 000	≤ 2 000	> 2 000
Najmanji protok mlaznicom, [l min ⁻¹]	25	30	40	50	60	100	150	300	450

Tablica 1.3::IV Potrebne količine vode za gašenje požara unutarnjom hidrantskom mrežom

Najmanji tlak na mlaznici kod propisanog minimalnog protoka i trajanja, također kao i kod vanjske hidrantske mreže, ne smije biti manji od 2.5 [bara].

Karakter opreme zgrade sanitarno-tehničkim uređajima	Specifična potrošnja q_{sp}
Naselja sa zgradama koje nisu opremljene vodovodom i kanalizacijom	30 do 50
Naselja sa zgradama opremljenim unutarnjim vodovodom i kanalizacijom bez kupaonice	125 do 150
Naselja sa zgradama opremljenim vodovodom, kanalizacijom i kupaonicom	150 do 230
Naselja sa zgradama opremljenim unutarnjim vodovodom, kanalizacijom i sistemom centralne opskrbe toplom vodom	250 do 400

Tablica 3. Specifična potrošnja vode

	Srednja dnevna potrošnja Q_{sr} (l/st/d)		
	1980.g.	1993.g.	1995.g.
Austrija	155 255	170 262	162 243
Belgija	104 163	120 157	120 160
Danska	165 261	155 229	145 215
Francuska	109 167	157 215	156 212
Italija	211 280	251 329	249 327
Nizozemska	142 179	171 203	175 210
SR Njemačka	137 211	136 177	132 168
Švedska	195 315	203 276	191 261
Švicarska	229 392	242 362	237 357
Velika Britanija	154 254	- 331	- 343

211 Podatak uključuje potrošnju vode u industriji

Tablica 4. Srednja dnevna potrošnja vode u nekim europskim državama

Primjer 1:

Za naselje s procijenjenim brojem stanovnika (za plansko razdoblje do 2030. godine) od 50 000 stanovnika, treba odrediti potrošnju vode po pojedinim kategorijama potrošača pretpostavljajući:

- specifičnu potrošnju vode za kućanske potrebe
 $q_{sp} = 200 \text{ l/st/d}$
- konstantnu industrijsku potrošnju
 $q_{IND,6-14h} = 20 \text{ l/s}$
 $q_{IND,14-22h} = 15 \text{ l/s}$
 $q_{IND,22-6h} = 10 \text{ l/s}$

Potrošnja vode za stanovništvo

$$Q_{sr,dn} = q_{sp} \cdot M_k$$

$$Q_{sr,dn} = 200/1000 \cdot 50000 = 10000 \text{ m}^3 / d$$

$$Q_{max,dn} = K_d \cdot Q_{sr,dn}$$

$$Q_{max,dn} = 1,3 \cdot 10000 = 13000 \text{ m}^3 / d$$

$$q_{max,h} = \frac{K_h \cdot Q_{max,dn}}{24} = \frac{K_h \cdot K_d \cdot Q_{sr,dn}}{24} = \frac{1,4 \cdot 1,3 \cdot 10000}{24}$$

$$q_{max,h} = 758,33 \text{ m}^3 / h = 210,65 \text{ l / s}$$

Potrošnja vode za gašenje požara

Prema tablici 1.3::III ukupna potrošnja vode za gašenje požara iznosi:

$$Q_{pož} = 10 \text{ l/s (minimalna količina)}$$

Potrošnja vode u industriji

$$q_{IND,6-14h} = 20 \cdot 3600/1000 = 72,0 \text{ m}^3/h$$

$$q_{IND,14-22h} = 15 \cdot 3600/1000 = 54,0 \text{ m}^3/h$$

$$q_{IND,22-6h} = 10 \cdot 3600/1000 = 36,0 \text{ m}^3/h$$

Ukupna dnevna potrošnja industrije:

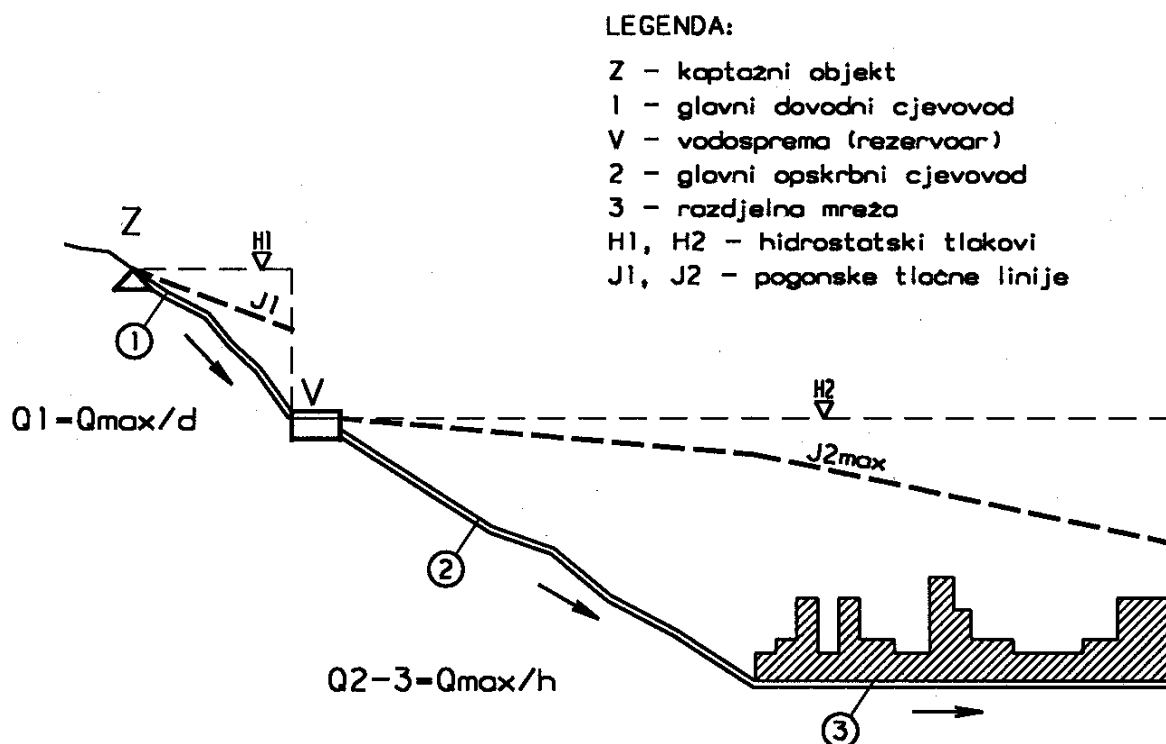
$$Q_{IND,DN} = (72,0+54,0+36,0) \cdot 8 = 1296,0 \text{ m}^3/d$$

DIMENZIONIRANJE SUSTAVA

Razmotrit ćemo gravitacijski i kombinirani sustav opskrbe vodom s obzirom na njihovo dimenzioniranje:

Gravitacijski sustav opskrbe vodom

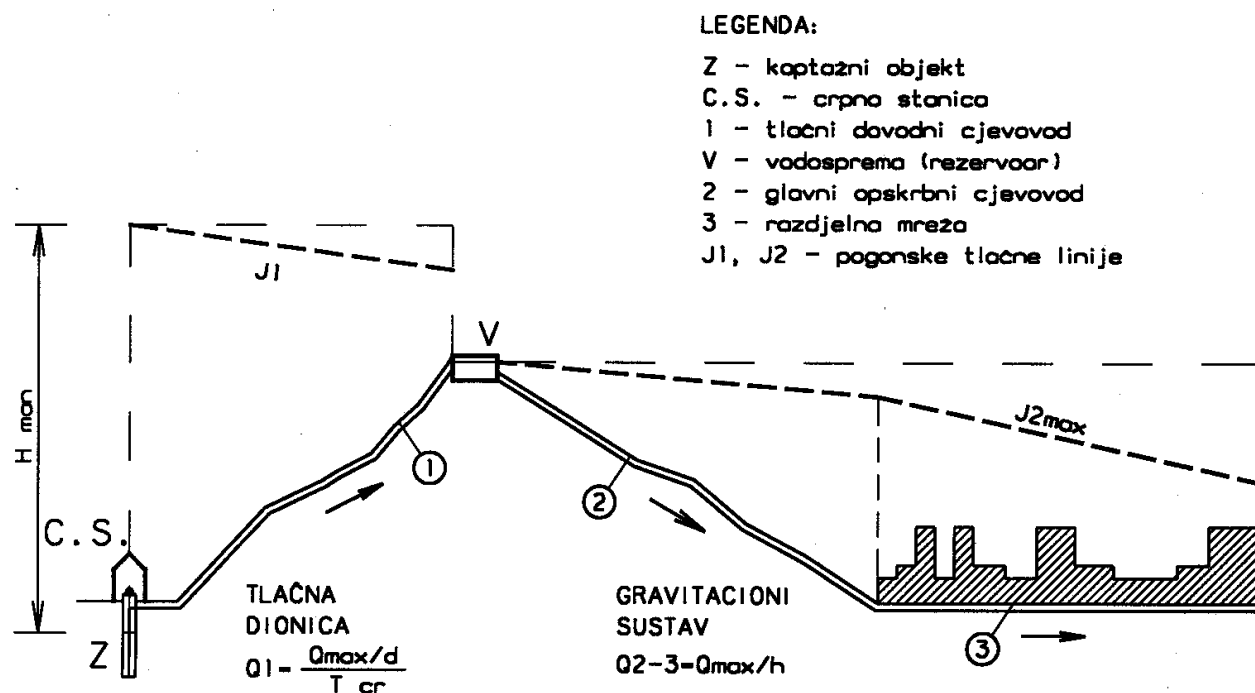
Obilježava ga gravitacijski dovod i gravitacijska raspodjela opskrbnih količina (Slika 1).



Slika 1. Gravitacijski sustav opskrbe vodom

Kombinirani sustav opskrbe vodom

Vodosprema ispred mjesta potrošnje



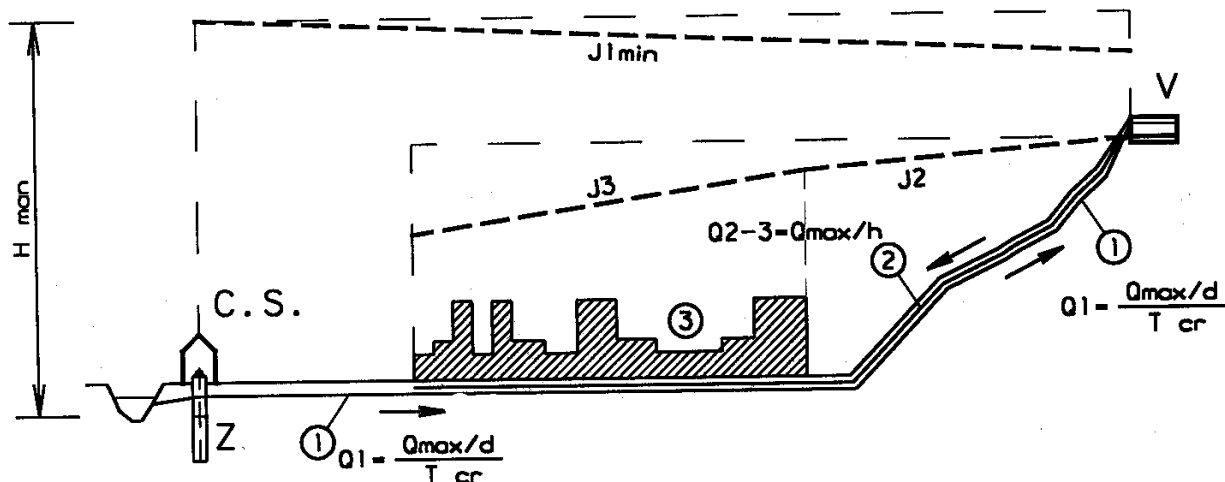
Slika 2. Kombinirani sustav opskrbe vodom – vodosprema ispred mjesta potrošnje

Količina $Q_{\max, dn}$ koja protječe tlačnim cijevnim vodom ovisi o radnom vremenu crpne stanice T_{cr} .

Radno vrijeme crpne stanice T_{sati}	Protok $Q \text{ (l/s)}$
8 sati	$Q_1 = \frac{Q_{\max, dn}}{8^h \cdot 3600} = \frac{Q_{\max, dn}}{28800}$
16 sati	$Q_2 = \frac{Q_{\max, dn}}{16^h \cdot 3600} = \frac{Q_{\max, dn}}{57600}$
24 sata	$Q_3 = \frac{Q_{\max, dn}}{24^h \cdot 3600} = \frac{Q_{\max, dn}}{86400}$

dionica 3: obilježava dionicu tlačnog cjevovoda na prolazu kroz naselje i to je cjevovod sustava raspodjele. Mjerodavni protok jednak je $Q_{max,h}$ dok se razlika između maksimalne satne potrošnje $Q_{max,h}$ i količine crpljene količine Q_1 nadoknađuje dotokom iz vodospreme.

Varijanta II.



Slika 4. Kombinirani sustav opskrbe vodom – vodosprema iza mjesta potrošnje

dionica 1: povezuje crpilište s vodospremom i djeluje isključivo kao tlačni dovodni cjevovod. Mjerodavni protok iznosi:

$$Q_1 = \frac{Q_{\max, dn}}{T_{cr}}$$

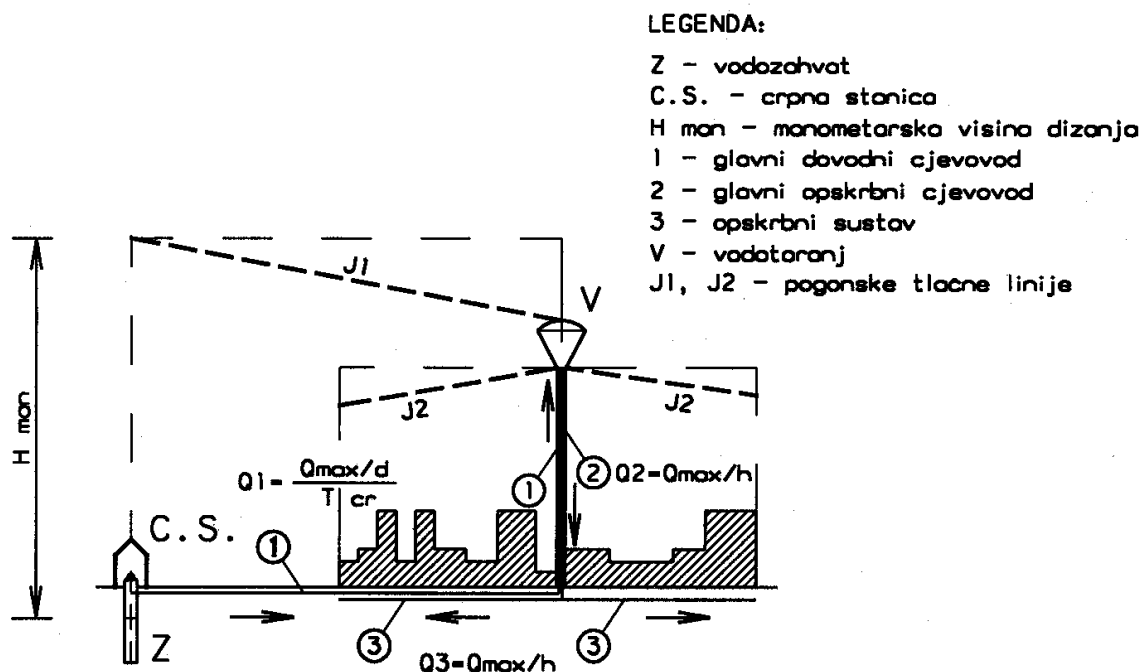
dionica 2: cjevovod vodosprema – opskrbno područje djeluje kao glavni opskrbni vod pa je mjerodavni protok:

maksimalna satna potrošnja $Q_{\max, h}$ (l/h)

dionica 3: sastavni je dio opskrbnog sustava u mjestu potrošnje pa se njegove dimenzije određuju u skladu s njegovom ulogom u sustavu raspodjele vode.

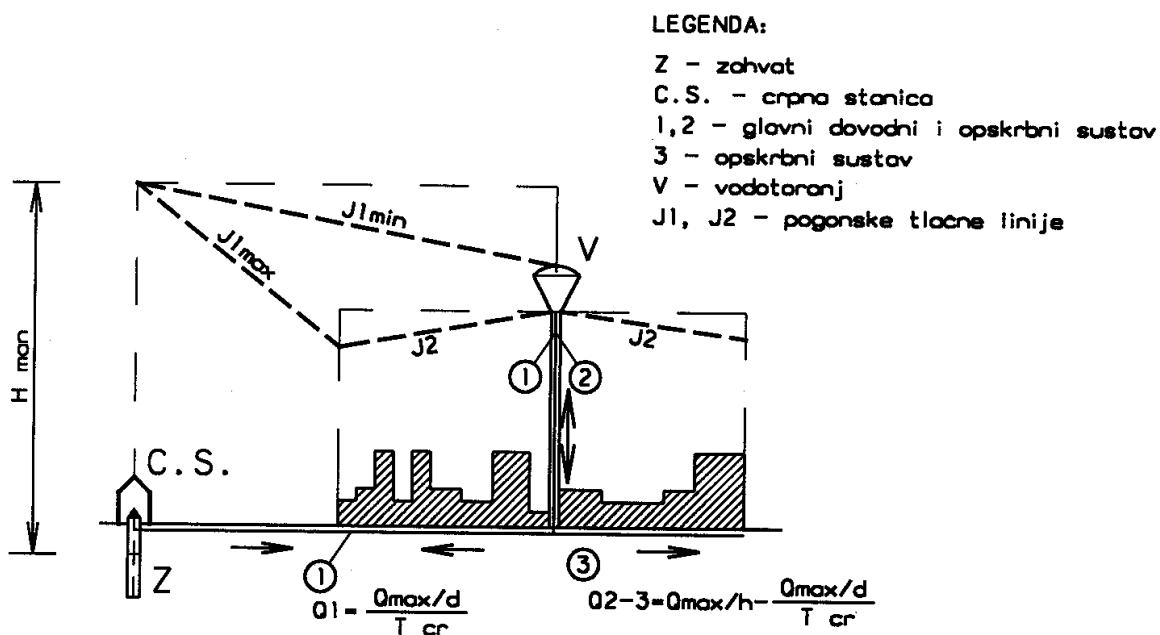
Sustav opskrbe vodom naselja u ravničarskom kraju

Varijanta I.



Slika 5. Opskrba vodom naselja u ravničarskom kraju

Varijanta II.

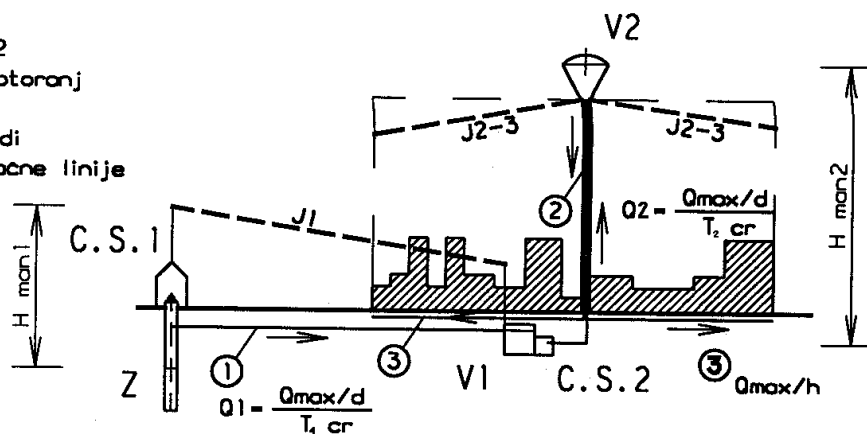


Slika 6. Opskrba vodom naselja u ravničarskom kraju

Varijanta III.

