

ŽELJKO ŠRENG
SAVE ŠPANJA

PRIRUČNIK

VODOOPSKRBA NASELJA

PRIMJERI RIJEŠENIH ZADATAKA IZ TEORIJE I PRAKSE



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

ŽELJKO ŠRENG
SAVE ŠPANJA

PRIRUČNIK

VODOOPSKRBA NASELJA

PRIMJERI RIJEŠENIH ZADATAKA IZ TEORIJE I PRAKSE



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Impressum

Izdavač:

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Za izdavača:

prof. dr. sc. Hrvoje Krstić, dekan

Urednik:

doc. dr. sc. Željko Šreng

Tehnički suradnik:

Save Španja, mag. ing. aedif.

Recenzenti:

izv. prof. dr. sc. Dražen Vouk

izv. prof. dr. sc. Ivan Halkijević

Lektorica:

Klaudija Španja, mag. educ. croat. / mag. educ. germ.

Izdanje:

Osijek, listopad 2024. godine

ISBN: 978-953-6962-68-6

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku



Suglasnost za izdavanje ovog sveučilišnog priručnika donio je Senat Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 1. sjednici u akademskoj godini 2024./2025. održanoj 30. listopada 2024. godine pod točkom 8. podtočkom 8.2.

Zahvalu za tehničku pomoć i podršku, kao i ustupanje dijela fotodokumentacije, želimo uputiti tvrtkama:

IDT d. o. o. Osijek, Kralja Petra Svačića 16, 31000 Osijek

Vodoplast promet d. o. o., Dumovečka 16, 10361 Sesvetski Kraljevec

Vodovod-Osijek d. o. o., Poljski put 1, 31000 Osijek

Miholjački vodovod d. o. o., Ulica Pavla Radića 99, 31540 Donji Miholjac

Zahvalu za podršku, savjetovanje i recenziju priručnika želimo uputiti:

izv. prof. dr. sc. Dražen Vouk, izvanredni profesor na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

izv. prof. dr. sc. Ivan Halkijević, izvanredni profesor na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

Posebnu zahvalu na svakodnevnoj motivaciji za osobnim napredovanjem želimo uputiti Karlu, Piji i Adrianu.

Sadržaj

I ELEMENTI VODOOPSKRBNOG SUSTAVA	1
Potisni vodoopskrbni sustav	3
Gravitacijski vodoopskrbni sustavi.....	3
Kombinirani vodoopskrbni sustavi	5
II POTROŠNJA VODE.....	8
Vodna bilanca	10
Određivanje potrošnje vode	10
Koeficijenti neravnomjernosti potrošnje vode.....	11
Praćenje i kontrola vode u vodoopskrbnom sustavu.....	14
<i>Zadatak 2.1 Određivanje srednje potrošnje vode stanovništva za definirani planski period</i>	<i>15</i>
<i>Zadatak 2.2 Određivanje specifične potrošnje vode po stanovniku.....</i>	<i>16</i>
<i>Zadatak 2.3 Određivanje koeficijenta neravnomjernosti potrošnje u promatranom periodu</i>	<i>16</i>
<i>Zadatak 2.4 Određivanje koeficijenta satne neravnomjernosti</i>	<i>17</i>
<i>Zadatak 2.5 Određivanje mjerodavnih količina vode za dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava po pojedinim kategorijama potrošača</i>	<i>19</i>
III DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA.....	21
Hidrauličko dimenzioniranje cjevovoda	22
Dimenzioniranje razdjelne vodoopskrbne mreže.....	27
Klasifikacija i nomenklatura cijevi	28
<i>Zadatak 3.1 Dimenzioniranje dovodnog i opskrbnog cjevovoda.....</i>	<i>31</i>
<i>Zadatak 3.2 Dimenzioniranje dovodnog cjevovoda uz poštivanje minimalno dozvoljenog tlaka....</i>	<i>33</i>
<i>Zadatak 3.3 Dimenzioniranje granate mreže i određivanje tlaka u kritičnoj točki mreže</i>	<i>36</i>
<i>Zadatak 3.4 Dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava uz određivanje minimalne razine vode u vodospremi i snage crpke na vodozahvatu.....</i>	<i>38</i>
<i>Zadatak 3.5 Proračun gubitka tlaka preko ekvivalentnog protoka.....</i>	<i>42</i>
IV RASPODJELA TLAKA U VODOOPSKRBNOM SUSTAVU.....	44
<i>Zadatak 4.1 Određivanje vrijednosti tlaka na dovodnom cjevovodu.....</i>	<i>45</i>
<i>Zadatak 4.2 Određivanje minimalne razine vode u vodotornju.....</i>	<i>49</i>
<i>Zadatak 4.3 Dimenzioniranje cjevovoda i određivanje vrijednosti tlaka u točkama sustava</i>	<i>53</i>
<i>Zadatak 4.4 Raspodjela tlaka u vodoopskrbnom sustavu industrijskog postrojenja</i>	<i>57</i>

<i>Zadatak 4.5 Usporedba varijantnih rješenja opskrbe vodom naselja.....</i>	<i>61</i>
V VODOSPROME	64
<i>Zadatak 5.1 Određivanje operativnog volumena vodospreme.....</i>	<i>66</i>
<i>Zadatak 5.2 Određivanje parametara potrošnje vode preko analiziranog rada vodospreme.....</i>	<i>72</i>
<i>Zadatak 5.3 Dimenzioniranje vodospreme za zadani režim rada industrijskog postrojenja.....</i>	<i>75</i>
VI ARMATURE FAZONSKI KOMADI ČVORIŠTA	78
Armature	79
Fazonski komadi	80
Hidranti	82
Kućni i višestambeni vodovod	83
Primjeri armatura i fazonskih komada iz prakse.....	85
Literatura.....	95

Slike

Slika 1.1 Elementi vodoopskrbnog sustava	3
Slika 1.2 Potisni vodoopskrbni sustav	3
Slika 1.3 Tipični gravitacijski vodoopskrbni sustav	4
Slika 1.4 Zonirani gravitacijski vodoopskrbni sustav	4
Slika 1.5 Gravitacijski vodoopskrbni sustav s protuvodospremom	5
Slika 1.6 Kombinirani vodoopskrbni sustav s vodotornjem	5
Slika 1.7 Kombinirani vodoopskrbni sustav s protuvodospremom	6
Slika 1.8 Zonirani kombinirani vodoopskrbni sustav s protuvodospremom	6
Slika 1.9 Kombinirani indirektni vodoopskrbni sustav	7
Slika 1.10 Zonirani kombinirani indirektni vodoopskrbni sustav	7
Slika 2.1 Primjer analize godišnje potrošnje vode po mjesecima	12
Slika 2.2 Primjer analize mjesečne potrošnje na temelju podataka o fakturiranoj vodi	13
Slika 2.3 Primjer analize dnevne potrošnje vode	14
Slika 2.4 Trend promjene potrošnje u planskom razdoblju	15
Slika 2.5 Histogram koeficijenta neravnomjernosti k_h u toku dana	18
Slika 3.1 Moodyjev dijagram	24
Slika 3.2 Primjer PE cijevi sa oznakama	28
Slika 3.3 Primjer PE cijevi s oznakama	29
Slika 3.4 Primjer duktilne cijevi s oznakama	29
Slika 3.5 Shema vodoopskrbnog sustava	31
Slika 3.6 Uzdužni presjek terena s naznačenom niveletom cijevi (plava isprekidana linija)	33
Slika 3.7 Uzdužni presjek dovodnog cjevovoda	35
Slika 3.8 Shematski prikaz razdjelne mreže unutar naselja	36
Slika 3.9 Shema vodoopskrbnog sustava	38
Slika 4.1 Shema vodoopskrbnog sustava	45
Slika 4.2 Raspodjela protoka u trenutku maksimalne satne potrošnje u naseljima A i B	46
Slika 4.3 Raspodjela tlakova za slučaj $Q_{\max,h}$	47
Slika 4.4 Raspodjela tlakova za slučaj $Q = 0$	48
Slika 4.5 Shema vodoopskrbnog sustava	49
Slika 4.6 Raspodjela protoka i položaj "mrtve" točke	50
Slika 4.7 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$	51
Slika 4.8 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$ i $Q = 0$	52
Slika 4.9 Shema vodoopskrbnog sustava	53
Slika 4.10 Raspodjela protoka i položaj "mrtve" točke za slučaj $Q_{\max,h}$	54
Slika 4.11 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$	55
Slika 4.12 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$ i $Q = 0$	56
Slika 4.13 Shema vodoopskrbnog sustava industrijskog postrojenja u presjeku i tlocrtu	57
Slika 4.14 Piezometarska linija za vrijeme maksimalne satne potrošnje u postrojenju	60
Slika 4.15 Piezometarska linija za vrijeme kada crpka ne radi	60
Slika 4.16 Shematski prikaz vodoopskrbnog sustava	61
Slika 5.1 Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi	67
Slika 5.2 Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi	68
Slika 5.3 Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi	69
Slika 5.4 Koeficijenti satne neravnomjernosti potrošnje vode	74
Slika 5.5 Odnos početka rada crpne stanice i volumena vodospreme	76
Slika 5.6 Nivogram u vodospremi	77
Slika 6.1 Primjer izvedbe hidrantske mreže od glavnog voda PEHD DN 110 sa spojnim komadima i armaturom, do nadzemnog hidranta DN 100	85
Slika 6.2 Završno slaganje fazonskih komada magistralnog cjevovoda DN 800	85

