

VODOVODI

1. OPŠTI POJMOVI

Pod vodovodima se, u širem smislu gledano, ne podrazumevaju samo cevovodi za transport i distribuciju voda, već i sva postrojenja i uređaji koji su u funkciji razmatranog vodosnabdevanja. Šta će, pored cevovoda, vodovod da sadrži zavisi od namene vodovoda, vrste i mesta izvorišta – vodozahvata i drugih uticajnih faktora. U opštem slučaju, pored cevovoda, vodovod čine i vodozahvatni objekat, pumpna ili pumpne stanice, postojenja za prečišćavanje i pripremu vode, rezervoari, uređaji za zaštitu od hidrauličkog udara i dr.

1.1. KLASIFIKACIJA VODOVODA (SISTEMA VODOSNABDEVANJA)

Prema nameni vode razlikuju se:

- vodovodi za pijaću vodu (regionalni, gradski, seoski i kućni vodovodi)
- vodovodi za industrijsku (tehnološku) vodu
- vodovodi za protivpožarno snabdevanje
- vodovodi za polivanje zelenih gradskih površina i pranje ulica
- vodovodi za navodnjavanje
- višefunkcionalni vodovodi.

Gradski vodovodi su po pravilu višefunkcionalni, jer pored obezbeđenja potreba za pijaćom vodom, obezbeđuju i vodu za gašenje požara, a vrlo često, što je dugoročno gledano potpuno neekonomično, obezbeđuju i vodu za polivanje zelenih površina i pranje ulica, pa i potrebe industrijske vode koja ne zahteva kvalitet vode za piće.

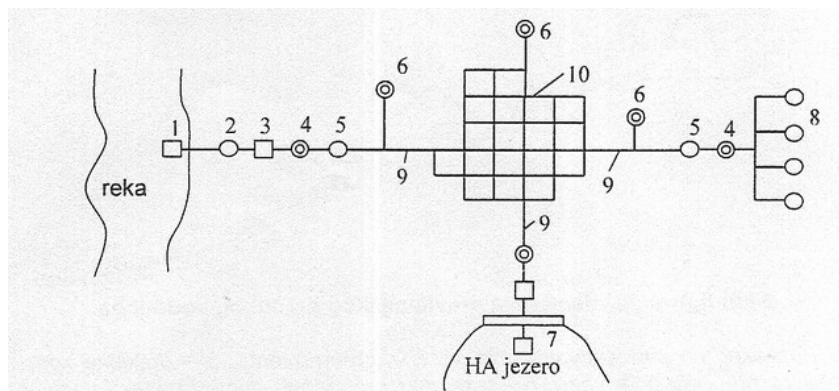
Prema prirodi izvora vodosnabdevanjavodovodi mogu biti:

- sa površinskim izvorima vodosnabdevanja (reke i jezera)
- sa podzemnim izvorima vodosnabdevanja (bunarski) i
- sa obe vrste izvora (i sa površinskim i sa podzemnim izvorima vodosnabdevanja).

Veći gradski vodovodi obično se snabdevaju sa više različitih izvorišta. Kao ilustracija ovoga, na sl.1.1 šematski je prikazan jedan gradski vodovod sa tri izvorišta sirove vode (reke, jezera i bunara). Na slici je (pozicija 10) prikazana samo prstenasta gradska razvodna mreža. Razvodne grane koje idu ka potrošačima nisu prikazane na slici, a napominjemo da se sva potrošnja vode može fiktivno redukovati kao potrošnja iz čvorova prstenaste mreže (kao da se voda odvodi potrošačima iz čvorova prstenaste mreže).

Pozicijom 6, na slici 1.1, označeni su naporni rezervoari. Napornim rezervoarima nazivaju se rezervoari iz kojih voda može gravitacijski da dođe sa natpritiskom do potrošača. U ravničarskim krajevima naporni rezervoari se izvode u formi vodotornjeva.

Napornim cevovodima (pozicija 9 na sl.1.1) nazivaju se cevovodi kojima se voda dovodi do razvodne vodovodne mreže.



sl. 1.1 – šema jednog gradskog vodovoda

Oznake: 1 – vodozahvatni objekat na reci, 2 - crpna pumpna stanica, 3 – postrojenje za prečišćavanje vode, 4 – rezervoar čiste vode, 5 – potisne pumpne stanice, 6 – naporni rezervoari (održavaju pritisak u mreži i regulišu traženi protok), 7 – vodozahvatni objekat u hidroakumulacionom jezeru, 8 – bunari sa crpnim pumpama, 9 – naporni cevovodi, 10 – prstenasta razvodna mreža

Prema uzroku strujanja vodovodi mogu biti:

- gravitacijski (samotočni),
- sa pumpnom stanicom.

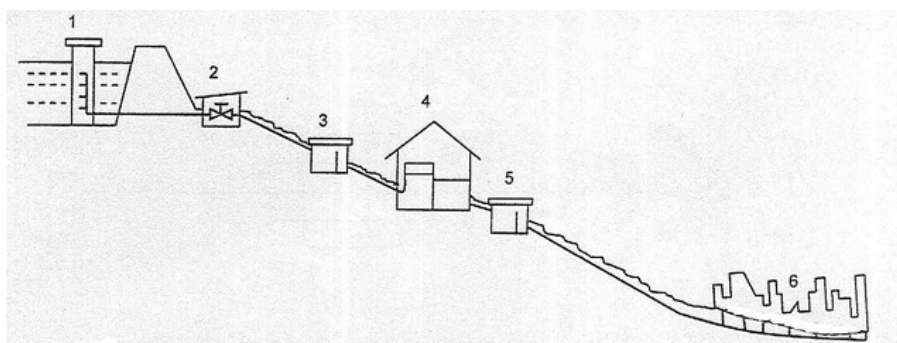
Na sl.1.2 šematski je prikazana konfiguracija elemenata jednog gravitacijskog (samotočnog) vodovoda. U slučajevima kada je hidroakumulacija na mnogo većoj visini od potrošača (naselja koja se snabdevaju vodom), da bi se smanjio pritisak u napornom cevovodu, trasa napornog cevovoda se prekida sa jednom ili više prekidnih komora (pozicija 3 na sl.1.2).

Na sl.1.3 šematski su prikazane konfiguracije elemenata dva gradska vodovoda sa pumpnim stanicama, jednog sa prethodnim napornim rezervoarom (sl.1.3. a) i drugog sa kontrarezervoarom (sl.1.3. b). Naporni rezervoar ima funkciju regulatora protoka – kompenzira razliku protoka potisnih pumpi i protoka potrošača i u slučajevima kada se ovaj rezervoar nalazi ispred potrošača govori se o vodovodu (vodovodnom sistemu) sa prethodnim rezervoarom. U ovakvim sistemima potisna pumpna stanica napaja napojni rezervoar, a iz napornog rezervoara voda gravitacijski otiče potrošačima, pa režim rada potisnih pumpi ne zavisi od protoka koji ide potrošačima. U slučajevima kada je prethodni naporni rezervoar na velikoj visini u odnosu na crpište (izvor vodosnabdevanja), a i naporni cevovod je dugačak, da bi se izbegao visok pritisak u napornom cevovodu (cevovod koji povezuje potisnu pumpnu stanicu sa rezervoarom) naporna linija se projektuje sa jednom ili više međupumpnim stanicama.

U slučajevima kad se potrošači vode nalaze između potisne pumpne stanice i napornog rezervoara govori se o vodovodima sa kontrerezervoarom (sl.1.3. b). Režim rada potisnih pumpi, u ovakvim vodovodnim sistemima, zavisi od protoka vode koju koriste potrošači.

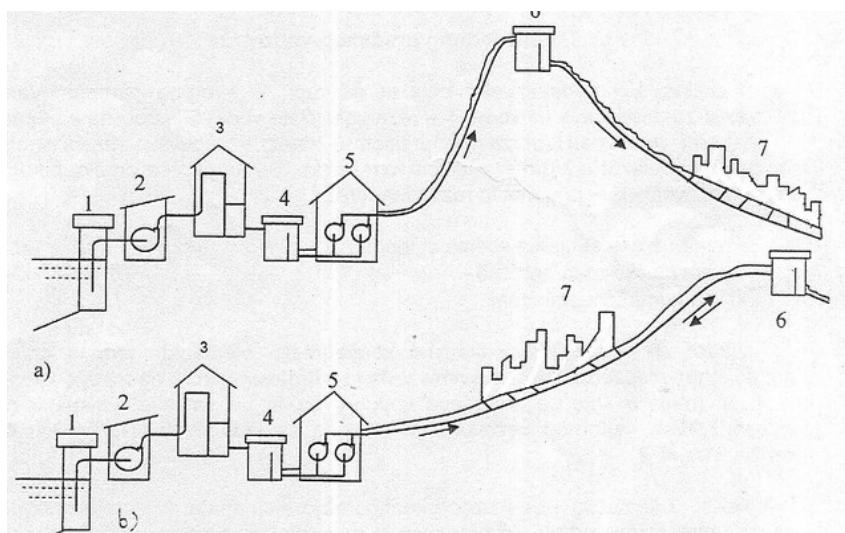
Crpne pumpe imaju zadatak da usisavaju vodu iz vodozahvatnog objekta i preko postrojenja za prečišćavanje transportuju je do rezervoara čiste vode, koji je u sastavu pumpne stanice. Crpne pumpe mogu biti smeštene u zasebnom građevinskom objektu, kao što je na sl.1.3 prikazano, a čest je slučaj da su ove pumpe smeštene u zajedničkom građevinskom objektu sa vodozahvatom. Primenjuje se i treće rešenje, po kojem su crpne i potisne pumpe smeštene u zajedničkoj mašinskoj hali.

Potisne pumpe imaju zadatak da vodu iz rezervoara prečišćene vode transportuju do napornog rezervoara (u vodovodima sa prethodnim napornim rezervoarom), odnosno, do potrošača i napornog rezervoara (u vodovodima sa kontrarezervoarom).



sl.1.2 – konfiguracija elemenata gravitacijskog gradskog vodovoda

Oznake: 1 – vodozahvatni objekat, 2 – zaporni ventil, 3 – prekidna komora, 4 – stanica za prečišćavanje vode, 5 – rezervoar prečišćene vode (naporni rezervoar), 6 – potrošači



sl.1.3 – konfiguracija gradskog vodovoda sa : a) prethodnim napornim rezervoarom i b) kontrarezervoarom

Oznake: 1 – vodozahvatni objekat, 2 – crpna pumpna stanica, 3 – stanica za prečišćavanje vode, 4 – rezervoar čiste vode, 5 – potisna pumpna stanica, 6 – naporni rezervoar, 7 – potrošači

Vodozahvatni objekat prikazan na sl.1.3 je priobalskog tipa. Za razliku od ovog koriste se i vodozahvati koji se nalaze u koritu reke ili jezera (sl.1.2). Zadatak vodozahvatnog objekta je da prihvati vodu iz reke ili jezera, onemogući prodor grube mehaničke nečistoće i stvori povoljne uslove za usisavanje vode.

Pumpne stanice ne moraju da imaju odvojene crpne i potisne pumpe. Jedne te iste pumpe (ili jedna te ista pumpa), u izvesnim slučajevima, mogu da obave i jednu i drugu funkciju. Takav je npr. slučaj kod pumpnih stanica za navodnjavanje industrijskih, kućnih i seoskih vodovoda (kod kojih ne postoje postrojenja za prečišćavanje vode).

Pumpna stanica industrijskog vodovodnog sistema može da ima pumpe različitih namena. Tako na primer u jednoj ovakvoj pumpnoj stanici jedna grupa pumpi snabdeva vodom proizvodne pogone, druga grupa transportuje otpadnu vodu do prečištača ili do rashladne kule, a treća grupa pumpi vraća prečišćenu i ohlađenu vodu ponovo u radni ciklus.

Broj pumpi u pumpnoj stanici određuje se na osnovu tehničko-ekonomskog proračuna i važnosti vodovodnog sistema. Prema važnosti vodovodnog sistema određuje se broj rezervnih pumpi i asortiman rezervnih delova kojima mora da se raspolaže.

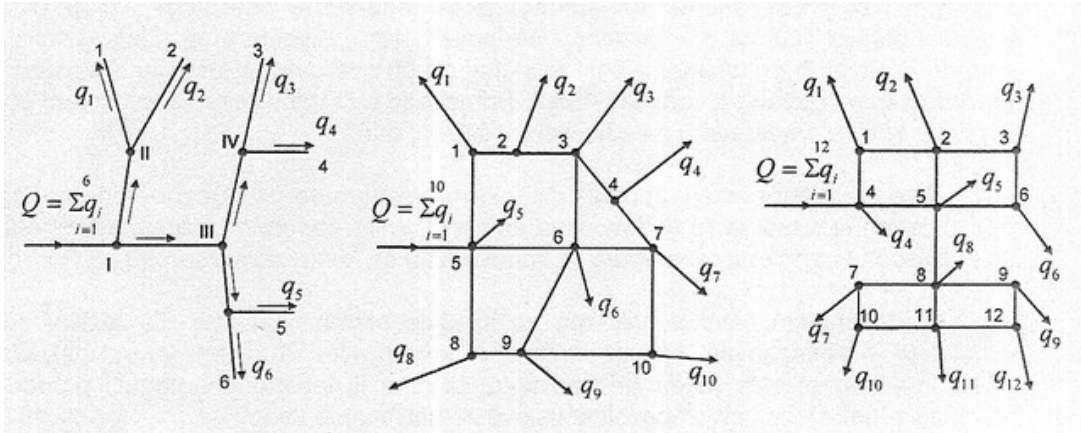
1.2. VODOVODNE MREŽE

Vodovodnu mrežu čine cevovodi kojima se voda dovodi do potrošača. Prema konfiguraciji vodovodne mreže mogu biti **granate** (sl.1.4.a), **prstenaste** (sl.1. 4. b) i **mešovite** (sl.1. 4. c).

Čvorovima mreže zovu se mesta račvanja cevi i mesta priključivanja potrošača, a deonicama mreže zovu se cevovodi koji povezuju čvorove mreže. U deonici mreže ne računa se naporni cevovod koji napaja mrežu vodom ($Q=\sum q_i$).

Sva potrošnja vode može se fiktivno redukovati kao potrošnja iz čvorova mreže, kako je na sl.1.4 i prikazano.

Kod granatih vodovodnih mreža tokovi su jednoznačno definisani (u svaki od čvorova mreže voda može da dođe samo jednim putem), pa se prekidom protoka u jednoj deonici mreže (havarijski – zbog prskanja cevi ili namerni – zatvaranjem ventila) prekida dovod vode svim potrošačima nizvodno od ove deonice.



sl.1.4 – vodovodne mreže: a) granata, b) prstenasta, c) mešovita

U prstenastim vodovodnim mrežama postoji više puteva (najmanje dva) kojima voda iz jednog čvora može da stigne do drugog čvora, pa i u slučaju prekida u jednoj od deonica mreže svi potrošači dobijaju vodu. Vodovodne mreže protivpožarne zaštite (vodovodne mreže koje povezuju hidrante za gašenje požara) po pravilu su prstenaste.

U prstenastim mrežama bilo koja dva čvorova mogu biti povezana preko nekoliko različitih lanaca deonica. Dva bilo koja lanca deonica koji povezuju dva čvorova obrazuju prsten. Prsten koga ne seku nikakve deonice naziva se elementarnim prstenom. Mreža prikazana na sl.1.4.b ima četiri elementarna prstena.

Mešovite vodovodne mreže su kombinacija prstenastih i granatih mreža, pa u nekim svojim delovima imaju svojstva prstenaste mreže, a u drugim svojstva granate mreže. Mreža prikazana na sl. 1.4. c ima svojstva granate mreže samo u deonici između čvorova 5 i 8, dok u svim ostalim delovima imaju svojstva prstenaste mreže. Prekid protoka u deonici 5 – 8 ostavlja bez vode potrošače priključene u čvorovima 7, 8, 9, 10, 11 i 12, dok pri prekidu protoka u bilo kojoj drugoj deonici svi potrošači dobijaju vodu.

Kod gradskih i seoskih vodovoda pravi se razlika između **spoljašnje** (ulične) i **unutrašnje** (dvorišne i kućne) vodovodne mreže. Od priključka na spoljašnju mrežu sve nadalje je unutrašnja vodovodna mreža. Ako je pritisak vode na priključku za spoljašnju mrežu nedovoljan da potisne vodu do svih spratova višespratnih zgrada ili je pritisak vode na priključcima potrošača na višim spratovima nedovoljan za njihov normalan rad, pritisak u unutrašnjoj mreži povećava se u hidroforskom postrojenju. Za normalan rad potrošača vode (tekućih mesta) u domaćinstvima potreban natpritisak na priključku za spoljašnju mrežu je 1 bar za prizemlje, plus približno 0,5 bara za svaki sprat zgrade.

Spoljašnje vodovodne mreže manjih naselja su granate, kakve su i unutrašnje vodovodne mreže gradskih porodičnih kuća i seoskih domaćinstava.

Spoljašnje gradske vodovodne mreže su mešovite konfiguracije; prstenastom mrežom obuhvataju se blokovi zgrada i značajni društveni, zdravstveni i privredni objekti, a iz čvorova i deonica ove mreže prostiru se granate mreže. U čvorovima prstenaste mreže nalaze se protivpožarni hidranti (za napajanje vatrogasnih vozila). Zahtevani minimalni pritisak u hidrantima je 2,5 bara.

Unutrašnja vodovodna mreža u višespratnim zgradama je, takođe, mešovite konfiguracije, s tim da su protivpožarni hidranti u zgradi povezani u prstenastu mrežu.

Zbog zaštite vode od spoljašnjih temperaturskih uslova, spoljašnja vodovodna mreža se ukopava ispod zone spoljašnjih temperaturskih uticaja, a to je $0,8 \div 1$ metar ispod kote terena.

Vodovodne cevi se izrađuju od livenog gvožđa, čelika, plastičnih masa (polietilena i polivinilhlorida), mešavine azbesta i cementa (azbestno – betonske cevi) i armiranog betona.

Cevi od livenog gvožđa se zaptivaju na mestima spojeva i otporne su na koroziju, ako se još za vreme izrade u fabrici zaštite odgovarajućim premazima za zaštitu od korozije. Zbog slabe elastičnosti su osetljive na promenljive pritiske, pa često pucaju pri hidrauličkim udarima. Izrađuju se za pritiske do 10 bara. Koriste se u spoljašnjim gradskim vodovodnim mrežama, u napornim cevovodima pritiska do 10 bara, i drugim vodovodima pritiska do 10 bara.

Čelične cevi imaju veliku mehaničku čvrstoću i elastičnost, zbog čega se koriste za naporene cevovode pritiska iznad 10 bara, u deonicama mreže koje prolaze ispod puta ili železničke pruge i u slučajevima kada se vodovodi polažu u poroznom terenu i seizmološki osetljivim područjima. Veliki nedostatak čeličnih cevi je njihova osetljivost na koroziju, pa se spoljašnji zidovi cevi obično zaštićuju od korozije premazima na bazi bitumena. Mnogo se radi i na usavršavanju raznih postupaka unutrašnje i spoljašnje plastifikacije zidova čeličnih cevi. Nerđajuće pocinkovane čelične cevi su manjeg prečnika (do oko 50 mm) i imaju široku primenu u unutrašnjem (kućnim) vodovodnim mrežama.

Plastične cevi su mnogo lakše od metalnih, ne korodiraju, neosetljive su na lutajuće struje i vrlo su glatke (stvaraju veoma male otpore strujanju). Nedostatak im je što imaju veći koeficijent linearnog širenja. Proizvode se za radne pritiske do 6 bara i prečnike do 250 (300) mm kao cevi od tvrdog polietilena (TPE cevi), odnosno, prečnike do 125 (150) mm za savitljive cevi od polietilena (SPE cevi). Imaju široku primenu u spoljašnjim mrežama seoskih vodovoda. Tvrde plastične cevi manjeg prečnika dobijaju sve veću primenu i u unutrašnjim (kućnim) vodovodnim mrežama.

Cevi za vodu od polietilena visoke gustine, u klasi materijala PE – 80 i PE – 100, proizvode se za nazivne pritiske od 6 do 20 bara i nazivne (spoljašnje) prečnike do 250mm. Koriste se u gradskim vodovodnim mrežama, ali i u magistralnim napornim cevovodima.

Azbestno-betonske cevi izrađuju se od mase koju čine 20÷25% azbestnih vlakana i 80÷70% portland cementa. Ove cevi ne korodiraju, imaju tanke zidove i glatke površine.

Zbog kancerogenog dejstva azbesta ove cevi se danas ne ugrađuju u vodovodne mreže, ali ih ima ranije ugrađenih. Proizvodile su se za pritiske do 12 bara i prečnike do 500mm.

Napomenimo da je vlada SAD, godine 1989., uvela zabranu proizvodnje i korišćenja proizvoda sa azbestom.

Betonske cevi ne korodiraju, a loše osobine su im velika težina (zbog debelih zidova) i osetljivost na mehaničke udare, pa se praktično primenjuju za transport agresivnih voda (u industrijskim vodovodnim sistemima). Izrađuju se za pritiske i do 20 bara.

dnevnih potrošnji vode, dnevni dijagrami časovne potrošnje mogli da se upoređuju po sličnosti, na ordinatama ovih dijagrama nanose se časovne potrošnje svedene na procenete dnevne potrošnje vode, pa se ovi dijagrami često zovu i dijagrami dnevne potrošnje po časovima.

Pored opšte karakteristike da je časovna potrošnja vode u kasnim noćnim satima i u zoru smanjena, može se uočiti određena sezonska sličnost u karakteru promena stepenica dnevnih dijagrama časovne potrošnje vode u radnim danima, odnosno u danima vikenda. Napomenimo, odmah, da različiti događaji, kao što su, na primer, veliki verski praznici, interesantni televizijski prenosi i programi, bitno menjaju karakter promena stepenica u dijagramu časovne potrošnje vode.

Srednja časovna potrošnja vode u toku dana je 1/24 dnevne potrošnje vode:

$$\dot{V}_{sr\ dn}^h = \frac{\dot{V}^{(dn)}}{24} = 0,0417 \cdot \dot{V}^{(dn)}, (4,17 \% \text{ od } \dot{V}^{(dn)})$$

Srednja časovna potrošnja je na sl.1.5 označena crta – tačka linijom.

U svakom dnevnom dijagramu časovne potrošnje vode mogu se, u poređenju sa srednjom časovnom potrošnjom, uočiti vremenski periodi sa smanjenom i sa povećanom časovnom potrošnjom vode. Karakteristične veličine su i minimalna i maksimalna časovna potrošnja vode u toku dana ($\dot{V}_{\min\ dn}^{(h)}$ i $\dot{V}_{\max\ dn}^{(h)}$),

a bezdimenzijski koeficijenti:

$$k_{\min\ dn}^{(h)} = \frac{\dot{V}_{\min\ dn}^{(h)}}{\dot{V}_{sr\ dn}^{(h)}} \quad \text{i} \quad k_{\max\ dn}^{(h)} = \frac{\dot{V}_{\max\ dn}^{(h)}}{\dot{V}_{sr\ dn}^{(h)}},$$

predstavljaju koeficijente minimalne ($k_{\min\ dn}^{(h)} < 1$) i maksimalne ($k_{\max\ dn}^{(h)} > 1$) časovne potrošnje u toku dana. Iako se ovi koeficijenti, manje ili više, svakodnevno menjaju, njihova odstupanja od jedinice su manja u vodovodima većih gradova sa razvijenom industrijom, a najveća su u seoskim vodovodima (sa izrazitim oscilacijama u časovnoj potrošnji vode). Po svom karakteru promene dijagrama na sl.1.5 odgovara većem gradu sa razvijenom industrijom.

Promene potrošnje vode u periodima manjim od jednog sata ne razmatraju se, pa se u razmatranju problematike vodovoda, umesto sa stvarnim trenutnim protocima, barata srednjim časovnim protocima:

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{1}{3600} \dot{V}^{(h)}, \quad \dot{V}^{(h)} \left[\frac{m^3}{h} \right].$$

Sa centrifugalnim napornim pumpama, kakve su obično naporne pumpe, vodovodi bi mogli da rade i bez napornog rezervoara, jer sama vodovodna mreža prigušno reguliše režim rada (protok) ovih pumpi. U vodovodima u kojima časovna potrošnja vode značajno varira, ovakva regulacija pumpi je neekonomična i praćena visokim pritiscima u mreži pa se i za mrežu moraju koristiti cevi većeg nazivnog pritiska.

Zbog napred navedenih razloga, vodovodi sa pumpnom stanicom mogu se projektovati bez napornog rezervoara samo u slučajevima kada se časovna potrošnja vode vrlo malo menja, što je slučaj kod nekih industrijskih vodovoda. Gradski vodovodi i uopšte, vodovodi naseljenih mesta, projektuju se sa napornim rezervoarom, koji ima funkciju regulatora dopremljene i potrošene vode (kompenzatora razlike protoka napornih pumpi i protoka potrošača). U periodima kada pumpe daju veći protok od onog koji se troši, naporni rezervoar se puni vodom, a prazni se u periodima kada protok pumpi nije dovoljan da zadovolji sve potrošače.