LEGENDA:

- Z - vodozahvat dubokim bušenim zdencem
- C.S.1 - crpna stanica 1
- 1 - glavni dovodni cjevovod
- V1 - niska vodosprema
- C.S.2 - crpna stanica 2
- 1' - tlačni dovod u vodotoranj
- V2 - vodotoranj
- 2, 3 - opskrbni cjevovodi
- J1, J2-3 - pogonske tlačne linije

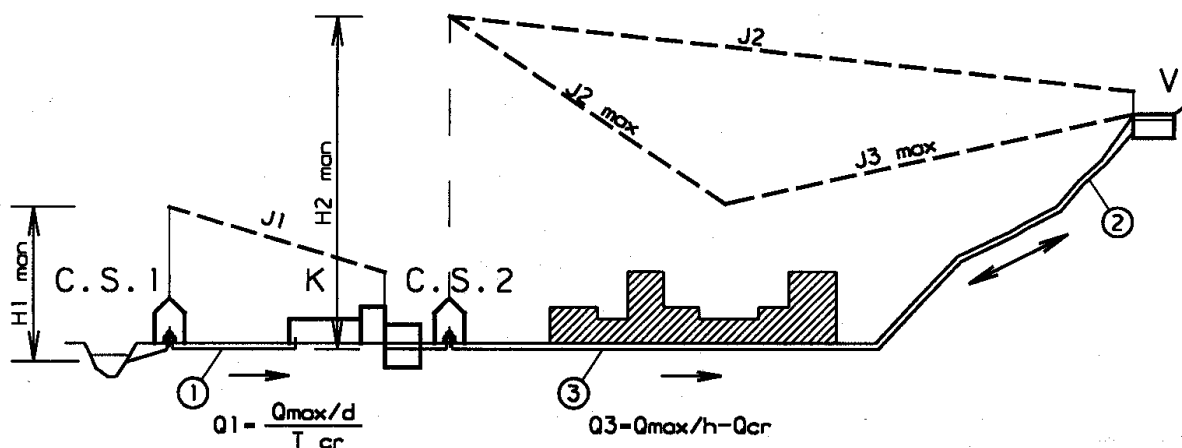


Slika 7. Opskrba vodom naselja u ravničarskom kraju : vodosprema podno vodotoranja

Kondicioniranje vode u sklopu sustava opskrbe

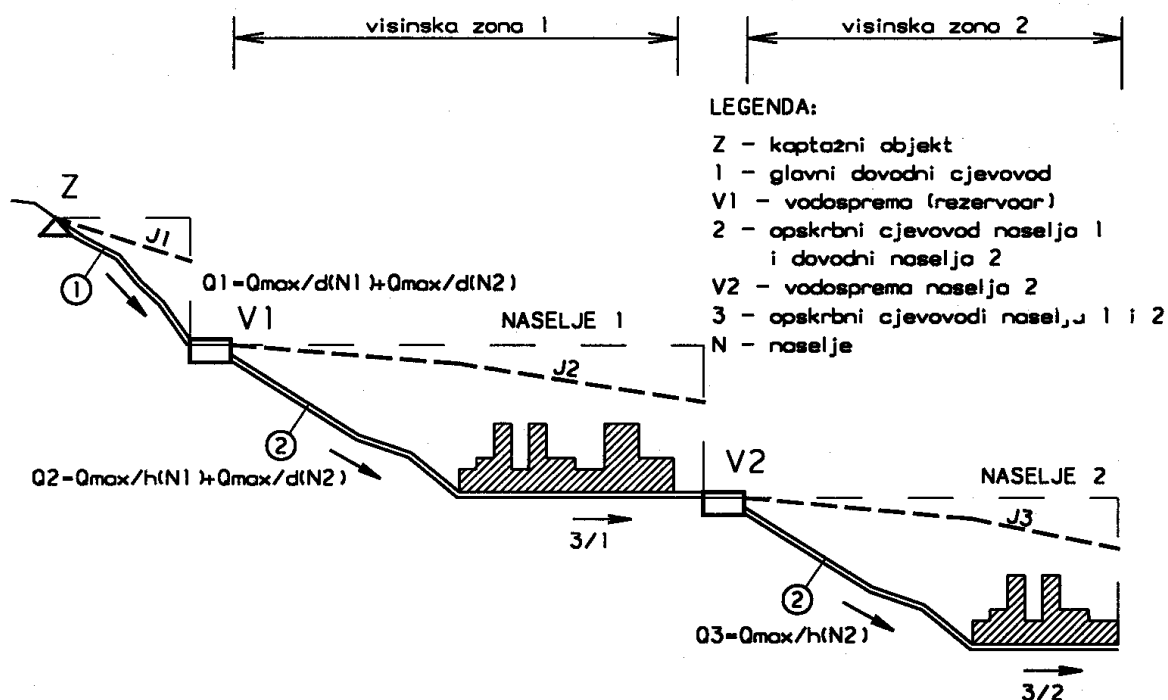
LEGENDA:

- Z - kaptazni objekt
- C.S.1 - crpna stanica 1
- 1 - glavni dovodni cjevovod
- H1 man - manometarska visina dizanja za uređaj kondicioniranja
- K - objekti kondicioniranja
- C.S.2 - crpna stanica 2
- H2 man - manometarska visina dizanja
- V - vodosprema
- 2-3 - glavni opskrbni cjevovodi



Slika 8. Shematski prikaz sustava opskrbe vodom uz primjenu kondicioniranja vode

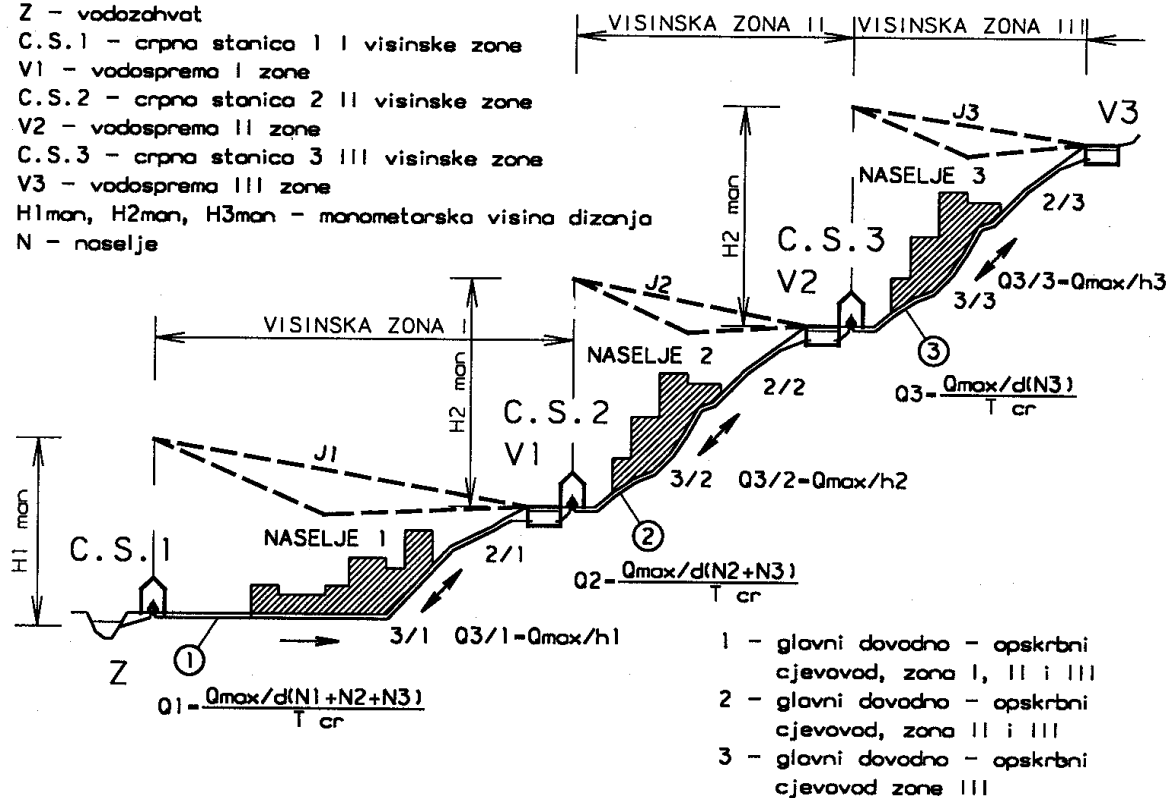
Višezonska opskrba vodom



Slika 9. Višezonski sustav opskrbe vodom - gravitacijski

LEGENDA:

Z - vodozahvat
 C.S.1 - crpna stanica I visinske zone
 V1 - vodosprema I zone
 C.S.2 - crpna stanica II visinske zone
 V2 - vodosprema II zone
 C.S.3 - crpna stanica III visinske zone
 V3 - vodosprema III zone
 H1_{man}, H2_{man}, H3_{man} - manometarska visina dizanja
 N - naselje



Slika 10. Višezonski sustav opskrbe vodom - kombinirani

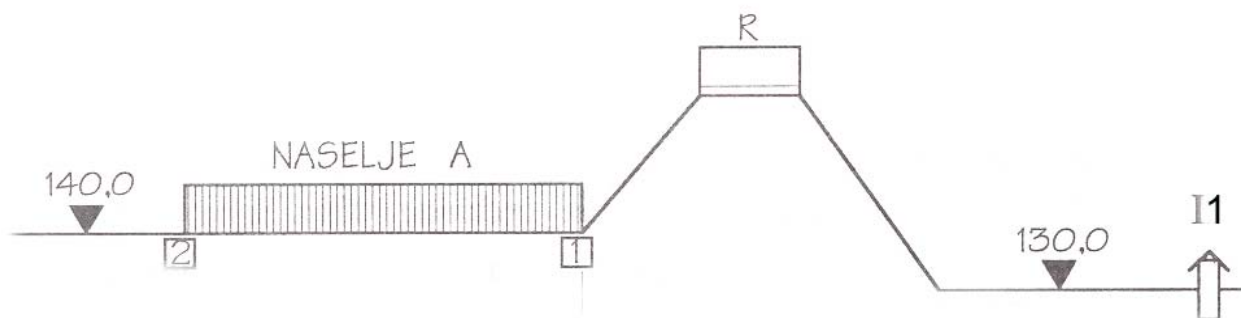
Primjer 2:

Naselje 'A' opskrbljuje se vodom iz izvorišta 'I1' iz kojeg se voda preko crpne stanice i cjevovoda 'I1-R' dovodi do vodospreme 'R' te dalje gravitacijski raspodjeljuje unutar naselja. Za plansko razdoblje do 2025. godine procjenjuje se da će naselje imati 24000 stanovnika sa specifičnom potrošnjom vode od $q_{sp} = 340 \text{ l/st/d}$. Također je pretpostavljena stalna potrošnja vode u industriji u iznosu $q_{ind} = 25 \text{ l/s}$.

Uz uvjet da brzina tečenja u oba cjevovoda ne bude veća od $1,5 \text{ m/s}$ te vrijeme crpljenja od $T_{cr} = 16 \text{ h/d}$, potrebno je dimensionirati cjevovode 'I1-R' i glavni opskrbeni cjevovod 'R - 1'.

Specifično požarno opterećenje za sve objekte iznosi $500\text{-}1000 \text{ MJm}^{-2}$, s tlocrtnom površinom objekata u rangu $501\text{-}1000 \text{ m}^2$.

Dnevne i satne koeficijente neravnomjernosti potrošnje uzeti iz tablice 1.



Potrošnja vode za stanovništvo:

$$Q_{\max, dn} = K_d \cdot q_{sp} \cdot M_k$$

$$Q_{\max, dn} = 1,3 \cdot 340 / 1000 \cdot 24000 = 10608 \text{ m}^3 / d = 122,77 \text{ l/s}$$

$$q_{\max, h} = \frac{K_h \cdot Q_{\max, dn}}{24} = \frac{1,6 \cdot 10608}{24}$$

$$q_{\max, h} = 707,20 \text{ m}^3 / h = 196,44 \text{ l/s}$$

Potrošnja vode u industriji:

$$Q_{ind, dn} = 25 \text{ l/s} = 25 \cdot \frac{86400}{1000} = 2419,2 \text{ m}^3 / d$$

Potrošnja vode za gašenje požara

prema tablici 2. ukupna potrošnja vode za gašenje požara iznosi:

$$Q_{pož} = 2 \cdot q_{pož} = 2 \cdot 15 \text{ l/s} = 30 \text{ l/s}$$

Najveća ukupna dnevna potrošnja vode:

$$Q_{\max, dn, uk} = Q_{\max, dn} + Q_{ind, dn} = 10608 + 2419,2 = 13027,2 \text{ m}^3 / d$$

Najveća ukupna satna potrošnja vode

$$q_{\max, h, uk} = q_{\max, h} + q_{ind} + q_{pož} = 196,44 + 25 + 30 = 251,44 \text{ l / s}$$

Cjevovod 'I1-R' se dimenzionira na protok:

$$Q_{I1-R'} = \frac{Q_{\max, dn, uk}}{T_{cr}} = \frac{Q_{\max, dn, uk}}{16^h \cdot 3600} = \frac{13027,2 \cdot 1000}{57600} = 226,16 \text{ l / s}$$

Za uvjet da brzina vode unutar cjevovoda nesmiye prijeći iznos od 1,5 m/s vrijedi:

$$D_{I1-R'} \geq \sqrt{\frac{4Q_{I1-R'}}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,22616}{\pi \cdot 1,5}} = 0,438 \text{ m}$$

USVOJENO: $\varnothing_{I2-R'}$ 450mm

Glavni opskrbeni cjevovod 'R-1' dimenzionira se na protok $q_{\max, h, uk}$:

$$D_{R-1'} \geq \sqrt{\frac{4q_{\max, h, uk}}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,25144}{\pi \cdot 1,5}} = 0,462 \text{ m}$$

USVOJENO: $\varnothing_{R-1'}$ 500mm

Obilježja cjevovoda	Promjer cijevi D (mm)	Brzina protjecanja v (m/s)
Gravitacijski	100 < D < 300 400 < D < 600 D = 700	0,60 ≤ v ≤ 1,00 1,00 ≤ v ≤ 1,30 1,50 ≤ v ≤ 2,00
Tlačni		1,00 < v < 2,00

Tablica 6. Ekonomske brzine u postupku dimenzioniranja cjevovoda

Hidraulički proračun tečenja pod tlakom

Tečenje pod tlakom može biti gravitacijsko i kombinirano (gravitacijsko-potisno).

Hidraulički proračun vodovodne mreže pod tlakom najčešće se provodi pod pretpostavkom stacionarnog tečenja dionicom konstantne protjecajne površine, odnosno unutarnjeg promjera.

Kod proračuna se primjenjuje Bernoullijeva jednažba uz napomenu da se, kao posljedica znatne duljine vodovodne mreže, lokalni gubici zanemaruju.

Hidraulički gubici, odnosno linijski gubici definirani su Darcy-Weisbachovom jednažbom:

$$\Delta H_{tr} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (m)$$

gdje su:

λ koeficijent trenja
 L duljina dionice (m)
 v srednja brzina strujanja (m/s)
 D unutarnji promjer cjevovoda (m)
 g ubrzanje uslijed sile teže (m/s²)

Zaključuje se da je otpor strujanju tekućine cjevovodom:

- neovisan o tlaku kojim tekućina struji
- proporcionalan dužini cjevovoda
- obrnuto proporcionalan unutarnjem promjeru cijevi
- proporcionalan brzini strujanja

Dijeljenjem hidrauličkih gubitaka na određenoj dionici, ΔH_{tr} , s duljom te dionice, L , dobijemo hidraulički pad, I_E :

$$I = \frac{\Delta H_{tr}}{L} = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Zaključak:

Hidraulički proračun promatrane dionice vodovodne mreže poznate duljine i vrste cijevi svodi se na određivanje sljedeća tri parametra:

- **za zadani protok, Q , i unutarnji promjer cjevovoda, D , treba odrediti hidraulički pad, I**
- **za zadani hidraulički pad, I , i unutarnji promjer cjevovoda, D , treba odrediti protok, Q**
- **za zadani hidraulički pad, I , i protok, Q , treba odrediti unutarnji promjer cjevovoda, D**

Primjer 3:

Odrediti najnižu razinu vode, h_A (m.n.m.), na izlazu iz uređaja za kondicioniranje vode (A), da bi se do vodotornja (B) s najvišom razinom vode, $h_B = 135$ m.n.m, moglo ljevanoželjeznim gravitacijskim cjevovodom ($\varepsilon = 0,1$ mm), duljine $L = 6000$ m i unutarnjeg promjera, $D=450$ mm, transportirati $Q=240$ l/s. Pretpostavka je da nema usputne potrošnje vode.

$$h_A = h_B + \Delta H_{tr} \quad (m.n.m.)$$

Problem se svodi na proračun linijskih gubitaka na datoj dionici. Linijski gubici će se proračunati prema Darcy-Weisbachovoj jednadžbi, gdje su poznate sve veličine osim koeficijenta λ , koji je u funkciji Reynolsovog broja, Re , i relativne hrapavosti, ε/D :

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{D^2 \pi} = \frac{4 \cdot 0,24}{0,45^2 \cdot 3,14} = 1,51 \quad (m/s)$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{1,51 \cdot 0,45}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 5,19 \cdot 10^5$$

Za temperaturu vode $T=10$ °C vrijednost kinematskog koeficijenta viskoznosti iznosi $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,1}{450} = 2,2 \cdot 10^{-4}$$

Iz Moodyevog dijagrama se očitava:

$$\lambda = 0,0156$$

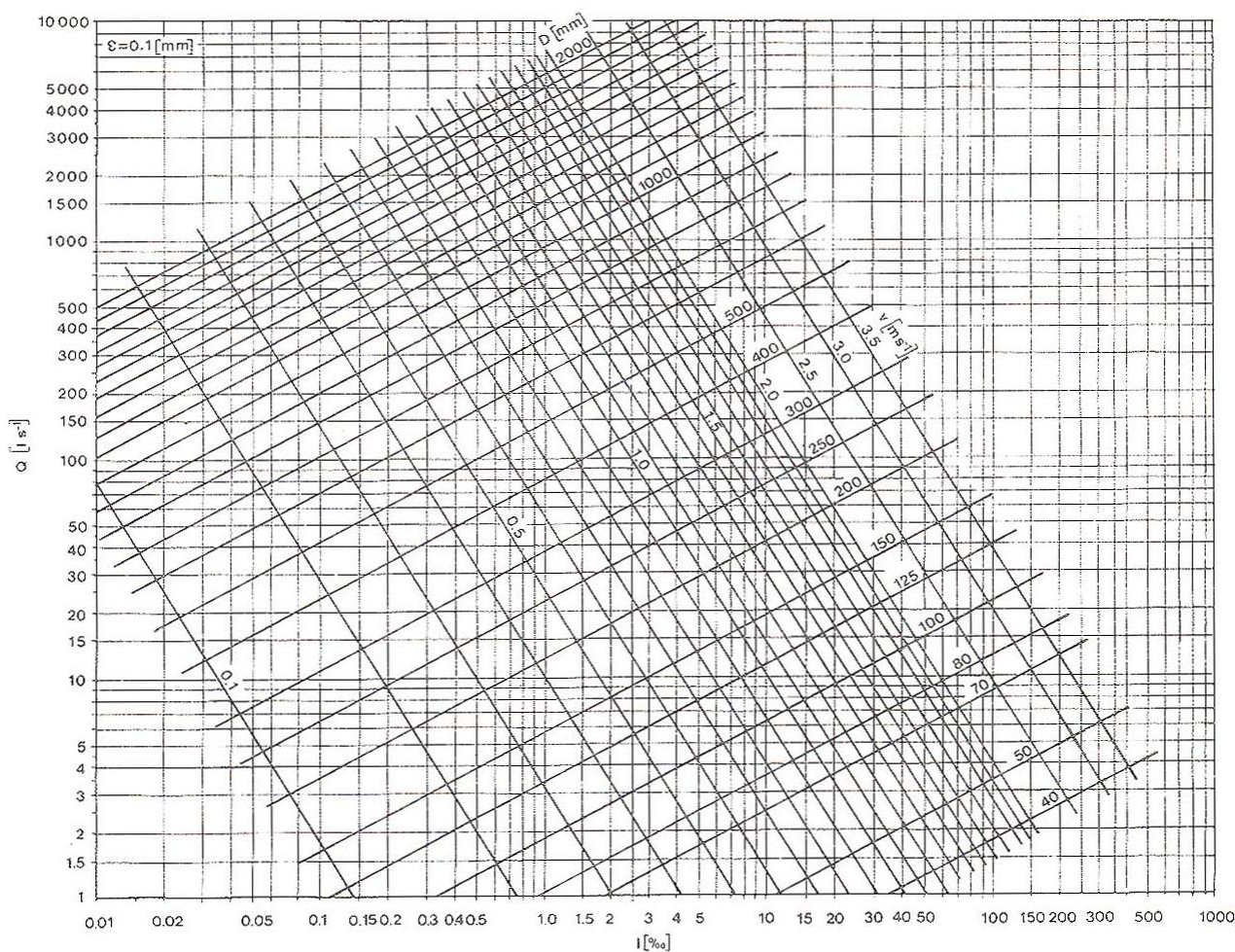
Slijedi:

$$\Delta H_{tr} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,0156 \cdot \frac{6000}{0,45} \cdot \frac{1,51^2}{2 \cdot 9,81} \approx 24 \text{ m}$$

$$I = \frac{\Delta H_{tr}}{L} = \frac{24}{6000} = 0,004 = 4 \text{ ‰}$$

azina vode, h_A , na izlazu iz uređaja za kondicioniranje treba biti:

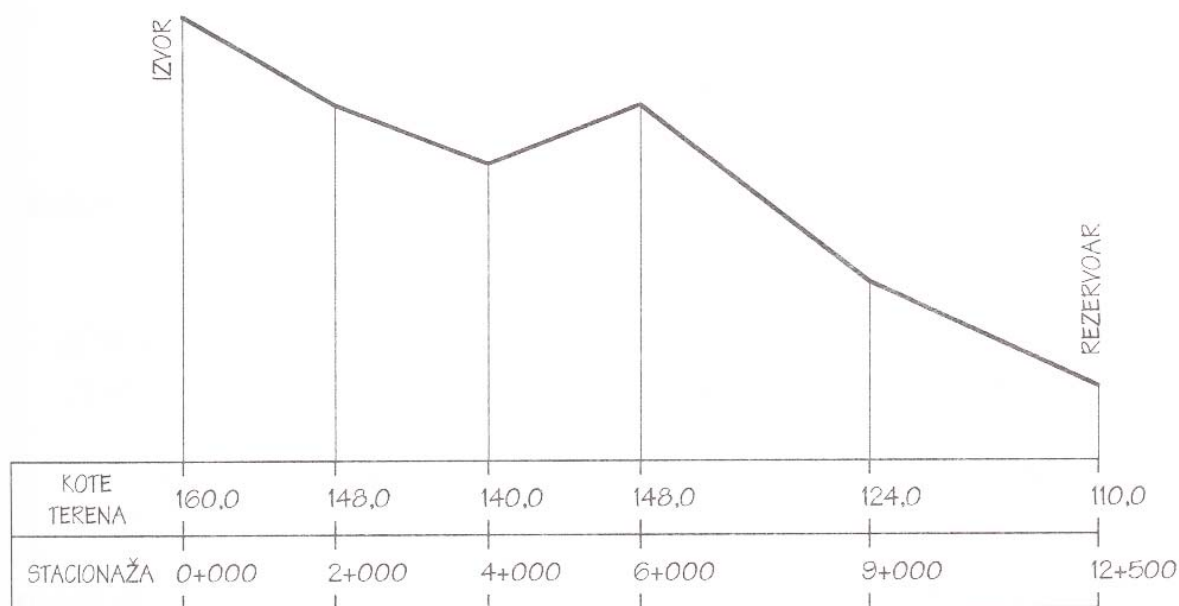
$$h_A = 135 + 24 = 159 \text{ m.n.m.}$$



Slika 11. Nomogram hidrauličkih parametara za okrugle cijevi

Primjer 4:

Zadan je uzdužni profil gravitacijskog cjevovoda (Slika) kroz koji treba transportirati $Q_{\max, \text{dn}} = 30 \text{ l/s}$ od izvora do vodospreme. Apsolutna hrapavost cjevovoda je $0,15 \text{ mm}$. Treba dimensionirati cjevovod tako da se za transport $Q_{\max, \text{dn}}$ iskoristi pad kojim se raspolaže uz uvjet da je minimalna tlačna visina u cjevovodu $2,0 \text{ m}$. Piezometarska kota na mjestu izvora iznosi $160,0 \text{ m.n.m.}$



S obzirom na izgled uzdužnog profila potrebno je da pri maksimalnom protoku $Q_{\max, \text{dn}}$ tlačna visina u stacionaži $6+000 \text{ km}$ bude veća od $2,0 \text{ m}$.