Slika 6.3 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 s koljenom i zaštitnom cijevi izvan okna.....	86
Slika 6.4 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 s postavljenim fazonskim komadima i armaturama	86
Slika 6.5 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 na kojem se vrši spajanje novog cjevovoda na postojeći cjevovod DN 400.....	87
Slika 6.6 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i izbetoniranom donjom pločom i pripremljenom armaturom za zidove okna	88
Slika 6.7 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i betoniranom donjom pločom i pripremljenom armaturom za zidove okna	88
Slika 6.8 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima i armaturama; vidljiva podzemna voda unutar građevne jame	89
Slika 6.9 Prikaz elemenata vodoopskrbne mreže izvan okna.....	89
Slika 6.10 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i pripremljenom oplatom.....	90
Slika 6.11 Polaganje duktilne cijevi u širokom rovu i povezivanja dionica cjevovoda s FF i MDK komadom	90
Slika 6.12 Prikaz utiskivanja vodoopskrbne cijevi kroz zaštitnu čeličnu cijev s distancerima, prijenosna crpka osigurava rad u suhom unutar građevne jame	91
Slika 6.13 Primjer vodovodnih čvorišta	91
Slika 6.14 Potopljeno vodomjerno okno, u oknu se nalaze 3 EV zasuna, T komad i FF komadi	92
Slika 6.15 Primjer vodovodnih čvorišta	92
Slika 6.16 Unutrašnjost PEHD okna u koje su smješteni EV zasun mjerači tlaka i protoka spojeni na nadzorno upravljački sustav vodoopskrbe	93
Slika 6.17 Unutrašnjost PEHD okna u koje su smješteni mjerači tlaka i protoka spojeni na nadzorno upravljački sustav vodoopskrbe, okno se nalazi neposredno uz izvorište vode.....	93
Slika 6.18 Prikaz priključnog okna u stambenoj zgradi sa zasebnim razvodom i mjeračima protoka za unutarnju hidrantsku i opskrbnu mrežu	94

Tablice

Tablica 2.1 Isporučena voda u danu maksimalne potrošnje.....	17
Tablica 2.2 Koeficijenti satne neravnomjernosti potrošnje k_h	18
Tablica 2.3 Potrebne količine vode za industriju Q_{ind}	19
Tablica 3.1 Empirijske vrijednosti koeficijenta hrapavosti za nove cijevi.....	25
Tablica 3.2 Cijevi PE 80 – polietilen minimalne potrebne čvrstoće 8 MPA	30
Tablica 3.3 Cijevi PE 100 – polietilen minimalne potrebne čvrstoće 10 MPA	30
Tablica 3.4 Nadmorske visine čvorova	36
Tablica 3.5 Proračun mjerodavnih protoka za dimenzioniranje	37
Tablica 3.6 Dimenzioniranje cijevi i proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama.....	37
Tablica 3.7 Vrijednosti tlakova po čvorovima	37
Tablica 3.8 Proračun mjerodavnih protoka za dimenzioniranje	39
Tablica 3.9 Dimenzioniranje cijevi i proračun linijskih gubitaka po dionicama	40
Tablica 4.1 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{max,h}$	47
Tablica 4.2 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj kada nema potrošnje vode.....	48
Tablica 4.3 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{max,h}$	50
Tablica 4.4 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj kada nema potrošnje u naselju	51
Tablica 4.5 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{max,h}$	54
Tablica 4.6 Proračun tlaka u karakterističnim točkama sustava	55
Tablica 4.7 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{max,h}$	55
Tablica 4.8 Proračun tlaka u karakterističnim točkama sustava	56
Tablica 4.9 Potrošnja vode za industriju tijekom dana	57
Tablica 5.1 Koeficijenti satne neravnomjernosti k_h potrošnje vode stanovnika u naselju	66
Tablica 5.2 Koeficijenti satne neravnomjernosti k_h potrošnje vode za industriju	66
Tablica 5.3 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj konstantnog dotoka.....	67
Tablica 5.4 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj dotoka od 22 h do 10 h	68
Tablica 5.5 Proračun operativnog volumena vodospreme za dotoka od 10 h do 22 h.....	69
Tablica 5.6 Vrijednosti operativnog volumena vodospreme prema analiziranim varijantama.....	70
Tablica 5.7 Proračun satne potrošnje u industriji.....	70
Tablica 5.8 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj konstantnog dotoka.....	71
Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti dubine vode h_v u vodospremi tijekom dana.....	72
Tablica 5.10 Proračun potrošnje vode u naselju	73
Tablica 5.11 Proračun koeficijentata satne neravnomjernosti potrošnje vode	74
Tablica 5.12 Potrošnja vode za industriju tijekom dana	75
Tablica 5.13 Proračun volumena vodospreme za vrijeme početka rada crpne stanice $T_0= 5, 6$ i 20 h	76
Tablica 5.14 Proračun nivograma u vodospremi	77

I

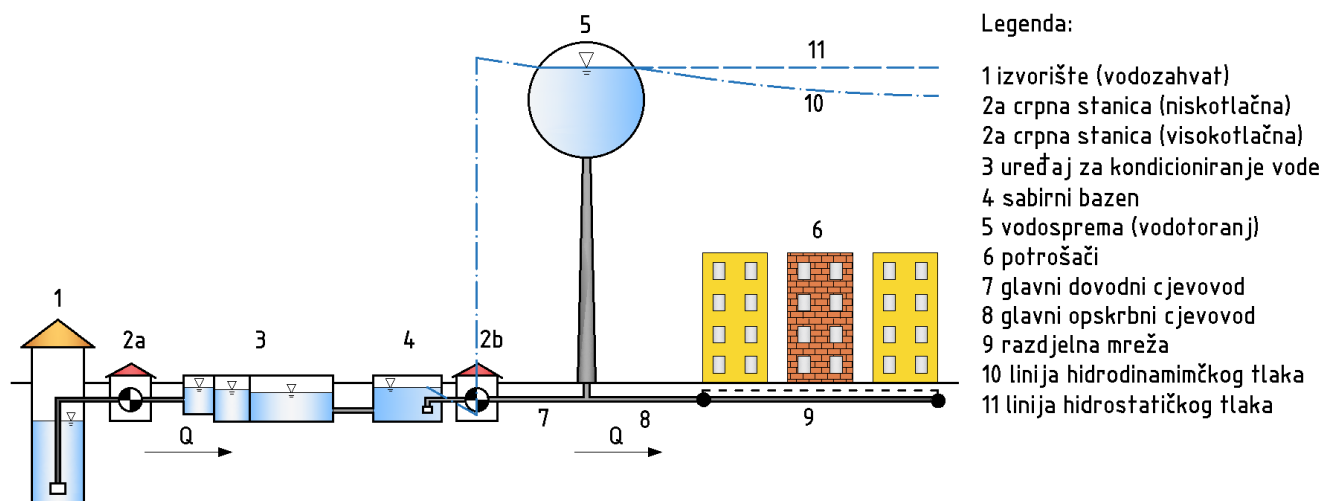
ELEMENTI

VODOOPSKRBNOG SUSTAVA

Vodoopskrba naselja predstavlja proces osiguranja pitke vode potrošačima te pripada području sanitarne hidrotehnike. Cilj je vodoopskrbe na optimalan način iskoristiti prirodne resurse vode te pitku vodu distribuirati do krajnjih korisnika. Pod pojmom optimalno se podrazumijeva:

- racionalno korištenje prirodnih resursa, tj. zahvaćanje količine vode s izvorišta koja će zadovoljiti potrebe korisnika u sadašnjosti, ali i u budućnosti, te neće negativno utjecati na bilancu vode u području, tj. imati negativan utjecaj na okoliš
- prerada sirove vode u pitku (kondicioniranje) korištenjem prikladnih tehnologija i procesa
- projektiranje i izgradnju vodoopskrbne infrastrukture koja će dimenzijama zadovoljiti potrebe korisnika i biti u skladu s pravilima struke
- osiguranje ekonomski i tehnički prihvatljivih pogonskih elemenata, kao što su tlakovi i oscilacije tlakova u sustavu, te potrošnja električne energije u crpnim postrojenjima.