Da bi zapremina napornog rezervoara bila manja, a u vodovodima sa kontrarezervoarom i da bi se smanjio pritisak u mreži, u časovima male potrošnje vode, naporne pumpe se regulišu stepenasto – uključivanjem u paralelni rad različitog broja pumpi. Ova regulacija je obično dvostepena, ili, najviše, trostepena.

Crpne pumpe i stanica za prečišćavanje vode obično rade sa jednolikim protokom, a razlika između protoka crpnih i napornih pumpi kompenzira se u beznapornom rezervoaru prečišćene vode, koji je u sastavu pumpnih stanica.

Proračun vodovoda (svih elemenata vodovodnog sistema) vrši se prema najvećoj dnevnoj potrošnji vode ($\dot{V}_{\min}^{(dn)}$) u tzv. proračunskoj godini, a proračunska godina je zadnja godina njegovog planiranog širenja (planiranog povećanja potrošnje vode). U svakoj etapi povećanja potrošnje vode, do proračunske godine, elementi vodovodnog sistema se suštinski ne menjaju, već se samo postepeno povećava njihovo opterećenje.

Za proračunsku godinu se procenjuje broj stanovnika i prema normativima potrošnje vode određuje se srednja dnevna potrošnja vode za domaćinstva i javne ustanove i objekte (Tabela I).

TABELA I Potreba za vodom različitih potrošača u naselju (izvoda značajnih normativa)

VRSTA POTREBE		jedinica	količina vode u litrima
A.	DOMAĆINSTVA		
1.	Za piće i kuvanje	po stanovniku / dan	3 - 6
2.	Za piće, kuvanje, pranje sudova, umivanje	po stanovniku / dan	25 - 30
3.	Za pranje veša	po stanovniku / dan	10 - 15
4.	Za ispiranje wc šolje		
	- sa visoko postavljenim vodokotlićem	jednokratno	6 - 12
	- sa nisko postavljenim vodokotlićem	jednokratno	12 - 20
	- sa ispiraćem pod pritiskom	jednokratno	6 - 20
5.	Za kupanje		
	- u kadi	jednokratno	200 - 300
	- pod tušem	jednokratno	40 - 100
6.	Za pranje automobila		
	- kofom	jednokratno	20 - 50
	- crevom	jednokratno	100 - 300
7.	Za zalivanje dvorišta i zelenih površina	po 1 m ²	2 - 5
8.	Za pojenje i pranje stoke		
	- krupna stoka	po 1 grlu / dan	40 - 60
	- sitna stoka	po 1 grlu / dan	10 - 15
	- pas	po 1 grlu / dan	2 - 5
9.	Za kuhinjske drobilice sa jednokratnim ispiranjem vodom	jednokratno	
B. JAVNE USTANOVE I OBJEKTI			
1.	Škole		
	- bez tuševa	učenik / dan	2 - 10
	- sa tuševima	učenik / dan	20
	- sa bazenom	učenik / dan	30 - 50
2.	Bolnice	postelja / dan	250 - 650
3.	Ambulante	pacijent / dan	12 - 15
4.	Bioskopi, pozorišta	posetilac / dan	3 - 5
5.	Hoteli	prenoćište / dan	250 - 300
6.	Restorani	gost / dan	30 - 80
7.	Kasarne	vojnika / dan	100 - 300
8.	Tržnice	po m ² / dan	3 - 5
9.	Javni klozeti	po mokricioniku / dan	30
10.	Ulična česma	l / s	5 - 10
11.	Pranje ulica	po m ²	2 - 10

Za proračunsku godinu se, prema normativima, određuje i srednja dnevna potrošnja vode za industrijske potrebe. U tabeli II dat je izvod iz normativa potrošnje vode u industriji.

TABELA II Potreba za vodom u industriji (izvod iz normativa)

VRSTE POTREBA		jedinica	količina vode u litrima
1.	Klanice		
	- sitne stoke	po komadu	150 - 300
	- krupne stoke	po komadu	300 - 750
2.	Mlekare	po 1 l mleka	3 - 6
3.	Tekstilna industrija		
	- prerada vune u štof	na 1 kg vune	1000
	- proizvodnja pamučnih tkanina	na 1 m ² tkanine	30 - 50
	- proizvodnja viskozne svile	na 1 kg svile	1200
4.	Šećerane	na 1 kg šećera	100 - 120
5.	Proizvodnja hartije	na 1 kg hartije	400 - 1100
6.	Kožare - štavljenje kože		

Prema određenoj srednjoj dnevnoj potrošnji vode ($\dot{V}_{sr}^{(dn)}$) maksimalna dnevna potrošnja računa se korišćenjem formule:

$$\dot{V}_{max}^{(dn)} = k_{max}^{(dn)} \cdot \dot{V}_{sr}^{(dn)} \quad (1.1)$$

pri čemu se veličina koeficijenta maksimalne dnevne potrošnje kreće u granicama $k_{max}^{(dn)}$ od 1,2 do 1,6, gde manje vrednosti odgovaraju velikim gradovima sa razvijenom industrijom. U tabeli III date su okvirne veličine ovog koeficijenta u zavisnosti od veličine naselja.

TABELA III Koeficijent maksimalne dnevne potrošnje

Veličina naselja	$k_{max}^{(h)}$
Sela, manja naselja	1,5 - 1,6
Naselja do 25000 stanovnika bez industrije	1,4 - 1,5
Naselja do 25000 stanovnika sa industrijom	1,3 - 1,4
Naselja od 25000 do 50000 stanovnika	1,3 - 1,5
Naselja od 50000 do 100000 stanovnika	1,25 - 1,3
Naselja preko 100000 stanovnika	1,20 - 1,25

Maksimalna dnevna potrošnja vode merodavna je za dimenzionisanje vodozahvata, izbora crpnih pumpi i dimenzionisanje stanice za prečišćavanje vode.

Proračun vodovodne mreže vrši se prema maksimalnoj časovnoj potrošnji u danu maksimalne potrošnje, kada je

$$\dot{V}_{max}^{(h)} = k_{max}^{(h)} \frac{\dot{V}_{max}^{(dn)}}{24}, \quad (1.2)$$

gde je $k_{max}^{(h)}$ koeficijent maksimalne časovne potrošnje u danu maksimalne potrošnje vode.

Pored ovog proračuna, vodovodne mreže sa kontrarezervoarom treba proračunati (proveriti na pritisak) i u času kada je protok koji ide u rezervoar najveći (kada je pritisak u mreži najveći). U slučajevima jednostepene regulacije napornih pumpi, do ovog slučaja dolazi u času najmanje potrošnje vode, kada je

$$\dot{V}_{min}^{(h)} = k_{min}^{(h)} \frac{\dot{V}_{min}^{(dn)}}{24}, \quad (1.3)$$

gde je $k_{min}^{(h)}$ koeficijent minimalne časovne potrošnje.

Minimalna dnevna potrošnja vode može se izračunati korišćenjem formule

$$\dot{V}_{\min}^{(dn)} = k_{\min}^{(dn)} \cdot \dot{V}_{sr}^{(dn)},$$

gde je $k_{\min}^{(dn)}$ od 0,7 do 0,9, pri čemu veće vrednosti odgovaraju velikim gradovima sa jakom industrijom.

Orijentacioni podaci o veličinama koeficijenata maksimalne i minimalne časovne potrošnje vode, koji figurišu u formulama (1.2) i (1.3), date su u tabeli IV.

TABELA IV Veličine koeficijenata maksimalne i minimalne časovne potrošnje

broj stanovnika	$k_{\max}^{(h)}$	$k_{\min}^{(h)}$
do 1000	2.4 - 2.8	0.04 - 0.06
5000	1.7 - 2.0	0.09 - 0.14
10000	1.6 - 1.8	0.16 - 0.24
30000	1.4 - 1.6	0.24 - 0.36
100000	1.3 - 1.5	0.28 - 0.42
300000	1.25 - 1.45	0.35 - 0.50
1000000 i više	1.2 - 1.4	0.50 - 0.70

Zapremina napornog rezervoara i izbor napornih pumpi vrši se prema verovatnom dijagramu časovne potrošnje vode u danu najveće potrošnje vode. Da bi se došlo do verovatnog – proračunskog dijagrama časovne potrošnje vode potrebno je, prethodno, analizirati stvarne dijagrame časovne potrošnje vode u gradovima u kojima su uslovi života slični uslovima grada za koji se projektuje vodovodni sistem.

Pri određivanju zapremine napornog rezervoara treba voditi računa da ovaj rezervoar treba da prihvati i protivpožarnu rezervu vode, za gašenje jednog unutrašnjeg i jednog spoljašnjeg požara u trajanju od 10 minuta.

Zapremina beznapornog sabirnog rezervoara prečišćene vode određuje se usklađivanjem dijagrama časovnih dopremanja vode crpnih i napornih pumpi, s tim da ovaj rezervoar mora da ima i protivpožarnu rezervu vode, za gašenje požara u trajanju od 3 sata.

Pri projektovanju vodovoda mora se voditi računa i o njegovom radu za vreme gašenja požara. Po postojećim pravilima projektovanja, vodovod se proračunava, odnosno, računski proverava, uz pretpostavku da je do požara došlo u času maksimalne potrošnje vode.

Norme potrošnje vode za gašenje požara i verovatno moguć broj istovremenih požara date su u tabeli V.

TABELA V Norme potrošnje vode za gašenje požara u gradovima i naseljima

broj stanovnika u naselju	proračunski broj istovremenih požara	protok vode za jedan požar [l/s]	
		zgrade do dve etaže	zgrade sa tri i više etaža
do 5000	1	10	10
10000	1	10	15
25000	2	10	15
50000	2	20	25
100000	2	25	35
200000	3	25	40
300000	3	25	55
400000	3	25	70
500000	3	25	80
800000	3	25	95
1000000	3	25	100
2000000	4	25	100

Proračunsko vreme gašenja požara je 3 sata

Prema mogućnostima gašenja požara, vodovodi, kao sistemi za gašenje požara, mogu biti:

- 1) sistemi gašenja požara niskim pritiskom i
- 2) sistemi gašenja požara visokim pritiskom.

U sistemima gašenja požara niskim pritiskom, vodovod treba, u traženom momentu, da obezbedi samo povećanje protoka, za veličinu protoka potrebnog za gašenje požara. Pritisak, potreban za dobijanje protivpožarnih mlazeva vode, stvaraju prenosive pumpe, koje donose vatrogasci, a koje se napajaju iz protivpožarnih hidranata na vodovodnoj mreži. Za ispravan rad ovih pumpi dovoljno je da natpritisak vode u hidrantu bude 1 bar, ili nešto više, ako se na hidrantu puni vodom vatrogasno vozilo (zbog većih otpora u usisnom cevovodu autopumpe). Kako postoji opasnost da protivpožarne pumpe stvore potpritisak u mreži, proračunom treba proveriti, da za vreme gašenja požara u svim tačkama vodovodne mreže vlada natpritisak (po propisima, veći od jednog bara). Pojava potpritiska u vodovodnoj mreži može da, kroz nehermetičke spojeve cevi, izazove prodiranje podzemnih voda u cevovod i zagađenje pijaće vode.

Gradski vodovodi se, obično, projektuju kao sistemi gašenja požara niskim pritiskom.

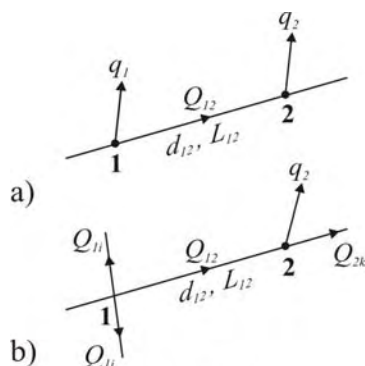
U sistemima gašenja požara visokim pritiskom, vodovod treba, u traženom momentu, da obezbedi, ne samo potreban protok ka mestu požara, već i povećanje pritiska u vodovodnoj mreži, do veličine koja je dovoljna da obezbedi protivpožarni mlaz neposredno od hidranta. Obično se, kod ovakvih sistema, povećanje pritiska obezbeđuje samo u vremenu gašenja požara.

Sistemi gašenja požara visokim pritiskom projektuju se kao pojedini fabrički vodovodi, ili delovi gradskog vodovoda u reonima lokacija fabrika.

2. OSNOVE HIDRAULIČKOG PRORAČUNA VODOVODNIH MREŽA

2.1. GUBITAK NAPORA (PRITISKA) U DEONICI CEVOVODA BEZ GRANANJA PROTOKA

Deonice cevodova bez grananja protoka su deonice cevodova između dva susedna potrošača (sl.1.a) i deonice cevodova između mesta račvanja cevodova (čvora mreže) i sledećeg priključka potrošača (sl.2.b), ili između priključka potrošača i sledećeg čvora mreže.



sl.2.1

Označavajući sa Q_{12} zapreminski protok u deonici cevodova između tačaka grananja protoka 1 i 2, brzina strujanja vode u ovoj deonici cevodova je:

$$c = c_{12} = \frac{4Q_{12}}{d_{12}^2 \pi} \quad (2.1)$$

gde je d_{12} – unutrašnji prečnik cevi.

Totalni pritisak vode (p_{tot}) u posmatranom preseku cevodova jednak je zbiru strujnog pritiska (p) i dinamičkog pritiska $p_d = 1/2 \cdot \rho c^2$,

$$p_{tot} = p + \frac{1}{2} \rho c^2, \quad (2.2)$$

gde je ρ – gusitna vode, a c – brzina strujanja vode u posmatranom preseku cevodova.

Napomenimo da se strujni pritisak (p) često zove i statički pritisak, prema jednom od načina njegovog merenja (pomoću staklene pijezometarske cevčice povezane sa izbušenom rupicom na cevovodu).

Naporom vode (H) zove se visinski ekvivalent totalnog pritiska,

$$H = \frac{p_{tot}}{\rho g} = \frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g}. \quad H [m]. \quad (2.3)$$

Označavajući sa z_1 i z_2 kote terena na mestima račvanja $\underline{1}$ i $\underline{2}$ ($z_1 = KT_1$, $z_2 = KT_2$), energijska jednačina za deonicu vodovodne mreže glasi:

$$\frac{p_1}{g} + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{g} + \frac{c_2^2}{2} + gz_2 + Yg_{12}, \quad (2.4)$$

odnosno,

$$ptot_1 + pgZ_1 = ptot_2 + pgZ_2 + Yg_{12}, \quad (2.4')$$

ili

$$H_1 + z_1 = H_2 + z_2 + \Delta h_{12} \quad (2.4'')$$

gde su:

- Yg_{12} – jedinični (po masi) gubitak mehaničke strujne energije, zbog viskoznog trenja u posmatranoj deonici [J/kg],
- Δpg_{12} – gubitak pritiska zbog viskoznog trenja u posmatranoj deonici cevodova [p_a],
- Δh_{12} – gubitak napora zbog viskoznog trenja u posmatranoj deonici cevodova [m],

$$Yg_{12} = \frac{\Delta p g_{12}}{g} = g \cdot \Delta h_{12}.$$

Jedinični (po masi) gubitak mehaničke strujne energije nepovratno je transformisan u unutrašnju (toplotnu) energiju vode. Zbog visoke specifične toplote vode ($4183 \text{ J} / (\text{kg } ^\circ\text{C})$, na $20 \text{ }^\circ\text{C}$), a i zbog razmene toplote sa okolinom, generirana toplota viskoznog trajanja praktično i ne utiče na promenu temperaturne vode u vodovodnoj mreži.

2.1.1. Proračun gubitka napora (pritiska) u pravolinijskim deonicama cevovoda

Zbog jednostavnijeg pisanja izostavljamo indekse označavanja posmatrane pravolinijske deonice cevovoda i koristimo oznake:

d – unutrašnji prečnik cevovoda [m],

L – dužina cevovoda [m],

Q – zapreminski protok kroz cevovod [m^3 / s],

c – brzina strujanja vode u cevovodu [m^3 / s], $c = \frac{4Q}{d^2 \pi}$,

$\Delta p g$ – gubitak pritiska u cevovodu [p_a],

Δh – gubitak napora u cevovodu [m],

pri čemu je:

$$\Delta h = \frac{\Delta p g}{p g}, \text{ odn. } \Delta p g = p g \cdot \Delta h, (g = 9,81 \text{ m}^3 / \text{s}). \quad (2.5)$$

Hidraulički nagib cevovoda (I) je bezdimenzijska veličina, definisana odnosom gubitka napora u cevovodu (Δh) prema dužini cevovoda (L),

$$I = \frac{\Delta h}{L}. \quad (2.6)$$

Hidraulički radijus cevovoda (R_h), ili strujnog kanala, definiše se kao odnos protočne površine (A) prema obimu ove površine (O), $R_h = A / O$.

Za strujanja pod natpritiskom, kakva su strujanja u vodovodnim mrežama, dobija se ($A = d^2 \pi / 4$, $O = d \cdot \pi$) da je hidraulički radijus cevovoda $R_h = d / 4$.

U literaturi se, za izračunavanje gubitka pritiska (gubitak napora) u pravolinijskim deonicama cevovoda koriste tri vrste formula:

1 – Formula Darsija (Darcy)

$$\Delta p g = p \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2}, \quad \text{tj.} \quad \Delta h = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g}, \quad (2.7)$$

gde je λ – bezdimenzijski koeficijent trenja,

2 – Formula Šezija (Chezy)

$$C = \frac{c}{\sqrt{R_h I}}, \quad \text{tj.} \quad I = \frac{c^2}{C^2 R_h} \quad (2.8)$$

gde je C – Šezijev koeficijent, koji ima dimenziju $m^{0.5} s^{-1}$,

3 – Formule tipa

$$c = c(d, I), \quad \text{ili} \quad I = I(c, d).$$

S obzirom da je $I = \Delta h / L$ i da je pri strujanju sa natpritiskom $R_h = d / 4$, Šezijeva formula (2.8) se svodi na oblik

$$\Delta h = \frac{4}{C^2} \cdot \frac{L}{d} \cdot c^2. \quad (2.8')$$

Prema drugoj jednačini (2.7) i jednačini (2.8') može se uspostaviti sledeća veza između bezdimenzijskog koeficijenta trenja u Darsijevoj formuli i Šezijevog koeficijenta:

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (2.9)$$

Rejnoldsov (Reynolds-ov) broj, definisan kao odnos inercijske sile prema sili viskoznog trenja, za strujanje u cevovodu je

$$\text{Re} = \frac{c \cdot d}{\nu}, \quad (2.10)$$

gde je ν – kinematički koeficijent viskoznosti vode ($\nu = (1,3 \div 0,8) \nu \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$, za $t = (10 \div 30)^\circ \text{C}$).

Za strujanje u cevovodima pod natpritiskom, Re – broj karakteriše režim strujanja u cevovodu. Za $\text{Re} \leq 2320$ strujanje je laminarno, dok je za, uobičajeno, $\text{Re} > 2320$ strujanje turbulentno, s tim da većim Re – brojevima odgovara veći intenzitet turbulencije.

Kod laminarnih strujanja ($\text{Re} \leq 2320$), koja se praktično ne javljaju u deonicama vodovodnih mreža, Darsijev koeficijent trenje, do kojeg se dolazi teorijskim putem [1], iznosi:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}, \quad \text{za } \text{Re} \leq 2320$$

Strujanja u deonicama vodovodne mreže su po pravilu turbulentna i to sa $\text{Re} > 10^4$, a najčešće i sa $\text{Re} > 10^5$.

Kod turbulentnih strujanja, Darsijev koeficijent trenja u opštem slučaju zavisi od Re – broja i relativne hrapavosti unutrašnjeg zida cevi $\bar{\delta} [\delta = \delta / d]$,

$$\lambda = \lambda(\text{Re}, \bar{\delta}).$$

Veličina hrapavosti unutrašnjih zidova vodovodnih cevi data je u tabeli I

Tabela I

Materijal i stanje cevi	δ [mm]
Čelične cevi	0,4 ÷ 1,2
Grubo pocinkovane čelične cevi	0,50
Cevi od livenog gvožđa	
- nove	0,3 ÷ 0,4
- nove, bitumenizirane	0,1 ÷ 0,2
- upotrebljivane, malo korodirane	0,5 ÷ 1,0
Plastične cevi	
- nove	0,006
- upotrebljivane	0,03

Od formula tipa $\lambda = \lambda(\text{Re}, \bar{\delta})$ uobičajeno se citira formula Kolbruka (Colbrook-a), ili bolje reći jednačina

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + 0,27 \bar{\delta} \right), \quad (2.11)$$

a u ruskoj stručnoj literaturi i formula Altšula (Албштул-а)

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{100}{\text{Re}} + 1,46\bar{\delta} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \bar{\delta} \right)^{0,25}, \quad (2.12)$$

kao i formula Frenkelja (Френкел-а)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \bar{\delta} \right],$$

odnosno

$$\lambda = \frac{1}{\left\{ -2 \log \left[\left(\frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \bar{\delta} \right] \right\}^2}. \quad (2.13)$$

Formula Kolbruka (2.11) ne određuje λ eksplicitno, pa su za praktičnu primenu pogodnije formule (2.12) i (2.13).

Upoređivanjem koeficijenata trenja λ dobijenih po formuli Frenkelja (2.13) i formuli, ili bolje reći jednačini Kolbruka (2.11) (koja se mora numerički rešavati), za $\text{Re} \geq 10^4$ i u širokom dijapazonu relativne hrapavosti unutrašnjeg zida cevi (od $\bar{\delta} = 0,05$, kada je hrapavost zida cevi vrlo velika, pa do $\bar{\delta} = 10^{-6}$, kada se praktično radi o hidraulički glatkim cevima) može se zaključiti da se veličina koeficijenta λ zanemarljivo malo razlikuje (najviše 1%). Isto važi i kada se ove formule primene za $\bar{\delta} = 0$.

Zaključak je da formula (2.13), koja eksplicitno određuje koeficijent λ , vrlo dobro može da zameni jednačinu (2.11), koja ne određuje λ eksplicitno. Napomenimo da je formula (2.13) data dvadeset godina kasnije, u odnosu na jednačinu (2.11).

Koeficijenti λ dobijen po formuli (2.12), za $\text{Re} > 10^5$ i $\bar{\delta} = 0,004 \div 0,003$, malo su manji od onih dobijenih po formulama (2.11) i (2.13).

Cevi ne mogu biti apsolutno glatke, ali se ponašaju kao hidraulički glatke cevi, ukoliko je debljina laminarnog graničnog podsloja (δ_s) veća od hrapavosti zida cevi ($\delta_s > \bar{\delta}$). Laminirani granični podsloj u ovom slučaju potpuno pokriva hrapavu oblast zida cevi i koeficijent trenja postaje samo funkcija Re – broja ($\lambda = \lambda(\text{Re})$).

Prema mnogobrojnim eksperimentima određivanja funkcionalnih veza $\lambda = \lambda(\text{Re}, \bar{\delta})$, utvrđeno je da se cevi mogu smatrati hidraulički glatkim ($\lambda = \lambda(\text{Re})$) ukoliko je ispunjen uslov:

$$\bar{\delta} = \frac{7,5}{\text{Re}} \quad \text{i} \quad \text{Re} \geq 4000, \quad (2.14)$$

pri čemu je uslov $\text{Re} \geq 4000$ po pravilu ispunjen u deonicama vodovodne mreže.

Polazeći od Karmanovog uopštenja Prantlove teorije o putanji mešanja kod turbulentnog strujanja, teorijskim putem se dolazi do jednačine [1]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -k_1 \log \left(\frac{1}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) + k_2, \quad k_1, k_2 - \text{konstante},$$

koja daje vezu između koeficijenta trenja i Re – broja, za turbulentna strujanja u hidraulički glatkim cevima.

Prema mnogobrojnim eksperimentima izvršenim u glatkim cevima utvrđene su i konstante u napred datoj jednačini ($k_1 = 2, k_2 = -0,8$), čime se ova svodi na oblik

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}, \quad (2.15)$$

poznate Prantl – Karmanove jednačine za određivanje koeficijenta trenja u hidraulički glatkim cevima.

Prema jednačini (2.15) ne može se eksplicitno odrediti $\lambda = \lambda(\text{Re})$.

Za $\bar{\delta} = 0$, jednačina (2.12) svodi se na jednačinu (2.15).