Minimalna dopuštena kota piezometarske linije u stacionaži $6+000 \text{ km}$ je:

$$K_{\min, 6+000 \text{ km}} = 148,0 + 2,0 = 150 \text{ m.n.m.}$$

tako da je raspoloživi nagib piezometarske linije na dionici od izvora do $6+000 \text{ km}$:

$$I_{\max} = \frac{\Delta H_{tr}}{L} = \frac{160 - 150}{6000} = 1,666 \cdot 10^{-3} = 1,6 \text{ ‰}$$

Promjer cjevovoda određuje se postupkom iteracije. To znači da će se za pretpostavljeni promjer cijevi, D , određivati nagib piezometarske linije uz zadani protok od $Q_{\max, \text{dn}} = 30 \text{ l/s}$.

Za dionicu od 0+000 km do 6+000 km pretpostavlja se:

$$\varnothing 200 \text{ mm} \Rightarrow v = 0,955 \text{ m/s} ; \lambda = 0,0212 ; I = 4,98 \text{ ‰}$$

$$\varnothing 250 \text{ mm} \Rightarrow v = 0,611 \text{ m/s} ; \lambda = 0,0210 ; I = 1,61 \text{ ‰}$$

usvaja se cijev $\varnothing 250 \text{ mm}$

$$\frac{v^2}{2g} = 0,02 \text{ m} \Rightarrow \text{može se zanemariti zajedno s lokalnim gubicima}$$

ukupni gubici na dionici od 0+000 km do 6+000 km iznose:

$$\Delta H_{tr} = I \cdot L = 0,00161 \cdot 6000 = 9,66 \text{ m}$$

kota piezometarske linije u stacionaži 6+000 km iznosi:

$$K_{6+000 \text{ km}} = 160,0 - 9,66 = 150,34 \text{ m.n.m.}$$

Promatra se dionica 6+000 km do 12+500 km:

raspoloživi nagib piezometarske linije na dionici od 6+000 km do 12+500 km

$$I_{\max} = \frac{\Delta H_{tr}}{L} = \frac{150,34 - 110,00}{6500} = 6,21 \text{ ‰}$$

Za dionicu od 0+000 km do 6+000 km pretpostavlja se:

$$\varnothing 200 \text{ mm} \Rightarrow v = 0,955 \text{ m/s} ; \lambda = 0,0212 ; I = 4,98 \text{ ‰}$$

$$\varnothing 150 \text{ mm} \Rightarrow v = 1,700 \text{ m/s} ; \lambda = 0,0214 ; I = 21,0 \text{ ‰}$$

usvaja se cijev $\varnothing 200 \text{ mm}$

kota piezometarske linije u stacionaži 12+500 km iznosi:

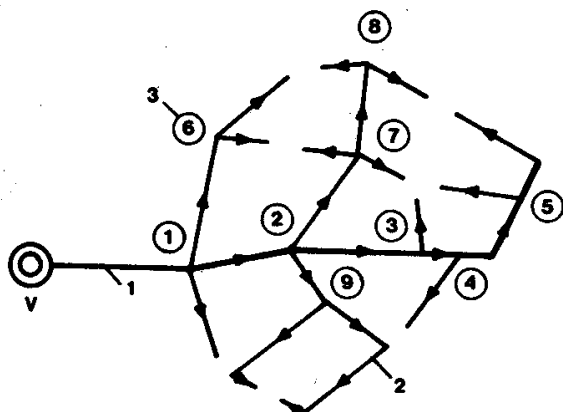
$$K_{12+500 \text{ km}} = 150,34 - 6500 \cdot 0,00498 = 117,97 \text{ m.n.m.}$$

Hidraulički proračun vodovodne mreže:

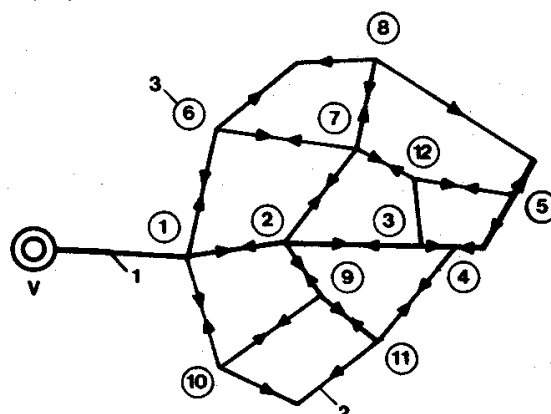
Hidraulički proračun vodovodne mreže uvjetovan je sustavom raspodjele vode koji može biti:

- granati
- prstenasti

(a)



(b)



Slika 12. Osnovni sustavi raspodjele vode
a) granati sustav; b) prstenasti sustav

V – vodosprema; 1 – glavni opskrbni cjevovod; 2 – razdjelna mreža; ⊗ - oznaka čvora

Granati sustav raspodjele vode karakterizira tečenje samo u jednom smjeru, od vodospreme prema potrošačima.

Prstenasti sustav raspodjele vode karakterizira međusobna povezanost cjevovoda gdje do jednog mjesta potrošnje voda dotječe iz najmanje dva smjera

Hidraulički proračun vodovodnih mreža obično se svodi na dimenzioniranje cjevovoda te određivanje raspoloživih tlakova za dionice kojima je poznata duljina i protok.

Kod hidrauličkog proračuna vodovodnih mreža potrebno je voditi računa o minimalno i maksimalno dozvoljenim tlakovima u mreži. Minimalni tlak treba osigurati u satu najveće potrošnje na najvišim izljevnim mjestima u zgradama, dok se maksimalni tlak odnosi na najveću dozvoljenu vrijednost hidrostatskog tlaka u najnižim točkama vodovodne mreže.

Granati sustav

Kod proračuna granatog sustava raspodjele vode mjerodavne su dvije veličine u odnosu na protok:

$$q_{max,h} \text{ i } Q_{pož}$$

Količina vode potrebna za gašenje požara je mjerodavna u slučajevima kad je:

$$Q_{pož} \geq q_{max,h}$$

Mjerodavni protok za dimenzioniranje mreže, može se izračunati za svaku dionicu mreže na više načina:

- poznavanjem vrste i broja potrošača uz svaku dionicu (najtočniji pristup)
- linearnim uprosječivanjem potrošnje na jedinici duljine vodoopskrbne mreže
- uprosječivanjem potrošnje po udjelu pripadne naseljene površine uz dionicu

Uglavnom se koristi pristup linearnog uprosječivanja potrošnje. Mjerodavni protok ($q_{max,h}$ ili $Q_{pož}$) dijeli se linearno na cijelu vodoopskrbnu mrežu i ta vrijednost predstavlja specifični protok na metar dužine cjevovoda:

$$q_0 = \frac{Q_{mjerodavno}}{\sum l_i} \quad (l/s/m')$$

gdje je:

l_i duljine dionica na kojima se troši voda

Vlastiti protok dionice dužine l_i iznosi:

$$q_i = q_0 \cdot l_i \quad (l/s)$$

Protoci koji se troše koncentrirano (industrija i gašenje požara) tretiraju se kao tranzitni protoci do mjesta potrošnje.

Mjerodavni protoci za dimenzioniranje pojedinih dionica određuju se na temelju vlastitog protoka uvećanog za tranzitne protoke nizvodnih dionica.

DIMENZIONIRANJE CIJEVI

Cijevi se dimenzioniraju na mjerodavni protok. Za odabranu vrstu cijevnog materijala određuje se pogonska hrapavost i mjerodavna temperatura za odabir kinematičkog koeficijenta viskoznosti.

Poprečni presjek cijevi određuje se na temelju prihvaćenog kriterija ekonomičnih brzina strujanja ($v = 1-2 \text{ m/s}$).

Za odabrani profil cijevi, mjerodavni protok, hrapavost i kinematički koeficijent viskoznosti, iz tablica, prema Darcy-Weisbach-Colebrook-White-u određuje se pad piezometarske linije.

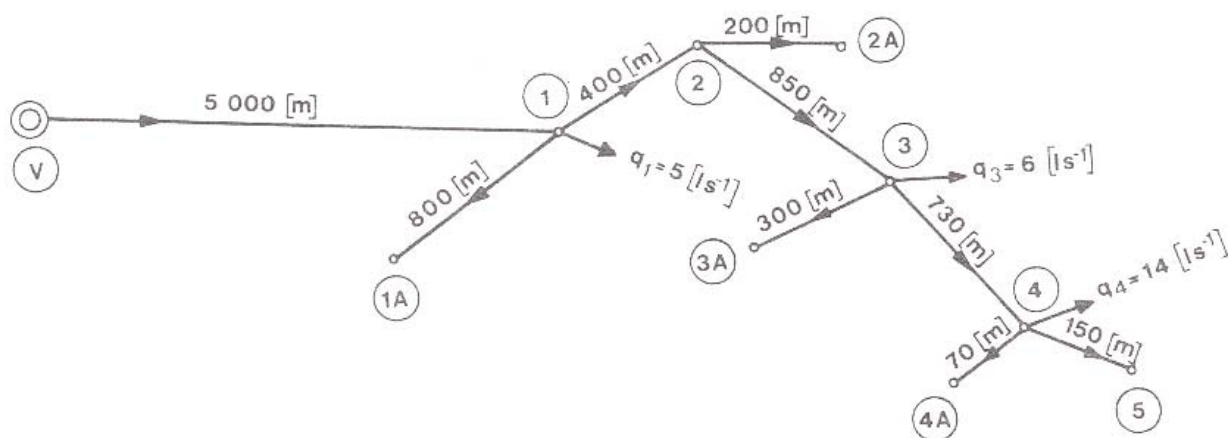
Primjer 5:

Potrebno je u satu najveće potrošnje dimenzionirati cjevovode i odrediti tlakove u ljevanoželjeznoj granastoj mreži kojom se naselje iz vodospreme (V), s najnižom razinom vode, $h_v = 240,0 \text{ m.n.m.}$ gravitacijski opskrbljuje vodom.

Minimalni tlak u mreži treba iznositi 2,0 bara, a maksimalni 6,0 bara.

Maksimalna satna potrošnja vode iznosi $q_{\max,h} = 200 \text{ l/s}$, uključujući i potrošače s koncentriranom potrošnjom u čvorovima 1, 3 i 4.

Visinske kote čvorova su također poznate.



Slika 13. Ulazni podaci za hidraulički proračun vodovodne mreže

Specifični protok na metar dužine cjevovoda iznosi:

$$q_0 = \frac{Q_{mjerodavno}}{\Sigma l_i} = \frac{q_{\max,h} - \sum_{i=1}^3 q_{k,i}}{\Sigma l_i} = \frac{200 - 25}{3500} = 0,05 \quad (l/s/m')$$

Vlastiti protok pojedine dionice računa se prema:

$$q_i = q_0 \cdot l_i \quad (l/s)$$

Mjerodavni protok za proračun pojedine dionice dobije se kao zbroj vlastitog i tranzitnog protoka.

$$Q_{mjer} = q_i + q_{tranz} \quad (l/s)$$

Zatim se prepostavi unutrašnji promjer cijevi, D, za pojedinu dionicu. Na osnovi pretpostavljenog D, izračuna se ukupni gubitak tlaka, odnosno raspoloživi tlak za tu istu dionicu.

Vrijednosti Reynoldsovog broja, Re, dobivene su uz pretpostavku da je temperatura vode $T = 10^\circ\text{C}$ za koju je vrijednost kinematskog koeficijenta viskoznosti $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Apsolutna hrapavost za ljevanoželjezne cijevi je uzeta kao vrijednost $\varepsilon = 0,1 \text{ mm}$.

Hidrostatska tlačna visina (kad nema potrošnje) u promatranoj točki dobije se kao razlika najniže razine vode u vodospremi i visinske kote te točke, pa se na osnovu te veličine izračuna vrijednost hidrostatskog tlaka.

Vrijednost hidrodinamičke tlačne visine u promatranoj točki dobije se primjenom izraza:

$$H_{td} = h_V - h_t - \sum_{i=1}^k \Delta H_{tr} \quad (m)$$

gdje je $\Sigma \Delta H_{tr}$ suma linijskih gubitaka od vodospreme do promatrane točke.

Na osnovu proračunate hidrodinamičke tlačne visine određuje se ukupni raspoloživi tlak u promatranoj točki.

Ozn. toč.	Visin. kota točke h_i [m n.m.]	Ozn. čvora	Kone. potr. u čv. q_k [l s ⁻¹]	Ozn. dion.	Dulj. dion. L [m]	Specif. protok q [l s ⁻¹]	Vlast. protok q_v [l s ⁻¹]	Tranz. protok q_t [l s ⁻¹]	Ukupni protok q_u [l s ⁻¹]	Unut. prom. D [mm]	Projec. površina A 10 ⁻¹ [m ²]	Brzina v [m s ⁻¹]	Reynol. broj Re 10 ⁻⁵ [1]	Relat. hrap. ϵ/D 10 ⁻⁴ [1]	Koefic. trenja λ 10 ⁻² [1]	Linijski gubitak ΔH_g [m]	Piezom. pad I [%]	Raspoloživi hidrostat. tlak p_{st} [bar]	Raspoloživi hidrodinam. tlak p_{st} [bar]		
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
V	240.0	1	5.0	V - 1	5 000	-	-	200.0	200.0	450	1.59	1.26	4.33	2.22	1.58	14.2	2.8	-	-		
1	190.5	2	-	1 - 1A	800	0.05	40.0	-	40.0	250	0.49	0.82	1.56	4.00	1.90	2.1	2.6	4.86	3.46		
1A	192.0	3	6.0	1 - 2	400		20.0	135.0	155.0	400	1.26	1.23	1.27	3.76	2.50	1.65	1.3	3.2	4.71	3.11	
2	187.4	4	14.0	2 - 2A	200		10.0	-	10.0	100	0.08	1.27	0.97	10.00	2.24	3.7	18.5	5.16	3.64		
2A	188.5				2 - 3		42.5	82.5	125.0	350	0.96	1.30	3.47	2.86	1.67	3.5	4.1	5.05	3.17		
3	188.9				3 - 3A		15.0	-	15.0	150	0.18	0.85	0.97	6.67	2.10	1.5	5.1	5.01	3.15		
3A	190.0				3 - 4		36.5	25.0	61.5	300	0.71	0.87	1.99	3.33	1.81	1.7	2.3	4.91	2.89		
4	195.3				4 - 4A		3.5	-	3.5	80	0.05	0.70	0.43	12.50	2.53	0.6	8.6	4.39	2.35		
4A	191.0				4 - 5		7.5	-	7.5	100	0.08	0.96	0.73	10.00	2.32	1.6	10.7	2.84	2.72		
Σ	195.4				Σ	0.05	175.0													4.38	2.19

Tablica 7. Rezultati hidrauličkog proračuna granaste vodovodne mreže

Crpna stanica

Crpna stanica je građevina s pripadnom elektrostrojarskom opremom, kojom se voda crpi i podiže (potiskuje) na tlačnu visinu potrebnu za osiguranje zahtijevane raspodjele vode potrošačima.

Mjerodavni protok za dimenzioniranje crpki iznosi $Q_{max,dn}$, dok količina crpljenja ovisi o režimu rada crpki, odnosno trajanju crpljenja:

$$Q_{cr} = \frac{Q_{max,dn}}{T_{cr}}$$

gdje su:

Q_{cr} količina crpljenja

$Q_{max,dn}$ maksimalna dnevna potrošnja vode (m³/d)

T_{cr} vrijeme crpljenja (sati/dan)

Vrijeme crpljenja je kod proračuna crpnih stanica vrlo značajan ekonomski faktor.

Manometarska visina dizanja vode

S obzirom na osovину crpnog agregata, razlikuju se dvije strane odnosno dvije razine dizanja vode:

■ usisna strana crpnog postrojenja i obilježava ju manometarska usisna visina $H_{man,us}$

■ tlačna strana – obilježava ju manometarska tlačna visina $H_{man,tl}$

$$H_{man} = H_{man,us} + H_{man,tl}$$

Usisna manometarska visina:

$$H_{man,us} = H_{g,us} + \Sigma \Delta H_{us} \quad (m)$$

gdje su:

$H_{g,us}$ geodetska visinska razlika između razina vode u vodospremi (zahvatu) i osovini crpke (m)

$\Sigma \Delta H_{us}$ ukupni gubitak energije u usisnom cjevovodu (m)

Tlačna manometarska visina:

$$H_{man,tl} = H_{g,tl} + \Sigma \Delta H_{tl} + \frac{v_{tl}^2}{2g} \quad (m)$$

gdje su:

$H_{g,tl}$ geodetska visinska razlika između razine (preljevne) u opskrbenoj vodospremi i osovine crpke (m)

v_{tl}^2 brzina istjecanja vode u tlačnom cjevovodu (m/s)

$\Sigma \Delta H_{tl}$ ukupni gubitak energije u tlačnom cjevovodu (m)

Proračun crpne stanice

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad (W)$$

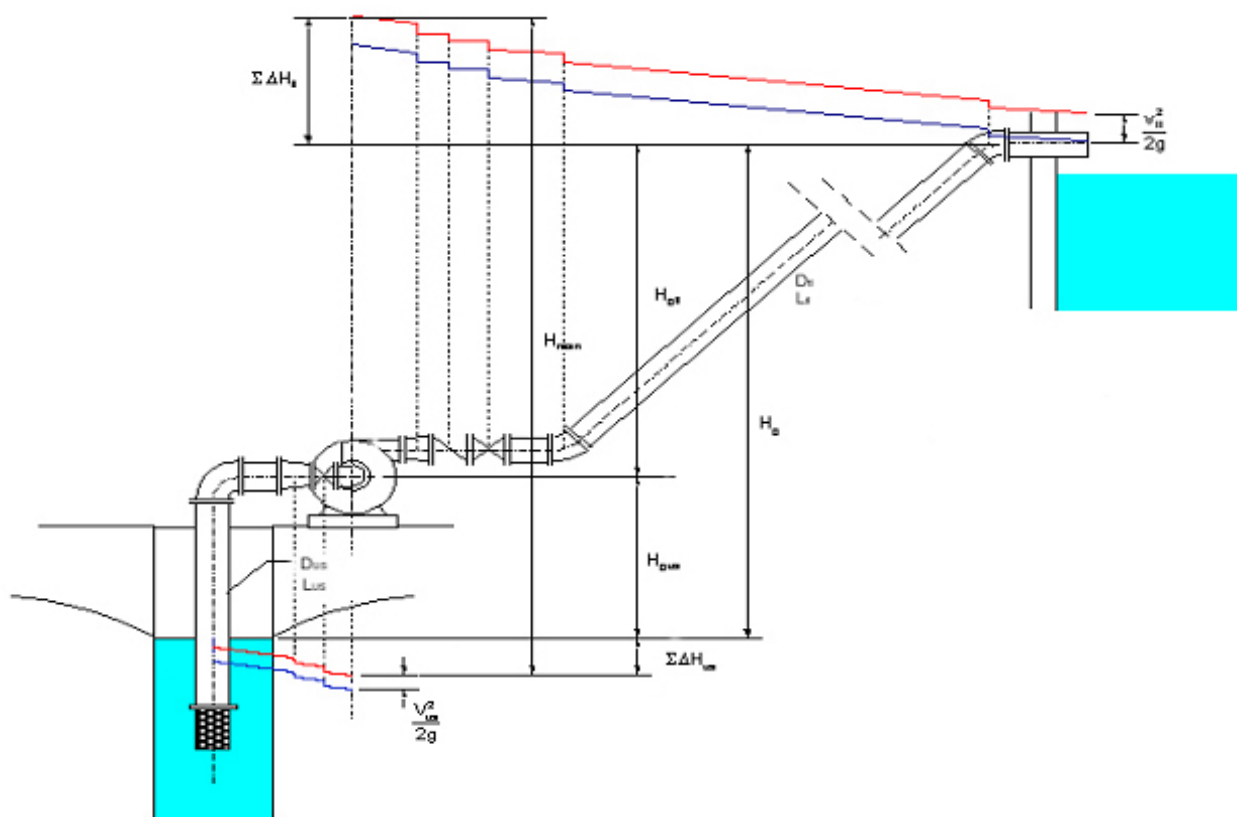
$$P = \frac{9,81 \cdot Q H}{\eta} \quad (kW)$$

gdje su:

Q protok (količina crpljenja) (m³/s)

H_{man} manometarska visina dizanja (m)