Na **Slici 1.1** prikazani su osnovni elementi vodoopskrbnog sustava [1]. Sirova voda se zahvaća s izvorišta (vodozahvata). S izvorišta se voda gravitacijski ili pod sredstvom crpki potiskuje prema uređaju za kondicioniranje, gdje se vrši priprema pitke vode. Ako je voda s izvorišta zadovoljavajuće kvalitete, uređaj za kondicioniranje može izostati iz sustava, iako je nužno vršiti kontrolu u realnom vremenu kako bi se osigurala zdravstvena ispravnost vode za piće. Voda se dalje distribuira prema vodospremi koja posreduje između izvorišta i potrošača. Vodosprema služi za izravnavanje dotoka s izvorišta (i uređaja za kondicioniranje) i potrošnje vode u naselju. U vidu optimizacije sustava i veličine objekta vodospreme, najčešće se dimenzionira na dnevno izravnavanje dotoka i potrošnje, tj. voda koja u tijeku jednog dana dotekne u vodospremu mora i isteći iz nje, tj. potrošiti se. Vodospremom se može osigurati konstantan režim rada crpnog postrojenja uzvodno od vodospreme (crpke rade s konstantnim protokom i konstantnom potrošnjom električne energije). Konstantan i kontroliran režim rada crpke omogućuje da se odabere crpka koja će raditi s maksimalnom iskoristivošću, te se tako racionaliziraju i optimiziraju troškovi pogona. U uvjetima kada to nije moguće osigurati, koriste se crpke s frekventnom regulacijom čime se optimiziraju pogonske karakteristike (protok i tlak), dok učinkovitost ostaje gotovo konstantna. Na taj način optimizira se rad cijelog crpnog sustava koji se prilagođava potrošnji vode, a ne samo crpki. Vodosprema svojim operativnim (korisnim) volumenom pokriva oscilacije u potrošnji vode tijekom dana. Potreban tlak u cjevovodu i razdjelnoj mreži vodosprema osigurava svojim visinskim položajem (smještaj na višoj koti terena, vodotoranj) ili crpkama (niska, ukopana vodosprema). Cjevovod od izvorišta i uređaja za kondicioniranje do vodospreme naziva se dovodni cjevovod. Na tom cjevovodu nema potrošača (priključaka) i protok kroz njega najčešće nema značajnih odstupanja (u uvjetima korištenja konstantnog režima rada crpki osigurava se i konstantan protok na dovodnom cjevovodu). U dovodne cjevovode uvrštavaju se i magistralni cjevovodi koji povezuju naselja te služe za transport vode na veće udaljenosti. Dovodni cjevovodi velikim promjerima osiguravaju mali pad tlaka u vodoopskrbnom sustavu. Cjevovod od vodospreme do naselja, odnosno od dovodnog cjevovoda (magistralnog) do naselja, naziva se opskrbeni cjevovod. Protok kroz opskrbeni cjevovod nije konstantan i ovisi o režimu potrošnje vode u naselju. U slučaju da se vodosprema nalazi iza naselja (vodoopskrbni sustav s protuvodospremom), a kada postoje spojeni potrošači, cjevovod se naziva dovodno-opskrbeni i preko njega se puni vodosprema, ali i opskrbljuje naselje. Mreža cijevi unutar naselja naziva se razdjelna mreža i ona može biti granata i/ili prstenasta. Na mreži se mogu nalaziti i dodatni objekti i elementi radi osiguranja nesmetane opskrbe vodom (npr. crpne stanice). Za ispravno funkcioniranje mreže, njeno održavanje i upravljanje koriste se tzv. vodovodne armature (zasuni, hidranti, odzračni ventili itd.). Također, na cjevovodu se postavljaju i tzv. fazonski ili oblikovni komadi, koji se koriste uslijed promjena pravaca i grananja cjevovoda, te za spajanje cijevi različitog profila i materijala.

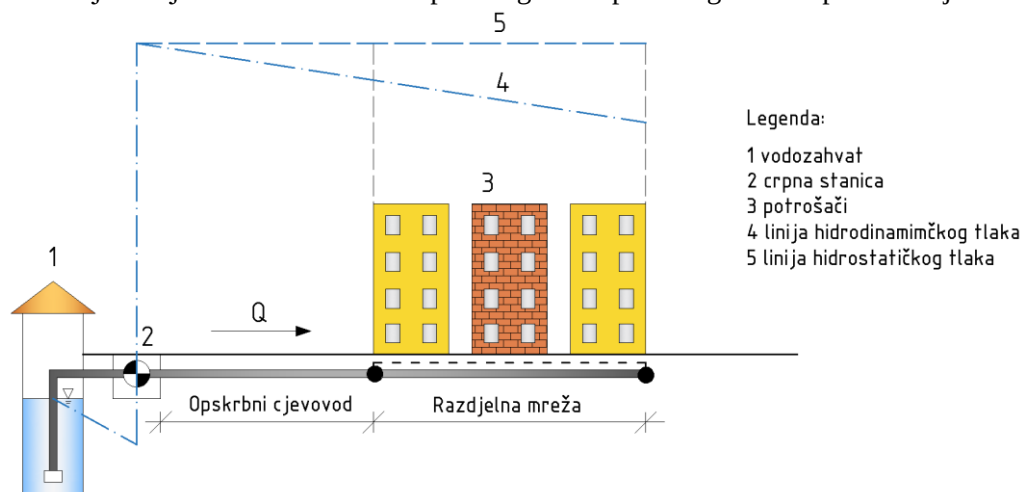


Slika 1.1 Elementi vodoopskrbnog sustava

Sve navedene objekte potrebno je dimenzionirati na način da omoguće opskrbu vodom u danu s najvećom potrošnjom. Kod dimenzioniranja opskrbenog cjevovoda i razdjelne mreže potrebno je analizirati i satne oscilacije u potrošnji i dimenzionirati ih na maksimalne satne vrijednosti. Način analize potrošnje vode i odabir mjerodavnih količina za dimenzioniranje objekata obrađen je u poglavlju **II Potrošnja vode**. U nastavku je dan kratki pregled tipova vodoopskrbnog sustava prema pogonskim osobinama.

Potisni vodoopskrbni sustav

Voda se direktno s vodozahvata ili uređaja za kondicioniranje distribuira prema naselju i potrošačima pod sredstvom crpke. Crpka radi neprekidno tijekom dana i s promjenjivim protokom, što rezultira povećanjem pogonskih troškova. Ovakav tip vodoopskrbnog sustava najčešće se primjenjuje za manje i/ili tehnički manje zahtjevne sustave. Shema potisnog vodoopskrbnog sustava prikazana je na **Slici 1.2**.