Kako jednačina (2.15) ne određuje λ eksplicitno, u literaturi se daju brojne, jednostavnije, formule za određivanje koeficijenta trenja u hidraulički glatkim cevima. Od svih ovih formula, navedimo dve najpoznatije, koje se mogu primeniti i u deonicama vodovodnih mreža ($\text{Re} \geq 10^4$), a to su:

- Hermanova (Hermann-ova) formula:

$$\lambda = 0,0054 + \frac{0,396}{\text{Re}^{0,3}}, \quad \text{za } \text{Re} = 10^4 \div 2 \cdot 10^5, \quad (2.16)$$

- Nikuradzeova formula:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}, \quad \text{za } \text{Re} = 10^5 \div 10^8, \quad (2.17)$$

Zbog jednostavne formule navedimo i Blaziusovu (Blasius-ovu) formulu:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad \text{za } \text{Re} = 5 \cdot 10^3 \div 10^5, \quad (2.18)$$

mada je, zbog malih Re – brojeva za koje važi, njena primena u vodovodnim mrežama ograničena.

Za $\bar{\delta} = 0$, formula Altštula (2.12) svodi se na Blazijusovu formulu (2.18).

Kako se prema Kolbrukovoj jednačini (2.11) i Prantl-Karmanovoj jednačini (2.15), za hidraulički glatke cevi, koeficijent trenja (λ) ne određuje eksplicitno, u svim priručnicima praktične primene iz hidraulike, daju se dijagrami $\lambda = \lambda(\text{Re}, 1/\bar{\delta} = d/\delta)$, izračunati prema ovim jednačinama. Na sl. 2.2 dat je dijagram $\lambda = \lambda(\text{Re}, 1/\bar{\delta} = d/\delta)$ preuzet iz priručnika [2]. Koeficijent trenja u režimu laminarnog strujanja ($\text{Re} \leq 2320$) određen je korišćenjem jednačine $\lambda = 64/\text{Re}$. Zbog preglednosti dijagrama i apcisa (Re) i ordinata (λ) dijagrama su u logaritamskoj podeli (razmeri). $\lambda = \lambda(\text{Re}, 1/\bar{\delta} = d/\delta)$

Prema karakteru grafika $\lambda = \lambda(\text{Re}, 1/\bar{\delta} = d/\delta)$, datim na sl. 2.2, može se zaključiti da postoji oblast Re – brojeva i relativnih hrapavosti unutrašnjeg zida cevi δ (desno od granične krive A – A, na sl. 2.2) u kojoj uticaj Re – broja postaje zanemarljiv i koeficijent trenja zavisi samo od relativne hrapavosti unutrašnjeg zida cevi ($\lambda = \lambda(\bar{\delta})$).

Za strujanja kod kojih koeficijent trenja ne zavisi od Re – broja ($\lambda = \lambda(\bar{\delta})$) kaže se da su automodelna po Re – broju. Prema graničnoj krivoj A – A na sl. 2.1, može se zaključiti da je

$$\lambda = \lambda(\bar{\delta}), \quad \text{za } \bar{\delta} \geq \frac{1500}{\text{Re}}. \quad (2.19)$$

Za izračunavanje Darsijevog koeficijenta trenja u režimima automodelnih strujanja po Re – broju, u stručnoj literaturi se najčešće citiraju dve formule i to:

- formula Nikuradzea:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log(0,27 \cdot \bar{\delta}), \quad \text{tj.} \quad \lambda = \frac{1}{(1,14 - 2 \log \bar{\delta})^2} \quad \text{i} \quad (2.20)$$

- formula Šifrinsona:

$$\lambda = 0,111(\bar{\delta})^2. \quad (2.21)$$

Ako se u formulama Kolbruka (2.11) i Frenkelja (2.13) zanemare članovi u kojima figuriše Re – broj, ove se svode na formulu Nikuradzea (2.20), a po istom principu, formula Altštula (2.12), sa zanemarljivim odstupanjem, svodi se na formulu Šifrinsona (2.21).

Osim Darsijeve formule (2.7), u kojoj figuriše bezdimenzijski koeficijent trenja λ , za izračunavanje gubitka pritiska (napora) koristi se i Šezijeva formula (2.8), u kojoj figuriše Šezijev koeficijent C [$m^{0,5} s^{-1}$].

Za strujanje pod pritiskom u cevovodima od livenog gvožđa ili čelika, često je citirana Maningova (Manning-ova) formula za izračunavanje Šezijevog koeficijenta,

$$C = \frac{1}{n} R h^{1/6} = \frac{1}{n} \left(\frac{d}{4} \right)^{1/6}, \quad (2.22)$$

gde je $n = 0,011 \div 0,013$ koeficijent koji zavisi od hrapavosti cevi i uzima se:

- $n = 0,011$, za nove bitumenizirane cevi,
- $n = 0,012$, za upotrebljavane, lako korodirale cevi i
- $n = 0,013$, za upotrebljavane, jako korodirale cevi.

Za C prema formuli (2.22), jednačina (2.8') dobija oblik

$$\Delta h = \frac{4^{4/3} n^2 L}{d^{4/3}} c^2 = 6,35 \cdot n^2 \frac{L}{d^{4/3}} c^2. \quad (2.23)$$

Jednačina (2.23) poznata je kao Maningova jednačina za izračunavanje gubitka napora u pravolinijskim deonicama cevovoda od livenog gvožđa ili čelika.

S obzirom na jednačine (2.9) i (2.22) moglo bi se, iz formalnih razloga, doći i do, da je nazovemo Maningove formule za izračunavanje koeficijenta trenja u cevima od livenog gvožđa i čelika,

$$\lambda = \frac{8 \cdot 4^{1/3} g n^2}{d^{1/3}} = \frac{124,6 \cdot n^2}{d^{1/3}}, \quad (2.23')$$

gde je $n = 0,011 \div 0,013$, kako je uz formulu (2.22) objašnjeno, pa se s obzirom na ovo konkretno dobija:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{0,0151}{d^{1/3}}, \text{ za nove bitumenizirane cevi } (n = 0,011), \\ \lambda &= \frac{0,0179}{d^{1/3}}, \text{ za lako korodirale cevi } (n = 0,012) \text{ i} \\ \lambda &= \frac{0,0210}{d^{1/3}}, \text{ za jako korodirale cevi } (n = 0,013). \end{aligned}$$

Formula (2.23') može se pridružiti formulama za izračunavanje koeficijenta trenja u režimima automodelnih strujanja po Re – broju, s tim da je konkretno vezana za cevi od livenog gvožđa i čelika.

Jasno je, da bi se uvođenjem koeficijenta trenja λ po (2.23') u Darsijevu jednačinu (2.7), za Δh , ponovo dobila jednačina (2.23).

Kako je Maning svoju formulu (2.22), preko veličine koeficijenta n , definisao prema stanju cevi od livenog gvožđa ili čelika, a takve su i formule (2.23) i (2.23'), koje proističu iz (2.22), interesantno je zaključiti da bi pri istoj brzini strujanja vode u posmatranoj pravolinijskoj deonici cevovoda ($c = const$), odnosno pri istom zapreminskom protoku ($Q = const$), gubitak napora pri strujanju kroz upotrebljavane lako korodirani cevovod ($n = 0,012$), u odnosu na gubitak napora kroz novi bitumenizirani cevovod ($n = 0,011$) bio

$$\frac{\Delta h(n = 0,012)}{\Delta h(n = 0,011)} \left(= \frac{\lambda(n = 0,012)}{\lambda(n = 0,011)} \right) = 1,19, \quad \text{za } c = const \quad (Q = const),$$

dok bi odnos gubitka napora kroz upotrebljavani jako korodirani cevovod ($n = 0,013$) prema gubitku napora kroz novi bitumenizirani cevovod ($n = 0,011$) iznosio

$$\frac{\Delta h(n = 0,013)}{\Delta h(n = 0,011)} \left(= \frac{\lambda(n = 0,013)}{\lambda(n = 0,011)} \right) = 1,39, \quad \text{za } c = \text{const} \quad (q = \text{const}).$$

Prema napred izvedenoj analizi sleduje da, pri istom zapreminskom protoku ($q = \text{const}$), gubitak napora, posmatran u donosu na nov bitumeniziran cevovod od livenog gvožđa ili čelika, raste za skoro 20%, u slučaju da cevovod, zbog upotrebe, lako korodira, odnosno da raste za skoro 40%, u slučaju da cevovod, zbog dugotrajne upotrebe, jako korodira. Isti procenti promena važe i za koeficijente trenja λ , zbog čijih promena može da dođe i do preraspodele protoka u deonicama vodovodne mreže.

Treću grupu formula, koje se koriste za izračunavanje gubitka napora u pravolinijskim deonicama cevovoda, čine formule tipa

$$I = I(c, d), \quad \text{gde je} \quad I = \Delta h / L,$$

koje se svode na oblik

$$\Delta h = L \cdot I(c, d). \quad (2.24)$$

S obzirom na jednačinu (2.25) i drugu jednačinu (2.7), dobija se jednačina

$$\lambda = 2gd \frac{I(c, d)}{c^2}, \quad (2.25)$$

koja omogućava da se prema formuli $I = I(c, d)$, formalno, doredi njoj odgovarajuća formula za određivanje Darsijevog koeficijenta trenja.

Prema ispitivanjima na terenu, Ševeljev je postavio sledeće formule:

$$I = 0,00107 \cdot \frac{c^2}{d^{1,3}}, \quad \text{za } c \geq 1,2m/s, \quad (2.26)$$

$$i \quad I = 0,000912 \cdot \frac{c^2}{d^{1,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{c} \right)^{0,3}, \quad \text{za } c < 1,2m/s,$$

za cevovode koji su u eksploataciji, sa cevima od čelika i livenog gvožđa.

S obzirom na jednačine (2.24) i (2.26) dobija se:

$$\Delta h = 0,00107 \cdot \frac{L}{d^{1,3}} c^2, \quad \text{za } c \geq 1,2m/s, \quad (2.26')$$

$$i \quad I = 0,000912 \cdot \frac{L}{d^{1,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{c} \right)^{0,3} \cdot c^2, \quad \text{za } c < 1,2m/s,$$

a prema jednačinama (2.25) i (2.26) formalno se dobijaju i dogovarajući koeficijenti trenja:

$$\lambda = \frac{0,0210}{d^{0,3}}, \quad \text{za } c \geq 1,2m/s, \quad (2.26'')$$

$$i \quad \lambda = \frac{0,0179}{d^{0,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{c} \right)^{0,3}, \quad \text{za } c < 1,2m/s.$$

U napred datim formulama koeficijent trenja za $c \geq 1,2m/s$ odgovara režimima automodelnih strujanja po Re – broju, dok koeficijent trenja za $c < 1,2m/s$, preko brzine c , koja u njemu figuriše, indirektno zavisi i od Re – broja.

Upoređujući formule (2.26'') i (2.23'), koje važe za cevi od livenog gvožđa i čelika, lako je utvrditi, da za unutrašnje prečnike cevi $d = 0,050 \div 0,250m$ ($50 \div 250mm$), formula (2.26''), za $c \geq 1,2m/s$, odgovara formuli (2.23') za srednje korodirale cevi (za $n =$ između 0,012 i 0,013). Ovo je sasvim logično, s obzirom da je Ševaljev svoju formulu (2.26), iz koje proističe i formula (2.26''), dao za cevovode koji su u eksploataciji.

Za $c < 1,2m/s$, formula (2.26'') odgovarala bi, prema formuli (2.23'), stanju jako korodiranih cevovoda. Kako je verovatnoća, da su svi cevovodi u eksploataciji, sa $c < 1,2m/s$, koje je ispitivao Ševaljev, bili u jako korodiralom stanju, verovatnije je da izvedena formula Maninga (2.23'), ne opisuje najbolje strujanja sa $c < 1,2m/s$.

Za određivanje gubitka napora u plastičnim cevovodima, uzimajući u obzir i spajanje cevi u prirodnim uslovima, Ševaljev je dao formulu

$$I = 0,000685 \frac{c^{1,774}}{d^{1,226}}, \quad \text{odn.} \quad \Delta h = 0,000685 \frac{L}{d^{1,226}} c^{1,774}, \quad (2.27)$$

naglašavajući da se radi o plastičnim cevima ruske proizvodnje.

Prema jednačini (2.25), formula (2.27), za $I = I(c,d)$, transformiše se u formulu za Darsijev koeficijent trenja,

$$\lambda = \frac{0,0134}{(c \cdot d)^{0,226}}. \quad (2.27')$$

Za vodu temperature $(10 \div 25)^\circ C$, kinematički koeficijent viskoznosti vode je $\nu = (13 \div 0,9) \cdot 10^{-6} m^2/s$, pa se napred data formula može, dovoljno tačno, može napisati i u obliku:

$$\lambda = \frac{0,300}{Re^{0,226}}. \quad (2.27'')$$

Formula (2.27), iz koje proističe (2.27''), Ševaljev je postavio uzimajući u obzir i spajanje plastičnih cevi u prirodnim uslovima. Prema ovome koeficijent λ u (2.27'') obuhvata i lokalne gubitke napora u spojevima cevi, pa formula (2.27''), po svom obliku $\lambda = \lambda(Re)$, samo formalno odgovara formulama za određivanje koeficijenta λ u hidraulički glatkim cevima. Za Reynoldsove brojeve $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^5$ (kakvi su obično u deonicama vodovodnih mreža), koeficijenti λ dobijeni po formuli (2.27'') veći su od onih dobijenih za hidraulički glatke cevi ((2.15), (2.16) i (2.17)), za $(25 \div 15)\%$, s tim da manje razlike odgovaraju većim Re – brojevima.

Proizvodjači plastičnih cevi, zbog vrlo male hrapavosti unutrašnjih zidova ovakvih cevi, obično daju hidraulički nagib cevovoda ($I = \Delta h / L$), ili Darsijev koeficijent trenja (λ), ne prema rezultatima ispitivanja, već prema proračunu, korišćenjem neke od formula za hidraulički glatke cevi (obično formule (2.15)). Za svaki konkretan prečnik cevi ($d = const$), ovi podaci se daju u obliku tabela

$$I(c), \quad \text{ili} \quad \lambda(c),$$

a ređe i u obliku tabela

$$I(q), \quad \text{ili} \quad \lambda(q),$$

gde je q – protok kroz cev unutrašnjeg prečnika d ,

$$q = c \cdot \frac{d^2 \pi}{4}, \quad \text{odn.} \quad c = \frac{4q}{d^2 \pi}. \quad (2.28)$$

S obzirom na jednačine (2.7) i (2.6) je

$$q = \frac{2gd}{4c^2} I, \quad \text{odn.} \quad I = \frac{\lambda}{2gd} \cdot c^2. \quad (2.29)$$

Prema datim karakteristikama $I(c)$, ili $\lambda(c)$, odnosno datim karakteristikama $I(q)$, ili $\lambda(q)$, može se lako utvrditi da li su one date kao rezultat ispitivanja ili su rezultat proračuna po nekoj od formula za hidraulički glatke cevi.

Ako se utvrdi da su date karakteristike rezultat proračuna za hidraulički glatke cevi, treba proveriti da li je u svim delovima date karakteristike ispunjen uslov (2.14), da se cevi ponašaju kao hidraulički glatke. U delovima datih karakteristika, u kojima nije ispunjen uslov (2.14), ove treba proračunati korišćenjem formula (2.13), uzimajući u obzir i relativnu hrapavost zida cevi.

U svakom slučaju, date $I(c)$, ili $\lambda(c)$, karakteristike treba povećati za $5 \div 10\%$, s obzirom na spojeve cevi.

2.1.2. Karakteristike gubitka napora u deonicama cevovoda bez grananja protoka

Deonice cevovoda u kojima nema grananja protoka obično su, da ne kažemo, po pravilu, konstantnog prečnika. Cevovod obično nije pravolinijski. Račve na početku i na kraju deonice, kao i kolena, u kojima se menja pravac trase cevovoda, stvaraju lokalne gubitke napora. Lokalni gubici napora nastaju i na mestima spajanja cevi i na mestima ugradnje zaporne, ili druge armature.

Sve veličine vezane za cevovod bez račvanja protoka, indeksirane su, u ovom odeljku, sa 12, prema oznakama, kako je na sl. 2.1 prikazano, početka (1) i kraja (2) posmatrane deonice cevovoda. Tako je d_{12} – unutrašnji prečnik cevovoda, L_{12} – dužina cevovoda, a Q_{12} – protok vode u posmatranom deonici cevovoda.

Prema Darsijevoj formuli za proračun gubitka napora u pravolinijskim deonicama cevovoda (2.7) i formuli za proračun lokalnih gubitaka napora (2.30), gubitak napora u deonici cevovoda konstantnog protoka može se izračunati korišćenjem jednačine,

$$\Delta h_{12} = \left(\lambda_{12} \frac{L_{12}}{d_{12}} + \sum_{k=1}^n \xi_k \right) \cdot \frac{c_{12}^2}{2g},$$

odnosno, jednačine

$$\Delta h_{12} = \alpha_{12} \cdot \lambda_{12} \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}} \cdot \frac{c_{12}^2}{2g}, \quad (2.31)$$

gde je

$$\alpha_{12} = 1 + \frac{\sum_{k=1}^n \xi_k}{\lambda_{12} \frac{L_{12}}{d_{12}}}. \quad (2.31')$$

Drugi član u jednačini (2.31') predstavlja odnos lokalnih gubitaka napora prema gubicima napora u pravolinijskim deonicama cevovoda.

Pri proračunu spoljašnjih (uličnih) vodovodnih mreža ne detaljiše se sa lokalnim gubicima napora i uzima se da oni iznose $5 \div 10\%$ od gubitka napora u pravolinijskim deonicama cevovoda, pa je $\alpha_{12} = 1,05 \div 1,10$

Kako je

$$c_{12} = \frac{4Q_{12}}{d_{12}^2 \pi},$$

jednačina (2.31) može da se svede na oblik

$$\Delta h_{12} = K_{12} \cdot Q_{12}^2$$

gde je

$$K_{12} = \frac{8\alpha_{12}\lambda_{12}L_{12}}{\pi^2 g \cdot d_{12}} = 0,0826 \cdot \alpha_{12}\lambda_{12} \frac{L_{12}}{d_{12}^5}. \quad (2.32)$$

Kako koeficijent trenja λ_{12} , u opštem slučaju, zavisi od relativne hrapavosti unutrašnjeg zida cevi ($\bar{\delta}_{12} = \delta_{12} / d_{12}$) i veličine Rejnoldsovog broja,

$$\text{Re}_{12} = \frac{c_{12} \cdot d_{12}}{\nu} = \frac{4 \cdot Q_{12}}{\pi d_{12} \nu},$$

$\lambda_{12} = \lambda_{12}(\bar{\delta}_{12}, \text{Re}_{12})$, parametar K_{12} , u jednačini (2.32), u opštem slučaju je funkcija veličine $\bar{\delta}_{12}, L_{12}, d_{12}$ i Re – broja,

$$K_{12} = K_{12}(\bar{\delta}_{12}, L_{12}, d_{12}, \text{Re}_{12}),$$

a preko Rejnoldsovog broja, indirektno je u funkciji i protoka kroz posmatranu deonicu cevovoda. Veličine $\bar{\delta}_{12}, L_{12}$ i d_{12} su konstante. Koeficijent α_{12} , koji figuriše u formuli za K_{12} , takođe je konstanta, koja se prema proceni usvaja u granicama $\alpha_{12} = 1,05 \div 1,10$.

U slučajevima automodelnih strujanja po Re – broju, kada koeficijent trenja ne zavisi od Re – broja ($\lambda_{12} = \lambda_{12}(\bar{\delta}_{12})$), parametar K_{12} postaje konstanta i gubitak napora u deonici cevovoda opisuje se jednačinom kvadratne parabole.

$$\Delta h_{12} = K_{12} \cdot Q_{12}^2, \quad K_{12} = \text{const} \quad (2.33)$$

Napred data jednačina parabole je karakteristika gubitka napora u posmatranoj deonici cevovoda, a konstanta K_{12} , koja u njoj figuriše, je koeficijent karakteristike gubitka napora.

Kako je gubitak napora proporcionalan kvadratu protoka (odnosno kvadratu brzine), automodelna strujanja po Re – broju, zovu se još i strujanja sa kvadratnom karakteristikom gubitka napora (ili gubitka pritiska).

Maningova formula (2.23) za strujanje u cevima od livenog gvožđa ili čelika, u kojima su strujanja automodelna po Re – broju, uzimajući $\alpha_{12} = 1,05$, svodi se na oblik*

$$\Delta h_{12} = 0,00131 \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}} \cdot Q_{12}^2, \quad (K_{12} = 0,00131 \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}}), \quad (2.34)$$

za nove cevi,

$$\Delta h_{12} = 0,00156 \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}} \cdot Q_{12}^2, \quad (K_{12} = 0,00156 \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}}), \quad (2.34')$$

za lako korodirale cevi i

$$\Delta h_{12} = 0,00182 \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}} \cdot Q_{12}^2, \quad (K_{12} = 0,00182 \frac{L_{12}}{d_{12}^{5,33}}), \quad (2.34'')$$

za jako korodirale cevi.

Za hidraulički glatke cevi, u koje spadaju plastične vodovodne cevi, koeficijenti trenja se mogu eksplicitno izračunati korišćenjem formula (2.15) i (2.17). Blazijusova formula (2.18) je navedena zbog jednostavnog oblika i ne preporučuje se za korišćenje pri proračunu vodovodnih meža.

I pored činjenice da se ne preporučuje za primenu u proračunu kod plastičnih vodovodnih cevovoda, iz metodoloških razloga počnimo baš od Blazijusove jednačine (2.18). Zamenjujući Re prema jednačini (2.33), Blazijusova jednačina dobija oblik

$$\lambda_{12} = \frac{0,316}{\text{Re}_{12}^{0,25}} = \frac{0,316 \pi^{0,25} \nu^{0,25} d_{12}^{0,25}}{4^{0,25} Q_{12}^{0,25}} = \frac{0,297 \nu^{0,25} d_{12}^{0,25}}{Q_{12}^{0,25}}$$

* Relativna hrapavost cevi tokom eksploatacije cevovoda raste, a sa njom raste i koeficijent trenja, odnosno gubitka napora. Višegodišnje gledano, karakteristike gubitka napora u deonicama vodovodne mreže menjaju se.

što zamenom Re u drugu jednačinu (2.32) daje

$$K_{12} = \frac{B_{12}}{Q_{12}^{0,25}}, \quad \text{gde je} \quad B_{12} = 0,0245 \cdot d_{12} \cdot v^{0,25} \frac{L_{12}}{d_{12}^{4,75}} = const, \quad (2.35)$$

pa je gubitak napora u posmatranoj deonici cevovoda definisan jednačinom

$$\Delta h_{12} = B_{12} \cdot Q_{12}^{1,75} \quad (2.35')$$

Polazeći od Hermanove formule (2.16), za proračun koeficijenta trenja, dobilo bi se

$$K_{12} = E_{12} + \frac{F_{12}}{q_{12}^{0,3}},$$

$$E_{12} = 0,000446 \cdot \alpha_{12} \frac{L_{12}}{d_{12}^5} = const, \quad F_{12} = 0,0304 \cdot \alpha_{12} \frac{v^{0,3} L_{12}}{d_{12}^{4,7}}, \quad (2.36)$$

pa je gubitak napora u posmatranoj deonici cevovoda definisan jednačinom

$$\Delta h_{12} = E_{12} \cdot Q_{12}^2 + F_{12} \cdot Q_{12}^{1,7} \quad (2.36')$$

Za strujanja u kojima koeficijent trenja zavisi od Re – broja i od relativne hrapavosti cevi, za njegovo izračunavanje može se koristiti jednostavna, ali i dovoljno tačna, formula Altštula (2.12). Polazeći od ove formule, dobilo bi se

$$K_{12} = 0,00909 \cdot d_{12} \left(\frac{53,4 \cdot v \cdot d_{12}}{Q_{12}} + \bar{\delta}_{12} \right)^{0,25} \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}^5} \quad (2.37)$$

odnosno,

$$\Delta h_{12} = 0,00909 \cdot dij \left(\frac{53,4 \cdot v \cdot d_{12}}{Q_{12}} + \bar{\delta}_{12} \right)^{0,25} \cdot \frac{L_{12}}{d_{12}^5} \cdot Q_{12}^2 \quad (2.37')$$

Napred date jednačine (2.35'), (2.36') i (2.37') najbolje svedoče oblicima funkcije $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}(Q_{12})$ kojima se može opisati gubitak napora u posmatranoj deonici vodovodne mreže u kojoj je $\lambda_{12} = \lambda_{12}(Re_{12})$ ili je $\lambda_{12} = \lambda_{12}(Re_{12}, \bar{\delta}_{12})$. Polazeći i od drugih formula za pororačun koeficijenta trenje, datim u odeljku 2.1.1, mogli smo da napišemo još nekoliko ovakvih funkcija, ali bi zaključak bio isti, glasi:

- polazeći od različitih formula za izračunavanje $\lambda_{12} = \lambda_{12}(Re_{12})$ i $\lambda_{12} = \lambda_{12}(Re_{12}, \bar{\delta}_{12})$, dobijaju se različite funkcije $\Delta h_{12} = \Delta h_{12}(\bar{\delta}_{12})$, koje u opštem slučaju nisu slične i
- polazeći samo od formula oblika

$$\lambda_{12} = \frac{a}{Re_{12}^m}, \quad a = const, \quad m < 1,$$

za hidraulički glatke cevi, dobija se funkcija gubitka napora u obliku

$$\Delta h_{12} = C_{12} \cdot Q_{12}^n, \quad C_{12} = const, \quad n = 2 - m.$$

U literaturi se, kao opšta formula za izračunavanje gubitka napora u cevovodu, često citira jednačina

$$\Delta h = K \cdot Q^n, \quad K = const, \quad n \leq 2,$$

gde koeficijent K zavisi od geometrijskih parametara cevovoda, a veličina eksponenta n zavisi od režima strujanja (Re – broja). Za izrazito turbulentna strujanja je $n \leq 2$, a kod laminarnih strujanja je $n = 1$ (što se može dokazati, polazeći od formule $\lambda = 64 / Re$, za $Re \leq 2320$).