η koeficijent korisnog djelovanja crpke

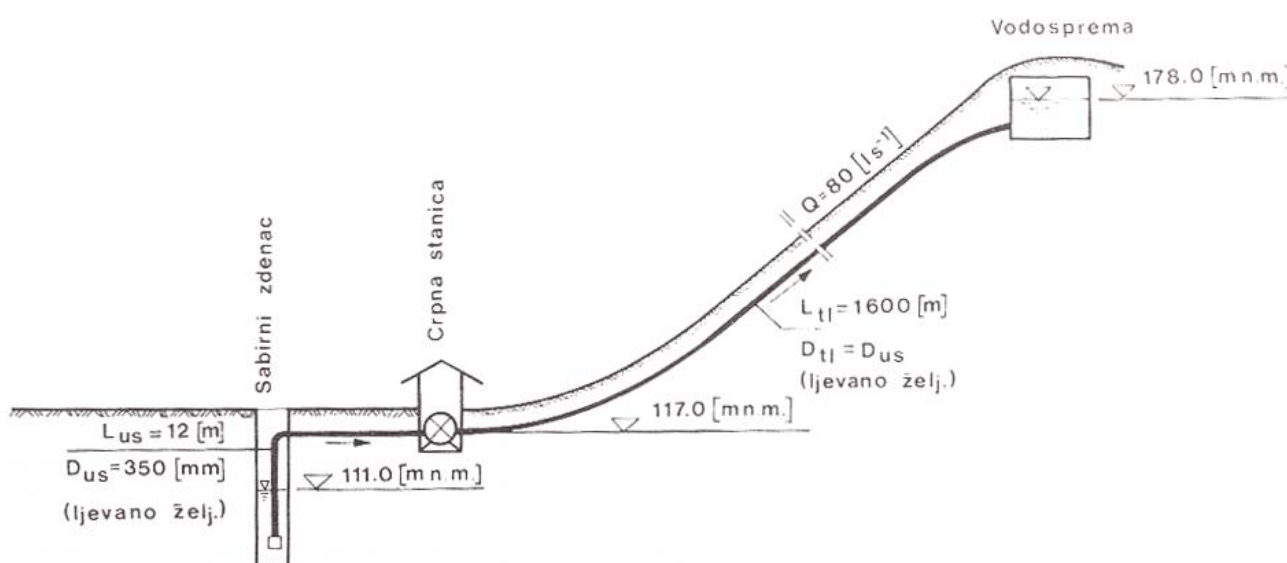


Slika 14. Definićijska shema manometarske visine dizanja

Primjer 6:

Za sustav sa slike potrebno je odrediti snagu crpke ako je poznato:

- $Q = 80 \text{ l/s}$ količina vode koja se crpi iz bazena
 $\varepsilon = 0.1 \text{ mm}$ apsolutna hrapavost ljevanoželjezne usisne cijevi
 $\xi_{uk} = 3,5$ koeficijent lokalnog gubitka usisne košare
 $\xi_{zk} = 0,2$ koeficijent lokalnog gubitka koljena pod 90°
 $\eta = 0,7$ koeficijent korisnog djelovanja crpke
 $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ kinematski koeficijent viskoznosti



Slika 15. Parametri crpnog sustava

Potrebno je odrediti manometarsku visinu dizanja H_{man} :

$$H_{man} = H_{man,us} + H_{man,tl}$$

$$H_{man} = H_{g,us} + \Sigma \Delta H_{us} + H_{g,tl} + \Sigma \Delta H_{tl} + \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

geodetska usisna visina:

$$H_{g,us} = 117,0 - 111,0 \quad (m)$$

hidraulički gubici u usisnom cjevovodu:

$$\Sigma \Delta H_{us} = \Delta H_{lin,us} + \sum_{i=1}^m \Delta H_{lok,us} = \lambda_{us} \frac{L_{us}}{D_{us}} \frac{v_{us}^2}{2g} + \xi_{uk} \frac{v_{us}^2}{2g} + \xi_{zk} \frac{v_{us}^2}{2g}$$

da bi se odredili gubici na usisnoj cijevi potrebno je poznavati brzinu v_{us} i koeficijent trenja λ .

$$v_{us} = \frac{Q}{A_{us}} = \frac{4Q}{D_{us}^2 \pi} = \frac{4 \cdot 0,080}{0,35^2 \cdot 3,14} = 0,83 \quad (m/s)$$

$$Re = \frac{v_{us} D_{us}}{\nu} = \frac{0,83 \cdot 0,35}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 2,22 \cdot 10^5$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,1}{350} = 2,86 \cdot 10^{-4}$$

iz Moodyjevog dijagrama se očitava:

$$\lambda_{us} = 0,0176$$

slijedi:

$$\Sigma \Delta H_{us} = \frac{0,83^2}{2 \cdot 9,81} \cdot (0,0176 \cdot \frac{12,0}{0,35} + 3,5 + 0,2) = 0,15 \text{ m}$$

hidraulički gubici u tlačnom cjevovodu:

$$\Sigma \Delta H_{tl} = \Delta H_{lin,tl} = \lambda_{tl} \frac{L_{tl}}{D_{tl}} \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$D_{tl} = D_{us}$$

$$v_{tl} = v_{us} = 0,83 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{tl} = \lambda_{us} = 0,0176$$

$$\Sigma \Delta H_{tl} = 0,0176 \cdot \frac{1600}{0,35} \cdot \frac{0,83^2}{2 \cdot 9,81} = 2,83 \text{ m}$$

geodetska tlačna visina:

$$H_{g,us} = 178,0 - 117,0 = 61,0 \quad (m)$$

brzinska visina:

$$\frac{v_{tl}^2}{2g} = \frac{0,83^2}{2 \cdot 9,81} = 0,035 \text{ m}$$

manometarska visina dizanja:

$$H_{man} = H_{g,us} + \Sigma \Delta H_{us} + H_{g,tl} + \Sigma \Delta H_{tl} + \frac{v_{tl}^2}{2g} = 6,0 + 0,15 + 61,0 + 2,83 + 0,035 = 70,0 \text{ m}$$

snaga crpke:

$$P = \frac{9,81 \cdot Q H}{\eta} = \frac{9,81 \cdot 0,08 \cdot 70,0}{0,7} = 78,48 \quad (kW)$$

Vodosprema

Vodosprema je građevina koja posreduje između postojeće dobave vode (izvorišta) i opskrbnog područja, potrošača promjenjive potrošnje.

Njezina uloga u sustavu opskrbe je višeznačna:

- izjednačuje dnevnu potrošnju koju obilježava minimalna i maksimalna satna potrošnja $q_{\min,h}$ i $q_{\max,h}$
- osigurava i ravnomjerno raspodjeljuje zahtijevani pogonski tlak duž opskrbnog područja
- osigurava količinu vode potrebnu za slučaj požara
- osigurava određenu količinu vode za slučaj nepredviđenih zbivanja duž sustava opskrbe (prekid napajanja strujom, oštećenja na cijevnim vodovima i sl.)

Hidraulički proračun volumena vodospreme

Volumen vodospreme proračunava se analitički i grafički ovisno o odnosu promjenjive potrošnje u tijeku pojedinih sati dana i načina dotoka opskrbnih količina.

Dotok vode u vodospremu može biti *gravitacijski i tlačni (posredstvom crpki)*.

Kod gravitacijskog dotoka vode u vodospremu pretpostavlja se stalni dotok u tijeku dana (24^h), dok dobavne količine crpljenjem ovise o režimu rada crpki.

Ukupni potrebni volumen vodospreme, V_{uk} , se sastoji od:

- operativne rezerve, V_{OR} (m^3)
- protupožarne rezerve, V_{PR} (m^3)
- sigurnosne rezerve, V_{SR} (m^3)

$$V_{uk} = V_{OR} + V_{PR} + V_{SR} \quad (m^3)$$

Operativne rezerve

Određivanje operativne rezerve, V_{OR} , odnosi se na proračun volumena vodospreme kojim se osigurava izravnanje oscilacija u potrošnji vode za kućanske i industrijske potrebe.

Potrošnja se u tijeku dana iskazuje u postocima (%) maksimalne dnevne potrošnje (% $Q_{\max, \text{dn}}$) u pojedinim satima.

Protupožarne rezerve

Određivanje protupožarne rezerve, V_{PR} , provodi se prema *Pravilniku o tehničkim normativima za hidrantsku mrežu za gašenje požara* (Tablica 2.).

Sigurnosne rezerve

Sigurnosna rezerva, V_{SR} , se predviđa za slučaj prekida dotoka u vodospremu, za vrijeme dok se ne otkloni uzrok prekida (kvar, oštećenje, prekid napajanja strujom).

Preporuka je da se ova rezerva uzme kao vrijednost od 25% zbroja operativne i protupožarne rezerve:

$$V_{SR} = 0,25 \cdot (V_{OR} + V_{PR})$$

Ukupan volumen vodospreme

Ukupan volumen vodospreme određuje se prema izrazu:

$$V_{uk} = V_{OR} + V_{PR} + V_{SR} = 1,25 \cdot (V_{OR} + V_{PR})$$

Primjer 7:

Proračun treba provesti za grad od 50 000 stanovnika i maksimalnu dnevnu potrošnju od $Q_{\max, \text{dn}} = 300$ l/stan-dan, analitički i grafički uz pretpostavku gravitacijske ili tlačne dobavne opskrbe količine vode.

U tablici 6. proračun operativne rezerve je proveden za pretpostavljenu raspodjelu potrošnje u pojedinim satima tijekom dana i gravitacijski dotok u količini od 4,17% $Q_{\max, \text{dn}}$.

U tablici 7. proračun operativne rezerve je proveden za raspodjelu potrošnje u danu za vremena crpljenja $T_1 = 8^{\text{h}}$ i $T_2 = 16^{\text{h}}$.

Na temelju predviđene varijacije potrošnje u koraku od jednog sata i konstantnog crpljenja, proračunati su viškovi i manjkovi vode u pojedinim vremenskim odsječcima.

Sumiranjem viškova i manjkova proračunat je volumen vode u vodospremi.

Pri tom su dobivene pozitivne i negativne vrijednosti volumena. Dobivene su negativne vrijednosti jer proračun teče od pretpostavke potpuno prazne vodospreme.

Operativna rezerva dobije se zbrajanjem apsolutnih vrijednosti najvećeg viška i manjka vode u vodospremi.

Pri proračunu prozupožarne rezerve uzeti da je vrijednost specifičnog požarnog opterećenja jednaka 1500 MJm^{-2} , a maksimalna veličina tlocrtne površine objekata 1500 m^2 .

Prema trajanju crpljenja, specifično opterećenje crpnog postrojenja s obzirom na $Q_{\max, \text{dn}}$ iznosi, kako pokazuje tablica 5:

Trajanje rada crpnog postrojenja T (h)	Specifično opterećenje % $Q_{\max, \text{dn}}$
8 sati	12,50
16 sati	6,25
24 sata	4,17

Tablica 8. Specifični dotok u odnosu na vrijeme crpljenja

Gravitacijski dotok

Sati od-do	Potrošnja % $Q_{\max/d}$	Dotok % $Q_{\max/d}$	Dotok višak u %	Potrošnja manjak u %	Obujam vodosp. % $Q_{\max/d}$
0-1	1,0	4,17	3,17		3,17
1-2	0,5	4,17	3,67		6,84
2-3	0,5	4,17	3,67		10,51
3-4	1,0	4,16	3,16		13,67
4-5	2,0	4,16	2,16		15,83
5-6	2,0	4,16	2,16		17,99
6-7	4,0	4,16	0,16		18,15
7-8	7,0	4,17		2,83	15,32
8-9	8,0	4,17		3,83	11,49
9-10	3,0	4,17	1,17		12,66
10-11	3,0	4,17	1,17		13,83
11-12	5,0	4,17		0,83	13,00
12-13	7,0	4,17		2,83	10,17
13-14	8,0	4,17		3,83	6,34
14-15	6,0	4,17		1,83	4,51
15-16	5,0	4,17		0,83	3,68
16-17	5,0	4,17		0,83	2,85
17-18	6,0	4,17		1,83	1,02
18-19	8,0	4,17		3,83	-2,81
19-20	7,0	4,17		2,83	-5,64
20-21	5,0	4,17		0,83	-6,47
21-22	3,0	4,17	1,17		-5,30
22-23	2,0	4,17	2,17		-3,13
23-24	1,0	4,17	3,17		+0,04
Ukupno	100,0%	100,0%	27,00%	26,99%	

Tablica 9. Proračun operativne rezerve – gravitacijski dotok

Prema podacima iz tablice 5., operativna rezerva iznosi:

$$18,15 + (-6,47) = 24,62\% = 25,00\% Q_{\max, dn}$$

$$V_{OR} = 0,25 \cdot 50000 \cdot 300 = 3750 \text{ m}^3$$

Dotok crpljenjem

Sati od-do	Potrosnja % $Q_{\max/d}$	Dotok tijekom crpljenja		$T_{cr} = 8^h$		$T_{cr} = 16^h$		Obujam vodospreme	
				Višak	Manjak	Višak	Manjak		
		8 ^h	16 ^h	8 ^h	8 ^h	16 ^h	16 ^h	8 ^h	16 ^h
0-1	1,0				1,0		1,00	-1,00	-1,00
1-2	0,5				0,5		0,50	-1,50	-1,50
2-3	0,5				0,5		0,50	-2,00	-2,00
3-4	1,0				1,0		1,00	-3,00	-3,00
4-5	2,0				2,0		2,00	-5,00	-5,00
5-6	2,0				2,0		2,00	-7,00	-7,00
6-7	4,0	12,5	6,25	8,5		2,25		1,50	-4,75
7-8	7,0	12,5	6,25	5,5			0,75	7,00	-5,50
8-9	8,0	12,5	6,25	4,5			1,75	11,50	-7,25
9-10	3,0	12,5	6,25	9,5		3,25		21,00	-4,00
10-11	3,0	12,5	6,25	9,5		3,25		30,50	-0,75
11-12	5,0	12,5	6,25	7,5		1,25		38,00	0,50
12-13	7,0	12,5	6,25	5,5			0,75	43,50	-0,25
13-14	8,0	12,5	6,25	4,5			1,75	48,00	-2,00
14-15	6,0		6,25		6,0	0,25		42,00	-1,75
15-16	5,0		6,25		5,0	1,25		37,00	-0,50
16-17	5,0		6,25		5,0	1,25		32,00	0,75
17-18	6,0		6,25		6,0	0,25		26,00	1,00
18-19	8,0		6,25		8,0		1,75	18,00	-0,75
19-20	7,0		6,25		7,0		0,75	11,00	-1,50
20-21	5,0		6,25		5,0	1,25		6,00	-0,25
21-22	3,0		6,25		3,0	3,25		3,00	3,00
22-23	2,0				2,0		2,0	1,00	1,00
23-24	1,0				1,0		1,0	0,00	0,00
Ukupno:	100,0%	100,0%	100,0%	55,0%	-55,0%	17,5%	-17,5%		

Tablica 10. Proračun operativne rezerve – dotok uz crpljenje vode $T_1=8^h$ i $T_2=16^h$

U slučaju crpljenja vode u trajanju od 8^h u toku dana operativna rezerva iznosi:

$$(-7,0) + 48,0 = 55,00\% Q_{\max, dn}$$

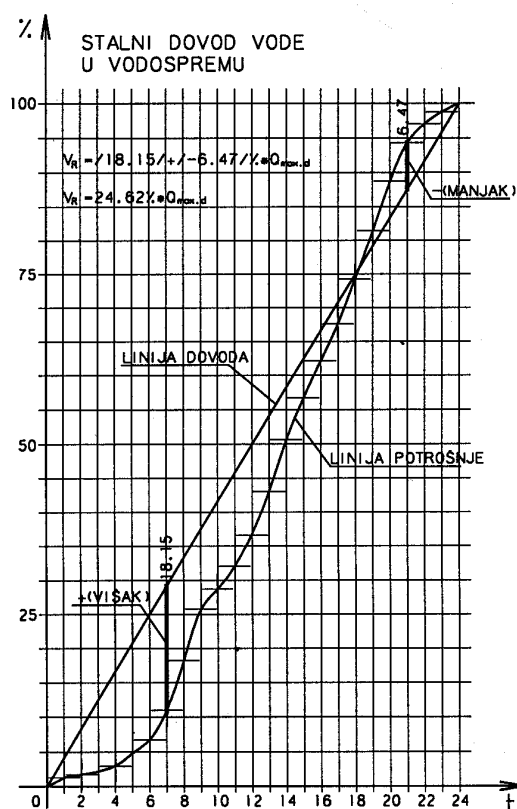
$$V_{OR} = 0,55 \cdot 15000 = 8250 \text{ m}^3$$

Produženjem vremena crpljenja na 16^h operativna rezerva iznosi:

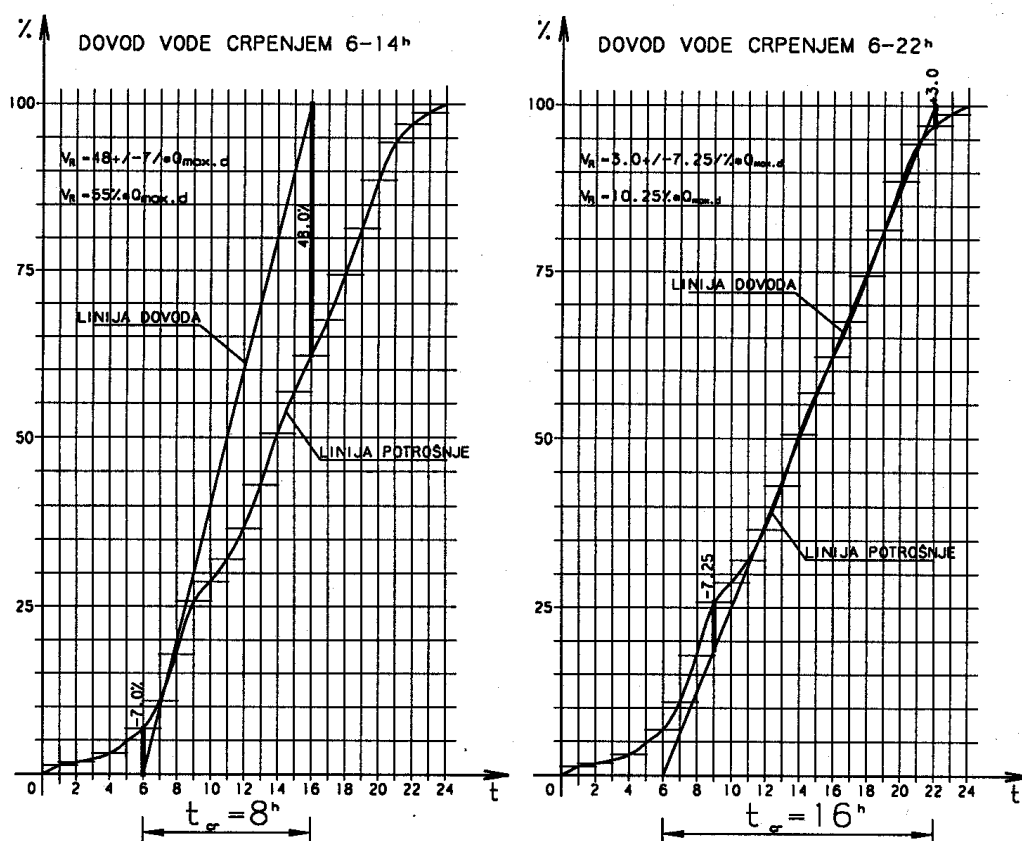
$$(-7,25) + 3,0 = 10,25\% Q_{\max, dn}$$

$$V_{OR} = 0,1025 \cdot 15000 = 1538 \text{ m}^3$$

Točnost analitičkih rješenja može se provjeriti grafičkim postupkom:



Slika 16. Dijagrami za proračun obujma vodospreme uz stalni dotok



Slika 17. Dijagrami za proračun operativne rezerve uz crpljenje vode 8 i 16 sati

Proračun protupožarne rezerve

Prema *Pravilniku o tehničkim normativima za hidrantsku mrežu za gašenje požara* (Tablica 2.) slijedi:

Za naselje od 50 000 stanovnika uzima se da se mogu istodobno pojaviti 2 požara, a potrošnja vode po jednom požaru iznosi $q_{pož}=25$ l/s. Vrijeme gašenja požara iznosi 2^h.

Iz navedenog proizlazi da je za gašenje požara potrebno osigurati:

$$V_{PR} = q_{pož} \cdot 2^h \cdot \frac{3600}{1000} = 25 \cdot 2 \cdot 3,6$$
$$V_{PR} = 180,0 \text{ m}^3$$

Proračun sigurnosne rezerve

Proračun se provodi prema jednadžbi:

$$V_{SR} = 0,25 \cdot (V_{OR} + V_{PR})$$

Ukupan volumen vodospreme

Dotok opskrbe količine	Volumen vodospreme				
	u % $Q_{max,dn}$	V_{OR} (m ³)	V_{PR} (m ³)	V_{SR} (m ³)	Total (m ³)
Gravitacijski 24 h	25,0	3750	180	1028	4958
Crpljenje	8 h	8250	180	2153	10583
	16 h	1538	180	475	2193

Tablica 11. Odnos volumena vodospreme u odnosu na dotok

Očito je kako se usklađivanjem vremena crpljenja s razdobljem najvećih potrošnji u tijeku dana može postići minimalan volumen vodospreme.

HARDY – CROSS-ova METODA PRORAČUNA PRSTENASTE MREŽE

Gubitak energije u bilo kojem elementu vodoopskrbnog sustava može se izračunati iz:

Jedn. 1

$$h_i = k_i Q_i^x$$

gdje je:

h_i gubitak energije u elementu i
 Q_i protok u elementu
 k_i konstanta koja ovisi o promjeru cijevi, duljini, vrsti i stanju
 x 1,5 – 2, ovisno o jednadžbi koja se koristi

Za bilo koju cijev u prstenu, stvarni se protok razlikuje od prvog pretpostavljenog za vrijednost Δ :

Jedn. 2

$$Q_i = Q_{i0} + \Delta$$

gdje je:

Q_i stvarni protok u cijevi
 Q_{i0} pretpostavljeni protok
 Δ potrebna korekcija protoka

Ako se uvrsti Jedn.2 u Jedn.1 dobije se:

Jedn. 3

$$k_i Q_i^x = k_i [Q_{i0}^x + x Q_{i0}^{(x-1)} \Delta + \dots]$$

Ostali članovi izraza iz Jedn.3 mogu se zanemariti ako je Δ mali u usporedbi s Q_i . Za bilo koji prsten suma gubitaka tlaka oko prstena mora biti jednaka nuli. Ova tvrdnja je matematički ekvivalentna tvrdnji da u jednoj točki može postojati samo jedan tlak. Dakle za svaki prsten vrijedi:

Jedn. 4

$$\sum_1^n k_i Q_i^x = \sum_1^n k_i Q_{i0}^x + \sum_1^n x k_i Q_{i0}^{(x-1)} \Delta = 0$$

Jedn. 4 može se riješiti po Δ :

Jedn. 5

$$\Delta = - \frac{\sum_1^n k_i Q_{i0}^x}{\sum_1^n x k_i Q_{i0}^{(x-1)}} = - \frac{\sum_1^n h_i}{x \sum_1^n h_i / Q_{i0}}$$

Postupak proračuna je slijedeći:

1. Rasporedi se protok po različitim načinima raspodjele (površine, duljina mreže, ili neki drugi kriterij),
2. Razdijeljeni protoci se koncentriraju u čvorove sustava
3. Odabere se početni promjer cijevi po kriteriju preporučenih brzina
4. Pretpostavi se suvisla unutarnja raspodjela protoka. Suma protoka koji ulaze i izlaze iz čvorova mora bit nula
5. Izračuna se gubitak tlaka za svaki element sustava. Prema dogovoru protoci u smjeru kazaljke na satu su pozitivni.
6. Uz poštovanje predznaka, izračuna se ukupni gubitak tlaka oko svakog prstena:

$$\sum_1^n h_i = \sum_1^n k_i Q_{i0}^x$$

7. Izračuna se, bez obzira na predznak, suma:

$$\sum_1^n k_i Q_{i0}^{(x-1)}$$

8. Izračuna se korekcijska vrijednost za svaki prsten pomoću Jedn. 5 i korigira svaka cijev u prstenu. Cijev koja je zajednička za dva prstena korigira se vrijednostima za oba prstena uz poštivanje predznaka.
9. Postupak se ponavlja sve dok korekcija u koraku 8 bude manja od zadanog maksimuma.
10. Usporede se tlakovi i brzine u uravnoteženoj mreži s kriterijima minimalnih i maksimalnih brzina. Promjeri cijevi se prilagode ako je potrebno, i ponovno se provede postupak proračuna.