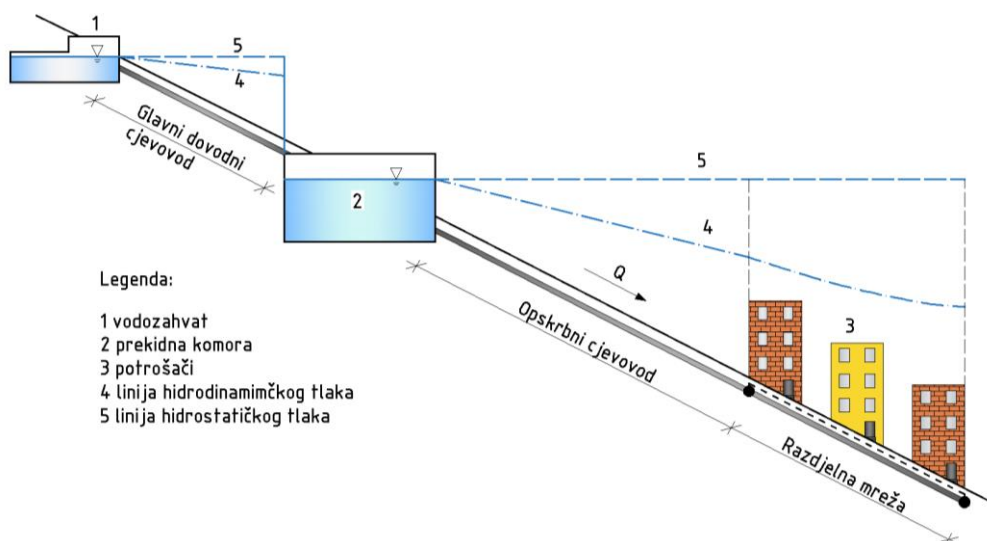


Slika 1.2 Potisni vodoopskrbni sustav

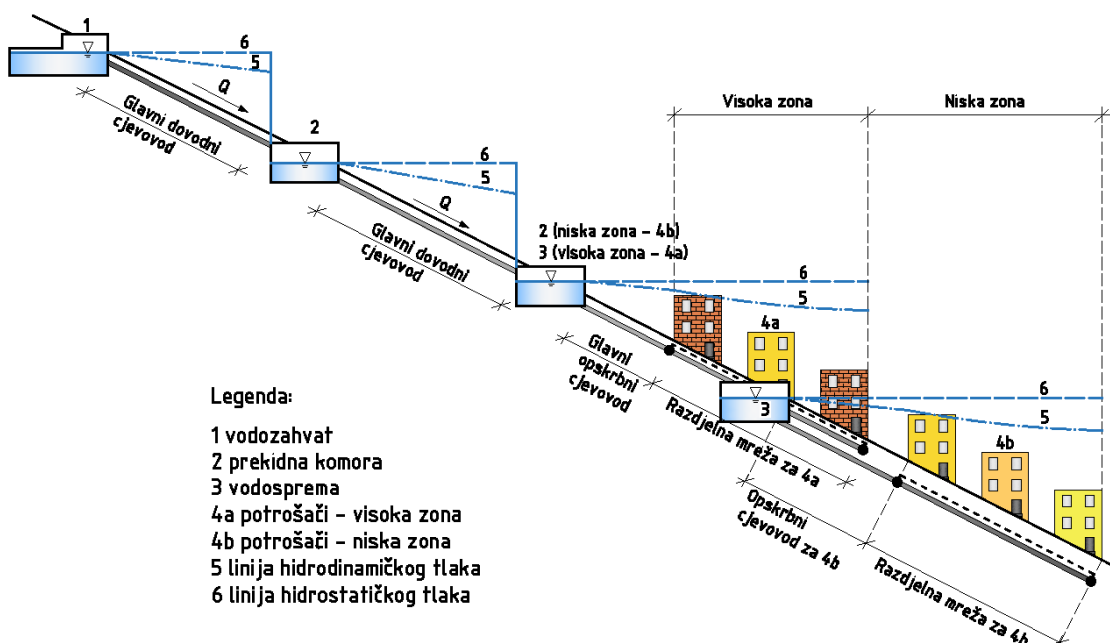
Gravitacijski vodoopskrbni sustavi

Voda teče pod sredstvom sile teže i tečenje se primarno odvija pod tlakom. U ovakvim sustavima moguće je i tečenje sa slobodnim vodnim licem, ali ono se zbog pogodnih i funkcionalnih razloga ograničava samo na dionicu dovodnog cjevovoda (do vodospreme). Tečenje sa slobodnim vodnim licem moguće je samo ako to dopuštaju topografske prilike. Na **Slici 1.3** prikazan je tipičan primjer gravitacijskog vodoopskrbnog sustava. Karakteristika ovakvog sustava je minimalan pogonski trošak

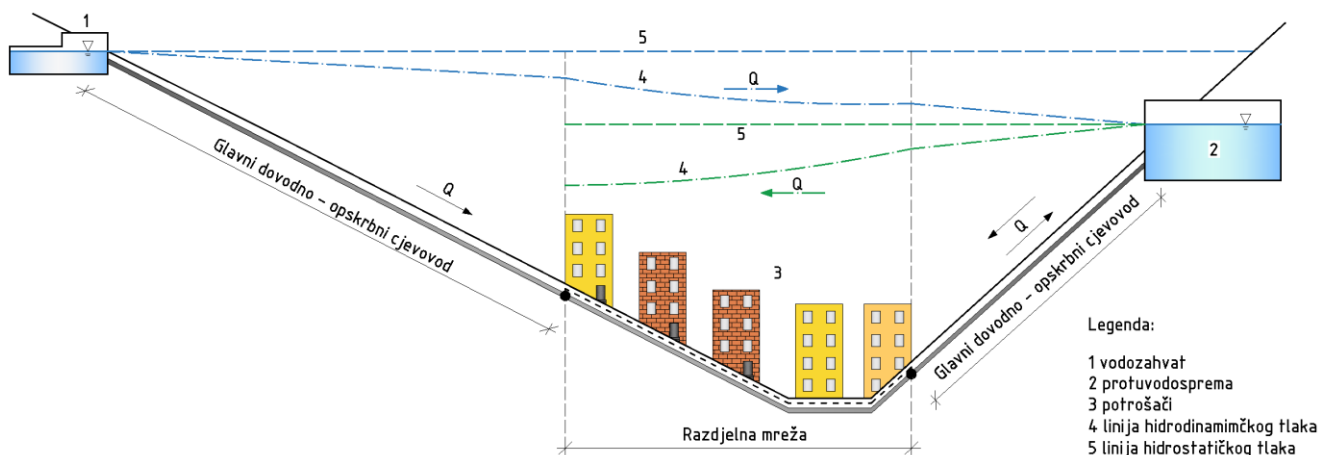
zbog nepostojanja crpnih stanica, što također ima pozitivan učinak i na pouzdanost rada sustava. Moguće je da se zbog visinskih odnosa između vodozahvata, vodospreme i naselja u sustavu pojave visoke vrijednosti tlakova (veće od dopuštenih, vidi poglavlje **III Dimenzioniranje cjevovoda**). Tada se u sustavu trebaju predvidjeti prekidne komore ili posebne vodovodne armature koje služe za reguliranje tlačnih odnosa, a sustav se tako dijeli na više zona, tzv. zonirani sustav. Na **Slici 1.4** prikazana je shema zoniranog gravitacijskog sustava gdje prekidna komora (2) osigurava prihvatljivu vrijednost tlaka (u slučaju da je nema, tlak u naselju bi bio prevelik zbog visinskog odnosa izvorišta i naselja). S obzirom na topografiju terena u nižim dijelovima naselja (niska zona) i dalje se mogu javiti visoke vrijednosti tlaka (zbog visinskog odnosa uzvodne prekidne komore i niske zone). Iz tog se razloga predviđa dodatna prekidna komora za nisku zonu koja će poslužiti i kao vodosprema za visoku zonu. Ukoliko se naselje nalazi između vodozahvata i vodospreme tada se radi o sustavu s protuvodospremom. Shema takvog sustava prikazana je na **Slici 1.5**. U takvom sustavu voda može dotjecati u vodospremu i istjecati iz nje istim cjevovodom (dovodno-opskrbeni cjevovod). Moguće je rješenje i da se vodosprema puni s jednim cjevovodom, a prazni i opskrbljuje naselje drugim cjevovodom, ali takvo rješenje dovodi do povećanja investicijskih troškova.



Slika 1.3 Tipični gravitacijski vodoopskrbni sustav



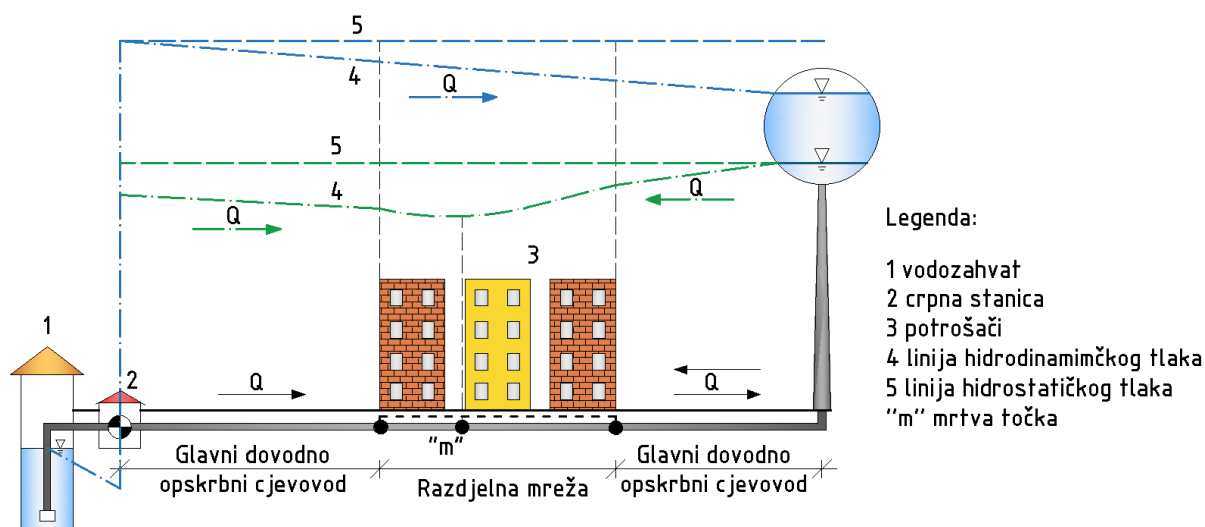
Slika 1.4 Zonirani gravitacijski vodoopskrbni sustav