Napomenimo odmah da o laminarnim strujanjima u vodovodnim mrežama nema smisla i govoriti.

Prema napred datoj diskusiji, jasno je, da o opštoj formuli $\Delta h = K \cdot q^n$ nema smisla govoriti, izuzimajući izrazito turbulentna strujanja (automodelna strujanja po Re – broju).

Usvaja se da se i kod strujanja koja nisu automodelna po Re – broju, gubitak napora u deonici vodovodne mreže opisuje jednačinom oblika (2.33), odnosno jednačinom (2.32), gde K_{12} nije konstanta, već parametar koji zavisi od protoka Q_{12} , kako je prikazano jednačinama (2.35), (2.36) i (2.37).

Razlog da se jednačina (2.32) koristi kao opšta formula predstavljanja gubitka napora u deonici vodovodne mreže je:

- uopštavanje metodologije proračuna vodovodnih mreža i
- promena gubitka napora zbog promene protoka u cevovodu mnogo više izražava član Q_{12}^2 nego li parametar K_{12} .

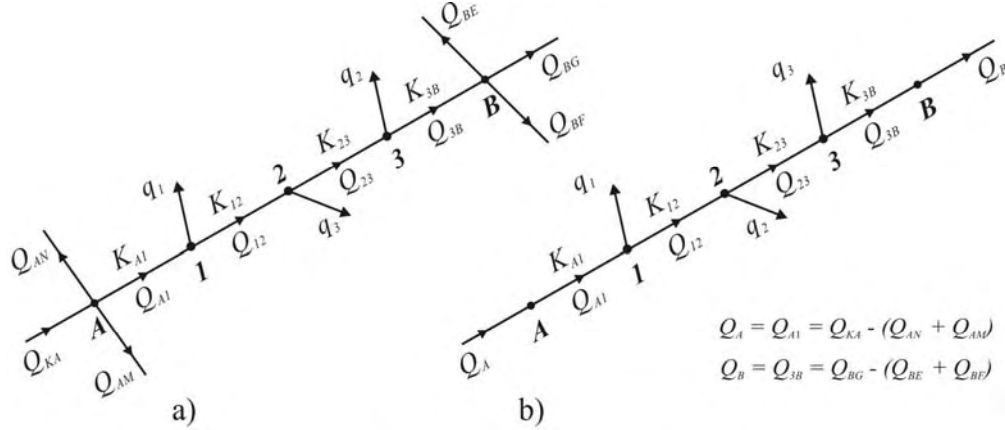
Da je ova druga tvrdnja tačna, može se jednostavno pokazati korišćenjem jednačine (2.35), koja je dobijena polazeći od Blazijusove formule za proračun koeficijenta trenja u hidraulički glatkim cevima. Promenom pritiska Q_{12} za 2 puta, član Q_{12}^2 se menja 4 puta, a parametar K_{12} se menja 1,19 puta (suprotno od promene protoka), dok bi se gubitak napora promenio za 3,35 puta. Ne ovako jednostavno, ali slično bi se moglo pokazati i korišćenjem jednačina (2.36) i (2.37).

U literativnim proračunima prstenastih vodovodnih mreža, u deonicama u kojima je λ_{12} funkcija i Re_{12} – broja, parametri K_{12} menjaju se u svakom iterativnom koraku rešavanja zadatka, ali se zbog njihove relativno male promene, postupak rešavanja zadatka značajno ne produžuje.

2.2. GUBITAK NAPORA U DEONICI VODOVODNE MREŽE SA USPUTNOM POTROŠNOM VODE

Čvorovima vodovodne mreže zovu se mesta račvanja magistralnih cevovoda vodovodne mreže i mesta priključka potrošača na krajevima magistralnih cevovoda. Deonicom magistralne vodovodne mreže zovu se cevovodi koji povezuju čvorove magistralne vodovodne mreže.

Označavajući sa Q protoke u deonicama magistralnih vodovodnih mreža, a sa q protoke koji se odvođe potrošačima, na sl. 2.10 prikazana je magistralna deonica vodovodne mreže između čvornih tačaka A i B, sa tri priključka potrošača (1, 2 i 3).



sl.2.11. Magistralna deonica vodovodne mreže (A - B) sa tri potrošača vode (q_1, q_2 i q_3)

Prema oznakama na sl. 2.10, protok u ulaznoj deonici magistralne deonice mreže je $Q_A = Q_{A1}$, dok je protok u izlaznoj deonici posmatrane magistralne deonice Q_B , pri čemu je

$$Q_A = Q_B + q, \quad q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (2.38)$$

gde je $q = q_1 + q_2 + q_3$ ukupan protok vode koji troše potrošači priključeni na magistralnu deonicu vodovodne mreže AB.

Gubici napora u deonicama magistralne vodovodne mreže AB su, prema oznakama na sl.2.11

$$\Delta h_{A1} = K_{A1} \cdot Q_{A1}^2, \quad \Delta h_{12} = K_{12} \cdot Q_{12}^2, \quad \Delta h_{23} = K_{23} \cdot Q_{23}^2, \quad \Delta h_{3B} = K_{3B} \cdot Q_{3B}^2,$$

odnosno

$$\Delta h_{AB}^{(3)} = K_{A1} \cdot Q_{A1}^2 + K_{12} \cdot Q_{12}^2 + K_{23} \cdot Q_{23}^2 + K_{3B} \cdot Q_{3B}^2, \quad (2.39)$$

gde su:

$$\begin{aligned} Q_{A1} &= Q_B + q = Q_B + (q_1 + q_2 + q_3), \\ Q_{12} &= Q_{A1} - q_1 = Q_B + (q_2 + q_3), \\ Q_{23} &= Q_{12} - q_2 = Q_B + q_3, \\ Q_{3B} &= Q_{23} - q_3 = Q_B. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Gornji indeks (3) uz oznaku gubitka napora $\Delta h_{AB}^{(3)}$ označava da se govori o cevovodu sa 3 priključena potrošača.

S obzirom na jednačine (2.40), jednačina (2.39) dobija oblik

$$\Delta h_{AB}^{(3)} = K_{A1} \cdot (Q_B + (q_1 + q_2 + q_3))^2 + K_{12} \cdot (Q_B + (q_2 + q_3))^2 + K_{23} \cdot (Q_B + q_3)^2 + K_{3B} \cdot Q_B^2 \quad (2.41)$$

U slučajevima kada koeficijenti trenja u cevovodu (λ) zavise samo od relativne hrapavosti cevi ($\lambda = \lambda(\bar{\delta})$), tj. u slučajevima kada su strujanja automodela po Re – broju, veličine K_{A1} , K_{12} ,

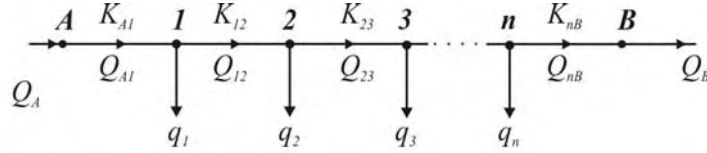
K_{23} i K_{33} , u jednačini (2.41), su konstante i predstavljaju koeficijente karakteristika gubitka napora u deonicama cevovoda,

$$K_{A1} = \text{const}, \quad K_{12} = \text{const}, \quad K_{23} = \text{const}, \quad K_{33} = \text{const}, \quad \text{za } \lambda = \lambda(\bar{\delta}).$$

U režimima strujanja u kojima je $\lambda = \lambda(\text{Re}, \bar{\delta})$ ili $\lambda = \lambda(\text{Re})$, veličine K_{A1} , K_{12} , K_{23} i K_{33} su parametri karakteristika gubitka napora u deonicama cevovoda, koji zavise od protoka u odgovarajućim deonicama cevovoda,

$$K_{A1} = K_{A1}(Q_{A1}), \quad K_{12} = K_{12}(Q_{12}), \quad K_{23} = K_{23}(Q_{23}), \quad K_{3B} = K_{3B}(Q_{3B}), \quad \text{za } \lambda = \lambda(\text{Re}, \bar{\delta}) \text{ ili } \lambda = \lambda(\text{Re}).$$

Razmotrimo primer većeg broja ravnomerno raspoređenih potrošača sa jednakom potrošnjom vode, kako je na sl. 2.12 prikazano



sl.2.12. Deonica cevovoda (AB) sa n ravnomerno raspoređenih potrošača sa jednakom potrošnjom vode

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n = \frac{q}{n}$$

$$q = \sum_{j=1}^n q_j, \quad L_{A1} = L_{12} = L_{23} = \dots = L_{nB} = \frac{L_{AB}}{n+1}$$

Prema oznakama na sl. 2.12, gubitak napora u deonici cevovoda AB je:

$$\Delta h_{AB}^{(n)} = K_{A1} Q_{A1}^2 + K_{12} Q_{12}^2 + K_{23} Q_{23}^2 + \dots + K_{nB} Q_{nB}^2.$$

Ako je Q ukupan protok koji se odvodi potrošačima priključenim na deonicu cevovoda AB, a Q_B tranzitni protok, koji se odvodi potrošačima iza ove deonice cevovoda, protok na ulazu u deonicu AB je:

$$Q_A = Q_B + q, \quad (2.42)$$

Za $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n = q/n$, protoci u deonicama cevovoda između priključka potrošača su:

$$\begin{aligned} Q_{A1} &= Q_A = Q_B + q = Q_B + n \frac{q}{n}, \\ Q_{12} &= Q_{A1} - q_1 = Q_B + (n-1) \frac{q}{n}, \\ Q_{23} &= Q_{12} - q_2 = Q_B + (n-2) \frac{q}{n}, \\ Q_{nB} &= Q_B. \end{aligned} \quad (2.42)$$

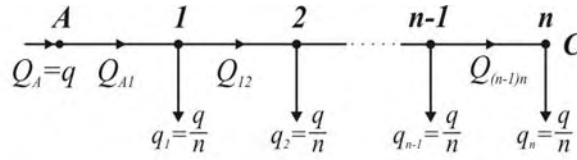
S obzirom na jednačine (2.42), gubitak napora u deonici cevovoda AB je:

$$\Delta h_{AB}^{(n)} = K_{A1} \left(Q_B + \frac{n}{n} \cdot q \right)^2 + K_{12} \left(Q_B + \frac{n-1}{n} q \right)^2 + K_{23} \left(Q_B + \frac{n-2}{n} q \right)^2 + \dots + K_{nB} Q_{nB}^2 \quad (2.43)$$

U slučaju da je deonica cevovoda AB istog prečnika i da je strujanje u njoj automodelno po Re – broju (λ - *const*), za $L_{A1} = L_{12} = L_{23} = \dots = L_{AB} = L_{AB} / (n+1)$ je $K_{A1} = K_{12} = K_{23} = \dots = K_{AB} = K_{AB} / (n+1)$, pa jednačina (2.43) dobija oblik,

$$\Delta h_{AB}^{(n)} = \frac{K_{AB}}{n+1} \sum_{j=0}^n \left(Q_B + \frac{j}{n} q \right)^2 \quad (2.44)$$

Razmotrimo i primer cevovoda AC, u krajnjoj grani vodovodne mreže, sa n ravnomerno raspoređenih potrošača sa jednakom potrošnjom vode, kako je na sl. 2.13 prikazano.



sl.2.13. Deonica cevovoda u krajnjoj grani vodovodne mreže

$$L_{A1} = L_{12} = L_{23} = \dots = L_{(n-1)n} = \frac{L_{AC}}{n}$$

Protoci vode u deonicama cevovoda između priključaka potrošača su:

$$Q_{A1} = q = \frac{n}{n}q, \quad Q_{12} = \frac{n-1}{n}q, \quad Q_{23} = \frac{n-2}{n}q, \dots, Q_{(n-1)n} = \frac{1}{n}q,$$

pa je gubitak napora u cevovodu AC:

$$\Delta h_{AC}^{(n)} = K_{A1} \left(\frac{n}{n}q \right)^2 + K_{12} \left(\frac{n-1}{n}q \right)^2 + \dots + K_{(n-1)n} \left(\frac{1}{n}q \right)^2. \quad (2.45)$$

U slučaju da je deonica cevovoda AC istog prečnika i da je strujanje u njoj automodelno po Re – broju (λ - *coust*), za $L_{A1} = L_{12} = L_{23} = \dots = L_{(n-1)n} = L_{AC}/n$ je $K_{A1} = K_{12} = K_{23} = \dots = K_{(n-1)n} = K_{AC}/n$, pa se jednačina (2.45) svodi na:

$$\Delta h_{AC}^{(n)} = \frac{K_{AC}}{n^3} q^2 \sum_{j=0}^n j^2. \quad (2.45')$$

Ako bi se sav protok Q potrošio na kraju deonice AC gubitak napora bi bio veći od gubitka napora pri usputnoj potrošnji i iznosio bi

$$\Delta h_{AC}^{(1)} = K_{AC} \cdot q^2. \quad (2.46)$$

Uz uslov pod kojim je izvedena jednačina (2.45') odnos ova dva gubitka napora je

$$\beta = \frac{\Delta h_{AC}^{(1)}}{\Delta h_{AC}^{(n)}} = \frac{n^3}{\sum_{j=1}^n j^2}, \quad (2.47)$$

što je ilustrovano podacima $\beta(n)$ datim u tabeli I.

Tabela I

n	2	3	4	5	10	20	30
β	1,60	1,93	2,13	2,27	2,60	2,79	2,86

U slučaju kada koeficijenti trenja u cevovodu zavise i od Rejnoldsovog broja ($\lambda = \lambda(Re, \delta)$), parametri karakteristika gubitka napora u deonicama cevovoda između potrošača ($K_{A1}, K_{12} \dots$) koji figurišu jednačinu (2.45), indirektno, preko veličine Re – brojeva ($Re_{A1}, Re_{12} \dots$), zavise od protoka u odgovarajućim deonicama cevovoda ($K_{A1} = K_{A1}(Q_{A1}), K_{12} = K_{12}(Q_{12}), \dots$) i nisu jednaki za $L_{A1} = L_{12} = \dots = L_{(n-1)n} = L_{AC}/n$. Iz navedenog razloga jednačina (2.45) ne može se svesti na oblik (2.45').

Sa smanjenjem protoka smanjuju se Re – brojevi, a rastu koeficijenti trenja i parametri karakteristika gubitka napora u nizvodnim deonicama cevovoda ($K_{A1} < K_{12} < \dots < K_{(n-1)n}$). S obzirom na ovo, odnos gubitka napora pri tranzitnom protoku kroz cevovod, prema gubitku napora pri usputnoj potrošnji vode, manji je od onog dobijenog po jednačini (2.47).

2.3. SVOĐENJE USPUTNE POTROŠNJE VODE NA FIKTIVNE POTROŠAČE NA POČETKU I KRAJU CEVOVODA

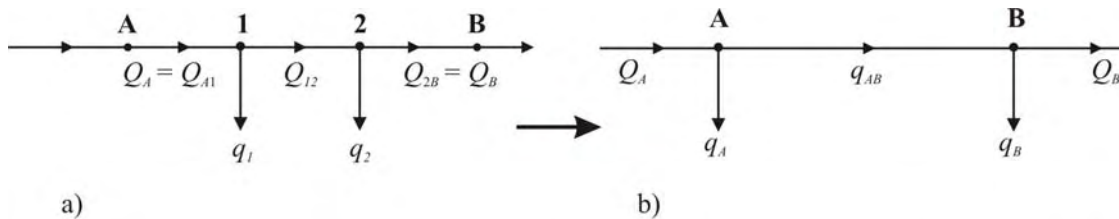
Gubitak napora u cevovodu sa usputnom potrošnjom vode $\Delta h_{AB}^{(n)}$ manji je od gubitka napora u istom tom cevovodu, u slučaju da je sav protok na ulazu u cevovod ($Q_A = Q_B + q$) tranzitno prošao kroz cevovod. Postoji neki protok Q_{AB} ($Q_B < Q_{AB} < Q_B + q$) koji bi tranzitno prolazeći kroz cevovod stvarao gubitak napora ($\Delta h_{AB} = K_{AB} \cdot Q_{AB}^2$) jednak gubitku napora u cevovodu sa usputnom potrošnjom vode ($\Delta h_{AB} = \Delta h_{AB}^{(n)}$),

$$Q_{AB} = \sqrt{\frac{\Delta h_{AB}^{(n)}}{K_{AB}}}, \quad (2.48)$$

gde je K_{AB} – koeficijent (parametar) karakteristike gubitka napora u cevovodu AB , a $\Delta h_{AB}^{(n)}$ – gubitak napora u cevovodu sa n priključenih potrošača.

Određujući, prema jednačini (2.48), ekvivalentni tranzitni protok Q_{AB} , cevovodu sa n priključenih potrošača, prema gubitku napora, ekvivalentan je cevovodu sa potrošačima na početku i na kraju cevovoda,

$$q_A = Q_B + q - Q_{AB}, \quad q_B = Q_{AB} - Q_B. \quad (2.49)$$



sl. 2.14. Svođenje usputne potrošnje vode na fiktivne potrošače na početku i na kraju posmatrane deonice cevovoda

Za deonicu cevovoda AB , prikazanu na sl. 2.14. a, sa dva priključena potrošača, gubitak napora je

$$\Delta h_{AB}^{(2)} = K_{A1}(Q_B + q)^2 + K_{12}(Q_B + q_2)^2 + K_{B2}Q_B^2 \quad (2.50)$$

gde je $q = q_1 + q_2$.

Zamenjujući (2.50) i (2.48) dobija se

$$Q_{AB} = \sqrt{\frac{K_{A1}}{K_{AB}}(Q_B + q)^2 + \frac{K_{12}}{K_{AB}}(Q_B + q_2)^2 + \frac{K_{B2}}{K_{AB}}Q_B^2} \quad (2.51)$$

gde je $K_{AB} = K_{A1} + K_{12} + K_{B2}$.

Po određivanju ekvivalentnog tranzitnog protoka kroz cevovod AB , korišćenjem jednačina (2.49) izračunavaju se protoci q_A i q_B , čime se usputna potrošnja vode (q_1 i q_2) svodi na dva fiktivna potrošača na početku i kraju cevovoda AB , kako je na sl. 2.14.b prikazano.

Zadržimo se malo na pitanju određivanja ekvivalentnog protoka Q_{AB} .

Ako su koeficijeti trenja λ_{A1} , λ_{12} i λ_{B2} konstante (ako je strujanje u svim deonicama cevovoda automodelno po Rejnoldsovom broju), konstantne su i veličine K_{A1} , K_{12} i K_{B2} (koeficijenti karakteristika gubitka napora u odgovarajućim deonicama cevovoda), koje figurišu u jednačini (2.51). Protok Q_{AB} , u ovom slučaju, se jednostavno, izračunava korišćenjem jednačine (2.51), u kojoj figurišu konstante.

Ako, pak, koeficijenti trenja λ_{A1} , λ_{12} i λ_{2B} zavise i od Reynoldsovih brojeva (Re_{A1} , Re_{12} , Re_{2B}), veličine K_{A1} , K_{12} , K_{2B} i K_{AB} , koje figurišu u jednačini (2.51) indirektno zavise i od odgovarajućih protoka i to:

$$K_{A1} = f_{A1}(Q_B + q), \quad K_{12} = f_{12}(Q_B + q_2), \quad K_{2B} = f_{2B}(Q_{AB}) \quad \text{i} \quad K_{AB} = f_{AB}(Q_{AB}).$$

Kako su protoci fiksirani ($Q_B = const$, $q = const$, $q_2 = const$) veličine K_{A1} , K_{12} i K_{2B} svode se na konstante, ali kao parametar koji zavisi od traženog protoka q_{AB} ostaje veličina K_{AB} , pa se jednačina (2.51) mora rešavati iterativnim postupkom.

Preporučuje se da se u početnom približanju uzme $Q_{AB} = 0,7(Q_B + q)$ i prema ovom protoku odredi parametar K_{AB} u početnom približanju, a zatim, prema jednačini (2.51) izračuna protok Q_{AB} u prvom približanju. Sa protokom Q_{AB} iz prvog približanja ulazi se u drugi iterativni korak određivanja ovog protoka i tako dalje, dok razlika dobijenog protoka i protoka iz prethodnog približenja ne postane zanemarljivo mala. Kako se parametar gubitka napora $K_{AB} = f_{AB}(Q_{AB})$ relativno malo menja, proračun se, praktično završava u dva, najviše tri, interaktivna koraka.

U slučaju da su, kako je na sl. 2.12 prikazano, potrošači ravnomerno raspoređeni duž vodovoda, da im je potrošnja ista i da je koeficijent trenja u cevovodu konstantan, gubitak napora može se izračunati korišćenjem jednačine (2.44). Zamenjujući (2.44) i (2.48) dobija se

$$Q_{AB} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \left(Q_B + \frac{j}{n} q \right)^2}, \quad (2.52)$$

gde su:

q – protok kojeg troše potrošači priključeni na cevovod AB ,

Q_B – protok koji se tranzitno provodi kroz cevovod AB , ka potrošačima iza ove deonice cevovoda,

n – broj priključenih potrošača.

Za $Q_B = 0$ jednačina (2.52) svodi se na oblik

$$Q_{AB} = \frac{q}{n} \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^n k^2}. \quad (2.52.a)$$

Prema jednačini (2.52.a) izračunati ekvivalentni protoci Q_{AB} i prema jednačini (2.49) izračunati protoci q_A i q_B , fiktivnih potrošača na početku i kraju cevovoda (na koje se svode realni potrošači), za različiti broj priključenih potrošača (n), dati su u tabeli II. U tabeli je dat i odnos protoka

$$\alpha = (Q_{AB} - Q_B) / q \quad (Q_{AB} = Q_B + \alpha \cdot q)$$

Tabela II ($Q_B = 0$, $Q_A = q$)

n	1	2	3	4	5	...	10
Q_{AB}	$0,707 \cdot q$	$0,645 \cdot q$	$0,624 \cdot q$	$0,612 \cdot q$	$0,606 \cdot q$	...	$0,592 \cdot q$
q_A	$0,293 \cdot q$	$0,355 \cdot q$	$0,376 \cdot q$	$0,388 \cdot q$	$0,394 \cdot q$	...	$0,408 \cdot q$
q_B	$0,707 \cdot q$	$0,645 \cdot q$	$0,624 \cdot q$	$0,612 \cdot q$	$0,606 \cdot q$	...	$0,592 \cdot q$
α	0,707	0,645	0,624	0,612	0,606	...	0,592

Za $Q_B = 0,5q$ jednačina (2.50) svodi se na oblik

$$Q_{AB} = q \sqrt{\frac{1}{4(n+1)} \sum_{j=0}^n \left(1 + \frac{2}{n} j \right)^2}. \quad (2.52.b)$$

Prema jednačinama (2.52.b) i (2.49) izračunati protoci Q_{AB} , q_A i q_B i odnosi protoka $\alpha = (Q_{AB} - Q_B)/q$, dati su u tabeli III,

Tabela III ($Q_B = 0,5q$, $Q_A = 1,5q$)

n	1	2	3	4	5	...	10
Q_{AB}	$1,118 \cdot q$	$1,080 \cdot q$	$1,067 \cdot q$	$1,061 \cdot q$	$1,057 \cdot q$	...	$1,049 \cdot q$
q_A	$0,382 \cdot q$	$0,420 \cdot q$	$0,433 \cdot q$	$0,439 \cdot q$	$0,443 \cdot q$	...	$0,451 \cdot q$
q_B	$0,618 \cdot q$	$0,580 \cdot q$	$0,567 \cdot q$	$0,561 \cdot q$	$0,557 \cdot q$	...	$0,549 \cdot q$
α	0,618	0,580	0,567	0,561	0,557	...	0,549

Za $Q_B = q$ jednačina (2.57) svodi se na oblik

$$Q_{AB} = q \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \left(1 + \frac{1}{n} j\right)^2}, \quad (2.57.c)$$

a prema njoj i jednačinama (2.49) izračunati protoci Q_{AB} , q_A i q_B , kao i odnosi protoka $\alpha = (Q_{AB} - Q_B)/q$, dati su u tabeli IV.