Primjer 8:

Na slici je prikazan pojednostavljeni sustav vodoopskrbne mreže. Protoci su raspodijeljeni u čvorove, a u čvoru G je dodan protok za gašenje požara. Voda ulazi u sustav u čvoru A. Promjeri cijevi temelje se preporučenim brzinama protjecanja. Korekcije su provode sve dok je razlika protoka veća od $0,2 \text{ m}^3/\text{min}$.

Vodoopskrbna mreža podijeljena je u tri prstena: ABHI, BEFGH i BCDE. Moguća je i bilo koja druga podjela, na pr.: ABCDEFGHI, ABHI i BCDE, uz uvjet da je svaka cijev uključena u barem jedan prsten.

Pad piezometarske linije izračunat je prema Hazen-Williams-ovoj jednadžbi s $C=100$. i označen s "s" u petom stupcu proračunske tablice. U svakoj cijevi izračunat je pad tlaka množenjem duljine cijevi s padom piezometarske linije "s" s predznakom koji određuje smjer tečenja.

Stupci 6 i 7 su na kraju zbrojeni, a pomoću njih izračunata korekcija Δ . Protoci koji su u cjevovodima koji ulaze u dva prstena su u jednom prstenu pozitivni, a u drugom negativni. Izračunata korekcija protoka raspodijeljena je na sve protoke u prstenu, uz uvažavanje predznaka. Cijevima koje su istodobno u dva prstena dodaju se obje korekcije.

Korekcije protoka unose se u slijedeći krug iteracije.

Hazen – Villiams-ova jednadžba:

$$V = 0,849 \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot S^{0,54}$$

gdje je:

- C faktor ovisan o relativnoj hrapavosti
- R hidraulički radijus, za okrugle cijevi $R = D/4$
- S nagib energetske linije

Nagib energetske linije može se izračunati iz:

$$S = \left(\frac{V}{0,849 \cdot C \cdot R^{0,63}} \right)^{1,85}$$

Darcy – Wisbach - (Colebrook-white)-ova jednadžba:

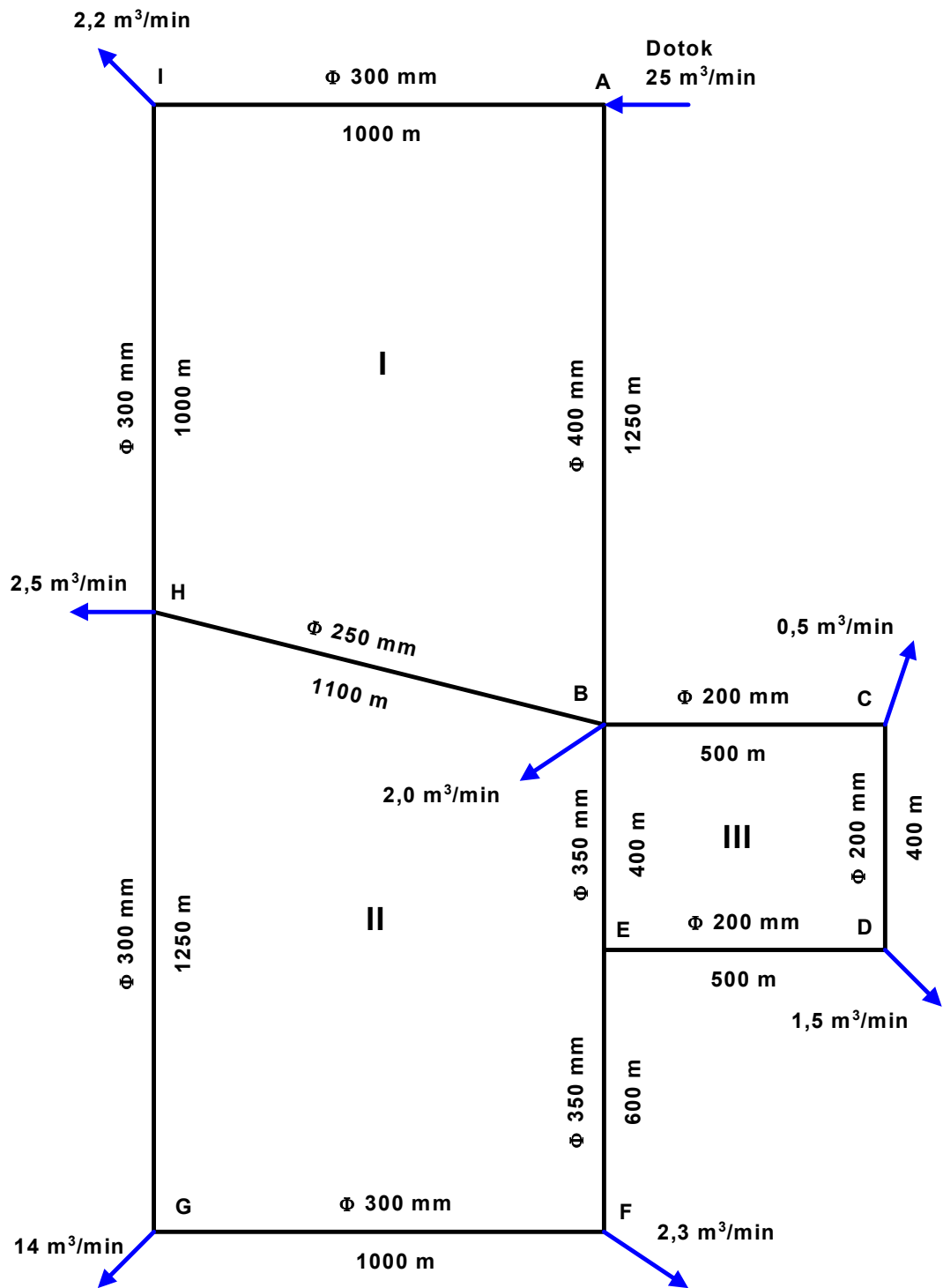
$$l = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} \qquad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3,71} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

Chezy – Manning-ova jednadžba:

Chezy-eva jedn.	Manning-ov C za Chezy-evu jedn.	Manning-ova jedn.
$v = C\sqrt{RS}$	$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$	$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} S^{1/2}$

Usporedne hrapavosti po Manning-u, Hazen-Williams-u i Darcy-Weisbach (Colebrook-White-u):

Vrsta cijevnog materijala	Manning-ov n	Hazen-Williams-ov C	Hrapavost po D-W (mm)
Azbest-cement	0.011	140	0.0015
Mjed	0.011	135	0.0015
Opeka	0.015	100	0.6
Lijevano-želejezo, nova cijev	0.012	130	0.26
<i>Beton</i>			
Čelična oplata	0.011	140	0.18
Drvena oplata	0.015	120	0.6
Centrifugirane cijevi	0.013	135	0.36
Bakar	0.011	135	0.0015
Naborani metal	0.022		45
Galvanizirani čelik	0.016	120	0.15
Staklo	0.011	140	0.0015
Olovo	0.011	135	0.0015
PVC	0.009	150	0.0015
<i>Čelik</i>			
Obloga od smola	0.010	148	0.0048
Nove bez obloge	0.011	145	0.045
Sa zakovičastim spojem	0.019	110	0.9
Wood stave	0.012	120	0.18



Prva iteracija

Prsten I Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
AB	13	0,40	1250	0,0110	13,75	1,058
BH	2	0,25	1100	0,0033	3,63	1,815
HI	-9,8	0,30	1000	-0,0260	-26,00	2,653
IA	-12	0,30	1000	-0,0380	-37,80	3,150
				SUMA:	-46,42	8,676

$$\Delta_I = -\frac{-46,42}{1,85(8,676)} = 2,9$$

Prsten II Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BE	7,5	0,35	400	0,0075	3,00	0,400
EF	7,0	0,35	600	0,0066	3,96	0,566
FG	4,7	0,30	1000	0,0067	6,68	1,423
GH	-9,3	0,30	1250	-0,0236	-29,54	3,177
HB	-2,0	0,25	1100	-0,0033	-3,63	1,815
				SUMA:	-19,53	7,381

$$\Delta_{II} = -\frac{-19,53}{1,85(7,381)} = 1,4$$

Prsten III Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BC	1,5	0,20	500	0,0058	2,91	1,937
CD	1,0	0,20	400	0,0028	1,10	1,110
DE	-0,5	0,20	500	-0,0008	-0,38	0,762
EB	-7,5	0,35	400	-0,0075	-3,00	0,400
				SUMA:	0,63	4,209

$$\Delta_{III} = -\frac{0,63}{1,85(4,209)} = -0,1$$

Druga iteracija

Prsten I Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
AB	15,9	0,40	1250	0,0157	19,65	1,236
BH	3,5	0,25	1100	0,0094	10,34	2,954
HI	-6,9	0,30	1000	-0,0136	-13,60	1,971
IA	-9,1	0,30	1000	-0,0227	-22,70	2,495
SUMA:					-6,31	8,656

$$\Delta_I = -\frac{-6,31}{1,85(8,656)} = 0,4$$

Prsten II Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BE	9,0	0,35	400	0,0105	4,20	0,467
EF	8,4	0,35	600	0,0093	5,58	0,664
FG	6,1	0,30	1000	0,0108	10,80	1,770
GH	-7,9	0,30	1250	-0,0175	-21,88	2,769
HB	-3,5	0,25	1100	-0,0094	-10,34	2,954
SUMA:					-11,64	8,624

$$\Delta_{II} = -\frac{-11,64}{1,85(8,624)} = 0,7$$

Prsten III Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BC	1,4	0,20	500	0,0051	2,55	1,821
CD	0,9	0,20	400	0,0023	0,92	1,022
DE	-0,6	0,20	500	-0,0011	-0,55	0,917
EB	-9,0	0,35	400	-0,0105	-4,20	0,467
SUMA:					-1,28	4,227

$$\Delta_{III} = -\frac{-1,28}{1,85(4,227)} = 0,2$$

Treća iteracija

Prsten I Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
AB	16,9	0,40	1250	0,0165	20,63	1,265
BH	3,2	0,25	1100	0,0080	8,80	2,750
HI	-6,5	0,30	1000	-0,0122	-12,20	1,877
IA	-8,7	0,30	1000	-0,0209	-20,90	2,402
				SUMA:	-3,67	8,294

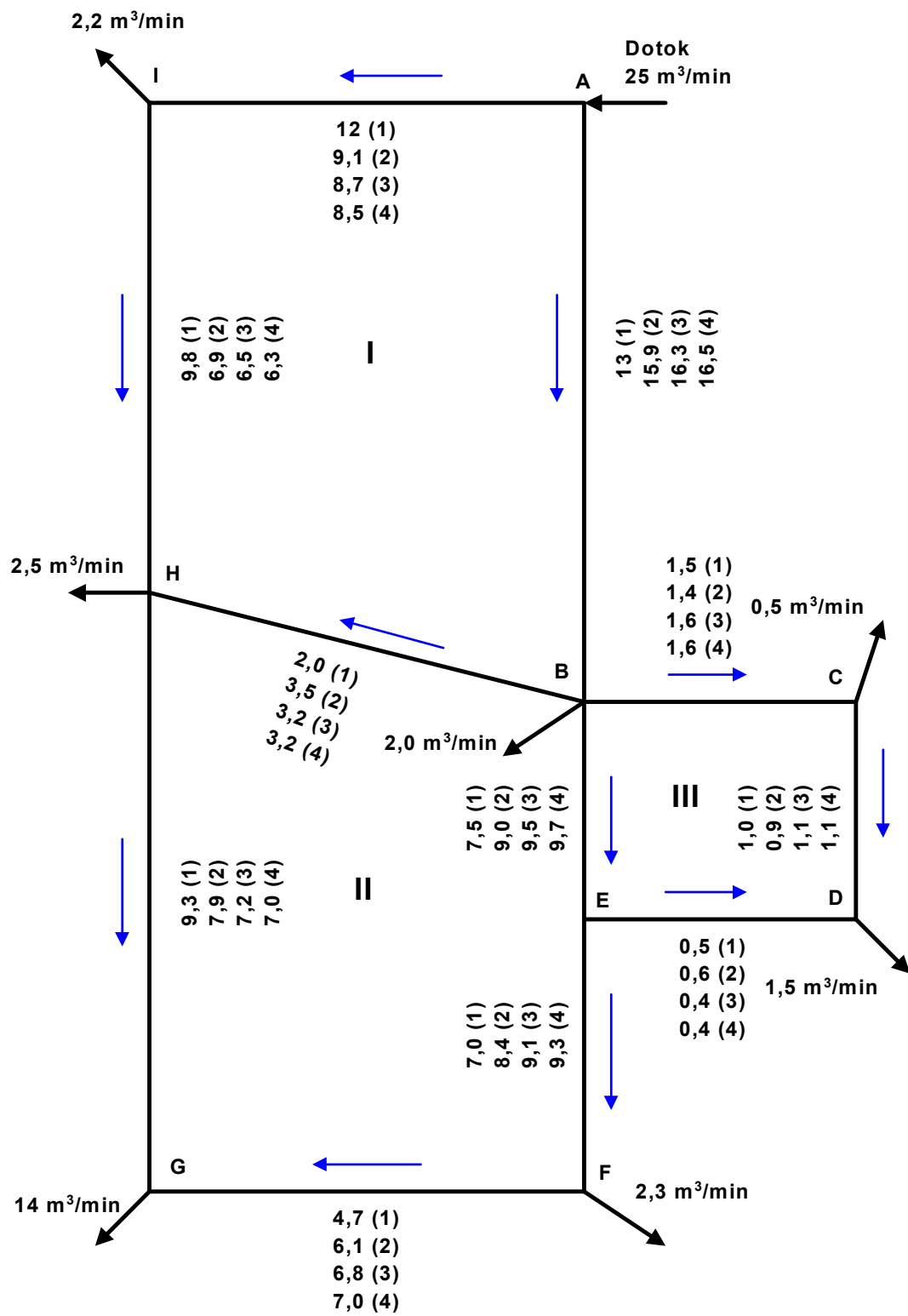
$$\Delta_I = -\frac{-3,67}{1,85(8,294)} = 0,2$$

Prsten II Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BE	9,5	0,35	400	0,0116	4,64	0,488
EF	9,1	0,35	600	0,0107	6,42	0,705
FG	6,8	0,30	1000	0,0132	13,20	1,941
GH	-7,2	0,30	1250	-0,0147	-18,38	2,552
HB	-3,2	0,25	1100	-0,0080	-8,80	2,750
				SUMA:	-2,92	8,436

$$\Delta_{II} = -\frac{-2,92}{1,85(8,436)} = 0,2$$

Prsten III Cijev	Protok (m ³ /min)	Promjer (m)	Duljina (m)	s	h (m)	h/Q m/(m ³ min)
BC	1,6	0,20	500	0,0066	3,30	2,063
CD	1,1	0,20	400	0,0033	1,32	1,200
DE	-0,4	0,20	500	-0,0005	-0,25	0,625
EB	-9,5	0,35	400	-0,0116	-4,64	0,488
				SUMA:	-0,27	4,376

$$\Delta_{III} = -\frac{-0,27}{1,85(4,376)} = 0,03$$



Zadatak:

Potrebno je projektirati vodoopskrbni sustav za novo naselje shematski prikazano na Sl.1.

Naselje je smješteno na vrlo blago nagnutoj riječnoj dolini u čijem se zaleđu uzdiže brdo.

Istraživanjima je utvrđen postojani silazni izvor kvalitetne podzemne pitke vode u blizini naselja.

Procijenjeni broj stanovnika za plansko razdoblje do 2020.god je:

$$M_k = 55000 \text{ st}$$

Specifična potrošnja vode za navedeno plansko razdoblje procjenjuje se na:

$$q_{sp} = 180 \text{ l/st/d}$$

Anketnim upitnikom ustanovljeno je da će industrija u navedenom planskom razdoblju vodu trošiti na slijedeći način:

$q_{IND,6-14h} = 22 \text{ l/s}$	$q_{IND,6-14h} = 22 \cdot 3600/1000 = 79,20 \text{ m}^3/\text{h}$
$q_{IND,14-22h} = 16 \text{ l/s}$	$q_{IND,14-22h} = 16 \cdot 3600/1000 = 57,60 \text{ m}^3/\text{h}$
$q_{IND,22-6h} = 10 \text{ l/s}$	$q_{IND,22-6h} = 10 \cdot 3600/1000 = 36,00 \text{ m}^3/\text{h}$

Istraživanjima je utvrđeno da je najmanja izdašnost zahvata oko 200 l/s pitke vode.

Vjerojatnost istovremene pojave jednog požara u naselju.

Gašenje požara u dvije faze:

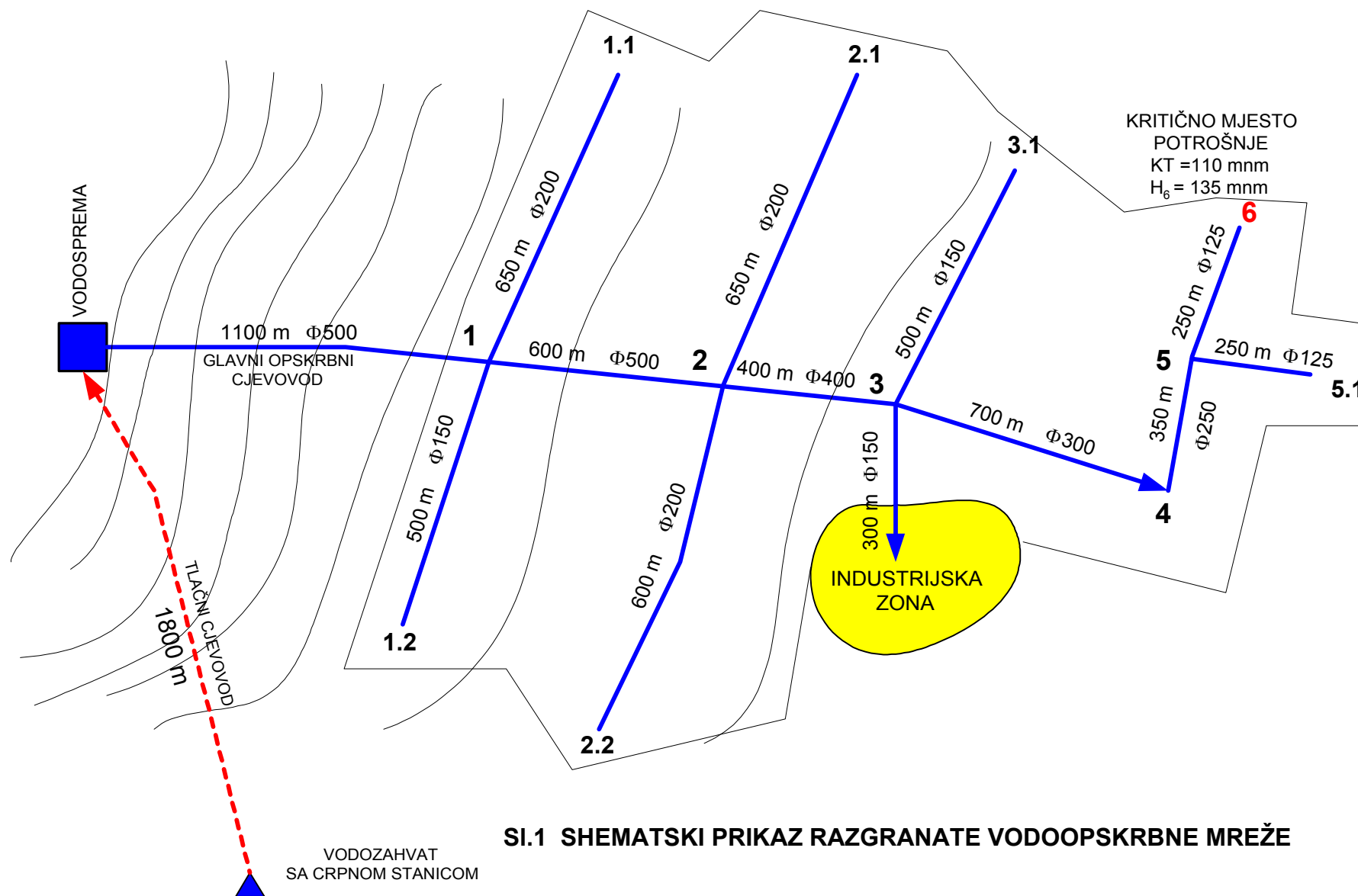
1. Faza: Lokalizacija požara u trajanju od jednog sata sa dva hidranta
2. Faza: Likvidacija požara u trajanju od dva sata s jednim hidrantom

Nazivni promjer hidranta je 80 mm

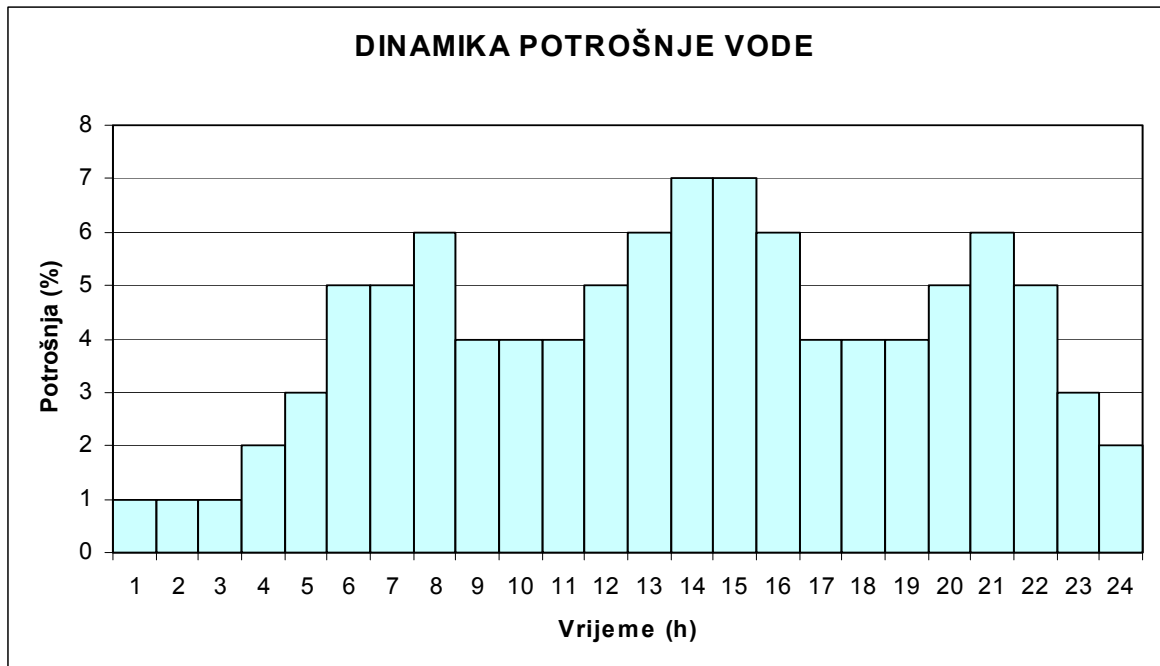
Izdašnost hidranta na mlaznici vatrogasnog crijeva je 3l/s

Najmanji dinamički tlak na hidrantu je 2,5 bara.