Slika 1.5 Gravitacijski vodoopskrbni sustav s protuvodospremom

Kombinirani vodoopskrbni sustavi

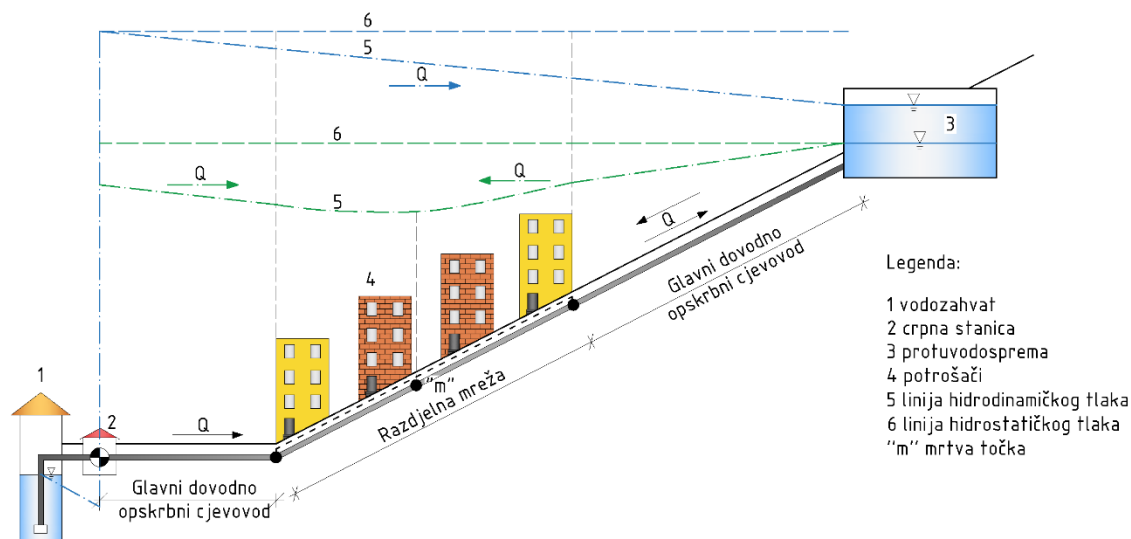
Ovakvi sustavi su kombinacija gravitacijskog i potisnog sustava i u praksi se često primjenjuju. Ako se izvorište nalazi na nižim kotama u odnosu na naselje, vodu je potrebno crpiti i potiskivati prema naselju, odnosno vodospremi. Vodosprema omogućuje gravitacijski tok vode prema naselju. Vodosprema osigurava potrebnu količinu vode u slučaju kvara crpke te je ovaj sustav pouzdaniji u odnosu na potisni sustav. Također, ovakav sustav ima niže troškove rada i održavanja. Uslijed izravnjavanja dotoka i potrošnje vode, iz vodospreme je moguće racionalizirati rad crpke na izvorištu (uprosječiti protok s izvorišta, definirati rad crpke s konstantnim protokom te uskladiti crpljenje s vremenom jeftinije cijene električne energije). Postupak proračuna izravnjavanja dotoka i potrošnje vode iz vodospreme prikazan je u poglavlju V **Vodospreme**. Na **Slici 1.6** prikazana je shema kombiniranog vodoopskrbnog sustava s vodotoranjem. Plava linija hidrodinamičkog tlaka predstavlja trenutak kada u naselju nema potrošnje i vodosprema se puni. Zelena linija hidrodinamičkog tlaka predstavlja trenutak kada postoji potrošnja u naselju te se naselje opskrbljuje vodom gravitacijski iz vodospreme, a potisno s izvorišta. Raspodjela protoka ovisi o kapacitetu crpke i potrošnji vode u naselju. Ovakav sustav nije tipičan školski primjer jer se vodotoranj obično smješta u centar naselja radi smanjenja hidrauličkih, a time i energetske gubitaka.



Slika 1.6 Kombinirani vodoopskrbni sustav s vodotoranjem

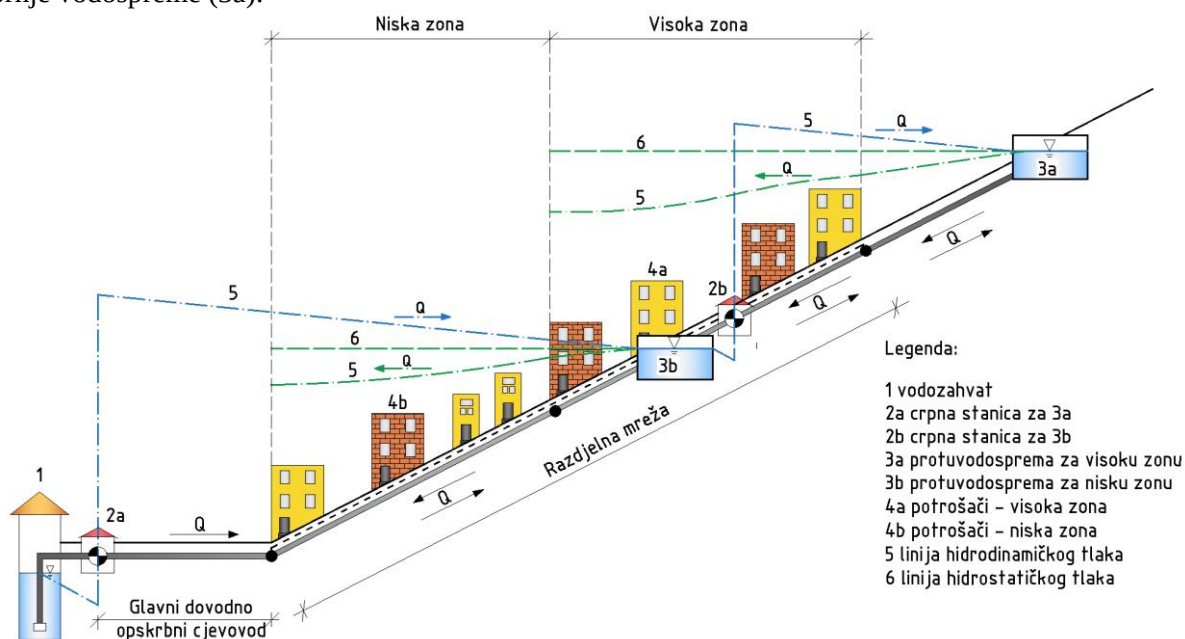
Na **Slici 1.7** prikazan je kombinirani sustav s protuvodospremom. Kao i na **Slici 1.6**, i ovdje je dotok u naselje moguć s obje strane naselja istovremeno, ovisno o kapacitetu crpke, režimu rada crpke i

potrošnji vode u naselju. Mrtva točka „m“, naznačena na **Slici 1.6**, predstavlja točku gdje je protok jednak nuli ($Q = 0$).



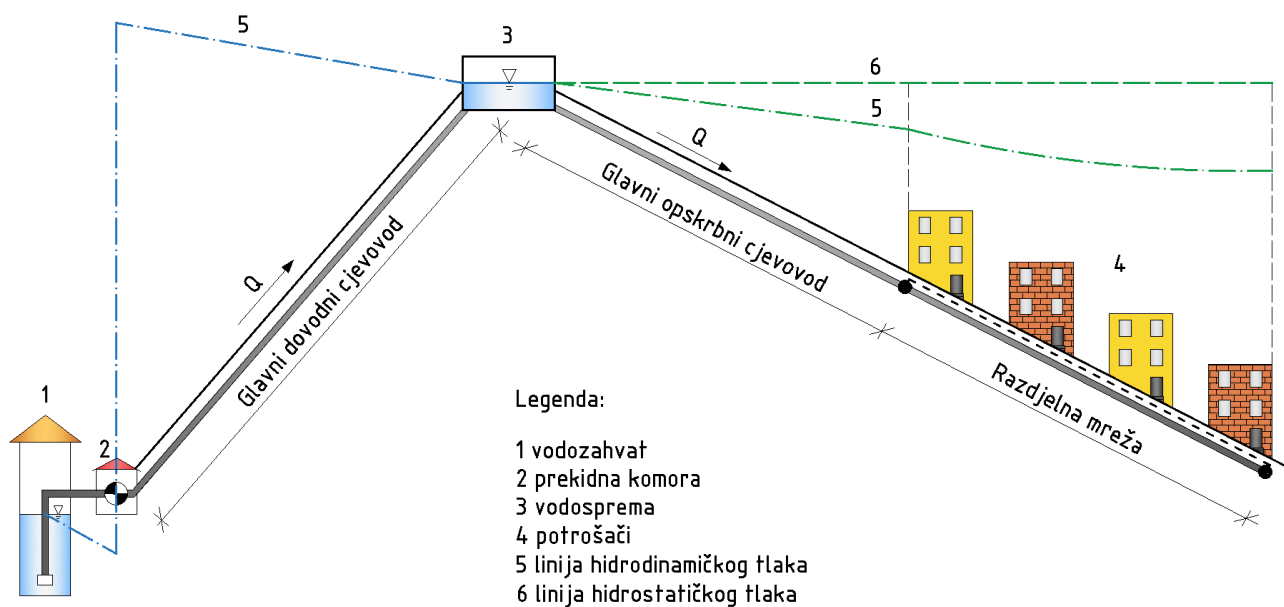
Slika 1.7 Kombinirani vodoopskrbni sustav s protuvodospremom

Na **Slici 1.8** prikazana je shema zoniranog kombiniranog sustava s protuvodospremom. Ovakav sustav se koristi kada visinski odnosi u sustavu zahtijevaju postavljanje dodatnih crpnih stanica i vodosprema za osiguranje povoljnih pogonskih uvjeta u sustavu, tj. dopuštenih tlakova. Vidljivo je sa **Slike 1.8** da kada bi se voda crpila direktno s izvorišta u gornju vodospremu (3a) da bi tlak u niskoj zoni bio prevelik. Također, tlak bi u niskoj zoni bio prevelik i prilikom opskrbe vodom iz gornje vodospreme (3a). Zbog toga je u sustav potrebno postaviti dodatnu vodospremu (3b) koja će posredovati između izvorišta i gornje vodospreme (3a).