Tabela IV ($Q_B = q$, $Q_A = 2q$)

n	1	2	3	4	5	...	10
Q_{AB}	$0,581 \cdot q$	$0,555 \cdot q$	$0,546 \cdot q$	$0,541 \cdot q$	$0,538 \cdot q$	...	$0,533 \cdot q$
q_A	$0,419 \cdot q$	$0,445 \cdot q$	$0,454 \cdot q$	$0,459 \cdot q$	$0,462 \cdot q$	...	$0,467 \cdot q$
q_B	$0,581 \cdot q$	$0,555 \cdot q$	$0,546 \cdot q$	$0,541 \cdot q$	$0,538 \cdot q$	...	$0,533 \cdot q$
α	0,581	0,555	0,546	0,541	0,538	...	0,533

Za $Q_B = 2q$ jednačina (2.52) svodi se na oblik

$$Q_{AB} = q \sqrt{\frac{4}{n+1} \sum_{j=0}^n \left(1 + \frac{1}{2n} j\right)^2}, \quad (2.52.d)$$

a prema njoj i jednačina (2.49) izračunati protoci Q_{AB} , q_A i q_B , kao i odnosi $\alpha = (Q_{AB} - Q_B)/q$, dati su u tabeli V.

Tabela V ($Q_B = 2q$, $Q_A = 3q$)

n	1	2	3	4	5	...	10
Q_{AB}	$2,550 \cdot q$	$2,553 \cdot q$	$2,527 \cdot q$	$2,525 \cdot q$	$2,523 \cdot q$	...	$2,520 \cdot q$
q_A	$0,450 \cdot q$	$0,467 \cdot q$	$0,473 \cdot q$	$0,475 \cdot q$	$0,477 \cdot q$	...	$0,480 \cdot q$
q_B	$0,550 \cdot q$	$0,533 \cdot q$	$0,527 \cdot q$	$0,525 \cdot q$	$0,523 \cdot q$	...	$0,520 \cdot q$
α	0,550	0,533	0,527	0,525	0,523	...	0,520

Prema podacima iz tabela II, III, IV i V može se zaključiti:

- protok q_A uvek je manji od protoka, q_B ($q_A/q_B < 1$)
- odnos protoka $\alpha = (Q_{AB} - Q_B)/q$ u cevovodima sa tranzitnim protokom ($Q_B \neq 0$) menja se u relativno uskim granicama $\alpha = (0,60 \div 0,50)$, gde manji broj odgovara velikim tranzitnim protocima*

* za $Q_B = 10q$ dobilo bi se $\alpha = 0,506$, za $n = 5$ i $\alpha = 0,505$ za $n = 10$

Za $Q_B = 0$ je $\alpha \leq 0,60$ za $n > 5$ i sa povećanjem broja potrošača (n) teži graničnoj vrednosti $\alpha = 0,58$.

S obzirom na granice promene, ekvivalentan tranzitan protok kroz posmatranu mu deonicu vodovodne mreže je

$$Q_{AB} = Q_B + \alpha \cdot q \quad (2.53)$$

a protoci fiktivno redukovanih potrošača na početku i kraju deonice su:

$$q_A = Q_B + q - Q_{AB} = (1 - \alpha)q \quad \text{i} \quad q_B = Q_{AB} - Q_B = \alpha \cdot q \quad (2.53')$$

Ako se krajnja grana vodovodne mreže AC , prikazana na sl. 2.13, svodi na cevovod sa dva potrošača na početku i na kraju cevovoda, dobilo bi se

$$Q_{AC} = \sqrt{\frac{\Delta h_{AC}^{(n)}}{K_{AC}}} \quad \text{i} \quad q_A = q - Q_{AC}, \quad q_C = Q_{AC}.$$

Uz uslove za koje je izvedena jednačina (2.45'), za $\Delta h_{AB}^{(n)}$, dobija se

$$Q_{AC} = \frac{q}{n} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n k^2} \quad (2.54)$$

Za $n = 1$ cevovod AC je sa samo jednim potrošačem na kraju cevovoda ($q_C = q$, $Q_{AB} = q_1$, $q_A = 0$), pa jednačinu (2.54) ima smisla koristiti za $n > 1$ ($n = 2, 3, \dots$).

Ekvivalentni tranzitni protoci Q_{AB} dobijeni po formuli (2.54) veći su u odnosu na ekvivalentne tranzitne protoke Q_{AC} dobijene po formuli (2.52.a) za $\sqrt{(n+1/n)}$. Razlog ovome je što cevovod AC ima n deonica, a cevovod AB ima jednu deonicu više.

U, teorijski gledano, graničnom slučaju, za $n = \infty$, po obe formule se dobijaju $\alpha_{AC} = \alpha_{AD} = 1/\sqrt{3} = 0,58$.

Na sl. 2.15.a prikazana je jedna trograna vodovodna mreža sa 30 potrošača (q_1, q_2, \dots, q_{30}). Magistralnu granu čini cevovod $A - B - C$, a bočne grane su cevovodi $C - D$, $C - E$ i $B - F$. Čvorove mreže čine mesto priključka vodovodne mreže na dovodni (naporni, magistralni) cevovod, mesta grananja cevovoda i mesta priključaka krajnjih potrošača. Ova mesta su na sl. 2.15.a označena tačkama A, B, C, D, E, F , što znači da posmatrana mreža ima 6 čvorova. Deonicama vodovodne mreže zovu se cevovodi koji povezuju čvorove mreže i ima ih 5 (AB, BC, CD, CE i AF). Broj deonica granate vodovodne mreže uvek je manji za jedan od broja čvorova mreže.

Prema napred izloženom principu ekvivalentnog protoka u deonici cevovoda, definisanog jednačinama (2.48) i (2.49), uz mogućnost promene indeksa (AB) u njima, realni potrošači, u svim deonicama posmatrane vodovodne mreže, mogu se zameniti fiktivnim potrošačima na početku i kraju deonica vodovodne mreže, kako je na sl. 2.15.b prikazano.

Ulazni protok u deonicu AB je $Q_A = \sum_{j=1}^{30} q_j$, a tranzitni protok kroz nju je $q_B = \sum_{j=5}^{30} q_j$.

Prema jednačinama (2.48) i (2.49) izračunati ekvivalentni protok i protoci fiktivnih potrošača na početku i kraju ove deonice vodovodne mreže su Q_{AB} , q_A i q'_B . Ulazni protok u deonicu BC je

$Q_B = \sum_{j=5}^{23} q_j$, a tranzitni protok kroz nju je $Q_C = \sum_{j=9}^{23} q_j$, a prema jednačinama (2.48) i (2.49), sa

indeksima BC , umesto AB , ekvivalentan tranzitan protok je Q_{BC} , a protoci fiktivnih potrošača na početku i kraju ove deonice mreže su q''_B i q'_C . Ulazni protok u deonicu mreže BF je

$Q_B = \sum_{j=24}^{30} q_j$, a tranzitni protok kroz nju je $Q_F = q_{29} + q_{30}$. Prema jednačinama (2.48) i (2.49), sa

indeksom BF , umesto AB , izračunati efektivan tranzitni protok je Q_{BF} a izračunati protoci

fiktivnih potrošača na početku i kraju ove deonice mreže su q_B''' i q_F' . Po istom principu izračunavaju se i efektivni protoci u ostale dve deonice mreže i fiktivni protoci potrošača na njihovom početku i kraju. Tako se za deonicu mreže CD , za $Q_C = \sum_{j=9}^{16} q_j$ i $Q_D = q_{16}$ dobija Q_{CD} ,

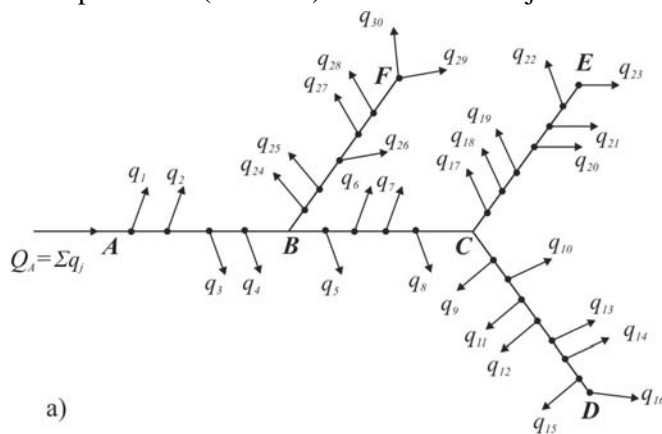
q_C'' i q_D'' , a za deonicu mreže CE , za $Q_C = \sum_{j=17}^{23} q_j$ i $Q_E = q_{23}$, dobija se Q_{CE} , q_C''' i q_E' .

Prema oznakama na sl. 2.15.b je:

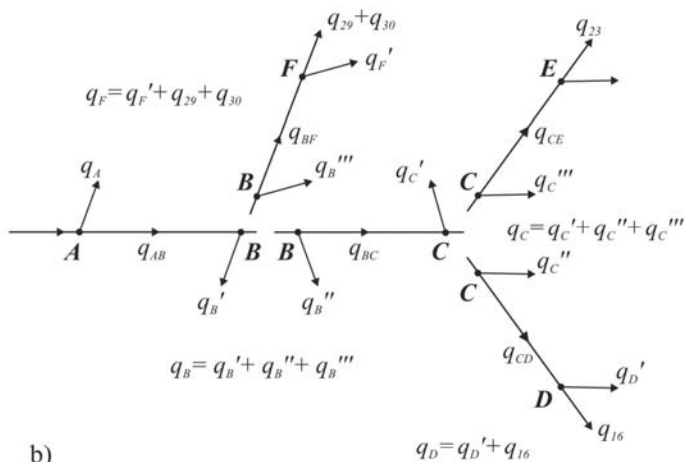
$$q_B = q_B' + q_B'' + q_B''', \quad q_C = q_C' + q_C'' + q_C''',$$

$$q_D = q_D' + q_{16}, \quad q_E = q_E' + q_{23}, \quad q_F = q_F' + q_{29} + q_{30}$$

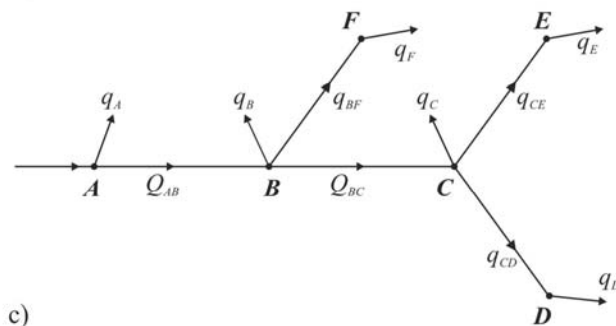
pa je prema ovome, na sl.2.15.c data vodovodna mreža sa fiktivno redukovanim potrošačima u čvorovima mreže. Sa 30 potrošača (sl.2.15.a) mreža se redukuje na samo 6 potrošača (sl.2.15.d).



a)



b)



c)

sl.2.15. Svođenje realnih potrošača na fiktivne potrošače u čvorovima jedne trograne vodovodne mreže

2.4. SPECIFIČNI PROTOK POTROŠNJE VODE U DEONICI VODOVODNE MREŽE

Čvorove vodovodne mreže čine mesta priključaka vodovodne mreže na naporne (dovodne) cevovode, mesta račvanja cevovoda i krajevi cevovoda, a deonicama mreže zovu se cevovodi koji povezuju čvorove mreže.

Govoreći o spoljašnjoj (uličnoj) vodovodnoj mreži, u sastavu mreže se ne računaju naporni cevovodi (kojima se mreža napaja vodom) i unutrašnje (kućne, fabričke i druge distributivne) vodovodne mreže. U sastav spoljašnje (ulične) vodovodne mreže ulaze samo mesta priključaka unutrašnjih vodovodnih mreža.

Na svaku deonicu spoljašnje (ulične), vodovodne mreže priključen je veći broj kućnih vodovodnih mreža, a svaka od njih ima svoj, specifičan, grafik potrošnje vode. Prema normativima potrošnje vode i grafika očekivane opšte potrošnje vode u toku dana, projektant može približno da odredi ukupan protok vode koju troše svi kućni vodovodi, ali nije u mogućnosti da ovaj protok konkretno preraspodeli na sve priključke kućnih vodovodnih mreža. Iz ovog razloga uvodi se uprošćena proračunska šema odvođenja vode iz deonica vodovodne mreže, po kojoj se voda, uslovno, odvodi ravnomerno po dužini deonice mreže.

Protok koji troše potrošači, sveden po jedinici dužine cevovoda zove se specifičan protok,

$$q_{SP} = \frac{\Sigma q}{\Sigma L}, \quad (2.55)$$

gde Σq – ukupan protok koji troše kući potrošači [m^3/s], a ΣL – ukupna dužina deonica vodovodne mreže [m].

Jednačina (2.55) može se promeniti i na delove gradske vodovodne mreže, na primer na gradske reone. U gradskim reonima sa većom gustinom naseljenosti veći je i specifični protok koji se odvodi kućnim vodovodnim mrežama.

Sa dnevnom promenom potrošnje vode menja se i specifični protok, a za dimenzionisanje cevovoda vodovodne mreže merodavan je specifični protok u danu i satu najveće potrošnje.

Protoci vode koji troše veliki potrošači (fabrike, klanice, hoteli, bolnice i drugi) poznati su u svakom trenutku dana, a tačno su definisana i mesta njihovih priključaka na spoljašnju vodovodnu mrežu, pa nema smisla ove protoke svoditi na specifične protoke.

Ako je q ukupan protok vode koji troše potrošači priključeni na deonicu vodovodne mreže dužine L , specifičan protok u ovoj deonici mreže je

$$q_{SP} = \frac{q}{L} \quad (2.55')$$

Za deonicu vodovodne mreže AB (označenu prema čvorovima na početku (A) i kraju (B) deonice), protok vode na ulazu u posmatranu deonicu (Q_A) jednak je zbiru protoka datog potrošačima priključenim na ovu deonicu (q) i protoka koji tranzitno prođe kroz deonicu (Q_B).

$$Q_A = Q_B + q \quad (2.56)$$

Prema gubitku napora u posmatranj deonici vodovodne mreže, ekvivalentan protok koji bi tranzitno prošao kroz ovu deonicu je

$$Q_{AB} = Q_B + \alpha \cdot q \quad (2.57)$$

a realni potrošači priključeni na ovu deonicu mogu se fiktivno redukovati na potrošače u čvorovima A i B sa protocima:

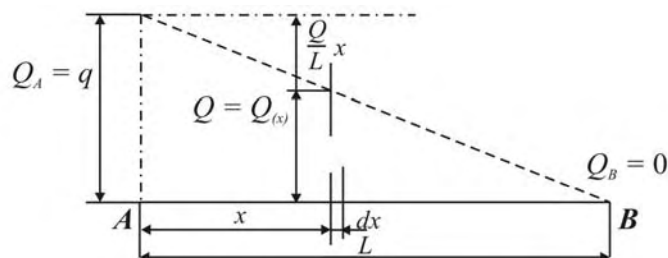
$$q_A = Q_A - Q_{AB} = (1 - \alpha) \cdot q, \quad q_B = Q_{AB} - Q_B = \alpha \cdot q \quad (2.57')$$

gde, kako je, u odeljku 2.3 pokazano, koeficijent α zavisi od veličine tranzitnog protoka Q_B i broja priključenih potrošača (sa istim ukupnim protokom q).

Prema podacima iz tabela II - V zaključuje se da je $\alpha = (0,60 \div 0,50)$, gde manji broj odgovara velikim tranzitnim protocima.

Po modelu ravnomernog odvođenja vode po dužini deonice vodovodne mreže dobilo bi se da koeficijent α zavisi samo od veličine tranzitnog protoka Q_B , a dobijene brojčane vrednosti

odgovarale bi graničnim vrednostima datim u tabelama II – V (za $n = \infty$). Ilustrujmo ovo na primeru jedne krajnje deonice vodovodne mreže (kroz koje nema tranzitnog protoka, $Q_B = 0$), kako je na sl. 2.16 prikazano



sl.2.16. Krajnja deonica vodovodne mreže sa ravnomernom potrošnjom vode po dužini deonice

Za primer prikazan na sl. 2.16, specifični protok potrošača je $q_{sp} = q / L$, a protok kroz cevovod u preseku na dužini x je:

$$Q = Q(x) = q - q_{sp} \cdot x = q - \frac{q}{L} x = q \left(1 - \frac{x}{L}\right). \quad (2.58)$$

Pretpostavljajući da je Darsijev koeficijent trenja u posmatranom cevovodu konstantan (λ - *coust*), između koeficijenta karakteristike gubitka napora u cevovodu (K_{AB}) i koeficijenta karakteristike gubitka napora u njegovom elementarno kratkom delu (K_{dx}) postoji veza,

$$K_{dx} = \frac{K_{AB}}{L} dx,$$

pa se gubitak napora u elementarno kratkoj deonici cevovoda (dx) može izračunati korišćenjem formule

$$d(\Delta h) = K_{dx} \cdot Q^2 = \frac{K_{AB}}{L} Q^2 \cdot dx, \quad Q = Q(x).$$

S obzirom na (2.58), napred data jednačina dobija oblik

$$d(\Delta h) = \frac{K_{AB}}{L} \cdot q^2 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 dx$$

a njen integral u granicama od $x = 0$ do $x = L$ definiše gubitak napora u deonici AB vodovodne mreže bez tranzitnog protoka

$$\Delta h_{A-B} = \frac{K_{AB}}{3} q^2. \quad (2.59)$$

U slučaju da kroz posmatranu krajnju deonicu vodovodne mreže struji samo protok koji troši potrošač na kraju ove deonice ($Q_{AB} = q_B$), gubitak napora bi bio

$$\Delta h_{AB} = K_{AB} \cdot Q_{AB}^2 \quad (2.60)$$

Izjednačavanjem desnih strana jednačina (2.59) i (2.60) dobija se da je ekvivalentni protok u krajnjim deonicama vodovodne mreže, sa ravnomernom potrošnjom vode po dužini deonice

$$Q_{AB} = \frac{q}{\sqrt{3}} = 0,577 \cdot q$$

i da je koeficijent α u njima

$$\alpha = \frac{q_{AB}}{q} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

Na sličan način moglo bi se pokazati da su, pri ravnomernoj potrošnji vode po dužini deonice vodovodne mreže, koeficijenti α ($\alpha = (Q_{AB} - Q_B)q$) sledeći $\alpha = 0,541$, za $Q_B = 0,5 \cdot q$; $\alpha = 0,528$, za $Q_B = q$; $\alpha = 0,517$, za $Q_B = 2Q$ i $\alpha = 0,505$, za $Q_B = 10 \cdot q$

Prema podacima iz tabela II – V (jer potrošnja vode nije nikad ravnomerna po družini deonice vodovodne mreže) predlaže se usvajanje koeficijenta α (koji figuriše u jednačinama (2.57) i (2.57')) prema podacima iz tabele VI.

U literaturi se, radi uprošćenja, često predlaže usvajanje koeficijenta $\alpha = 0,50$ za sve veličine tranzitnog protoka, a prema ovome i fiktivna redukcija potrošača duž deonice mreže na dva potrošača (na početku i kraju deonice), koji troše po polovinu protoka q . Prema napred datim podacima ovo dovodi do greške koja nije zanemarljivo mala, pogotovu u krajnjim deonicama vodovodne mreže.

Tabela VI

$Q_B / q = 0$	$\alpha = 0,60$
$0 < Q_B / q < 0,5$	$\alpha = 0,60 \div 0,55$
$0,5 < Q_B / q < 1$	$\alpha = 0,55 \div 0,53$
$1 < Q_B / q < 5$	$\alpha = 0,53 \div 0,51$
$5 < Q_B / q < 10$	$\alpha = 0,51 \div 0,505$
$Q_B / q > 10$	$\alpha = 0,50$

Pri proračunu vodovodnih mreža uvodi se još jedna pretpostavka, koja omogućava značajno uprošćenje proračunske šeme odvođenja vode potrošačima. Potrošači uključuju vodene protoke preko različitih ventila, a za različite stepene otvora ovih ventila protok vode na potrošačkim mestima zavisi od pritiska u unutrašnjoj (kućnoj) vodovodnoj mreži, a samim tim i od pritiska u spoljašnjoj (uličnoj) vodovodnoj mreži. Pritisak u spoljašnjoj vodovodnoj mreži neprekidno se menja, zavisno od broja uključenih potrošača, mesta njihovih priključaka na mrežu i veličine protoka koji ovi troše. U gradskim vodovodnim mrežama uključivanje kućnih potrošača je bez ikakvih zakonitosti, pa se u proračun ne može uvesti promena pritiska u mreži. Iz ovog razloga pretpostavlja se da svi fiktivno svedeni, odvodi vode iz čvorova mreže ne zavise od promene pritiska u mreži.

2.5. PRINCIPI ODREĐIVANJA PREČNIKA CEVOVODA

Prema jednačini protoka za strujanje sa punim prečnikom cevododa, kakva su strujanja sa natpritiskom vode,

$$Q = c \cdot \frac{d^2 \pi}{4},$$

unutrašnj prečnik cevododa (d), za protok kroz cevodod (Q), zavisi od brzine strujanja u cevododu (c),

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{R \cdot c}} \quad (2.61)$$

Prema napred datoj jednačini sleduje da, za zadati protok, prečnik cevododa zavisi od usvojene brzine strujanja vode u cevododu. Sa povećanjem brzine strujanja, pri zatom protoku, prečnik cevododa se smanjuje i obrnuto, sa smanjivanjem brzine strujanja prečnik cevododa se povećava.

Napomenimo da se brzina strujanja može birati proizvoljno, ali je izbor prečnika cevododa ograničen prečnicima cevi iz asortimana proizvođača cevi (standardnim prečnicima cevi), pa se povratno i brzina strujanja može, samo, diskretno menjati.

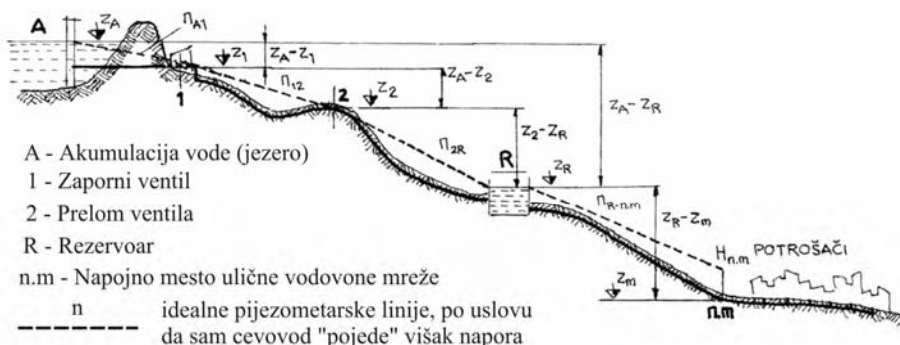
Prema Darsijevoj formuli za izračunavanje gubitka napora u pravolinijskim deonicama cevododa,

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} = \frac{8\lambda L}{g\pi^2 d^5} Q^2, \quad (2.62)$$

može se zaključiti da je gubitak napora približno obrnuto proporcionalan petom stepenu prečnika cevi. Kaže se približno, jer i Darsijev koeficijent trenja λ zavisi od prečnika cevi (nešto je manji u cevima većeg prečnika i obrnuto).

Lako je izračunati da se povećanjem prečnika cevi za 25% ($d'' = d' + 0,25d' = 1,25d'$) gubitak napora u cevododu smani za oko tri puta ($\Delta h / \Delta h'' \approx 3$), ili, da se smanjenjem prečnika cevi za 25% ($d'' = d' + 0,25d' = 0,75d'$) gubitak napora u cevododu poveća za oko četiri puta ($\Delta h / \Delta h'' \approx 4$).

U gravitacionim vodovodnim sistemima prečnik cevododa se bira tako da sam cevodod (preko gubitka napora koji stvara) „pojede“ višak napora, u odnosu na napor potreban da svi potrošači dobijaju tražene količine vode, pod odgovarajućim natpritiskom. Ilustrujmo ovo na vodovodnom sistemu prikazanom na sl.2.17.



sl. 2.17. Primer gravitacionog vodovodnog sistema

U gravitacionom vodovodnom sistemu prikazanom na sl.2.17, zbog velike visinske razlike između hidroakumulacije A i potrošača, postoji rezervoar R, čiji je zadatak, da, u trenucima male potrošnje vode, spreči preveliki pritisak u cevododu i vodovodnoj mreži. Po ovoj nameni rezervoar se često zove i prekidna komora pritiska. Rezervoar je dovoljno visoko iznad potrošača

vode, da obezbeđuje potreban napor u vodovodnoj mreži potrošača (ima funkciju napornog rezervoara za vodovodnu mrežu).