Za ljevano-željezne cijevi odabrana je pogonska hrapavost $k=0,4 \text{ mm}$ i koeficijent kinematičke viskoznosti za $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



SI.1 SHEMATSKI PRIKAZ RAZGRANATE VODOOPSKRBNJE MREŽE



Sl.2 Dinamika potrošnje vode za stanovništvo

Potrebno je:

a) odrediti količine mjerodavne za dimenzioniranje sustava

b) odrediti korisni volumen vodospreme (analitički i grafički)

c) odrediti najnižu kotu vode u vodospremi i nacrtati uzdužni profil piezometarske linije od vodospreme do čvora s najvećim gubitkom tlaka

1. POTROŠNJA VODE ZA STANOVNIŠTVO

Procijenjeni broj stanovnika za plansko razdoblje do 2020.god je:

$$M_k = 55000 \text{ st}$$

Specifična potrošnja vode za navedeno plansko razdoblje procjenjuje se na:

$$q_{\text{SPEC}} = 180 \text{ l/st/d}$$

Iz navedenog proizlazi da je srednja dnevna potrošnja za cijelo naselje:

$$Q_{\text{SR;DN}} = M_k \cdot q_{\text{SPEC}}$$

$$Q_{\text{SR;DN}} = 55000 \cdot 180/1000 = 9900 \text{ m}^3/\text{d}$$

Procjenjuje se najveće dnevno odstupanje u potrošnji od 50% pa je:

$$Q_{\text{MAX,DN}} = 1,5 \cdot Q_{\text{SR;DN}}$$

$$Q_{\text{MAX,DN}} = 1,5 \cdot 9900 = 14850 \text{ m}^3/\text{d}$$

Potrošnja vode tijekom dana varira prema predlošku karakterističnom za naselje od 55000 stanovnika i prikazana je dijagramom na Sl.2. Iz dijagrama je vidljivo da je najveća satna potrošnja vode između 13 i 15 sati i iznosi 7% od najveće dnevne potrošnje.

$$q_{\text{MAX,h}} = 0,07 \cdot 14850 = 1039,50 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{\text{MAX,h}} = 1039,5 \cdot 1000/3600 = 288,75 \text{ l/s}$$

2. POTROŠNJA VODE U INDUSTRIJI

Anketnim upitnikom ustanovljeno je da će industrija u navedenom planskom razdoblju vodu trošiti na slijedeći način:

$$\begin{array}{ll} q_{\text{IND},6-14\text{h}} = 22 \text{ l/s} & q_{\text{IND},6-14\text{h}} = 22 \cdot 3600/1000 = 79,20 \text{ m}^3/\text{h} = \\ q_{\text{IND},14-22\text{h}} = 16 \text{ l/s} & q_{\text{IND},14-22\text{h}} = 16 \cdot 3600/1000 = 57,60 \text{ m}^3/\text{h} \\ q_{\text{IND},22-6\text{h}} = 10 \text{ l/s} & q_{\text{IND},22-6\text{h}} = 10 \cdot 3600/1000 = 36,00 \text{ m}^3/\text{h} \end{array}$$

Ukupna dnevna potrošnja industrije:

$$Q_{\text{IND,DN}} = (79,20 + 57,60 + 36,00) \cdot 8 = 1382,4 \text{ m}^3/\text{d}$$

3. NAJVEĆA UKUPNA DNEVNA POTROŠNJA VODE

$$Q_{\text{MAX,DN,UK}} = 14850 + 1382,4 = 16232,4 \text{ m}^3/\text{d}$$

Srednji protok vode za dan s najvećom potrošnjom je:

$$\begin{array}{l} q_{\text{SR}} = 16232,4 \cdot 1000 / (24 \cdot 3600) = 187,88 \text{ l/s} \\ q_{\text{SR}} = 16232,4 / 24 = 676,35 \text{ m}^3/\text{h} \end{array}$$

Ovako proračunatu najveću dnevnu potrošnju trebalo bi osigurati iz postojećeg zahvata vode.

Istraživanjima je utvrđeno da je najmanja izdašnost zahvata oko 200 l/s pitke vode. To znači da je cjelodnevnim crpljenjem moguće zadovoljiti potrebe potrošača u danu najveće potrošnje.

4. POTREBNE KOLIČINE VODE ZA GAŠENJE POŽARA

Ove su količine propisne posebnim propisima koji u obzir uzimaju veličinu naselja, način izgradnje (vrste građevnog materijala) i način gašenja požara.

U konkretnom slučaju propisano je:

Vjerojatnost istovremene pojave jednog požara u naselju.

Gašenje požara u dvije faze:

- 1. Faza: Lokalizacija požara u trajanju od jednog sata sa dva hidranta**
- 2. Faza: Likvidacija požara u trajanju od dva sata s jednim hidrantom**

Nazivni promjer hidranta je 80 mm

Izdašnost hidranta na mlaznici vatrogasnog crijeva je 3l/s

Najmanji dinamički tlak na hidrantu je 2,5 bara.

Iz navedenog proizlazi da je za gašenje požara, pored vode koja se troši za potrebe stanovništva i industrije, potrebno osigurati:

1. Faza: $2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 3600/1000 = 21,6 \text{ m}^3$

2. Faza: $1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3600/1000 = 21,6 \text{ m}^3$

Ukupno: $43,2 \text{ m}^3$

Ova količina vode mora se držati spremnom u slučaju pojave požara, kao dio korisnog volumena vodospreme.

5. PRORAČUN KORISNOG VOLUMENA VODOSPROME

Korisni volumen vodospreme određen je dinamikom crpljenja vode u spremnik, dinamikom trošenja, te dijelom volumena vode koji se drži u pričuvi.

U konkretnom slučaju je izdašnost izvora vode takva da je vodu potrebno crpiti cijeli dan. U slučaju kada je izdašnost izvora mnogo veća od srednje satne potrošnje moguće je ostvariti različite režime crpljenja vode (s prekidima u crpljenju), sve u cilju rada u povoljnim tarifnim režimima potrošnje električne energije.

U Tabl.1 je prikazan proračun korisnog volumena vodospreme. Na temelju predviđene varijacije potrošnje u koraku od jednog sata i konstantnog crpljenja, proračunati su viškovi i manjkovi vode u pojedinim vremenskim odsječcima. Sumiranjem viškova i manjkova proračunat je volumen vode u vodospremi. Pri tom su dobivene pozitivne i negativne vrijednosti volumena. Dobivene su negativne vrijednosti jer proračun teče od pretpostavke potpuno prazne vodospreme. Volumen vodospreme dobije se zbrajanjem apsolutnih vrijednosti najvećeg viška i manjka vode u vodospremi.

Sati od-do	P O T R O Š N J A				Dotok m ³	Višak dotoka m ³	Manjak dotoka m ³	Volumen vode u vodospremi m ³	Sum.volumen crpljenja m ³	Sum. volumen trošenja m ³
	%	Stanovnici m ³ /h	Industrija m ³ /h	Ukupno m ³ /h						
0-1	1	148,50	36,00	184,50	676,35	491,85		491,85	676,35	184,50
1-2	1	148,50	36,00	184,50	676,35	491,85		983,70	1352,70	369,00
2-3	1	148,50	36,00	184,50	676,35	491,85		1475,55	2029,05	553,50
3-4	2	297,00	36,00	333,00	676,35	343,35		1818,90	2705,40	886,50
4-5	3	445,50	36,00	481,50	676,35	194,85		2013,75	3381,75	1368,00
5-6	5	742,50	36,00	778,50	676,35		-102,15	1911,60	4058,10	2146,50
6-7	5	742,50	79,20	821,70	676,35		-145,35	1766,25	4734,45	2968,20
7-8	6	891,00	79,20	970,20	676,35		-293,85	1472,40	5410,80	3938,40
8-9	4	594,00	79,20	673,20	676,35	3,15		1475,55	6087,15	4611,60
9-10	4	594,00	79,20	673,20	676,35	3,15		1478,70	6763,50	5284,80
10-11	4	594,00	79,20	673,20	676,35	3,15		1481,85	7439,85	5958,00
11-12	5	742,50	79,20	821,70	676,35		-145,35	1336,50	8116,20	6779,70
12-13	6	891,00	79,20	970,20	676,35		-293,85	1042,65	8792,55	7749,90
13-14	7	1039,50	79,20	1118,70	676,35		-442,35	600,30	9468,90	8868,60
14-15	7	1039,50	57,60	1097,10	676,35		-420,75	179,55	10145,25	9965,70
15-16	6	891,00	57,60	948,60	676,35		-272,25	-92,70	10821,60	10914,30
16-17	4	594,00	57,60	651,60	676,35	24,75		-67,95	11497,95	11565,90
17-18	4	594,00	57,60	651,60	676,35	24,75		-43,20	12174,30	12217,50
18-19	4	594,00	57,60	651,60	676,35	24,75		-18,45	12850,65	12869,10
19-20	5	742,50	57,60	800,10	676,35		-123,75	-142,20	13527,00	13669,20
20-21	6	891,00	57,60	948,60	676,35		-272,25	-414,45	14203,35	14617,80
21-22	5	742,50	57,60	800,10	676,35		-123,75	-538,20	14879,70	15417,90
22-23	3	445,50	36,00	481,50	676,35	194,85		-343,35	15556,05	15899,40
23-24	2	297,00	36,00	333,00	676,35	343,35		0,00	16232,40	16232,40
24 h	100	14850,00	1382,40	16232,40	16232,40					

Tabl.1 Proračun korisnog volumena vodospreme

$$V = | 2013,75 | + | -538,20 | = 2551,95 \text{ m}^3$$

Ovom volumenu potrebno je dodati pričuvni volumen. U ovom slučaju pričuvni se volumen odnosi samo na vodu potrebnu za gašenje požaru.

$$V_K = 2551,95 + 43,20 = 2595,15 \text{ m}^3$$

Do istog se rezultata može doći grafičkim putem koji je prikazan na Sl.3. Volumen spremnika predstavlja zbroj apsolutnih vrijednosti najvećih odstupanja između linije punjenja vodospreme i trošenja vode.

6. PRORAČUN VODOOPSKRBNNE MREŽE

U konkretnom slučaju predviđena je izgradnja granate vodoopskrbne mreže.

Na Sl.1 prikazana je mreža cjevovoda s pripadnim duljinama.

Mjerodavni protoci u mreži definiraju se iz najveće satne potrošnje stanovništva i industrije, uz dodatak protupožarnih protoka.

Najveći protupožarni protok je 6 l/s i predstavlja istovremeni rad dva hidranta svaki izdašnosti od 3 l/s. Najveći satni protok za stanovništvo je:

$$q_{\text{MAX,h}} = 288,75 \text{ l/s}$$

U isto vrijeme je najveći protok za industriju:

$$q_{\text{MAX,IND}} = 22 \text{ l/s}$$

Glavni opskrbnim cjevovodom (V-1), teče u satu najveće potrošnje:

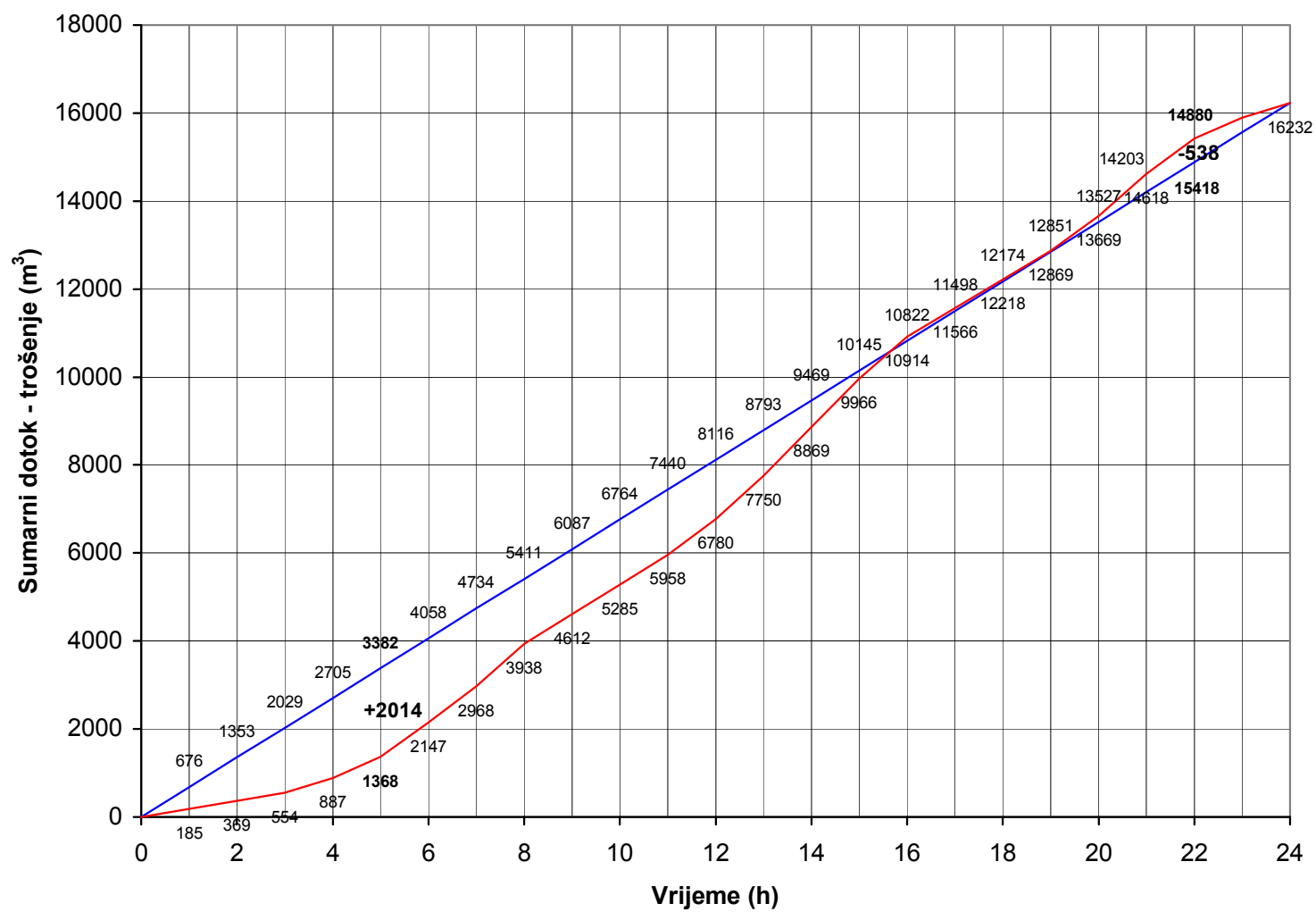
$$q_{\text{MAX,V-1}} = 288,75 + 22 + 6 = 316,75 \text{ l/s}$$

Ovaj dotok dijeli se prema potrošačima kroz vodoopskrbnu mrežu. Potrošnja, odnosno mjerodavni protok za dimenzioniranje mreže, može se izračunati za svaku dionicu mreže na više načina:

- poznavanjem vrste i broja potrošača uz svaku dionicu (najtočniji pristup)
- linearnim uprosječivanjem potrošnje na jedinici duljine vodoopskrbne mreže
- uprosječivanjem potrošnje po udjelu pripadne naseljene površine uz dionicu

Protoci koji se troše koncentrirano (industrija i gašenje požara) tretiraju se kao tranzitni protoci do mjesta potrošnje.

SI.2 GRAFIČKI PRIKAZ PRORAČUNA VOLUMENA VODOSPHEME



U konkretnom slučaju koristi se pristup linearnog uprosječivanja potrošnje. Najveći satni protok dijeli se linearno na cijelu vodoopskrbnu mrežu:

$$q_{LIN} = q_{MAX,h} / \sum L_i$$

gdje su L_i duljine dionica na kojima se troši voda. Zbroj duljina dionica na kojima se troši voda je u konkretnom slučaju 5450 m, pa je tada:

$$q_{LIN} = 288,75/5450 = 0,0530 \text{ l/s/m}$$

Proračun vodoopskrbne mreže prikazan je u Tabl.2.

Mjerodavni protoci za dimenzioniranje završnih (slijepih) grana određuju se isključivo na temelju vlastitog protoka. Za ostale dijelove mreže, ovisno o smjeru proračuna, mora se vlastitom protoku dodati tranzitni protok uzvodnih ili nizvodnih dionica.

7. DIMENZIONIRANJE CIJEVI

Cijevi se dimenzioniraju na mjerodavni protok. Za odabranu vrstu cijevnog materijala određuje se pogonska hrapavost i mjerodavna temperatura za odabir kinematičkog koeficijenta viskoznosti.

Poprečni presjek cijevi određuje se na temelju prihvaćenog kriterija ekonomičnih brzina strujanja ($v = 1\text{-}2 \text{ m/s}$). Za odabrani profil cijevi, mjerodavni protok, hrapavost i kinematički koeficijent viskoznosti, iz tablica, prema Darcy-Weisbach-Colebrook-White-u određuje se pad piezometarske linije. Točnije i brže, do istih se podataka može doći primjenom gotovih računalnih kalkulatora (Na pr. FLOW-MASTER od Haested Methods-a)

Za lijevano-željezne cijevi odabrana je pogonska hrapavost $k=0,4 \text{ mm}$ i koeficijent kinematičke viskoznosti za 10 °C , $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

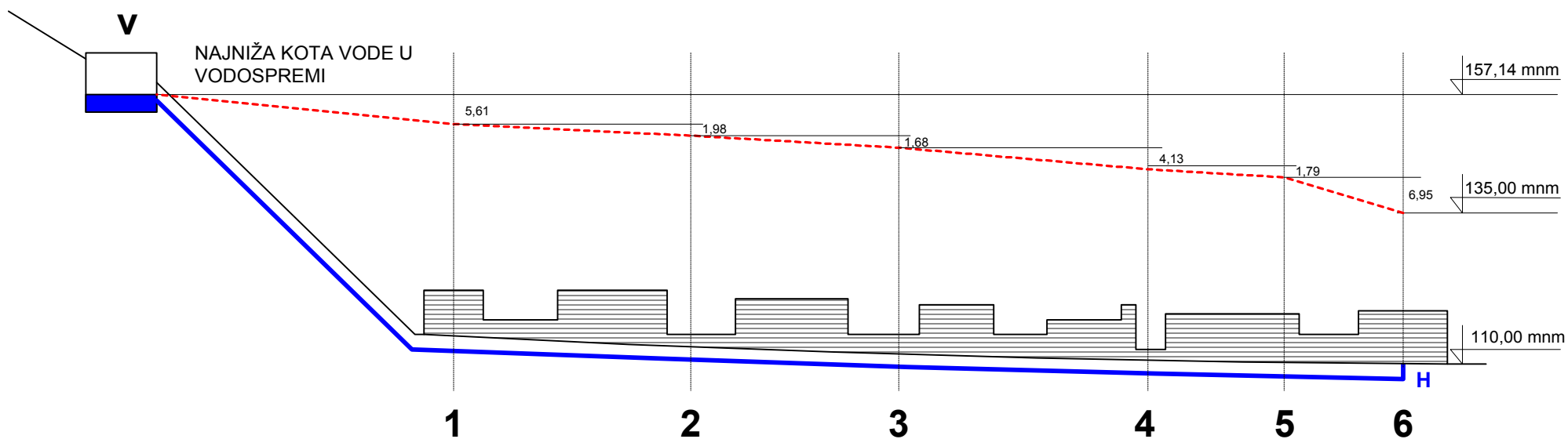
8. ODREĐIVANJE NAJNIŽE KOTE VODE U VODOSPREMIMA

Najugroženiji potrošač u vodoopskrbnom sustavu je onaj koji ima najniži raspoloživi dinamički tlak. Logično je da je to onaj potrošač koji je:

**smješten na najvišoj koti, ili
najudaljeniji od spremnika, ili
ima posebne zahtjeve na visinu izljevskog tlaka.**

Često je moguće odmah po nekom od nabrojenih kriterija odabrati najugroženijeg potrošača, a nekad je potrebno napraviti nekoliko pokušaja proračuna.