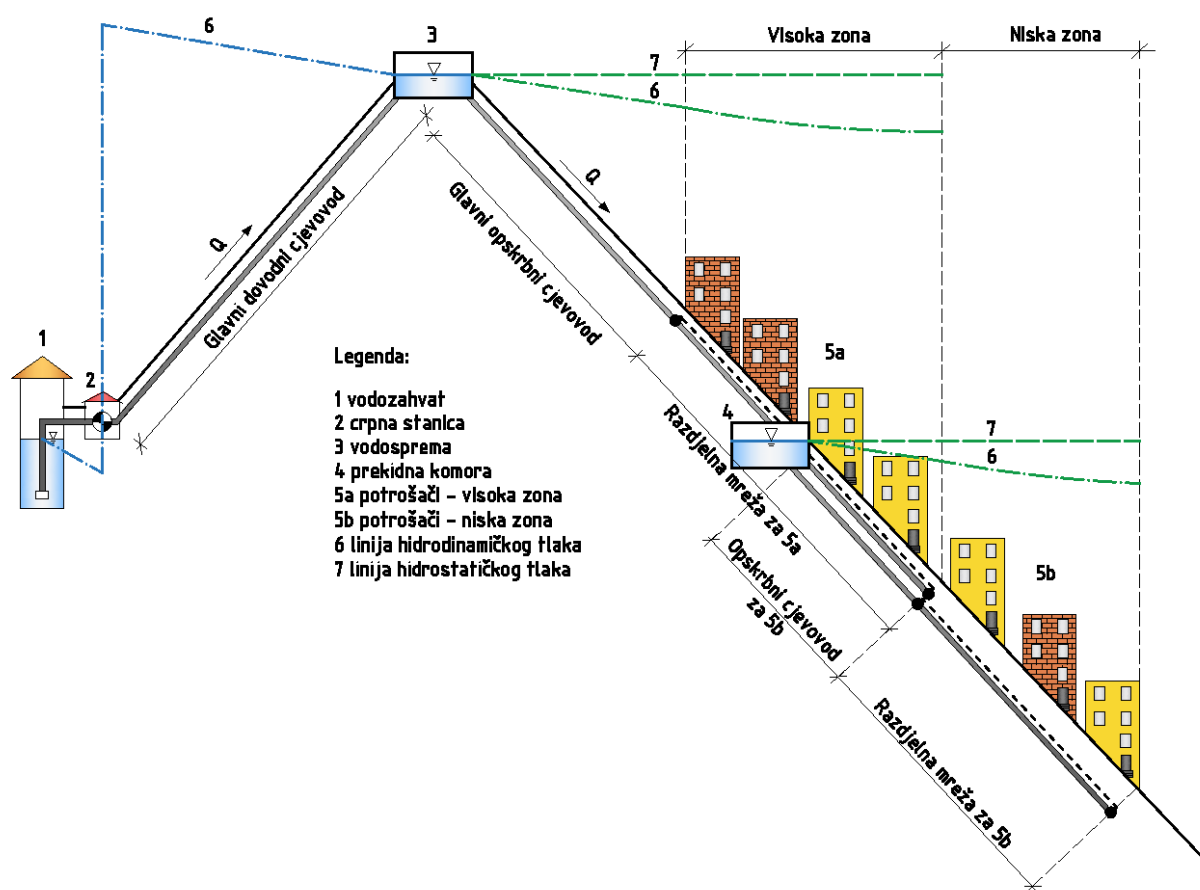


Slika 1.8 Zonirani kombinirani vodoopskrbni sustav s protuvodospremom

Na **Slikama 1.9 i 1.10** prikazana je shema kombiniranog indirektnog sustava. Izvorište je u ovakvim slučajevima odvojeno od naselja nekom vrstom prirodne prepreke. Ukoliko ta prepreka predstavlja područje s većom nadmorskom visinom, uobičajeno je tamo smjestiti vodospremu. Potisni dio sustava tada je onaj od izvorišta do vodospreme (dovodni cjevovod), a gravitacijski je onaj od vodospreme do potrošača (opskrbeni cjevovod).



Slika 1.9 Kombinirani indirektni vodoopskrbni sustav



Slika 1.10 Zonirani kombinirani indirektni vodoopskrbni sustav

Primjeri analize i proračuna različitih tipova vodoopskrbnih sustava provedeni su u poglavlju IV Raspodjela tlakova u naselju.

II

POTROŠNJA VODE

POJMOVI

JIVU	Javni isporučitelj vodnih usluga (pravna osoba ovlaštena za obavljanje javne službe vodoopskrbe i odvodnje – osnivači i vlasnici isporučitelja mogu biti isključivo jedinice lokalne samouprave)
JLS	Jedinica lokalne samouprave (općine i gradovi)
NUS	Nadzorno-upravljački sustav (koristi se za mjerenja i kontrolu protoka i tlakova na vodoopskrbnom sustavu)
DMA zona	Zona mjerenja i kontrole ulaznog/izlaznog protoka (podjela vodoopskrbnoga sustava na manje cjeline radi vršenja bolje kontrole potrošnje i gubitaka vode u mreži)
PMA zona	Regulacijska zona s mogućnošću mjerenja i kontrole ulaznog/izlaznog protoka i tlaka (podjela vodoopskrbnog sustava na manje cjeline radi vršenja bolje kontrole potrošnje i gubitaka vode u mreži te regulacije tlakova)
Analizirano područje	Područje za koje se definira potrebna potrošnja vode, provodi dimenzioniranje sustava, planira dogradnja sustava ili izgradnja dodatnih objekata (vodospreme, prekidne komore i sl.) – može obuhvaćati cijeli sustav javne vodoopskrbe ili se odnositi na pojedine JLS, naselja, ulice.

Uvod

Količina vode koju je potrebno osigurati na analiziranom području predstavlja glavnu ulaznu veličinu u analizi i definiranju vodoopskrbnog sustava i njegovih elemenata. Precizno određivanje potrebnih količina vode u trenutnom i budućem stanju (koje ovisi o projektnom periodu sustava) osnova je za optimalno dimenzioniranje i odabir svih tehničkih elemenata vodoopskrbnog sustava u vidu troškova izgradnje, pogona i održavanja.

Problemi kod neispravnog definiranja potreba za vodom mogu dovesti do:

- poddimenzioniranog sustava koji će imati problema s isporučivanjem potrebnih količina vode u vršnim trenucima potrošnje, nedostatne tlakove u mreži ili lošu raspodjelu tlakova u sustavu (uvjet minimalnog tlaka u hidrantskoj mreži 2,5 bara), nedostatne rezerve vode u vodospremama i sl.
- predimenzioniranog sustava što dovodi do povećanja troškova izgradnje (izgradnja cjevovoda velikih profila, izgradnja predimenzioniranih objekata i crpnih stanica) te do povećanja operativnih troškova (troškovi pogona i održavanja vodoopskrbnog sustava). Osim navedenog pojavljuje se i problem povećane opasnosti puknuća cjevovoda uslijed velikih tlakova u mreži, problem starosti vode u sustavu (produžavanjem perioda u kojem se voda zadržava u mreži dovodi do smanjenja kvalitete vode za piće) i sl.

Vodna bilanca

Ukupna količina vode koja se koristi na području jednog vodoopskrbnog sustava predstavlja zahvaćenu podzemnu vodu (podzemni izvori, zdenci i dr.) i/ili površinsku vodu (vodotok, akumulacija, jezero i dr.) te eventualno preuzetu vodu iz drugih vodoopskrbnih sustava. Kako bi se odredila ukupna potreba za vodom, potrebno je definirati sve vrste potrošača i gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu.

Potrošači:

- stanovništvo
- privreda (gospodarstvo)
- turizam (privremeni potrošači)
- mjerena količina vode za održavanje vodoopskrbnog sustava (ispiranje cjevovoda, filtra, membrana i dr.).

Gubitci vode:

- puknuća i curenja na cjevovodima
- prelijevanje iz rezervoara
- curenja na priključcima i elementima u sustavu
- neovlaštena potrošnja vode (krađa vode)
- netočnost vodomjera
- greška u obračunu.

Gubitci vode predstavljaju razliku između ukupne količine vode i isporučene vode. Dije se na prividne i stvarne gubitke, od kojih stvarni predstavljaju realne gubitke na mreži i, u pravilu, značajno su veći od prividnih koji se odnose na nepouzdanosti mjerenja u sustavu te neovlaštenu potrošnju.

Određivanje potrošnje vode

U ovom priručniku analiza potreba za vodom (potrošnja vode) bazirat će se na potrošnji stanovništva, privrede i ostalog (protupožarna rezerva, gubitci, održavanje vodoopskrbnog sustava).

Potreba za vodom na nekom području u direktnoj je vezi s brojem korisnika usluge:

- stanovništvo
- privreda
- povremeni potrošači (vikend naselja, turistički kompleksi i sl. sa značajnim oscilacijama potrošnje vode na razini godine/mjeseca/dana).

Analiziraju se:

- prijašnji obrasci i karakteristične količine potrošnje
- procjene kretanja broja stanovništva i turista (uzimaju se u obzir karakteristike naselja, urbanizacija i potencijal razvoja naselja)
- postojeći privredni subjekti i veća industrijskih postrojenja sa značajnom potrošnjom vode (specifični potrošači) te planirane industrijske zona i sl.

Potrošnja vode stanovništva uglavnom se svodi na osnovnu jedinicu *specifične potrošnje vode* stanovništva (litara/stanovnik/dan) koja je karakteristična za određeni dio vodoopskrbnog sustava (naselje, formirana regulacijska zona – DMA, ulica i dr.). Specifična potrošnja vode predstavlja važan podatak koji je značajan za definiranje ukupne potrebe za vodom stanovništva te puno govori o korisnicima sustava. Ova vrijednost na području Republike Hrvatske može značajno varirati te se očekivana vrijednost može kretati od 70 l/stanovniku/dan do 135 l/stanovniku/dan, a ovisi o karakteristikama promatranih naselja. Mala potrošnja uglavnom ukazuje na ruralan karakter naselja. U

ruralnim naseljima često se javlja pojava kombiniranog korištenja pitke vode iz vodoopskrbnog sustava s vodom iz privatnih zdenaca (zalijevanje vrtova, pranje i dr.). Veća potrošnja prisutna je uglavnom u većim gradovima i naseljima.