Cevovodi se proračunavaju prema protoku u času najveće potrošnje vode, kada su gubici napora u cevovodima najveći, a napor (natpritisk) vode u vodovodnoj mreži najmanji.

Razlika nivoa vode u akumulaciji i rezervoaru (prekidnoj komori pritiska) je $Z_A - Z_R$, kako je na sl.2.17 prikazano, pa se prečnik cevovoda od akumulacije do rezervoara određuje po uslovu da gubitak napora u cevovodu bude jednak ovoj visinskoj razlici

$$\sum_{A-R} \Delta h = Z_A - Z_R, \quad (2.63)$$

kada je prečnik cevovoda najmanji, a samim tim su i troškovi njegove izgradnje najmanji.

Kako se u gravitacionom cevovodu, bez spoljašnjeg zahvata, ne može uspostaviti strujanje sa potpritiskom, drugi uslov je da pijezometarska linija cevovoda bude iznad trase cevovoda, a u krajnjem slučaju da dodiruje trasu cevovoda.

Pijezometarskom visinom zove se visinski ekvivalent natpritiska vode u posmatranom preseku cevovoda, a pijezometarska linija cevovoda je linija koja povezuje pijezometarske visine u presecima cevovoda.

Napor vode u posmatranom preseku cevovoda je visinski ekvivalent totalnog natpritiska vode i veći je pijezometarske visine za veličinu visinskog ekvivalenta dinamičkog pritiska. Kako su brzine strujanja u cevovodima relativno male, praktično se može zanemariti odstupanje pijezometarske linije od naporne linije cevovoda.

Po uslovu da pijezometarska linija ne seče trasu cevovoda, cevovod od A do R , kako je na sl.2.17 prikazano, podeljen je u tri deonice (od A do 1; od 1 do 2 i od 2 do R), a prečnici cevi u ovim deonicama određuju se iz uslova:

$$\sum_{A-1} \Delta h = Z_A - Z_1, \quad \sum_{1-2} \Delta h = Z_1 - Z_2 \quad \text{i} \quad \sum_{2-R} \Delta h = Z_2 - Z_R. \quad (2.64)$$

Kako je

$$\sum_{A-R} \Delta h = \sum_{A-1} \Delta h + \sum_{1-2} \Delta h + \sum_{2-R} \Delta h \quad \text{i}$$

$$Z_A - Z_R = (Z_A - Z_1) + (Z_1 - Z_2) + (Z_2 - Z_R),$$

Jednačine (2.64) ispunjuju i uslov definisan jednačinom (2.63)

Množenjem desne strane jednačine (2.62) koeficijentom α ($\alpha = 1,05 \div 1,10$), kojim se obuhvataju i lokalni gubici napora (zbog vijuganja trase cevovoda i ugrađene armature), gubici napora u deonicama cevovoda konstantnog prečnika mogu se proračunati korišćenjem formule:

$$\sum \Delta h = \frac{8\alpha\lambda L}{gx^2 d^5} Q^2 \quad (2.65)$$

S obzirom na jednačinu (2.65) i uslove (2.64) mogu se izračunati prečnici u razmatranim deonicama cevovoda. Kako je izbor prečnika cevi ograničen standardnim prečnicima cevi (iz asortimana proizvođača cevi), uslov (2.64) se, obično, mogu zadovoljiti sa cevima dva različita prečnika u svakoj deonici (s tim da se prema usvojenim prečnicima, prema jednačinama (2.65), određuju dužine deonica sa istim prečnikom cevi).

Visinska razlika cevovoda koji povezuje rezervoar (R) i mesto napajanja ulične vodovodne mreže ($n \cdot m$) je $Z_R - Z_M$, kako je na sl.2.17 prikazano. Da bi svi potrošači dobili tražene protoke, pod odgovarajućim natpritiskom, treba obezbediti napor od $H_{n \cdot m}$ na mestima napajanja ulične vodovodne mreže (v.sl.2.17). Napor vode koji treba izgubiti u cevovodu između rezervoara (R) i mesta napajanja ulične vodovodne mreže ($n \cdot m$) je

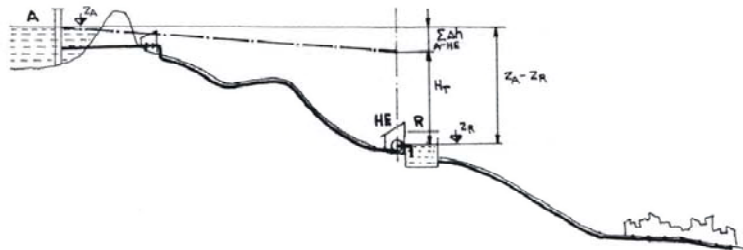
$$\sum_{R-n \cdot m} \Delta h = Z_R - Z_M - H_{n \cdot m}, \quad (2.66)$$

kako se sa slike 2.17 može zaključiti.

Potreban napor vode na mestu napajanja ulične vodovodne mreže ($H_{n \cdot m}$) dobija se proračunom ulične vodovodne mreže.

Prečnik cevovoda od rezervoara do mesta napajanja ulične vodovodne mreže, kao i proračun ulične mreže vrši se prema protoku vode usatu najveće potrošnje vode. U periodima manje potrošnje vode gubitak napora u cevovodu od rezervoara do mesta napajanja ulične vodovodne mreže je manji, pa potrošači dobijaju vodu pod većim naporom (pritiskom), u odnosu na proračunski.

Napred izložen proračun prečnika cevovoda od akumulacije do prekidne komore pritiska (rezervoara) dat je prema uslovu najmanje cene izgradnje ovog cevovoda (izborom najmanjih mogućih prečnika cevi) i u praksi se obično ovako radi, i ako sa gledišta racionalnog korišćenja energije, ovo nije uvek ispravno. Naime, trenjem izgubljen pad ($Z_A - Z_R$) može se posmatrati i kao bruto turbinski pad, koji se može iskoristiti za pogon male (mikro) hidroelektrane izgrađene na poziciji prekidne komore pritiska (rezervoara), kako je na sl.2.18 prikazano.



sl.2.18.Primer gravitacionog vodovoda sa malom (mikro) hidroelektranom (HE) ispred rezervoara

U cilju iskorišćenja vodovodnog pada za proizvodnju električne struje u maloj (mikro) hidroelektrani, prečnik cevovoda od hidroakumulacije do hidroelektrane (koja je ispred rezervoara) određuje se po uslovu da brzina strujanja vode u njemu bude ($1 \div 2 \text{ m/s}$), s tim da manje brzine odgovaraju većim prečnicima. Prema oznakama na sl.2.17, raspoloživ neto turbinski pad je:

$$H_T = (Z_A - Z_B) - \sum_{A-HA} \Delta h, \quad (2.67)$$

gde je $\sum_{A-HA} \Delta h$ – gubitak napora u cevovodu.

Snaga turbine, koja se može ugraditi je

$$N_T = \rho g Q H_T \eta_T, \quad (2.67)$$

gde je η_T – stepen korisnosti turbine.

S obzirom na stepen korisnosti generatora (η_G) snaga električne struje koja se može dobiti u ovoj hidroelektrani je

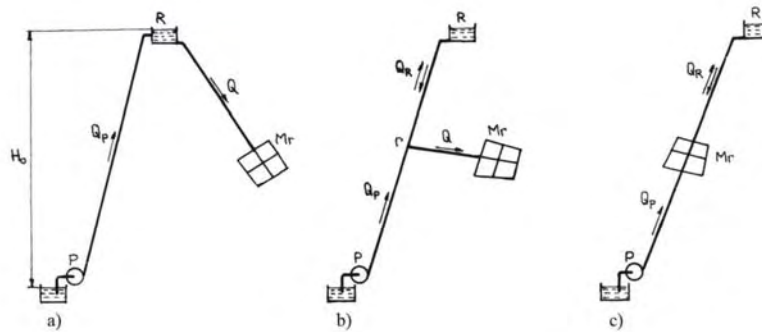
$$N = N_T \cdot \eta_G = \rho g Q H_T \eta_T \eta_G, \quad (2.68)$$

S obzirom na električnu snagu može se izračunati u kom vremenskom periodu (za koliko godina) će dobijena električna energija da kompenzira povećane troškove izgradnje cevovoda i troškove izgradnje same hidroelektrane.

Pri donošenju odluke o izgradnji male (mikro) hidroelektrane treba uzeti u obzir i blizinu postojeće električne mreže i mogućnosti da se voda iz prekidne komore preliva u vodotok kojeg hidroakumulacija mora snabdevati biološkim minimumom vode. Treba imati u vidu i da su troškovi održavanja i amortizaciona izdvajanja veća u vodovodnim sistemima sa malom (mikro) elektranom.

Vodovodni sistem sa potisnom pumpnom stanicom mogu biti:

- sa prethodnim napornim rezervoarom, b) sa prednjim kontrarezervoarom i
- sa zadnjim kontrarezervoarom, kako je šematski prikazano na sl.2.18.



sl.2.19. Sematski prikaz vodovodnog sistema sa: a)prethodnim napornim rezervoarom b)prednjim kontrarezervoarom i c)zadnjim kontrarezervoarom

Određivanje prečnika magistralnih cevovoda kojima potisna pumpna stanica transportuje vodu, znatno je složenija u odnosu na magistralne cevovode gravitacionih vodova. Naime, sa smanjenjem prečnika cevovoda, kada se smanjuju troškovi njegove izgradnje, raste gubitak napora u cevovodu, a sa njime raste utrošak električne energije za pogon pumpe ili pumpi. Naravno, važi i obratno, sa povećanjem prečnika cevovoda smanjuje se utrošak električne energije, a povećavaju se troškovi izgradnje cevovoda.

Ako se sa C_i označi godišnje svedena cena izgradnje cevovoda, cena njegovog održavanja i amortizacionog izdvajanja, a sa C_e se označi godišnja cena utošene električne energije za pogon pumpe (ili pumpi) u pumpnoj stanici, sumarni troškovi, uslovno svedeno na godinu dana, jednaki su zbiru troškova C_i i C_e ,

$$C_{\Sigma} = C_i + C_e. \quad (2.69)$$

Ako bi se za proračunski protok pumpe ($Q_p = const$) uspostavila funkcionalna veza $C_{\Sigma}(d)$, gde je d – prečnik cevovoda, najekonomičniji prečnik ($d = d_e$) je onaj za koji funkcija $C_{\Sigma}(d)$ ima minimalnu vrednost. Zbog standardizovanih prečnika cevi usvaja se cev čiji je prečnik najbliži veličini d_e .

Funkcionalne veze $C_i(d)$ i $C_e(d)$, a samim tim i $C_{\Sigma}(d)$, za $Q_p = const$, relativno je jednostavno postaviti za cevovod kojim pumpa napaja naporni rezervoar u vodovodnom sistemu sa prethodnim napornim rezervoarom (v.sl.2.19.a). Kod ovakvih vodovodnih sistema voda se iz napornog rezervoara odvodi potrošačima gravitaciono i prečnik ovog cevovoda se određuje prema ranije datim principima za gravitacione cevovode.

U vodovodnim sistemima sa prethodnim napornim rezervoarom, protok pumpe, ili pumpi (u pumpnoj stanici) Q_p ne zavisi od promenljive potrošnje vode ($Q = var.$) i konstanta je ($Q_p = const$) pri određivanju prečnika cevovoda kojim pumpa transportuje vodu do napornog rezervoara.

Napor pumpe je

$$H_p = H_o + \Sigma\Delta h,$$

gde je H_o – visina dizanja vode iz crpnog u naporni rezervoar (v.sl.2.19.a), $\Sigma\Delta h$ - gubitak napora u cevovodu kojim se voda transportuje u naporni rezervoar.

Zakon promene gubitka napora u cevovodu u funkciji prečnika cevovoda opisuje se jednačinom (2.65), za $Q = Q_p$, pa se može pisati da je

$$H_p = H_o + \frac{8\alpha\lambda L}{g\pi^2 d^5} Q_p^2, \quad (2.70)$$

pri čemu Darsijev koeficijent trenja u cevovodu (λ), u opštem slučaju, zavisi od relativne hrapavosti zida cevi ($\bar{\delta} = \delta/d$) i Rejnoldsovog broja, pa je

$$\lambda = \lambda(\bar{\delta}, d, Q_p), \quad (2.70')$$

Snaga pumpe u kW je

$$N_p [kW] = \frac{\rho g Q_p H_p}{1000 \cdot \eta_p} = \frac{\rho g}{1000 \cdot \eta_p} \left(Q_p H_p + \frac{8\alpha\lambda L}{g\pi^2} \cdot \frac{Q_p^3}{d^5} \right), \quad (2.71)$$

a označavajući sa T broj sata rada pumpe u godini ($maxT = 365 \cdot 24 = 8760$ sata), godišnje se za rad pumpe utroši električna energija

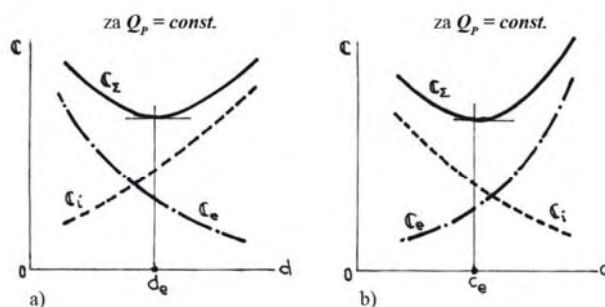
$$E_e^{(god)} [kWh] = T \cdot \frac{N_p [kW]}{\eta_{em}}, \quad (2.72)$$

gde je η_{em} – stepen korisnosti pogonskog elektromotora pumpe.

Označavajući sa C_e cenu kWh električne energije [din/kWh], godišnja cena utrošene električne energije za pogon pumpe je,

$$C_e = C_e \cdot E_e^{(god)} \quad (2.73)$$

S obzirom na jednačine (2.73), (2.72) i (2.71), grafik funkcije $C_e(d)$, za $Q_p = const$, ima opadajući karakter, kako je, u principu, prikazano na sl.2.20.a.



sl. 2.20

Sa povećavanjem prečnika cevovoda rasu troškovi njegove izgradnje, održavanja i amortizacionih izdvajanja, pa grafik funkcije $C_i(d)$ ima rastući karakter, kako je, u principu, prikazano na sl.2.20.a. Zbog suprotnosmernog karaktera promena funkcija $C_e(d)$ i $C_i(d)$, sumarno funkcija $C_z(d)$ ima minimum za $d = d_e$, kako je na sl.2.20.a prikazano, gde je, kako je već rečeno d_e – najekonomičniji prečnik cevovoda.

Za $Q_p = const$, brzina strujanja vode u cevovodu ($c = 4Q_p/(d^2\pi)$) opada sa povećanjem prečnika cevi i obrnuto, pa bi funkcija $C_i(c)$ bila opadajuća, a funkcija $C_e(c)$ rastuća po promenljivoj c . Grafik sumerne funkcije troškova $C_z(c)$ imao bi, kako je na slici 2.20.b prikazano, minimum za $c = c_e$, gde je c_e – najekonomičnija brzina strujanja vode u cevovodu. Brzina strujanja $c = c_e$ je brzina strujanja vode u cevovodu prečnika $d = d_e$.

Uz izvesna uprošćenja, izvedimo formulu za izračunavanje najekonomičnijeg prečnika cevovoda.

Prvo uprošćenje je pretpostavka da je strujanje u cevovodu automodelno po Rejnoldsovom broju, kada Darsijev koeficijent trenja u pravim deonicama cevovoda zavisi samo od relativne hrapavosti zida cevi ($\lambda = \lambda(\bar{\delta})$), a drugo uprošćenje je da se za prečnik cevovoda (d) u okolini prečnika d_e koeficijent trenja zanemarljivo malo menja ($\lambda = const$).

Uz uvedena uprošćenja, a saglasnosno jednačinama (2.73), (2.72) i (2.71), dobija se da je u okolini prečnika d_e ,

$$C_e = A \cdot Q_p + B \frac{Q_p^3}{d^5}, \quad (2.74)$$

gde su A i B koeficijenti:

$$A = \frac{C_e \rho g T}{1000 \eta_{em} \eta_p} \cdot H_o \quad \text{i} \quad B = \lambda \cdot \frac{8 \alpha C_e \rho T}{1000 \cdot \pi^2 \eta_{em} \eta_p} \cdot L$$

koji u glavnoj meri zavise od visine dizanja vode (H_o) i dužine cevovoda (L).

Sa povećanjem prečnika cevi povećava se: debljina zida cevi, pa se, u okolini prečnika $d = d_e$, masa cevi po jedinici dužine može približno interpolirati jednačinom

$$M_1 = a \cdot d^m, \quad M_1 [kg / m], \quad (2.75)$$

gde je α koeficijent koji zavisi od vrste cevi, a eksponent m , koji zavisi, takođe, od vrste cev, i kreće se u granicama $1 < m < 2$.

Masa cevi ugrađena u cevovod dužine L , saglasno prethodnoj interpolaciji, menja se, u funkciji prečnika, po zakonu

$$M_L = L \cdot a \cdot d^m, \quad M_L [kg].$$

Cena ugrađenog cevovoda (sa ugradnjom) proporcionalna je njihovoj masi, a kako cena građevinskih radova zanemarljivo malo zavisi od prečnika cevovoda, cena izgradnje cevovoda, uslovno svedena na godinu dana (prema godinama planirane amortizacije), može se opisati jednačinom

$$C'_i = I + J \cdot d^m,$$

gde koeficijent I predstavlja cenu građevinskih (zemljanih) radova ($I = I(L, H_o, \text{vrsta zemljišta})$), a koeficijent J zavisi od dužine cevovoda i cene cevi po jedinici težine.

Označavajući sa $R_{o/a}$ odnos godišnje cene troškova održavanja (tekućih remonta) i amortizacionog izdvajanja, prema C'_i ,

$$R_{o/a} = \frac{C_{odr\check{z}} + C_{amortiz}}{C'_i},$$

godišnje svedena cena izgradnje cevovoda, njegovog održavanja i amortizacionih izdvajanja može se opisati jednačinom:

$$C'_i = R_{o/a} (I + J \cdot d^m). \quad (2.76)$$

S obzirom na jednačine (2.76) i (2.74), sumirani troškovi, svedeni na godinu dana, opisuju se jednačinom:

$$C_\Sigma = R_{o/a} (I + J \cdot d^m) + A \cdot Q_p + B \frac{Q_p^3}{d^5} \quad (2.77)$$

Prvi izvod funkcije C_Σ po promenljivoj d , za $Q_p = const$, je

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial d} = m R_{o/a} \cdot J \cdot d^{m-1} - \frac{5 \cdot B Q_p^3}{d^6}, \quad \text{za } Q_p = const, \quad (2.78)$$

a kako je drugi izvod ove funkcije veći od nule,

$$\frac{\partial C_\Sigma}{\partial d^2} = m(m-1) R_{o/a} \cdot J \cdot d^{m-2} + \frac{30 \cdot B Q_p^3}{d^7} > 0, \quad \text{za } Q_p = const,$$

funkcija $C_\Sigma(d)$ ima minimalnu vrednost za d u kojem je $\frac{\partial C_\Sigma}{\partial d} = 0$.

Prema uslovu $\partial C_{\Sigma} / \partial d = 0$, korišćenjem jednačine (2.78) dobija se sledeća formula za izračunavanje najekonomičnijeg prečnika cevi,

$$d_e = P^\alpha \cdot Q_p^{3\alpha}, \quad \text{za } Q_p = \text{const}, \quad (2.79)$$

gde su konstanta P i eksponent α , prema napred datom izvođenju, definisani jednačinama:

$$P = \frac{5B}{mR_{o/a}J}, \quad \alpha = \frac{1}{5+m}. \quad (2.79')$$

Koeficijenti B i J , koji figurišu u izrazu za P , linearno zavise od dužine cevovoda, pa koeficijent P ne zavisi od dužine cevovoda, ali se prema izloženom, uz objašnjenje koeficijenata B , m , $R_{o/a}$ i J , može zaključiti da koeficijent P zavisi od cene kW^h električne energije, cene $1 m$ ugrađene cevi i relativne hrapavosti zida cevi (preko $\lambda = \lambda(\bar{\delta})$ u B).

Eksponent α , zavisi od debljine zida cevi i režima strujanja u cevovodu (izveden je za turbulentna strujanja automodelana po Re – broju – strujanja kod kojih su gubici napora proporcionalni kvadratu protoka).

Kako je brzina strujanja u cevovodu

$$c = \frac{4Q_p}{\pi d^2},$$

zamenjujući u napred datoj jednačini d sa d_e , po formuli (2.79), dobija se formula za proračun najekonomičnije brzine strujanja u cevovodu, pri zadatom protoku,

$$c_e = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{P^{2\alpha}} \cdot \frac{1}{Q_p^{6\alpha-1}}, \quad \text{za } Q_p = \text{const}, \quad (2.80)$$

Formula (2.79) može da se svede i na oblik,

$$Q_p = \frac{1}{P^{1/3}} \cdot d_e^{1/3\alpha}, \quad (2.81)$$

koji omogućava da se za standardne prečnike cevi ($d_e = d$) izračunaju protoci za koje su ove cevi najekonomičnije (u cevovodima kojima pumpa transportuje vodu).

Formula (2.79) i prema njoj izvedene formule (2.80) i (2.81), važe samo za turbulentna strujanja kod kojih su gubici napora proporcionalni kvadratu protoka (strujanja automodelna po Re – broju).

Prema različitim, konkretno rešenim, primerima određivanja ekonomičnog prečnika cevovoda, u ruskoj literaturi [4] se daje sledeća, uopštena, formula za određivanje ovog prečnika:

$$d_e = E^x Q_p^y, \quad (2.82)$$

gde je E – faktor ekonomičnosti, koji zavisi od niza ekonomskih pokazatelja, kao što su: cena električne energije, cena cevi i njihovog povezivanja i dr. U običnim uslovima je $E = 0,5 \div 1$. O eksponentima x i y kaže se samo da je $y = 3^x$, u slučajevima strujanja kod kojih je gubitak napora u cevovodu proporcionalan kvadratu protoka (kao što je: u formuli (2.79)). Doduše, prema podacima datim u tabeli VII, može se zaključiti, da je za cevovod od livenog gvožđa $y = 0,44$, $x = y/3 = 0,147$.

Ako bi jednačina (2.81) svela na oblik (2.82) dobilo bi se da je $E = P$, $x = \alpha$ i $y = 3\alpha$.

Korišćenjem jednačine (2.82) mogu se, za standardne prečnike cevi ($d_e = d$) izračunati protoci za koje su ovi prečnici najekonomičniji. Prema ovako izračunatim protocima može da se formira tabela oblasti ekonomičnih protoka, u kojoj se za različite prečnike cevi daju granice protoka za koje su ove cevi ekonomične. U tabeli VII, preuzetoj iz ruske literature [4], date su oblasti ekonomičnih protoka za cevi od livenog gvožđa. Tabela je dobijena korišćenjem jednačine (2.82), za $E = 0,5, 0,75$ i 1 .

Tabela VII Oblasti ekonomičnih protoka u cevovima od livenog gvožđa

Uslovni unutrašnji prečnik d [mm]	Q [l/s]		
	$E = 0,5$	$E = 0,75$	$E = 1$
100	6,4 ÷ 10,6	5,7 ÷ 9,4	5,2 ÷ 8,4
125	10,6 ÷ 16,8	9,4 ÷ 15	8,4 ÷ 13,3
150	16,8 ÷ 28,3	15 ÷ 25,3	13,3 ÷ 22,4
200	28,3 ÷ 51,2	25,3 ÷ 45,8	22,4 ÷ 40,6
250	51,2 ÷ 82,2	45,8 ÷ 73,5	40,6 ÷ 65,3
300	82,2 ÷ 121	73,5 ÷ 108	65,3 ÷ 96
350	121 ÷ 167	108 ÷ 149	96 ÷ 132
400	167 ÷ 220	149 ÷ 197	132 ÷ 175
450	220 ÷ 286	197 ÷ 254	175 ÷ 227
500	286 ÷ 394	254 ÷ 352	227 ÷ 313
600	394 ÷ 581	352 ÷ 518	313 ÷ 461
700	581 ÷ 808	518 ÷ 722	461 ÷ 642
800	808 ÷ 1080	722 ÷ 966	642 ÷ 857
900	1080 ÷ 1396	966 ÷ 1250	857 ÷ 1110
1000	1396 ÷ 1930	1250 ÷ 1725	1110 ÷ 1532

Tabela VII formirana je tako što su prve (donje) granične vrednosti protoka, za usvojene prečnike cevovoda, proračunate korišćenjem formule (2.82), a druge (gornje) granične vrednosti su protoci koji kao prve granične vrednosti odgovaraju sledećim većim prečnicima.

Korišćenjem tabele oblasti ekonomičnih protoka (i znajući kako je ona formirana) jednostavno se može odrediti prečnik cevovoda za zadati (poznati) protok.