U konkretnom slučaju pretpostavljeno je da je mjesto potrošnje prilično ravno, s niskim tipom izgradnje (najviše P+2). U tom slučaju najvjerojatnije je najugroženiji potrošač onaj koji je najudaljeniji u vodoopskrbnoj mreži (čvor 6 ili 5.1)



- 6** NAJUGROŽENIJI POTROŠAĆ
- H** HIDRANT
- TLAČNA (PIEZOMETARSKA) LINIJA

SI.3 PIEZOMETARSKA LINIJA OD VODOPREME DO NAJUGROŽENIJEG POTROŠAĆA

U čvoru 6, je kota terena 110,00 mnm. Mjerodavni tlak u mjestu potrošnje je tlak potreban za gašenje požara 2,5 bara, jer isti nadmašuje geodetsku visinu objekata i potrebni izljevni tlak u domaćinstvima od 0,5 bara. Dakle, u čvoru 6, mjerodavna kota piezometarske linije je na:

$$H_6 = 110,00 + 25,00 = 135,00 \text{ mnm}$$

Ukupni gubitak tlaka do čvora 6 moguće je za pretpostavljeni režim potrošnje izračunati sumiranjem gubitaka tlaka u dionicama koje slijede najkraći put do čvora 6.

Na Sl.1 je evidentno da je to potez koji definiraju čvorovi: V – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6.

Iz Tabl.2 moguće je očitati gubitke tlaka na spomenutim dionicama tako da je sumarni gubitak tlaka:

$$\Sigma \Delta h_{V-6} = 5,61 + 1,98 + 1,68 + 4,13 + 1,79 + 6,95 = 22,14 \text{ mVS.}$$

Najniža kota vode u vodospremi mora biti jednaka ili veća od:

$$H_{V,MIN} = 135,00 + 22,14 = 157,14 \text{ mnm}$$

Uzdužni profil piezometarske linije od vodospreme do čvora 6 prikazan je shematski na Sl.3

CRPNA STANICA

Crpna stanica nalazi se izvan naselja neposredno iznad zahvata vode.
Crpna stanica radi 24h/dan.

Potrebni najveći kapacitet $Q_{\max dn}/24 = 16232,40/24 = 676,35 \text{ m}^3/\text{h}$

$$676,35 \cdot 1000/3600 = 187,875 \text{ l/s} = 188 \text{ l/s}$$

Zahvat vode je kopani bunar.

Voda se crpi centrifugalnom dvostepenom visokotlačnom crpkom.
Jedna crpka je radna, a druga je u pričuvi.

Tlačni i usisni cjevovod je od nodularnog lijeva, $k = 0,4 \text{ mm}$

Prema podacima iz prethodnog proračuna i skice slijedi:

$$H_{\text{gus}} = 92,00 - 86,00 = 6,00 \text{ m}$$

$$H_{\text{gtl}} = 161,00 - 92,00 = 69,00 \text{ m}$$

$$H_{\text{g}} = 161,00 - 86,00 = 75,00 \text{ m}$$

Manometarska visina dizanja vode određena je jednadžbom:

$$H_{\text{man}} = H_{\text{g}} + \Sigma \Delta H_{\text{us}} + \Sigma \Delta H_{\text{tl}}$$

Brzine protjecanja vode na usisnom i tlačnom cjevovodu za mjerodavni protok:

$$V_{\text{us}} = \frac{0,188}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,45^2} = 1,18 \text{ m/s}$$

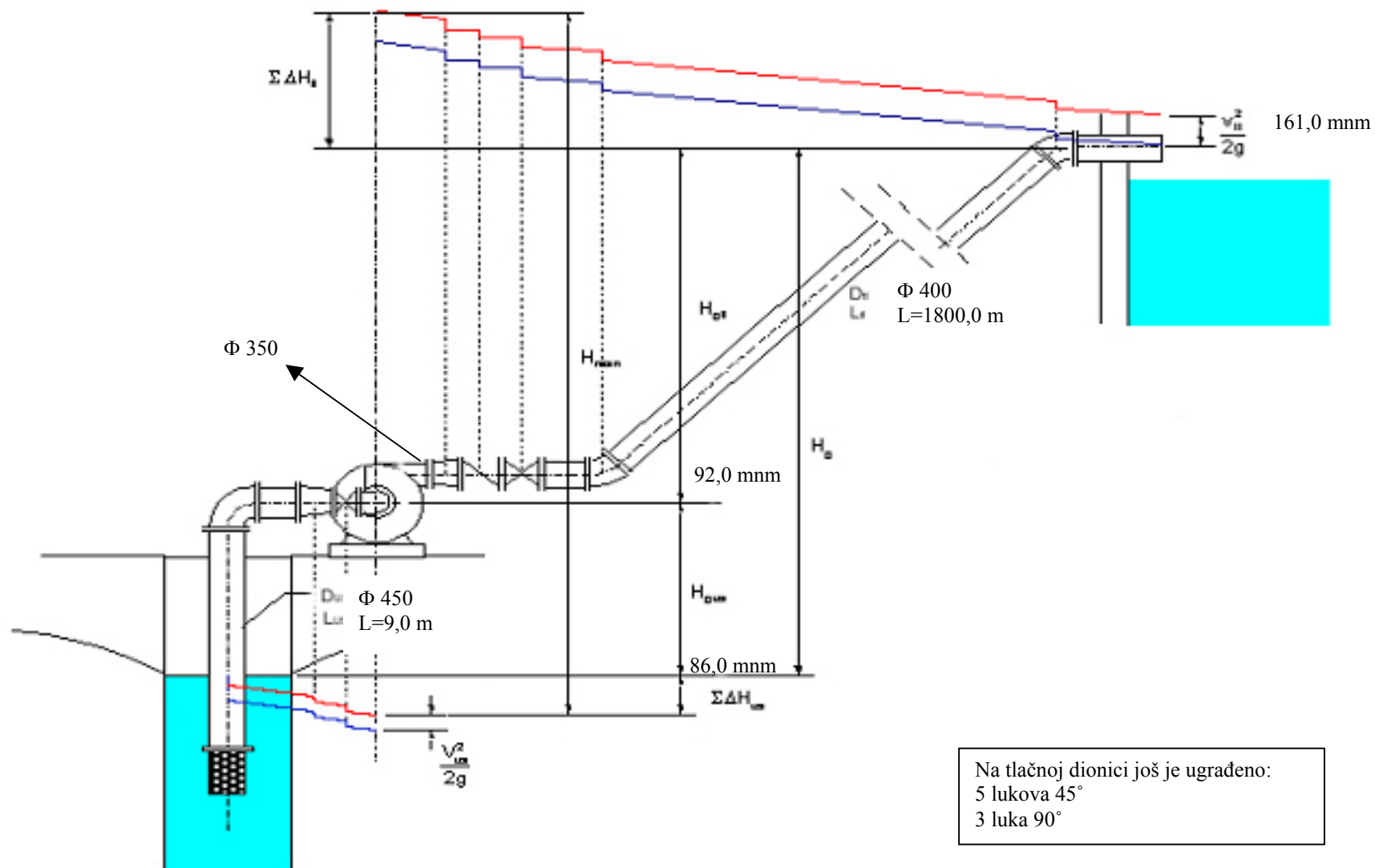
$$\frac{v_{\text{us}}^2}{2g} = \frac{1,18^2}{2 \cdot 9,81} = 0,071 \text{ m}$$

$$V_{\text{tl}} = \frac{0,188}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,4^2} = 1,50 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_{\text{tl}}^2}{2g} = \frac{1,50^2}{2 \cdot 9,81} = 0,115 \text{ m}$$

$$V_{\text{cr}} = \frac{0,188}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,35^2} = 1,95 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_{\text{cr}}^2}{2g} = \frac{1,95^2}{2 \cdot 9,81} = 0,194 \text{ m}$$



Proračun gubitaka tlaka u usisnom cjevovodu:

a) linijski gubici tlaka

iz tablica:

Za $\Phi 450$ i $Q = 0,188 \text{ m}^3/\text{s}$

$l = 0,0031$

$L_{us} = 9,0 \text{ m}$

$h_{lin.us} = 0,0031 \cdot 9,0 = 0,028 \text{ m}$

b) lokalni gubici tlaka

Gubitak tlaka na usisnoj košari $0,3 \cdot \frac{v_{us}^2}{2g}$

Gubitak tlaka na luku 90° $0,2 \cdot \frac{v_{us}^2}{2g}$

Ukupno: $0,5 \cdot \frac{v_{us}^2}{2g} = 0,5 \cdot 0,071 = 0,036 \text{ m}$

Gubitak tlaka na otvorenom zasunu $0,1 \cdot \frac{v_{cr}^2}{2g}$

Gubitak tlaka na smanjenju profila 450/350 $0,04 \cdot \frac{v_{cr}^2}{2g}$

Ukupno: $0,14 \cdot \frac{v_{cr}^2}{2g} = 0,14 \cdot 0,194 = 0,027 \text{ m}$

Lokalni gubici tlaka ukupno: $0,036 + 0,027 = 0,063 \text{ m}$

Ukupni gubici tlaka na usisnom cjevovodu: $0,028 + 0,063 = 0,091 \text{ m}$

$\Sigma \Delta H_{us} = 0,091 \text{ m}$

Proračun gubitaka tlaka u tlačnom cjevovodu:

a) linijski gubici tlaka

iz tablica:

$$\text{Za } \Phi 400 \text{ i } Q = 0,188 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$I = 0,0058$$

$$L_{tl} = 1800,0 \text{ m}$$

$$h_{lin.tl} = 0,0058 \cdot 1800,00 = 10,440 \text{ m}$$

b) lokalni gubici tlaka

$$\text{Gubitak tlaka na povratnom ventilu} \quad 2,5 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$\text{Gubitak tlaka na otvorenom zasunu} \quad 0,1 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$\text{Gubitak tlaka na luku } 90^\circ \quad 3 \cdot 0,2 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$\text{Gubitak tlaka na luku } 45^\circ \quad 7 \cdot 0,15 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$\text{Gubitak tlaka na izlazu} \quad 1 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g}$$

$$\text{Ukupno:} \quad 5,25 \cdot \frac{v_{tl}^2}{2g} = 5,25 \cdot 0,115 = 0,604 \text{ m}$$

Gubitak tlaka na

$$\text{Povećanje profila 350/400} \quad \frac{0,4(v_1 - v_2)^2}{2g} = \frac{0,4 \cdot (1,95 - 1,50)^2}{2 \cdot 9,81} = 0,004 \text{ m}$$

$$\text{Lokalni gubici tlaka ukupno:} \quad 0,604 + 0,004 = 0,608 \text{ m}$$

$$\text{Ukupni gubici tlaka na tlačnom cjevovodu: } 10,440 + 0,608 = 11,048 \text{ m}$$

$$\Sigma \Delta H_{tl} = 11,048 \text{ m}$$

Suma ukupnih gubitaka tlaka na usisnom i tlačnom cjevovodu je:

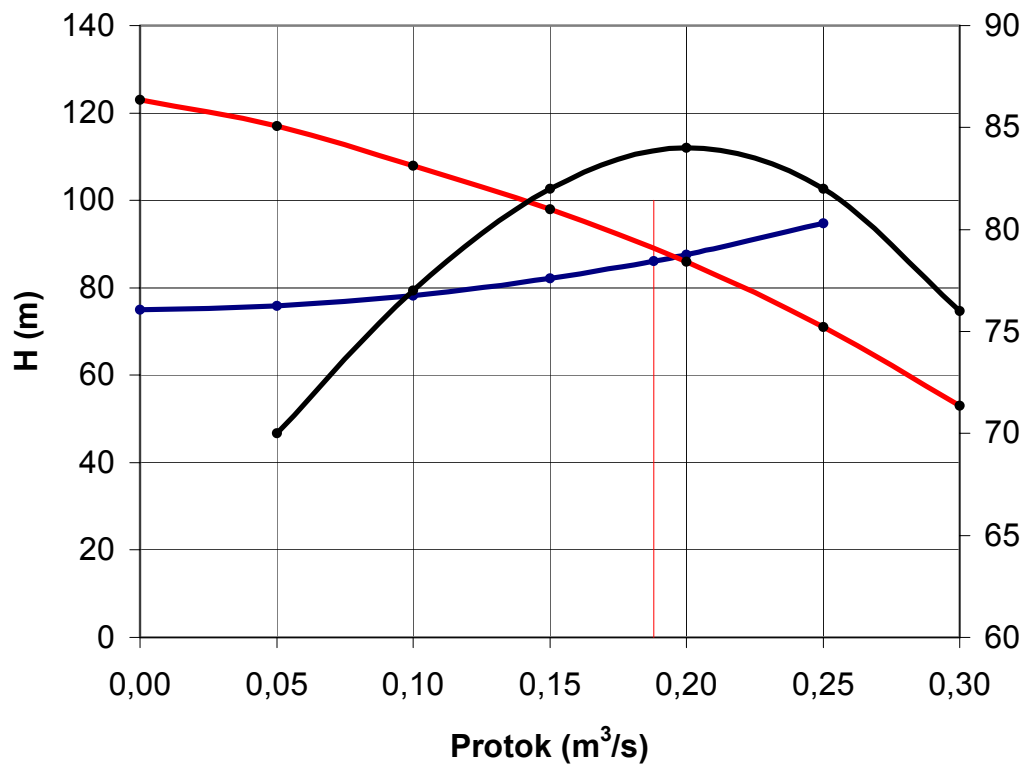
$$\Sigma \Delta H_{us} + \Sigma \Delta H_{tl} = 0,091 + 11,048 = \mathbf{11,139 \text{ m}}$$

Potrebno je izračunati manometarsku visinu za niz protoka, kako bi se konstruirala karakteristika sustava usisnog i tlačnog cjevovoda.

Q	Q/0,188	$(Q/0,188)^2$	$\Sigma(\Delta H_{us} + \Delta H_{tl})$	H _g	H _{man}
0,000	0,000	0,000	0,00	75,00	75,00
0,050	0,266	0,071	0,79	75,00	75,79
0,100	0,532	0,283	3,15	75,00	78,15
0,150	0,798	0,637	7,09	75,00	82,09
0,188	1,000	1,000	11,14	75,00	86,14
0,200	1,064	1,132	12,61	75,00	87,61
0,250	1,330	1,768	19,70	75,00	94,70

Karakteristike crpke preuzete su od proizvođača crpke:

Q	H	η
m ³ /s	(m)	(%)
0,00	123	-
0,05	117	70
0,10	108	77
0,15	98	82
0,20	86	84
0,25	71	82
0,30	53	76



Grafički prikaz određivanja radne točke crpke

S grafa očitano:

$Q = 0.195 \text{ m}^3/\text{s}$

$H_{\text{man}} = 87.0 \text{ m}$

$\eta = 84\%$

Zadatak:

Naselje sa slike opskrbljuje se vodom sa uređaja za kondicioniranje vode u čvoru 1. Stanovništvo je ravnomjerno priključeno duž cjevovoda vodovodne mreže. U čvoru 22 na vodovodnu mrežu priključen je industrijski pogon. Gradska vodosprema (čvor 23) se nalazi sa suprotne strane naselja u odnosu na uređaj za kondicioniranje. Kota preljeva vode u vodospremi je 446,5 m.n.m., a kota dna je 442,5 m.n.m.

Hrapavost cijevi je 0,1 mm.

Procijenjeni broj stanovnika iznosi:

$$M_k = 18000 \text{ stan}$$

Specifična potrošnja vode za navedeno plansko razdoblje procjenjuje se na:

$$q_{sp} = 317,5 \text{ l/st/d}$$

Koeficijenti neravnomjernosti potrošnje uzeti su iz tablice 3:

$K_d = 1,3$ koeficijent dnevne neravnomjernosti potrošnje

$K_h = 1,6$ koeficijent satne neravnomjernosti potrošnje

Zadana je maksimalna satna potrošnja industrijskog pogona:

$$q_{ind} = 31,2 \text{ l/s}$$

Porebno je dimenzionirati i hidraulički proračunati vodoopskrbni sustav naselja na slici koristeći se programskim paketom EPANET 2 uz uvjet da je:

- Maksimalni protok od uređaja za kondicioniranje prema naselju jednak 130,0 l/s
- Minimalni promjer cjevovoda unutar mreže 100 mm
- Minimalni dopušteni tlak u vodovodnoj mreži iznosi 2,5 bara
- U satu maksimalne potrošnje dogodila su se dva požara (u čvorovima 5 i 14) i za gašenje svakog je potrebno 20 l/s.



Rješenje:

Ukupna duljina mreže:

$$L = 4082,5 \text{ m}$$

Specifična potrošnja po metru dužnom cjevovoda iznosi:

$$q_0 = \frac{q_{\max,h}}{L} = \frac{137,6}{4082,5} = 0,034 \text{ l / s}$$

$$q_{\max,h,uk} = 208,8 \text{ l / s}$$

Cjelokupna potrošnja vode koncentrira se u čvorove. Prilikom određivanja čvorne potrošnje mora se voditi računa o vrst potrošača:

- potrošači koji su ravnomjerno raspoređeni u prostoru (stanovništvo)
- "točkasti" potrošači (industrija, količina potrebna za gašenje požara)

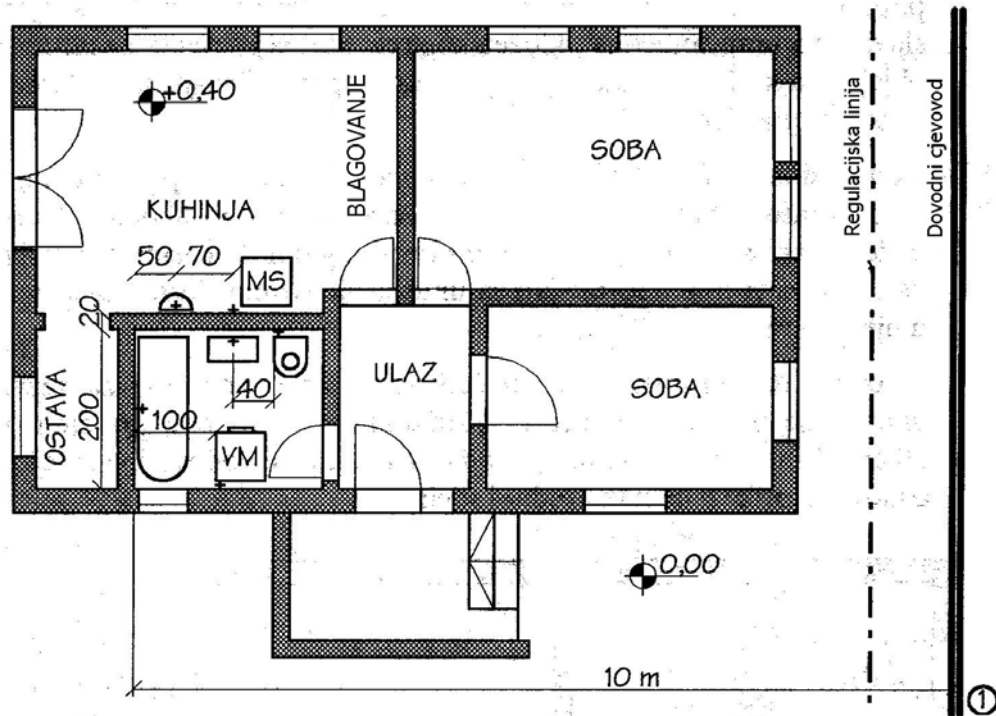
Čvorna potrošnja vode od stanovništva određena je kao zbroj polovina potrošnje vode iz dionica cijevi koje se spajaju u promatranom čvoru

Na osnovu poznatih protoka po dionicama pretpostavljaju se dimenzije cjevovoda, te se proračunom provjerava da li cjevovodi imaju odgovarajuću propusnu moć i da li su ispunjeni zadani uvjeti. Ako je potrebno vrši se korekcija dimenzija cjevovoda i ponavlja se proračun.

Proračun kućne vodoopskrbne mreže

Primjer 9:

U čvoru 1 ulične vodoopskrbne mreže priključena je jedan prizemni stambeni objekat. Tlocrt objekta dan je na slici. Kota dovodnog cjevovoda na mjestu priključka iznosi $-1,20$ m u odnosu na kotu terena.