Potrošnja industrije se definira na temelju postojećih podataka o količini i raspodjeli potrošnje pojedinog potrošača te uskom suradnjom s JLS-om i investitorima za određivanje budućih planova na analiziranom području vodoopskrbnog sustava.

Potreba vode za protupožarnu zaštitu u vodoopskrbnom sustavu definirana je *Pravilnikom o hidrantskoj mreži za gašenje požara* (NN 008/2006). U sklopu *Pravilnika* definiran je minimalno potrebni tlak na izlazu iz bilo kojeg nadzemnog ili podzemnog hidranta vanjske hidrantske mreže koji iznosi 2,5 bara. Navedeni tlak u sklopu vanjske hidrantske mreže mora biti osiguran za protočnu količinu vode ne manju od 10 l/s. Vanjska hidrantska mreža za gašenje požara mora imati siguran izvor vode takvog kapaciteta da omogući opskrbu minimalno propisanom protočnom količinom vode (količina potrebna za zaštitu požarnog sektora s najvećim požarnim opterećenjem građevine koja se štiti, može biti i veća od 10 l/s), uz tlak na hidrantu koji nije manji od 2,5 bara u trajanju od najmanje 120 minuta.

Koeficijenti neravnomjernosti potrošnje vode

Nakon definiranja osnovnih parametara potrošnje (specifična potrošnja stanovništva, potrošnja industrije te ostale potrebe za vodom) potrebno je u obzir uzeti i koeficijente neravnomjernosti potrošnje vode na analiziranom području vodoopskrbnog sustava (mjesečni, dnevni i satni). Ako ne postoje dostupni podaci o potrošnji na temelju čije analize bi se koeficijenti točno odredili, koriste se iskustvene vrijednosti i/ili vrijednosti preuzete iz dostupne literature za navedene koeficijente (mjesečna, dnevna i satna neravnomjernost). Analiza postojećih podataka potrošnje vode na vodoopskrbnom sustavu ovisi o tipu dostupnih podataka i frekventnosti mjerenja. Najčešće se analizom potrošnje vode definiraju srednje godišnje, srednje mjesečne i srednje dnevne vrijednosti potrošnje. Neujednačenost potrošnje opisuje se koeficijentima neravnomjernosti.

Na **Slici 2.1** je prikazana potrošnja vode tijekom godine za jedan vodoopskrbni sustav. Sa slike je jasno vidljivo da potrošnja vode tijekom godine nije ujednačena. Srednja dnevna potrošnja vode $Q_{sr,dn}$, iskazana kao prosječna godišnja vrijednost, definirana je kao odnos ukupne godišnje potrošnje vode $Q_{godišnje}$ i broja dana u godini:

$$Q_{sr,dn} = \frac{Q_{godišnje}}{365 \text{ dana}}$$

Za primjer sa **Slike 2.1** srednja dnevna potrošnja tijekom godine $Q_{sr,dn}$ iznosi 32,5 tisuće m³.

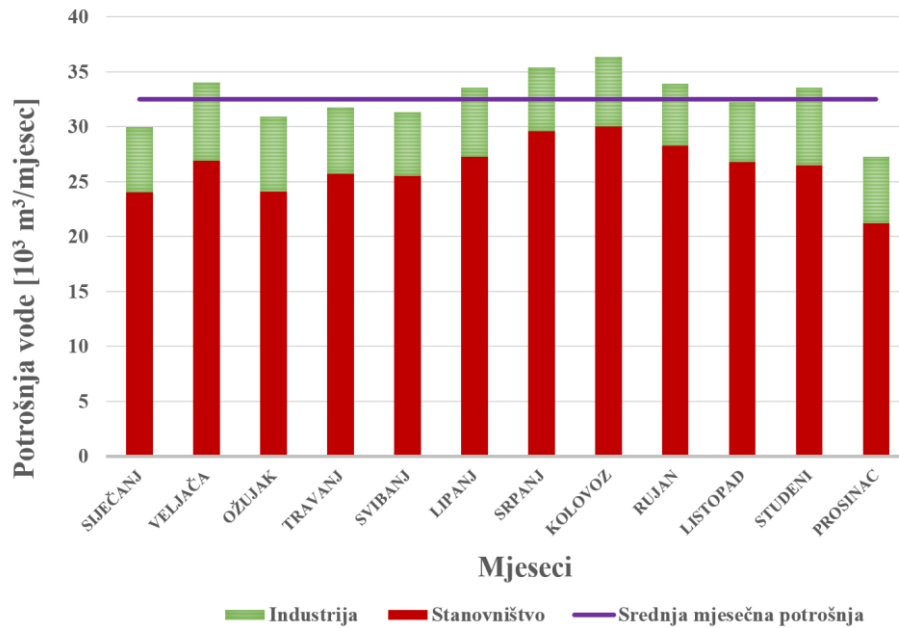
Sa **Slike 2.1** vidljivo je da je najveća potrošnja vode zabilježena u mjesecu kolovozu i iznosi 36 tisuća m³. U sklopu navedenih vrijednosti, prikazana je kumulativna mjesečna potrošnja stanovništva i industrije (ukupno fakturirana voda), što znači da gubiteci i količina vode za održavanje vodoopskrbnog sustava nisu uzimani u obzir u ovoj analizi. Iz godišnje i mjesečne analize potrošnje mogu se dobiti koeficijenti mjesečne neravnomjernosti:

$$k_{mj} = \frac{Q_{mj}}{Q_{sr,mj}}$$

gdje je k_{mj} koeficijent mjesečne neravnomjernosti u analiziranoj godini, Q_{mj} mjesečna potrošnja, $Q_{sr,mj}$ srednja mjesečna potrošnja $Q_{sr,mj} = \frac{Q_{godišnje}}{12 \text{ mjeseci}}$.

Maksimalni koeficijent mjesečne neravnomjernosti u ovom primjeru odnosi se na mjesec kolovoz i iznosi:

$$k_{\max, \text{mj}} = \frac{Q_{\max, \text{mj}} (\text{kolovoz})}{Q_{\text{sr}, \text{mj}}} = \frac{36\,000 \text{ m}^3}{32\,500 \text{ m}^3} = 1,107$$



Slika 2.1 Primjer analize godišnje potrošnje vode po mjesecima

S obzirom da je u mjesecu kolovozu zabilježena najveća potrošnja vode, taj će mjesec biti mjerodavan u daljnjoj analizi potrošnje. Na **Slici 2.2** prikazana je potrošnja vode u mjesecu kolovozu. Ako se ukupna mjesečna potrošnja Q_{mj} podijeli s brojem dana, dobit će se srednja dnevna potrošnja u promatranom mjesecu:

$$Q_{\text{sr}, \text{dn}, \text{mj}} = \frac{Q_{\text{mj}}}{\text{broj dana u mjesecu}} = \frac{36\,000 \text{ m}^3}{31} = 1161,3 \text{ m}^3$$

gdje je $Q_{\text{sr}, \text{dn}, \text{mj}}$ srednja dnevna potrošnja u promatranom mjesecu, Q_{mj} ukupna mjesečna potrošnja vode.

Neravnomjernost potrošnje u tijeku jednog mjeseca opisuje se koeficijentima dnevne neravnomjernosti. Ako se promatra mjesec s najvećom potrošnjom, onda se koeficijent dnevne neravnomjernosti za mjesec s najvećom potrošnjom definira kao:

$$k_{\text{dn}} = \frac{Q_{\text{dn}}}{Q_{\text{sr}, \text{dn}, \text{mj}}}$$

gdje je k_{dn} koeficijent dnevne neravnomjernosti za mjesec s najvećom potrošnjom, Q_{dn} dnevna potrošnja, $Q_{\text{sr}, \text{dn}, \text{mj}}$ srednja dnevna potrošnja.