Za određivanje ekonomičnog prečnika cevovoda od čeličnih cevi, Esemann je dao tabelu preporučenih brzina u funkciji prečnika cevi, (Tabela VIII). Za razliku od tabele citiranih u stručnoj literaturi, u tabeli VIII dodata je i rubrika odgovarajućih protoka.

Tabela VIII Prečnik brzine strujanja po Esemannu (za čelične cevi)

d [mm]	60	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200
c [m/s]	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00	1,10	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20
Q [l/s]	2	6	14	28	50	78	155	275	450	900	1550	2100

U vodovodnim sistemima sa prednjim kontrarezervoarom (sl.2.19.b), režim rada potisne pumpe ne zavisi od karakteristika gubitka napora u mreži napajanja potrošača, ali zavisi od protoka koji troša potrošači (Q). Zbog stalne promene potrošnje vode (Q) stalno se menja i režim rada pumpe. Sa povećanjem potrošnje vode povećavaju se protok i snaga pumpe (Q_p , N_p) i, naravno, obratno (sa smanjenjem potrošnje vode smanjuje se protok i snaga pumpe). Najveću snagu pumpa troši u času najveće potrošnje vode, kada pumpa i rezervoar, zajedno, u paralelnom radu, snabdevaju potrošače vodom.

U periodima kada je protok koji troše potrošači (Q) manji od protoka koji daje pumpa (Q_p), višak protoka pumpe ($Q_p - Q$) potiskuje se u naporni rezervoar (prednji kontrarezervoar),

da bi u periodima kada je protok koji troše potrošači veći od protoka koji daje pumpa ($Q_p > Q$), razlika ovih protoka ($Q_p - Q$), gravitaciono, u paralelnom radu sa pumpom, dopunila voda iz napornog rezervoara (kada se naporni rezervoar prazni). U periodima kada se naporni rezervoar prazni ($Q_p > Q$) snaga koju troši pumpa veća je od snage koju pumpa troši u periodima kada se rezervoar puni vodom ($Q_p > Q$).

Protok u deonici cevovoda od pumpne stanice \underline{P} do račve \underline{r} (v.sl.2.19.b) različit je od protoka u deonici cevovoda od račve \underline{r} do napornog rezervoara \underline{R} , s tim da u ovoj drugoj deonici strujanje može biti ka rezervoaru (kada se rezervoar puni), ili ka račvi (kada se rezervoar prazni). U cevovodu od račve \underline{r} do čvora napajanja vodovodne mreže protok vode jednak je protoku kojeg troše potrošači priključeni na vodovodnu meržu (Q).

Zbog različitih protoka, različiti su prečnici cevovoda od pumpne stanice do račve ($d_{p,r} = d_1$), cevovoda od račve do rezervoara ($d_{r-R} = d_2$) i cevovoda od račve do vodovodne mreže ($d_{r-Mp} = d_3$).

Funkcija sumarnih troškova, uslovno svedena na godinu dana, u ovom slučaju, zavisi od prečnika tri cevovoda,

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma}(d_1, d_2, d_3) \quad (2.83)$$

i, teorijski gledano, iz uslova $\partial C_{\Sigma} / \partial d_1 = 0$, $\partial C_{\Sigma} / \partial d_2 = 0$, $\partial C_{\Sigma} / \partial d_3 = 0$ moglo bi se odrediti ekonomične veličine prečnika d_1 , d_2 i d_3 .

Kako paralelno povezane pumpe, u pumpnoj stanici, iz časa u čas menjaju režim rada, teško je uspostaviti funkcionalnu vezu (2.83), pa se praktično i ne mogu odrediti najekonomičniji prečnici d_1 , d_2 i d_3 .

Iz navedenog razloga, prečnik cevovoda od pumpne stanice do račve ($d_{p,r} = d_1$) određuje se prema protoku pumpi u času najveće potrošnje vode (koji je manji od protoka kojeg troše potrošači priključeni na vodovodnu mrežu). Prečnik cevovoda od račve do čvora napajanja vodovodne mreže ($d_{r-Mp} = d_3$) određuje se prema protoku kojeg troše potrošači u času najveće potrošnje vode. Prečnik cevovoda koji povezuje račvu i rezervoar ($d_{r-R} = d_2$) određuje se po uslovu da u času najveće potrošnje vode (kada pumpna stanica i rezervoar zajednički snabdevaju potrošače vodom) svi čvorovi minimalno traženog (za ispravno funkcionisanje potrošača). Napomenimo da su napori vode u čvorovima mreže najmanji u času najveće potrošnje vode.

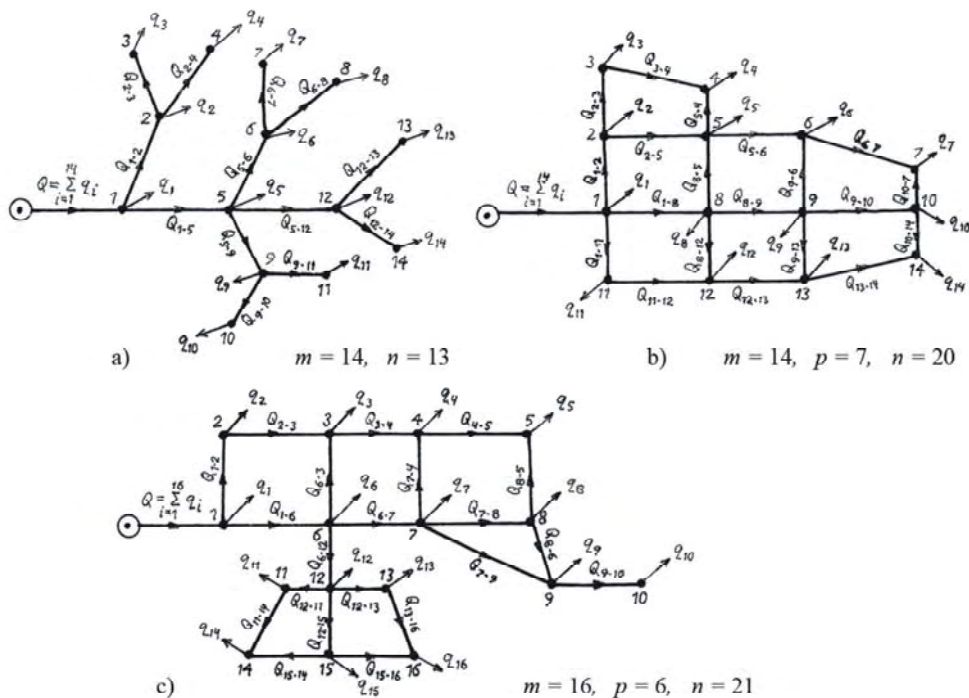
U vodovodnim sistemima sa zadnjim kontrarezervoarom (sl.2.19.c) režimi rada potisnih pumpi u pumpnoj stanici, zavise, ne samo, od protoka kojeg troše potrošači (Q), već i od karakteristika gubitaka napora u deonicama vodovodne mreže. Kako karakteristike gubitaka napora u deonicama vodovodne mreže zavise od prečnika deonica mreže, od protoka kojeg troše uključeni potrošači i od teritorijalnog rasporeda uključenih potrošača, praktično je nemoguće uspostaviti funkcionalnu zavisnost $C_{\Sigma} = C_{\Sigma}(d_1, d_2, \dots)$, gde je d_1 – prečnik cevovoda od pumpne stanice do vodovodne mreže, a d_2 – prečnik cevovoda od vodovodne mreže do rezervoara. Iz navedenog razloga d_1 i d_2 određuju se po istim, napred navedenim, principima po kojima se određuju prečnici d_1 i d_2 u vodovodnim sistemima sa prednjim kontrarezervoarom.

Prečnici cevi u deonicama vodovodne mreže određuju se prema protocima (u njima) u času najveće potrošnje vode.

2.6. KARAKTERISTIKE VODOVODNIH MREŽA I OPŠTA POSTAVKA ZADATKA NJIHOVOG PRORAČUNA

Broj tačaka odvoda vode iz mreže je veliki, pa se radi uprošćenja, tačke odvoda vode fiktivno reduktuju u tačkama čvorova vodovodne mreže, kako je u odeljku 2.3 objašnjeno. Čvorovima mreže nazivaju se mesta račvanja cevovoda i mesta priključenja krajnjih (zadnjih) potrošača, a deonicama mreže nazivaju se cevovodi koji povezuju čvorove mreže.

U granatim vodovodnim mrežama sa jednim izvorom napajanja, kao što je mreža prikazana na sl.2.21.a, smerovi strujanja u svim deonicama mreže jednoznčno su definisani jedino mogućim smerom strujanja. Napojni cevovod ne računa se kao deonica mreže. Prekid protoka u jednoj deonici mreže izaziva prekid protoka u svim deonicama iza ove. Tako bi, na primer, prekid protoka u deonici mreže 1-2 (v.sl.2.21.a) izazvao prekid protoka i u deonicama 2-3 i 2-4, pa bi svi potrošači priključeni na ove deonice ostali bez vode.



sl. 2.21

U prstenastim vodovodnim mrežama, kao što je mreža prikazana na sl.2.21.b, bilo koja dva čvora mreže mogu biti povezana preko nekoliko različitih lanaca deonica (ne manje od dva). Dva bilo koja lanca deonica koji povezuju dva čvora obrazuju prsten. Prema broju elementarnih prstenova, mreža prikazana na sl.2.21.b je sedmoprstena. Prekid protoka u jednoj od deonica dovodi do preraspodele protoka u mreži, ali ne izaziva prekid protoka u drugim deonicama mreže, pa izuzimajući potrošače iz isključene deonice, svi potrošači dobijaju vodu.

Na sl.2.21.b označeni su proračunski smerovi strujanja u deonicama prstenaste vodovodne mreže. Ako bi se, zbog remonta, isključila deonica 1-2, strujanje u deonici 2-5 bi promenilo smer. Mešovita vodovodna mreža (v.sl.2.21.c) ima svojstva kako prstenaste, tako i granate mreže.

Označavajući sa m – broj čvorova, n – broj deonica i p – broj elementarnih prstena, za bilo koju površinsku mrežu (bilo kog tipa), može se između parametaram, n , m i p postaviti veza:

$$n = p + m - 1, \quad (2.84)$$

Napojne grane se ne računaju kao deonice mreže.

Jadnačina (2.84) je posledica Ojlerove (Euler-ove) teoreme o poliedrima (višestranim geometrijskim figurama).

Kod granatih mreža je $p = 0$, pa je broj deonica uvek za jedan manji od broja čvorova ($n = m - 1$).

Cilj (zadatak) proračuna vodovodnih mreža je da se odrede odgovarajući prečnici cevovoda svih deonica mreže, koji će obezbediti da svi potrošači dobiju tražene protoke vode, pod natpritiskom koji će obezbediti razvođenje vode u objekte koja ulična (spoljašnja) mreža snabdeva vodom.

Poznati podaci, pri proračunu spoljašnje (ulične) vodovodne mreže, su:

- Konfiguracija vodovodne mreže, sa dužinama svih deonica (L_{ij}) i kotama terena svih čvorova mreže (Z_i),
- Ukupna potrošnja vode (Σq) i njena raspodela u vodovodnoj mreži i
- Minimalni traženi natpritisk (napor) u vodovodnoj mreži.

Napomenima da se kod granatih vodovodnih mreža mogu definisati različiti mionimalni pritisci krajnjih potrošača. Prema oznakama na sl.2.21.a krajnji potrošači su priključeni u čvorovima 3, 4, 7, 8, 10, 11, 13 i 14. Razlog da se nekom od krajnjih potrošača obezbeđuje veći natpritisk (napor) vode može biti priključak velikog potrošača (fabrika, hotela i sl.).

Kod prstenastih vodovodnih mreža najmanji natpritisk (napor) je u jednom od najudaljenijeg čvora u odnosu na čvoj napajanja mreže. Za mrežu prikazanu na sl.2.21.b to je ili čvor 7 ili čvor 14.

Proračun vodovodne mreže vrši se prema protoku vode koju potrošači troše u času najveće potrošnje vode (kada je pritisak u mreži najmanji).

Za krupne potrošače (fabrika, hotel i sl.) daju se konkretne veličine protoka koji troše, a protok vode koji se troši u stambenim zgradama svodi se na specifične protoke potrošnje vode u deolovima (reonima) vodovodne mreže, zavisno od gustine naseljenosti gradskog reona. Pretpostavljajući jednoliku gustinu naseljenosti cele teritorije grada, može se uzeti da je specifični protok potrošnje vode jednak u svim deonicama vodovodne mreže i iznosi,

$$q_{sp} = \frac{\Sigma q_n}{\Sigma l}$$

gde je (Σq_n) – sumarni protok koji se troši u stanbenim zgradama, a (Σl) – ukupna dužina svih deonica vodovodne mreže.

Potrošnja vode se, kako je u odeljcima 2.3 i 2.4 objašnjeno, fiktivno svodi na potrošnju u čvorovima mreže.

Za ispravno funkcionisanje vodozahvatnih uređaja i mašina u prizemnim kućama dovoljno je da natpritisk na mestu priključka na uličnu vodovodnu mrežu bude 1bar. Za svaki sprat zgrade ovaj natpritisk treba povećati za oko 0,4 bara. Za četvorospratne zgrade treba obezbediti natpritisk vode od oko 2,5 bara, što se obično usvaja kao minimalno dozvoljeni natpritisk u gradskoj (uličnoj) vodovodnoj mreži.

Prema određenim prečnicima svih deonica vodovodne mreže, proračunatim gubicima napora u njima i usvojenom minimalno dozvoljenom natpritisaku u mreži, kao rezultat proračuna mreže dobija se i potreban natpritisk napajanja vodovodne mreže, odnosno potreban napor vode u čvoru napajanja. Prema ovom naporu i protoku kojeg troše potrošači određuje se položaj prethodnog napornog rezervoara, ili se bira pumpa ako je vodovodni sistem sa kontrarezervoarom.

Za određivanje protoka u deonicama vodovodne mreže koriste se jednačine kontinuiteta u čvorovima mreže, koje se izražavaju jednačinama:

$$\sum Q_{i-k} = q_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.85)$$

gde je q_i protok vode koja se iz čvora (i) odvodi potrošačima, a $\sum Q_{i-k}$ je algebarski zbir protoka u deonicama mreže koje se računaju u posmatranom čvoru, s tim da protoci koji ulaze u čvor, uslovno imaju pozitivnu vrednost, a protoci koji izlaze iz čvora imaju negativnu vrednost.

Protok napajanja vodovodne mreže je,

$$Q = \sum_{i=1}^m q_i,$$

pa s obzirom na ovu jednačinu, jedna od jednačina (2.85) prelazi u identitet i na raspolaganju praktično imamo $m - 1$ jednačina oblika (2.85).

Broj deonica granate vodovodne mreže je $n = m - 1$, koliko je i jednačina (2.85), koje mogu da se iskoriste.

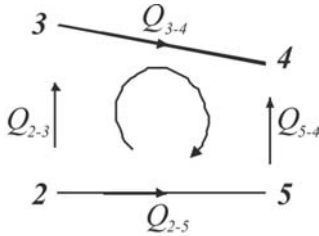
Kod prstenastih i mešovutih vodovodnih mreža broj deonica je $n = p + (m - 1)$, pa jednačinama (2.85), od kojih je nezavisno njih $m - 1$, treba dodati još p drugih jednačina za određivanje protoka u deonicama mreže, gde je p broj elementarnih prstenova mreže.

Iz jednog u drugi čvor elementarnog prstena voda dolazi koristeći dva puta, kao je na sl.2.24 prikazano za jedan elementarni prsten vodovodne mreže sa sl.2.21.b. Za strujni tok od čvora 2 do čvora 4, koji ide preko čvora 3, gubitak napora je

$$\Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4} = K_{2-3} \cdot Q_{2-3}^2 + K_{3-4} \cdot Q_{3-4}^2,$$

dok je gubitak napora za strujni tok koji iz čvora 2 ide u čvor 4 preko čvora 5,

$$\Delta h_{2-5} + \Delta h_{5-4} = K_{2-5} \cdot Q_{2-5}^2 + K_{5-4} \cdot Q_{5-4}^2.$$



sl.2.22

Gubici napora u oba strujna toka moraju biti jednaki, što se matematički može opisati jednačinom ravnoteže gubitaka napora u posmatranom prstenu vodovodne mreže.

$$K_{2-3} Q_{2-3}^2 + K_{3-4} Q_{3-4}^2 = K_{2-5} \cdot Q_{2-5}^2 + K_{5-4} \cdot Q_{5-4}^2,$$

odnosno jednačinom

$$K_{2-3} Q_{2-3}^2 + K_{3-4} Q_{3-4}^2 - K_{2-5} \cdot Q_{2-5}^2 - K_{5-4} \cdot Q_{5-4}^2 = 0.$$

Usvajajući smer obilaženja prstena, u smeru kretanja kazaljke na satu, kako je na sl.2.22 prikazano, napred data jednačina ravnoteže gubitka napora u elementarnom prstenu vodovodne mreže može da se piše u opštem obliku.

$$\left(\sum K_{j-k} Q_{j-k}^2 \right)_p = 0, \quad (2.86)$$

gde leva strana jednačine predstavlja algebarski zbir gubitka napora u deonicama prstena, s tim da se negativni predznak daje gubicima napora u deonicama u kojima je smer strujanja suprotan usvojenom smeru obilaženja prstena.

Broj nezavisnih jednačina tipa (2.86) jednak je broju elementarnih prstenova u mreži (p).

Veličine K_{j-k} koje figurišu u jednačinama (2.86) su koeficijenti karakteristika gubitka napora u deonicama vodovodne mreže u slučajevima kada Darsijevi koeficijenti trenja ne zavise od Reynoldsovog broja (kada je gubitak napora proporcionalan kvadratu protoka). U slučajevima kada Darsijev koeficijenti trenja zavise i od Reynoldsovog broja, veličine K_{j-k} su parametri karakteristika gubitka napora, jer indirektno zavise i od protoka u razmatranim cevovodima. Koeficijenti ili parametri K_{j-k} zavise od dužine (L_{j-k}) i prečnika (d_{j-k}) deonica vodovodne mreže.

Kod granatih vodovodnih mreža korišćenjem $n = m - 1$ jednačina kontinuiteta u čvorovima mreža (2.85) mogu se odrediti protoci vode u svim deonicama mreže, da bi se zatim, prema ovim protocima i preporučenim brzinama strujanja, odredili i prečnici svih deonica mreže u prvom približenju. Gubici napora u svim strujnim tokovima od čvora napajanja mreže do krajnjih

čvorova u mreži moraju biti jednaki (uravnoteženi), što se postiže korekcijom prečnika u pojedinim deonicama mreže. O proračunu granatih vodovodnih mreža detaljnije se govori u odeljku 2.7.

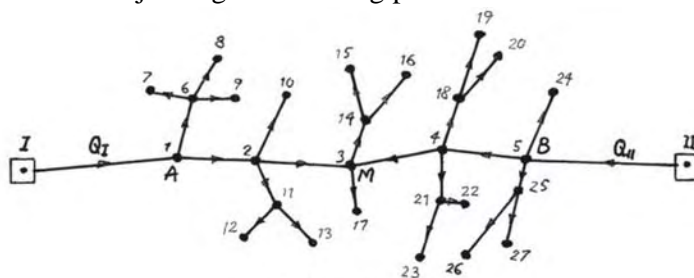
Za određivanje protoka u deonicama prstenastih i mešoviti vodovodnih mreža, jednačinama (2.85), kojih je $m-1$ (m – broj čvorova mreže), pridružuju se i jednačine (2.86), kojih je p (p – broj elementarnih prstenova u mreži). U sistemu jednačina (2.86), pored nepoznatih Q_{j-k} , preko koeficijenata, ili parametara K_{j-k} , figurišu i nepoznati prečnici d_{j-k} . Kako je broj jednačina (kojih je koliko i deonica u mreži) nedovoljan za istovremeno određivanje Q_{j-k} i d_{j-k} (jer je broj nepoznatih duplo veći od broja jednačina), zadatak se rešava iterativnim postupkom. U početnom približenju pretpostavljaju se protoci u p proizvoljno izabranih deonica (p – broj elementarnih prstenova u mreži), da bi se, zatim, korišćenjem jednačina (2.85) odredili protoci i u preostalih $m-1$ deonica mreže. Prema ovako dobijenim protocima u početnom približenju određuju se prečnici deonica mreže u prvom približenju. U daljem iterativnom postupku, koji je detaljnije obrađen u odeljku 2.8, vrši se unutrašnje usklađivanje mreže (usklađivanje prečnika i protoka po uslovu da sistemi jednačina (2.85) i (2.86) budu zadovoljeni).

Kao rezultat napred navedenih proračuna vodovodnih mreža dobijaju se prečnici deonica mreže, protoci u njima, a prema usvojenom minimalnom naporu vode u mreži proračunava se i potreban napor napajanja mreže.

Napred dato izlaganje odnosi se na vodovodne mreže sa jednim napojnim mestom (jednim izvorom napajanja), kako je na sl.2.21 prikazano. Praktično se ovo odnosi na vodovodne sisteme sa prethodnim napornim rezervoarom, a teorijski važi i za vodovodni sistem sa potisnom pumpnom stanicom, koji bi funkcionisao bez kontrarezervoara.

U vodovodnim mrežama sa više napojnih mesta (više izvora napajanja) potrebno je znati i protoke svih izvora napajanja. Kako je ukupni protok napajanja vodovodne mreže poznat (Q) i kako je on jednak zbiru protoka napajanja svih izvora napajanja, za određivanje pojedinačnih protoka izvora napajanja potrebno je postaviti dopunske jednačine, kojih je za jedan manje od broja izvora napajanja.

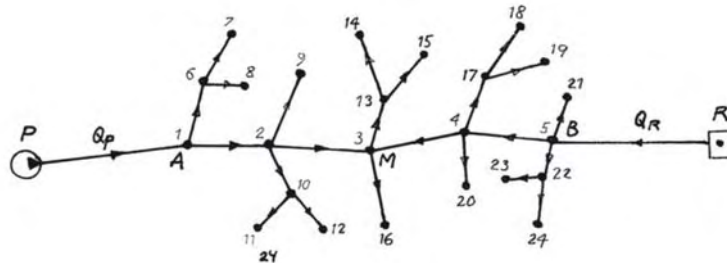
Razmotrimo dva primera granatih vodovodnih mreža sa dva izvora napajanja, jedne koji napajaju dva naporna rezervoara (sl.2.23.a) i druge sa kontrarezervoarom (sl.2.23.b), koju, u času najveće potrošnje, vodom snabdeva i potisna pumpa (P) i rezervoar (R). U periodima kada je protok potrošnje vode manji od protoka koji daje pumpa, kontrarezervoar se puni vodom (sl.2.23.c), a zbog nepoznatog protoka koji ide u rezervoar, ovaj se, za razliku od ostalih potrošača vode, tretira kao nefiksiran odvod vode. Kao i u slučaju dva izvora napajanja i u slučaju jednog izvora napajanja i jednog nefiksiranog odvoda vode, potrebno je postaviti još jednu jednačinu za određivanje ovog nefiksiranog protoka.



sl. 2.22.a

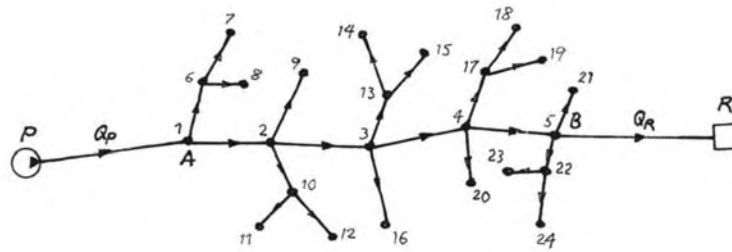
a)

$$Q_I + Q_{II} = Q = \sum_{i=1}^{27} q_i$$



sl. 2.22.b

b)
$$Q_P + Q_R = Q = \sum_{i=1}^{24} q_i, \quad (Q_P < Q)$$



sl. 2.22.c

c)
$$Q_P > Q \left(= \sum_{i=1}^{24} q_i \right), \quad Q_R = Q_P - \sum_{i=1}^{24} q_i$$

U slučaju da granata vodovodna mreža dobija gravitaciono vodu iz dva rezervoara, I i II, kako je na sl.2.23.a prikazano, ukupan protok vode koju troše potrošači,

$$Q = \sum_{i=1}^m q_i, \quad (m = 27, \text{ prema sl.2.23.a}),$$

jednak je zbiru protoka koji se dobijaju iz rezervoara I i II:

$$Q = Q_I + Q_{II} \quad (2.87)$$

Označavajući sa A i B čvorove napajanja mreže (prema sl.2.23.a je A = I, B = 5), očigledno je da na magistrali A - B postoji čvor koji se napaja od oba rezervoara – čvor u kojem se susreću protoci iz oba rezervoara. Pretpostavimo da je to čvor M.