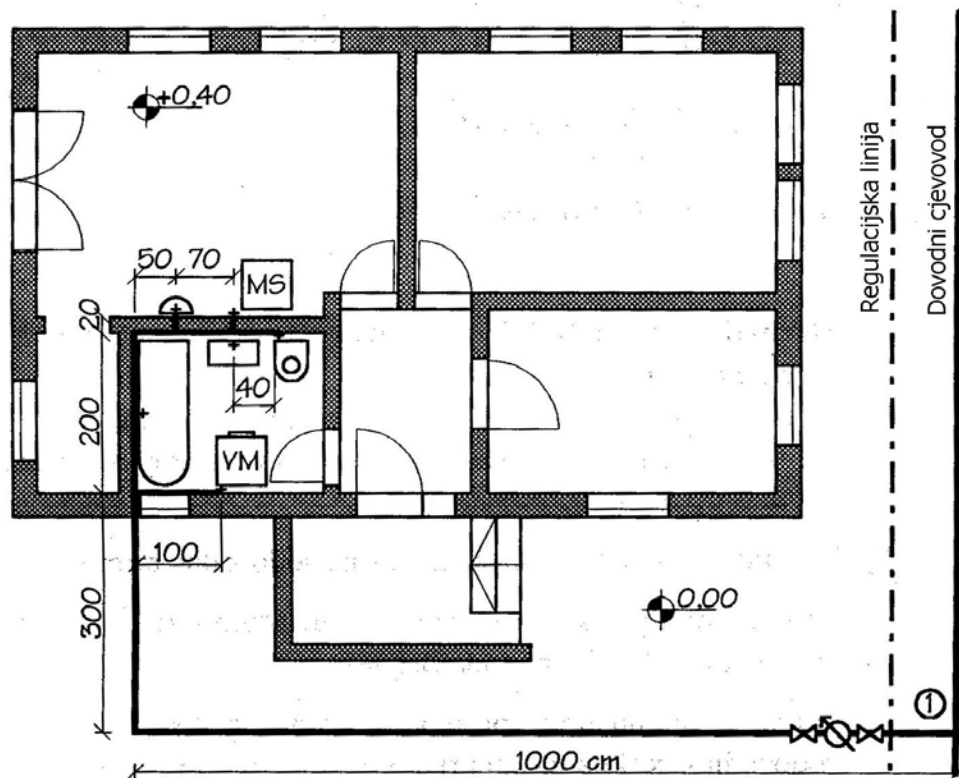
Napomena: na slici su sa križićem označena predviđena izljevnna mjesta

Potrebno je:

- skicirati shemu kućne vodoopskrbne mreže, do svakog izljevnoeg mjesta:
 - u kuhinji do: sudopera i perilica za posuđe
 - u kupaonici do: umivaonika, kade, vodokotlića i perilice rublja
- nacrtati aksonometrijsku shemu kućne vodoopskrbne mreže
- napraviti hidraulički proračun i dimenzionirati cijevi
- odrediti minimalnu potrebnu visinu pritiska u uličnom dovodnom cjevovodu na mjestu kućnog priključka

a) Kućna vodoopskrbna mreža služi za raspodjelu vode pod pritiskom do svih izljevnihi mjesta. Izvodi se od čeličnih pocinčanihi cijevi, polietilenskih cijevi, a koriste se i bakrene cijevi. Za spajanje slavina na umivaonicima, vodikotličima i drugim armaturama na objektima koji nisu uzidani i nepokretni, upotrebljavaju se metalne ili savitljive plastične cijevi.

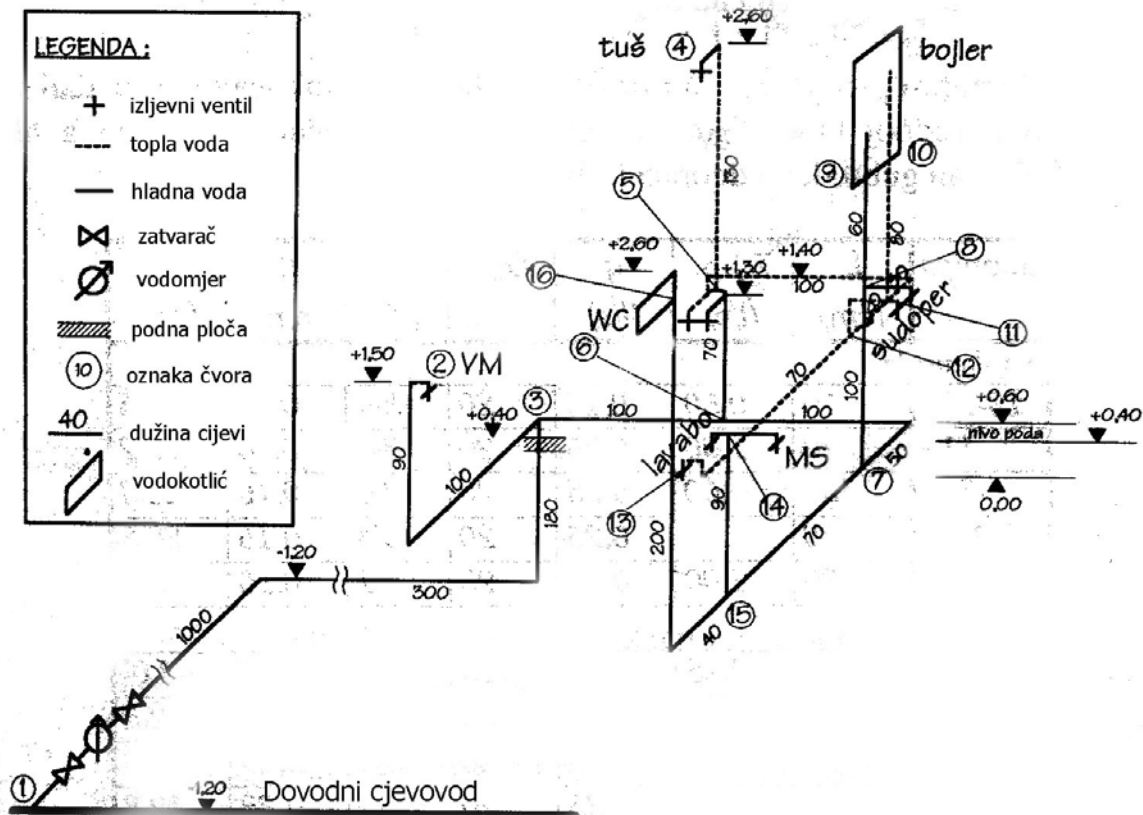
U ovom primjeru izabrane su čelične pocinčane cijevi. Horizontale su vođene po zidu, na 20 cm visine mjereno od nivoa poda. Shema kućnog vodoopskrbnog sustava prikazana je na slici:



Na spoju kućne vodoopskrbne mreže sa uličnim dovodnim cjevovodom, postavlja se vodomjer na 1,0 m od regulacijske linije (granica placa). Ispred i iza vodomjera postavljaju se zatvarači (zasuni) da bi se vodomjer mogao skidati (radi kontrole ispravnosti i baždarenja).

b) Kućna vodoopskrbna mreža se prikazuje aksonometrijskom shemom. Na njoj je prikazan svaki prolaz cijevi kroz zid ili međukatnu konstrukciju.

Aksonometrijska shema s upisanim kućne vodoopskrbne mreže sa upisanim dužinama cijevi, prikazana je na sljedećoj slici:



čvor	izljevno mjesto
2	perilica rublja
4	tuš (topla voda)
5	kada (topla voda)
8	sudoper
12	sudoper (topla voda)
13	perilica za posuđe + lavabo
14	lavabo (topla voda)
16	vodokotlić

c) Mjerodavni protoci za dimenzioniranje cijevi kućne vodoopskrbne mreže se određuju pomoću jednadžbe:

$$Q = 0,25\sqrt{\Sigma j.p.} \quad \text{l/s}$$

gdje $\Sigma j.p.$ predstavlja sumu jedinica potrošnje svih izljevniha mjesta nizvodno od razmatrane cijevi.

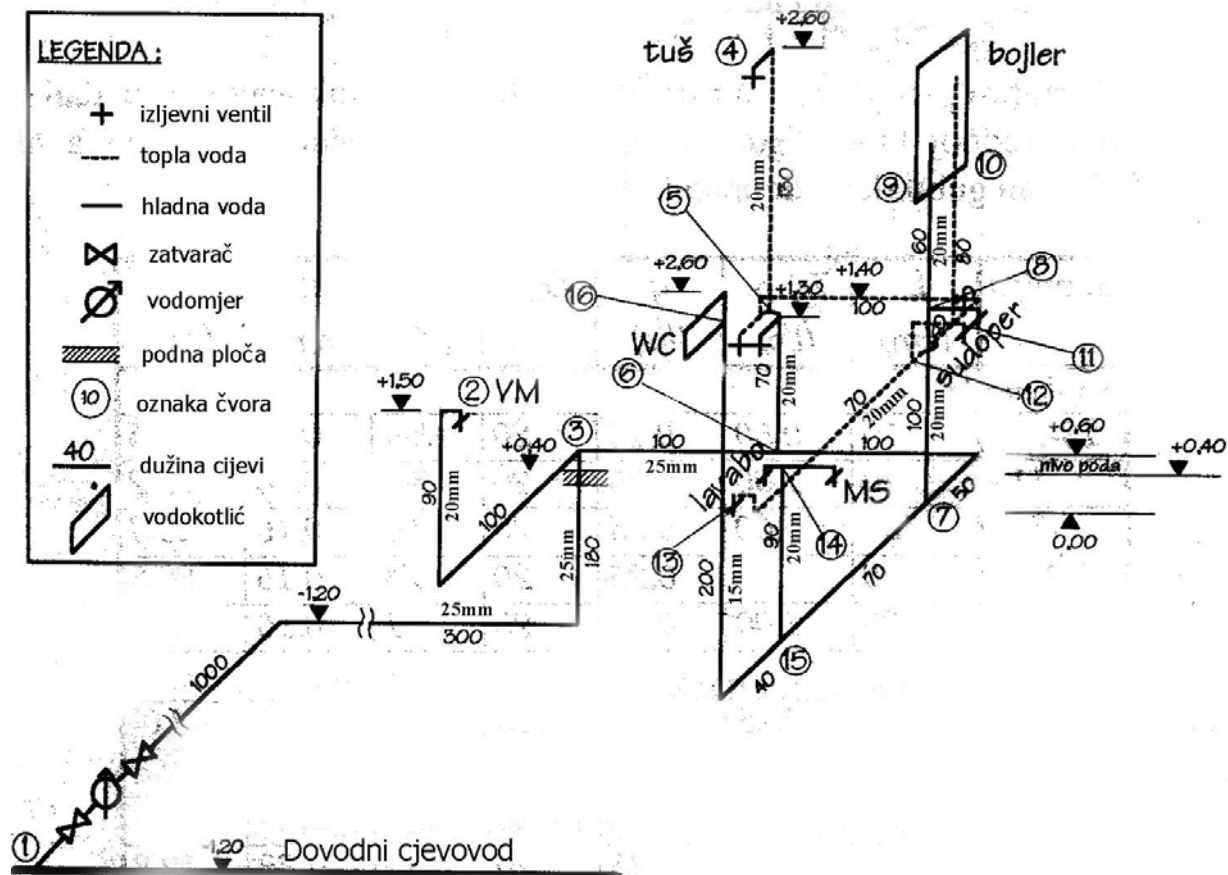
Rezultati proračuna za mrežu od čeličnih pocinčanih cijevi dati su u tablici, gdje su:

D_{usv} – usvojeni promjer cijevi

Δh_i – ukupan gubitak na dionici i

dionica	L (cm)	$\Sigma j.p.$ (l/s)	q (l/s)	D_{usv} (mm)	D_{usv} (")	I_E (m/m')	Δh_i (cm)
<i>Topla voda</i>							
13-12	70	0,50	0,18	20	3/4	0,08	5,6
12-11	20	1,00	0,25	20	3/4	0,16	3,2
4-5	130	1,00	0,25	20	3/4	0,16	20,8
5-11	130	1,00	0,25	20	3/4	0,16	20,8
11-10	80	2,00	0,35	25	1	0,10	8,0
<i>Hladna voda</i>							
16-15	240	0,25	0,13	15	1/2	0,20	48,0*
14-15	90	1,50	0,31	20	3/4	0,25	22,5
15-7	70	1,75	0,33	20	3/4	0,29	20,3
9-8	60	2,00	0,35	20	3/4	0,33	19,8
8-7	100	2,50	0,40	20	3/4	0,41	41,0
7-6	150	4,25	0,52	25	1	0,22	33,0
5-6	70	1,00	0,25	20	3/4	0,16	11,2
6-3	100	5,25	0,57	25	1	0,25	25,0
2-3	190	1,00	0,25	20	3/4	0,16	30,4
3-1	1480	6,25	0,63	25	1	0,32	473,6

Aksonometrijska shema kućne vodoopskrbne mreže sa dužinama i usvojenim promjerima cijevi prikazana je na slici:



zbir j,p.	q (l/s)	promjer cijevi											
		č	p	č	p	č	p	č	p	č	p	č	p
		15 *	16	20	20	25	25	32	30	40	40	50	50
0,5	0,18	0,39	0,15	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01					
1	0,25	0,78	0,29	0,16	0,09	0,05	0,03	0,01	0,01				
1,5	0,31	1,18	0,44	0,25	0,13	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01			
2	0,35	1,57	0,59	0,33	0,18	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01			
2,5	0,40	1,96	0,73	0,41	0,22	0,12	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01		
3	0,43	2,35	0,88	0,49	0,26	0,15	0,08	0,04	0,03	0,01	0,01		
4	0,50	3,13	1,18	0,66	0,35	0,20	0,11	0,05	0,04	0,02	0,01		
5	0,56			0,82	0,44	0,24	0,13	0,06	0,05	0,02	0,01	0,01	
6	0,61			0,98	0,53	0,29	0,16	0,08	0,06	0,02	0,01	0,01	
7	0,66			1,15	0,61	0,34	0,18	0,09	0,07	0,03	0,01	0,01	
8	0,70			1,31	0,70	0,39	0,21	0,10	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01
9	0,75			1,48	0,79	0,44	0,21	0,11	0,09	0,03	0,02	0,01	0,01
10	0,79			1,64	0,88	0,49	0,26	0,13	0,10	0,04	0,02	0,01	0,01
12	0,87			1,97	1,05	0,59	0,32	0,15	0,12	0,05	0,02	0,01	0,01
14	0,94			2,30	1,23	0,68	0,37	0,18	0,14	0,05	0,03	0,02	0,01
16	1,00					0,78	0,42	0,20	0,16	0,06	0,03	0,02	0,01
18	1,06					0,88	0,47	0,23	0,18	0,07	0,04	0,02	0,01
20	1,12					0,98	0,53	0,25	0,20	0,08	0,04	0,02	0,01
25	1,25					1,22	0,66	0,32	0,25	0,09	0,05	0,03	0,02
30	1,37					1,46	0,79	0,38	0,29	0,11	0,06	0,03	0,02
35	1,48							0,45	0,34	0,13	0,07	0,04	0,02
40	1,58							0,51	0,39	0,15	0,08	0,05	0,02
45	1,68							0,57	0,44	0,17	0,09	0,05	0,03
50	1,77							0,64	0,49	0,19	0,10	0,06	0,03
60	1,94							0,77	0,59	0,23	0,11	0,07	0,04
70	2,09							0,89	0,69	0,27	0,14	0,08	0,04
80	2,24							1,02	0,79	0,30	0,16	0,09	0,05
90	2,37							1,15	0,89	0,34	0,18	0,10	0,06
100	2,50									0,38	0,20	0,11	0,06
120	2,74									0,45	0,23	0,14	0,07
140	2,96									0,53	0,29	0,16	0,09
160	3,16									0,61	0,33	0,18	0,10
180	3,35									0,68	0,37	0,20	0,11
200	3,54									0,76	0,41	0,23	0,12
250	3,95											0,28	0,15
300	4,33											0,34	0,19

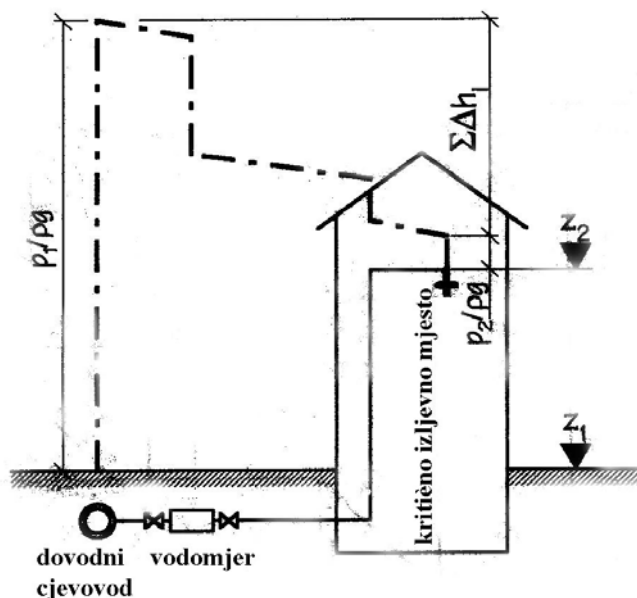
Tablica Gubici u metrima vodnog stupca na jedinicu duljine cjevovoda, uključujući otpore u koljenima, spojevima i ventilima, ali bez gubitaka na vodomjeru.

d) Najmanja potrebna visina na kućnom priključku određuje se primjenom Bernoulijeve jednadžbe (u kojoj se zanemaruje član kinetičke energije) koja se postavlja za priključno mjesto kućnog vodoopskrbnog sustava na ulični dovodni cjevovod i kritično izljevno mjesto:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \Sigma \Delta h_i$$

Bernoulijeva jednadžba trebala bi se odnositi na kotu osi cijevi, ali u inženjerskoj praksi je uobičajeno da se računa s kotom terena (umjesto s kotom osi cijevi), jer je dubina ukopavanja cijevi mala (1-1,5 m) u odnosu na visine tlakova u vodoopskrbnoj mreži.

Shematski prikaz Bernoulijeve jednadžbe dan je na slici:



gdje su:

- z_1 - kota terena (na priključku kućnog vodovoda)
- $p_1/\rho g$ - visina tlaka na priključku
- z_2 - kota kritičnog izljevno mjesto (u odnosu na kotu terena)
- $p_2/\rho g$ - potrebna visina tlaka vode na samom izljevnom mjestu
- $\Sigma \Delta h_i$ - suma hidrauličkih gubitaka od izljevno mjesto do presjeka 1 (linijski + lokalni)

U nastavku je prikazan detaljni hidraulički proračun za jedan od mogućih pteva vode: od uličnog dovodnog cjevovoda (čvor 1) do tuša (čvor 4). Bernoulijeva jednađžba za presjeke (u čvorovima) 1 i 4:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_4 + \frac{p_4}{\rho g} + \Sigma \Delta h_i + \Delta h_v + \Delta h_b$$

gdje su:

$\Sigma \Delta h_i$ – suma linijskih gubitaka po dionicama na putu od čvora 1 do 4

Δh_v – lokalni gubitak na vodomjeru

Δh_b – lokalni gubitak na bojleru

Potrebna visina tlaka za izljevno mjesto tuša iznosi:

$$\frac{p_4}{\rho g} = 4,5 \text{ m}$$

Lokalni gubici (Δh_{lok}):

- vodomjer: $\Delta h_v = 5 \text{ m}$
- bojler: Δh_b (zbog redukcije cijevi sa 20 mm na 15 mm) u bojler ulazi $Q = 0,35 \text{ l/s}$ (tablica-hidraulički proračun, dionica 8-9) kroz cijev $\varnothing 15 \text{ mm}$. Brzina tečenja kroz cijev 11-10 i 9-8 je:

$$v = 1,98 \text{ m/s}$$

Usvojeni su koeficijenti lokalnih gubitaka na ulazu i izlazu iz bojlera $\xi_{ul} = \xi_{iz} = 1,0$ tako da je lokalni gubitak na bojleru Δh_b :

$$\Delta h_b = (\xi_{ul} + \xi_{iz}) \frac{v^2}{2g} = 0,40 \text{ m}$$

Linijski gubici: od čvora 1 do čvora 4 (linija toppe vode):

$$\Sigma \Delta h_i = \Delta h_{4-5} + \Delta h_{5-11} + \Delta h_{11-10} + \Delta h_{9-8} + \Delta h_{8-7} + \Delta h_{7-6} + \Delta h_{6-3} + \Delta h_{3-1} = 6,42 \text{ m}$$

Konačno, minimalna potrebna visina pritiska u čvoru 1 ($z_1=0,0$ m):

$$\frac{p_1}{\rho g} = 2,6 + 4,5 + 6,42 + 5,0 + 0,40 = 18,92 \text{ m} \approx 19 \text{ m}$$

Kritično izljevno mjesto je ono za koje se dobija najveća potrebna visina tlaka na priključku $p_1/\rho g$. Kritično mjesto se mora u svakom slučaju posebno odrediti primjenom Bernoulijeve jednadžbe proračunom koji obuhvaća i druga izljevna mjesta koja bi mogla biti kritična. U nastavku je u obliku tablica prikazana vrijednost minimalne visine tlaka u čvoru 1 za različite puteve vode:

dionica 1-i	linijski gubici $\sum \Delta h_i$ (cm)	linijski gubici $\sum \Delta h_i$ (m)
1-16	473,6+25+33+20,3+48	6,00
1-14	473,6+25+33+20,3+22,5	5,74
1-13	473,6+25+33+41+19,8+8+3,2+5,6	6,09
1-12	473,6+25+33+41+19,8+8+3,2	6,04
1-8	473,6+25+33+41	5,73
1-4 (topla voda)	473,6+25+33+41+19,8+8+20,8+20,8	6,42
1-4 (hladna voda)	473,6+25+11,2+20,8	5,31
1-5	473,6+25+11,2	5,10
1-2	473,6+30,4	5,04

dionica 1-i	lokalni gubici $\sum \Delta h_{lok}$ (m)	$p_i / \rho g$ (m)	z_i (m)	$p_i / \rho g$ (m)
1-16	5	0,0	2,6	13,60
1-14	5	4,5	1,5	16,74
1-13	5+0,4	4,5	1,4	17,39
1-12	5+0,4	4,5	1,5	17,44
1-8	5	4,5	1,6	16,83
1-4 (topla voda)	5+0,4	4,5	2,6	18,92
1-4 (hladna voda)	5	4,5	2,6	17,41
1-5	5	4,5	1,3	15,90
1-2	5	4,5	1,5	16,04

Iz proračuna koji je prikazan u prethodnoj tablici prizlazi da je kritičan put od čvora 1 do čvora 4 8put tople vode) jer se za njega dobija najveća potrebna visina tlaka na kućnom priključku od 18,92 m. Ukoliko bi se proračun minimalne potrebne visine tlaka na priključku proveo samo na instalaciji hladne vode, tada bi kritičan čvor bio tuš (čvor 4), a minimalni tlak na priključku 17,41 m.

Ako u uličnoj vodoopskrbnoj mreži nije osiguran dovoljan tlak, može se postaviti hidrofor. Njegov zadatak je da poveća tlak u kućnoj vodoopskrbnoj mreži iznad raspoloživog.