Napor vode u čvoru napajanja A je

$$H_A = (Z_I - Z_A) - \Delta h_{I-A}, \quad (2.88)$$

gde su: Z_I – kota nivoa vode u rezervoaru I, Z_A – kota čvora A i Δh_{I-A} – gubitak napora u napojnom cevovodu I-A.

Gubitak napora u napojnom cevovodu I-A može se matematički opisati formulom

$$\Delta h_{I-A} = K_{I-A} \cdot Q_I^2,$$

gde je Q_I – zapreminski protok u cevovodu I-A, a K_{I-A} je koeficijent karakteristike gubitka napora u cevovodu I-A (za $\lambda_{I-A} = const$), odnosno parametar karakteristike gubitka napora u cevovodu I-A, ako Darsijev koeficijent trenja (λ_{I-A}) zavisi i od Re – broja.

S obzirom na napred datu formulu, jednačina (2.88) može da se piše u obliku

$$H_A = (Z_I - Z_A) - K_{I-A} \cdot Q_I^2, \quad (2.88')$$

prema kojem napor vode u tački napajanja A zavisi od protoka vode u napojnom cevovodu ($H_A = H_A(Q_I)$).

Napor vode u čvoru napajanja B je

$$H_B = (Z_{II} - Z_B) - \Delta h_{II-B}, \quad (2.89)$$

gde su: Z_{II} – kota nivoa vode u rezervoaru II, Z_B – kota čvora B i Δh_{II-B} – gubitak napora u napojnom cevovodu II-B.

Kako je $\Delta h_{II-B} = K_{II-B} \cdot Q_{II}^2$, napred data jednačina može da se piše i u obliku

$$H_B = (Z_{II} - Z_B) - K_{II-B} \cdot Q_{II}^2 \quad (2.89')$$

prema kojem je $H_B = H_B(Q_{II})$.

Prema energijskoj jednačini za strujni tok od rezervoara I do čvora M (u kojem se susreću protoci iz rezervoara I iz rezervoara II) je

$$Z_M + H_M = Z_I - \Delta h_{I-A} - \left(\sum \Delta h\right)_{A-M},$$

dok je prema energijskoj jednačini za strujni tok od rezervoara II do čvora M ,

$$Z_M + H_M = Z_{II} - \Delta h_{II-B} - \left(\sum \Delta h\right)_{B-M}.$$

Izjednačavanjem desnih strana napred datih jednačina za $Z_M + H_M$ sleduje da je

$$Z_I - \Delta h_{I-A} - \left(\sum \Delta h\right)_{A-M} = Z_{II} - \Delta h_{II-B} - \left(\sum \Delta h\right)_{B-M},$$

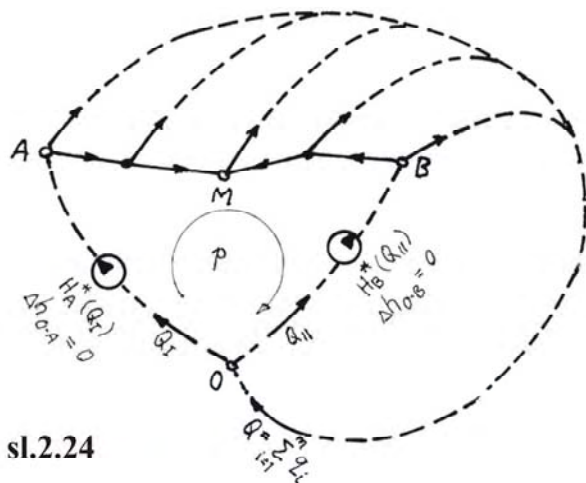
što s obzirom na (2.88) i (2.89), odnosno (2.88') i (2.89'), može da se piše u obliku

$$H_A^*(Q_I) - \left(\sum \Delta h\right)_{A-M} + \left(\sum \Delta h\right)_{B-M} - H_B^*(Q_{II}) = 0, \quad (2.90)$$

gde su:

$$H_A^*(Q_I) = Z_A + H_A(Q_I) = Z_I - K_{I-A} \cdot Q_I^2$$

$$i \quad H_B^*(Q_{II}) = Z_B + H_B(Q_{II}) = Z_{II} - K_{II-B} \cdot Q_{II}^2. \quad (2.90')$$



sl.2.24

Jednačine (2.87) i (2.90) omogućavaju da se prema poznatom protoku potrošnje Q , odrede protoci napajanja Q_I i Q_{II} , ($Q_I + Q_{II} = Q$).

Jednačina (2.90) predstavlja jednačinu ravnoteže priraštaja i gubitka napora u fiktivnom prstenu $OABO$, gde je u fiktivnom čvoru O , prema (2.87), $Q = Q_I + Q_{II}$, a u fiktivnim deonicama OA i OB , u kojima nema gubitka napora, ugrađene su fiktivne pumpe sa naponskim karakteristikama $H_A^* = (Q_I)$ i $H_B^* = (Q_{II})$, kako je na slici 2.24 prikazano.

Prema napred rečenom, problem određivanja protoka napajanja Q_I i Q_{II} , u granatoj mreži sa dva paralelna izvora napajanja, svodi se na problem određivanja protoka u fiktivnom prstenu (fiktivnoj zatvorenoj konturi).

U času najveće potrošnje vode, granatu vodovodnu mrežu sa kontrarezervoarom zajednički, u paralelnom radu, snabdeavaju i potisna pumpa i kontrarezervoar kako je na sl.2.23.b

prikazano. Protok kojeg troše potrošači Q (koji je poznat) jednak je zbiru protoka koji se dobija od potisne pumpe (Q_P) i protoka koji se dobija iz rezervoara (Q_R),

$$Q = Q_P + Q_R. \quad (2.91)$$

Napor vode u čvoru A , u kojem se mreža napaja od pumpe, je

$$H_A = H_P - (Z_A - Z_P) - \Delta h_{P-A}, \quad (2.92)$$

gde su H_P – napor potisne pumpe, Z_A, Z_P – visinske kote položaja čvora A i potisne pumpe P ($Z_A > Z_P$), Δh_{P-A} – gubitak napora u napojnom cevovodu $P-A$.

Kako je $H_P = H_P(Q_P)$ (prema karakteristici napora pumpe) i $\Delta h_{P-A} = K_{P-A} \cdot Q_P^2$, jednačina (2.92) može da se piše i u obliku

$$H_A = H_P(Q_P) - (Z_A - Z_P) - K_{P-A} \cdot Q_P^2, \quad (2.92')$$

prema kojem je $H_A = H_A(Q_P)$.

Napor vode u čvoru B , u kojem se mreža napaja iz rezervoara R (kontrarezervoara) je

$$H_B = (Z_R - Z_B) - \Delta h_{R-B}, \quad (2.93)$$

gde su Z_R, Z_B – visinske kote nivoa vode u rezervoaru i položaja čvora B ($Z_R > Z_B$) i Δh_{R-B} – gubitak napora u napojnom cevovodu $R-B$.

Kako je $\Delta h_{R-B} = K_{R-B} \cdot Q_P^2$, jednačina (2.93) može da se piše i u obliku

$$H_B = (Z_R - Z_B) - K_{R-B} \cdot Q_P^2, \quad (2.93')$$

prema kojem je $H_B = H_B(Q_R)$.

Pretpostavljajući da se čvor M napaja i od pumpe i od rezervoara (v.sl.2.23.b), energijske jednačine za strujne tokove od pumpe do čvora M i od rezervoara do čvora M glase:

$$Z_M + H_M = Z_P + H_P - \Delta h_{P-A} - \left(\sum \Delta h \right)_{A-M}$$

$$\text{i} \quad Z_M + H_M = Z_R - \Delta h_{R-B} - \left(\sum \Delta h \right)_{B-M}$$

Izjednačavanjem desnih strana napred datih jednačina dobija se

$$Z_P + H_P - \Delta h_{P-A} - \left(\sum \Delta h \right)_{A-M} = Z_R - \Delta h_{R-B} - \left(\sum \Delta h \right)_{B-M},$$

što se obzirom na (2.92) i (2.93), odnosno (2.92') i (2.93'), može da se piše i u obliku

$$H_A^*(Q_P) - \left(\sum \Delta h \right)_{A-M} + \left(\sum \Delta h \right)_{B-M} - H_B^*(Q_R) = 0, \quad (2.94)$$

gde su:

$$H_A^*(Q_P) = Z_A + H_A(Q_P) = H_P(Q_P) + Z_P - K_{P-A} \cdot Q_P^2$$

$$\text{i} \quad H_B^*(Q_R) = Z_B + H_B(Q_R) = Z_R - K_{R-B} \cdot Q_R^2. \quad (2.94')$$

Jednačine (2.91) i (2.94) omogućavaju da se, prema poznatom protoku potrošnje Q , odrede protoci napajanja Q_P i Q_R .

Jednačina (2.94), kao i jednačina (2.90), predstavlja jednačinu ravnoteže priraštaja i gubitaka napora u fiktivnom prstenu $OABO$ prikazanom na sl.2.24, s tim da Q_I treba zameniti sa Q_P , a Q_{II} sa Q_R , kako je na sl.2.25.a prikazano.

I u slučaju kada potisna pumpa daje veći protok od protoka kojeg troše potrošači u granatoj mreži sa kontrarezervoarom, potrebne su dopunske jednačine za određivanje protoka pumpe (Q_P) i protoka koji odlazi u rezervoar (Q_R), kako je na sl.2.23.c prikazano. Za $Q_P > Q$, gde je protok Q kojeg troše potrošači poznat ($Q = \sum q_i$), može se pisati

$$Q_P = Q + Q_R, \quad \text{ili} \quad Q_P - Q_R = Q \quad (2.95)$$

Napor vode u čvoru A , u kojem potisna pumpa napaja mrežu vodom, definisan je jednačinama (2.92) i (2.92'). a napor vode u čvoru B , iz kojeg se višak protoka pumpe ($Q_R = Q_P - Q$) potiskuje u kontrarezervoar je:

$$H_B = (Z_R - Z_B) + \Delta h_{B-R} \quad (2.96)$$

gde je Δh_{B-R} – gubitak napora u cevovodu $B-R$, kojim se voda odvodi u kontrarezervoar.

Kako je $\Delta h_{B-R} = K_{B-R} \cdot Q_R^2$, jednačina (2.96) može da se piše i u obliku

$$H_B = (Z_R - Z_B) + K_{B-R} \cdot Q_R^2, \quad (2.96')$$

prema kojem je $H_B = H_B(Q_R)$.

Energijska jednačina za strujni tok od pumpe do kontrarezervoara glasi

$$Z_P + H_P - \Delta h_{P-A} - \left(\sum \Delta h\right)_{A-B} - \Delta h_{R-B} - Z_R = 0,$$

a s obzirom na (2.92) i (2.96), odnosno (2.92') i (2.96'), ova jednačina može da se piše i u obliku

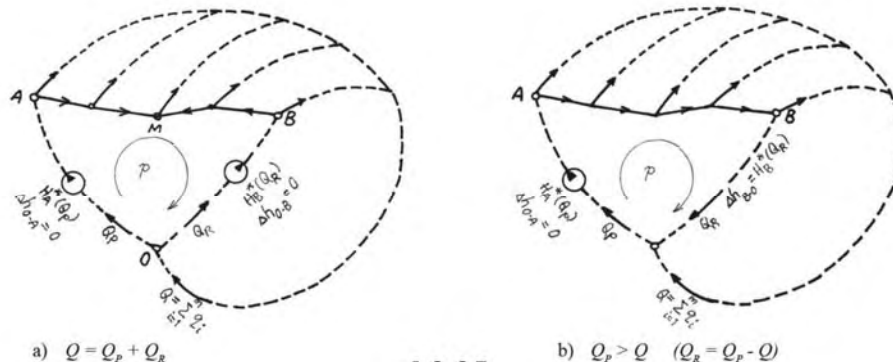
$$H_A^*(Q_P) - \left(\sum \Delta h\right)_{A-B} - H_B^*(Q_R) = 0 \quad (2.97)$$

gde su:

$$H_A^*(Q_P) = Z_A + H_A(Q_P) = H_P(Q_P) + Z_P - K_{P-A} \cdot Q_P^2$$

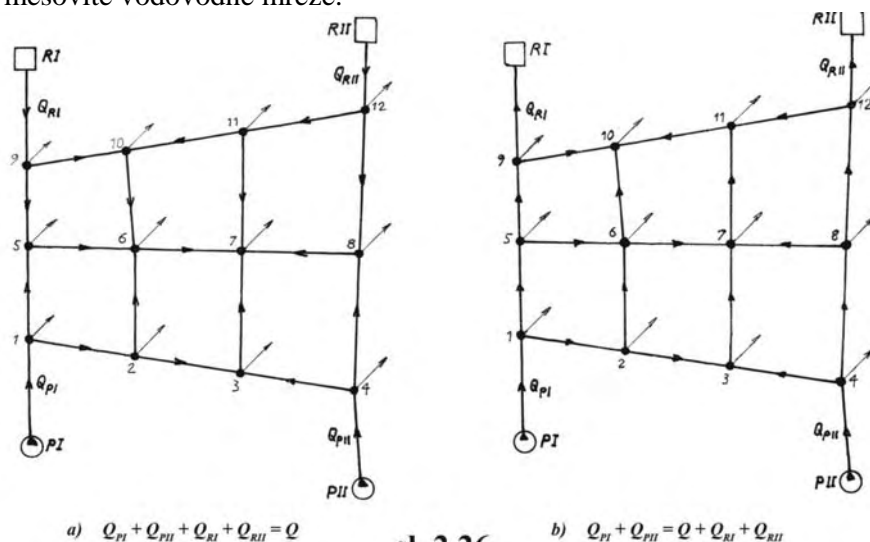
$$\text{i} \quad H_B^*(Q_R) = Z_B + H_B(Q_R) = Z_R + K_{R-B} \cdot Q_R^2. \quad (2.97')$$

Jednačina (2.97), s obzirom na jednačinu (2.95), predstavlja jednačinu ravnoteže priraštaja i gubitaka napora u fiktivnom prstenu $OABO$, gde je u fiktivnom čvoru O , prema (2.95) $Q_P = Q + Q_R$, a u fiktivnoj deonici OA ugrađena je pumpa naporne karakteristike $H_A^*(Q_P)$, dok fiktivna deonica AO stvara gubitak napora $\Delta h_{A-O} = H_B^*(Q_P)$, kako je na slici 2.25.b prikazano.



sl.2.25

Slične jednačine, za određivanje protoka napajanja iz više izvora, ili za određivanje protoka napajanja i protoka odvođenja vode u rezervoare (nefiksirane potrošače), mogu se postaviti i za prstenaste i mešovite vodovodne mreže.



sl. 2.26

Razmotrimo ovo na primeru prstenaste vodovodne mreže u sistemu vodosnabdevanja sa dve potisne pumpne stanice (PI i PII) i dva kontrarezervoara (RI i RII), kako je na sl.2.25

prikazano. Na sl.2.26 prikazani su smerovi strujanja u slučaju kada potisne pumpne stanice i kontrarezervoari, u paralelnom radu, zajednički snabdevaju potrošače vodom ($Q_{PI} + Q_{PII} + Q_{RI} + P_{RII} = Q$, Q – poznati protok kojeg troše potrošači). Na sl.2.26.b prikazani su smerovi strujanja u slučaju da su protoci iz pumpne stanice veći do protoka kojeg troše potrošači ($Q_{PI} + Q_{PII} > Q$), pa višak protoka iz pumpnih stanica puni kontrarezervoare ($Q_{PI} + Q_{PII} = Q + Q_{RI} + P_{RII}$).

U času najveće potrošnje vode, koji je merodavan za određivanje prečnika deonica vodovodne mreže, obe pumpne stanice i oba naporna rezervoara, u paralelnom radu, zajednički snabdevaju mrežu vodom (sl.2.26.a), pa je

$$Q_{PI} + Q_{PII} + Q_{RI} + P_{RII} = Q, \quad (2.98)$$

gde je Q – poznati protok potrošnje vode.

Napori vode u čvorovima napajanje mreže vodom, prema oznakama na sl.2.26.a, su:

$$H_1 = (Z_{PI} - Z_1) + H_{PI}(Q_{PI}) - K_{PI-1} \cdot Q_{PI}^2, \quad H_1 = H_1(Q_{PI}), \quad (2.99)$$

$$H_4 = (Z_{PII} - Z_4) + H_{PII}(Q_{PII}) - \frac{K_{PII-4} \cdot Q_{PII}^2}{K_{PII-4} \cdot Q_{PII}^2}, \quad H_4 = H_4(Q_{PII}), \quad (2.100)$$

$$H_9 = (Z_{RI} - Z_9) - \frac{K_{RI-9} \cdot Q_{RI}^2}{K_{RI-9} \cdot Q_{RI}^2}, \quad H_9 = H_9(Q_{RI}), \quad (2.101)$$

$$i \quad H_{12} = (Z_{RII} - Z_{12}) - \frac{K_{RII-12} \cdot Q_{RII}^2}{K_{RII-12} \cdot Q_{RII}^2}, \quad H_{12} = H_{12}(Q_{RII}). \quad (2.102)$$

$H_{PI}(Q_{PI})$ i $H_{PII}(Q_{PII})$, u jednačinama (2.99) i (2.100), su napori pumpi u pumpnim stanicama P_I i P_{II} , koji su, prema napornim karakteristikama uključenih pumpi, jednoznačne funkcije protoka pumpi.

Pored jednačine (2.98), za određivanje nepoznatih protoka napajanja Q_{PI} , Q_{PII} , Q_{RI} i Q_{RII} potrebno je postaviti još tri jednačine.

Pretpostavljajući, kako je na sl.2.26.a prikazano, da čvor 3 dobija vodu i od P_I i od P_{II} , može se napisati jednačina (za $Z_3 + H_3$, s obzirom na dva strujna toka):

$$Z_{PI} + H_{PI}(Q_{PI}) - K_{PI-1} \cdot Q_{PI}^2 - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3}) = Z_{PII} + H_{PII}(Q_{PII}) - K_{PII-4} \cdot Q_{PII}^2 - \Delta h_{4-3},$$

koja se, s obzirom na (2.99) i (2.100), može pisati i u obliku

$$H_1^*(Q_{PI}) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3}) + \Delta h_{4-3} - H_4^*(Q_{PII}) = 0, \quad (2.103)$$

gde su:

$$i \quad \begin{aligned} H_1^*(Q_{PI}) &= Z_1 + H_1 = Z_{PI} + H_{PI}(Q_{PI}) - K_{PI-1} \cdot Q_{PI}^2 \\ H_4^*(Q_{PII}) &= Z_4 + H_4 = Z_{PII} + H_{PII}(Q_{PII}) - K_{PII-4} \cdot Q_{PII}^2. \end{aligned} \quad (2.103')$$

Pretpostavljajući, kako je na sl.2.26.a prikazano, da čvor 5 dobija vodu i od P_I i od RI , može se napisati jednačina (za $Z_5 + H_5$, s obzirom na dva strujna toka):

$$Z_{PI} + H_{PI}(Q_{PI}) - K_{PI-1} \cdot Q_{PI}^2 - \Delta h_{1-5} = Z_{RI} + K_{RI} \cdot Q_{RI}^2 - \Delta h_{9-5},$$

koja se, s obzirom na (2.99) i (2.100), može pisati i u obliku

$$H_1^*(Q_{PI}) - \Delta h_{1-5} + \Delta h_{9-5} - H_9^*(Q_{RI}) = 0, \quad (2.104)$$

gde je:

$$H_9^*(Q_{RI}) = Z_9 + H_9 = Z_{RI} - K_{RI-9} \cdot Q_{RI}^2 \quad (2.104')$$

a napor $H_1^*(Q_{PI})$ je definisan prvom jednačinom (2.103').

Pretpostavljajući, kako je na sl.2.26.a prikazano, da čvor 8 dobija vodu i od PII i od RII , može se napisati jednačina

$$Z_{PII} + H_{PII}(Q_{PII}) - K_{PII-4} \cdot Q_{PII}^2 - \Delta H_{4-8} = Z_{RII} - K_{RII-12} \cdot Q_{RII}^2 - \Delta h_{12-8}$$

koja se, s obzirom na (2.100) i (2.102), može pisati i u obliku

$$H_4^*(Q_{PII}) - \Delta h_{4-8} + \Delta h_{12-8} - H_{12}^*(Q_{RII}) = 0, \quad (2.105)$$

gde je:

$$H_{12}^*(Q_{RI}) = Z_{12} + H_{12} = Z_{RII} - K_{RII-12} \cdot Q_{RII}^2, \quad (2.105')$$

a napor $H_4^*(Q_{PII})$ definisan je drigom jednačinom (2.103').

Jednačine (2.103), (2.104) i (2.105), uz jednačinu (2.98), čine zatvoreni sistem jednačina za određivanje protoka napajanja svih izvora (Q_{PI} , Q_{PII} , Q_{RI} i Q_{RII}).

Jednačine (2.103), (2.104) i (2.105) predstavljaju jednačine ravnoteže priraštaja i gubitka napora u fiktivnim prstenovima mreže 0-1-4-0, 0-1-9-0 i 0-4-12-0, kako je na sl.2.27.a prikazano.

U slučaju da potisne pumpne stanice $P1$ i $P2$ daju zbirni protok koji je veći od protoka kojeg troše potrošači ($Q_{PI} + Q_{PII} > Q$), naporni rezervoari (kontrarezervoari) RI i RII pune se vodom, pa je

$$Q_{PI} + Q_{PII} = Q + Q_{RI} + P_{RII}, \quad (2.106)$$

gde je Q – poznati protok potrošnje vode.

Napori vode u čvorovima napajanja mreže 1 i 4 definisani su jednačinom (2.99) i (2.100), a napori vode u čvorovima 9 i 12, iz kojih voda odlazi u rezervoar RI i RII , su:

$$H_9 = (Z_{RI} - Z_9) + K_{9-RI} \cdot Q_{RI}^2, \quad H_9 = H_9(Q_{RI}). \quad (2.107)$$

$$i \quad H_{12} = (Z_{RII} - Z_{12}) + K_{12-RII} \cdot Q_{RII}^2, \quad H_{12} = H_{12}(Q_{RII}). \quad (2.108)$$

Prema pretpostavljenim smerovima strujanja na sl.2.26.b, analognim putem kao u prethodnom primeru (ilustrovan sl.2.26.a), mogu se postaviti sledeće tri jednačine, koje uz jednačinu (2.106), kompletiraju sistem jednačina za određivanje Q_{PI} , Q_{PII} , Q_{RI} i Q_{RII} .

$$H_1^*(Q_{PI}) - (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3}) + \Delta h_{4-3} - H_4^*(Q_{PII}) = 0, \quad (2.109)$$

$$H_1^*(Q_{PI}) - \Delta h_{1-5} + \Delta h_{5-9} - H_9^*(Q_{RI}) = 0, \quad (2.110)$$

$$i \quad H_4^*(Q_{PII}) - \Delta h_{4-8} - \Delta h_{8-12} - H_{12}^*(Q_{RII}) = 0, \quad (2.111)$$

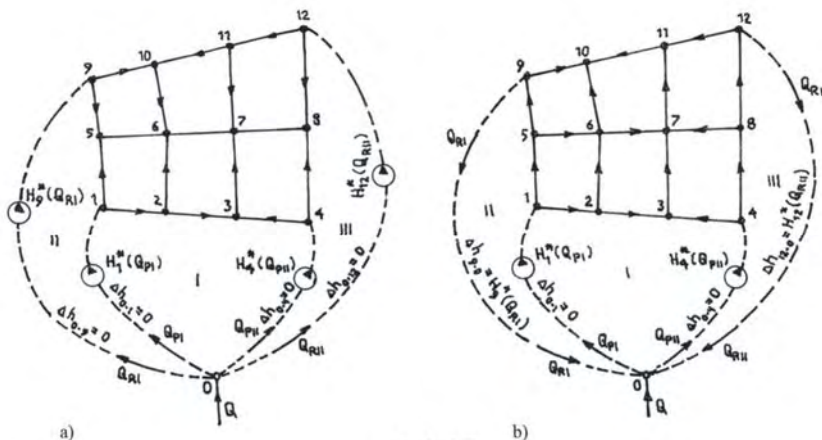
gde su:

$$H_9^*(Q_{RI}) = Z_9 + H_9 = Z_{RI} + K_{9-RI} \cdot Q_{RI}^2$$

$$i \quad H_{12}^*(Q_{RII}) = Z_{12} + H_{12} = Z_{RII} + K_{12-RII} \cdot Q_{RII}^2, \quad (2.112)$$

a napori $H_1^*(Q_{PI})$ i $H_4^*(Q_{PII})$ definisani su jednačinom (2.103').

Jednačine (2.109), (2.110) i (2.111) predstavljaju jednačine ravnoteže priraštaja i gubitka napora u fiktivnim prstenovima 0-1-4-0, 0-1-9-0 i 0-4-12-0, kako je na sl.2.27.b prikazano.



sl. 2.27