U ovom primjeru najveća dnevna potrošnja vode zabilježena je 22. kolovoza i iznosi $Q_{\max, \text{dn}} = 1384 \text{ m}^3$. Prema tome, koeficijent dnevne neravnomjernosti za dan s najvećom potrošnjom iznosi:

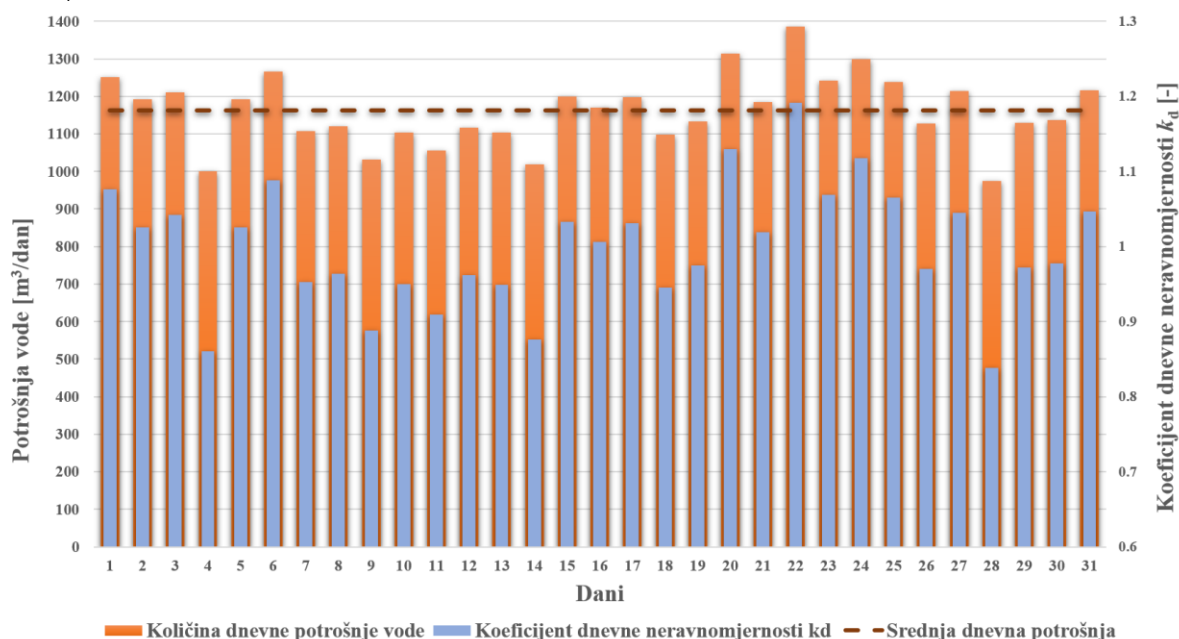
$$k_{\text{dn}} = \frac{Q_{\text{dn}}}{Q_{\text{sr}, \text{dn}, \text{mj}}} = \frac{1384 \text{ m}^3}{1161,3 \text{ m}^3} = 1,19$$

Umnožak koeficijenta mjesečne neravnomjernosti $k_{\max, \text{mj}}$ i koeficijenta dnevne neravnomjernosti za dan s najvećom potrošnjom k_{dn} daje koeficijent maksimalne dnevne neravnomjernosti $k_{\max, \text{dn}}$ u analiziranoj godini:

$$k_{\max, \text{dn}} = k_{\max, \text{mj}} \cdot k_{\text{dn}}$$

U ovom primjeru $k_{\max, \text{dn}}$ iznosi:

$$k_{\max, \text{dn}} = 1,107 \cdot 1,19 = 1,317$$



Slika 2.2 Primjer analize mjesečne potrošnje na temelju podataka o fakturiranoj vodi

Mjerodavna potrošnja vode za daljnju analizu je maksimalna dnevna potrošnja $Q_{\max, \text{dn}}$ i definira se kao:

$$Q_{\max, \text{dn}} = k_{\max, \text{dn}} \cdot Q_{\text{sr}, \text{dn}} = Q_{\max, \text{dn}, \text{potrošači}}$$

Važno je napomenuti da se vrijednost $Q_{\max, \text{dn}}$ odnosi samo na potrošače u naselju, ne i na protupožarnu količinu vode i gubitke vode u sustavu.

Izvorište, glavni dovodni cjevovod, crpne stanice (kojima se voda ne transportira prema krajnjim potrošačima), uređaj za kondicioniranje i vodosprema dimenzioniraju se na maksimalnu dnevnu (ukupnu) količinu vode $Q_{\max, \text{dn}, \text{uk}}$. Ta količina vode mora zadovoljiti maksimalne potrebne potrošača u vodoopskrbnom sustavu na razini dana, računajući i gubitke vode te protupožarnu rezervu. Prema tome, izraz za maksimalnu dnevnu količinu vode može se definirati kao:

$$Q_{\max, \text{dn}, \text{uk}} = Q_{\max, \text{dn}, \text{potrošači}} + Q_{\text{pož}} + Q_{\text{gubitci}}$$

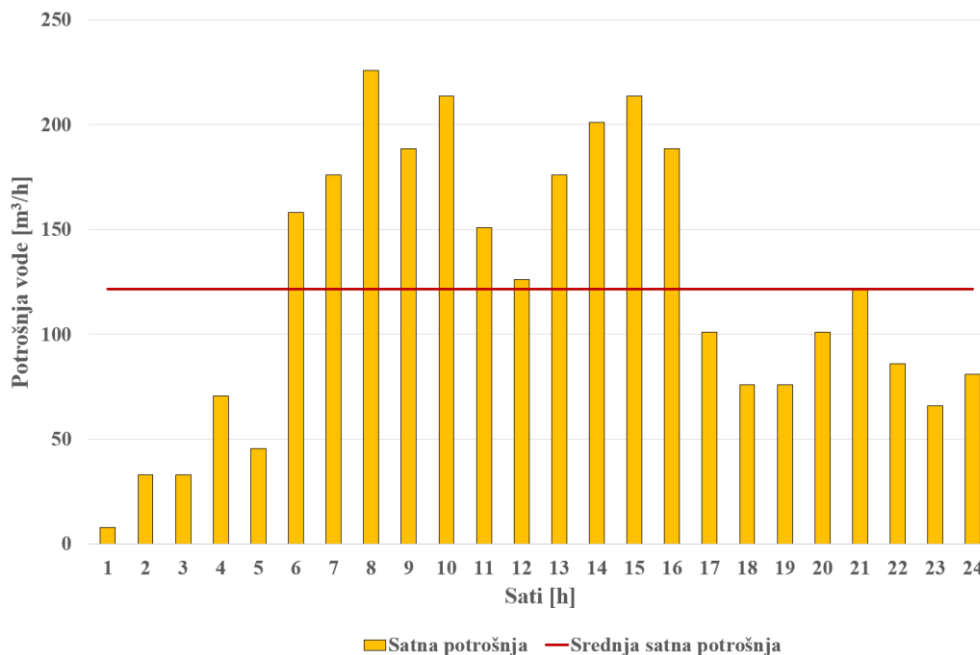
Ukoliko postoje dostupni podaci o dnevnoj potrošnji na analiziranom području moguće je provesti i analizu satne neravnomjernosti (Slika 2.3). Ukoliko se maksimalna dnevna potrošnja $Q_{\max, \text{dn}}$ podijeli s brojem sati potrošnje (24 h) dobit će se srednja satna potrošnja $[m^3/h]$, tj. srednja potrošnja u danu s najvećom potrošnjom:

$$Q_{\text{sr}, \text{h}} = \frac{Q_{\max, \text{dn}}}{24 \text{ h}}$$

Satna neravnomjernost potrošnje tijekom dana opisuje se koeficijentom satne neravnomjernosti:

$$k_h = \frac{Q_h}{Q_{\text{sr}, \text{h}}}$$

gdje je k_h koeficijent satne neravnomjernosti, Q_h satna potrošnja, $Q_{\text{sr}, \text{h}}$ srednja satna potrošnja.



Slika 2.3 Primjer analize dnevne potrošnje vode

Maksimalna satna potrošnja $Q_{\max,h}$ jednaka je umnošku srednje satne potrošnje u danu s maksimalnom potrošnjom $Q_{sr,h}$ i maksimalnog koeficijenta satne neravnomjernosti $k_{\max,h}$ i ta se količina izražava u m^3/h , m^3/s ili l/s :

$$Q_{\max,h} = k_{\max,h} \cdot \frac{Q_{\max,dn}[m^3/dan]}{24 h} = k_{\max,h} \cdot Q_{sr,h}$$

Maksimalna satna potrošnja mjerodavna je za dimenzioniranje glavnog opskrbnog cjevovoda, razdjelne mreže te crpnih stanica na mreži kojima se voda dovodi do krajnjih korisnika.

Praćenje i kontrola vode u vodoopskrbnom sustavu

U današnje je vrijeme praksa da se sve vrijednosti o zahvaćenoj vodi, potrošnji i gubitcima vode evidentiraju, stoga je najtočnije preuzeti i analizirati izmjerene podatke od nadležnog isporučitelja vodnih usluga. Kako bi se mogla utvrditi točnost i pouzdanost trendova potrošnje vode na temelju izmjerenih vrijednosti na vodoopskrbnom sustavu, potrebno je imati što duži niz mjerenih podataka (preporuča se koristiti niz mjerenja ne kraći od 5 godina). Danas se koriste GIS sustavi za prijenos geo-informacijskih podataka o vodoopskrbnom sustavu koji zajedno s NUS-om na terenu čini snažan alat za kvalitetno upravljanje vodoopskrbnim sustavom i brzu detekciju kvarova i krađe vode. Iz takvih podataka se mogu locirati i evidentirati puknuća i kvarovi na mreži, raspodjela potrošnje po DMA/PMA zonama i/ili priključcima, podaci o tlakovima u mreži i sl.

Takva baza podataka olakšava određivanje točnih podataka za dimenzioniranje mreže i objekata na sustavu u vidu rekonstrukcije i/ili dogradnje vodoopskrbne mreže. Temeljem izmjerenih vrijednosti daje se uvid u potrebe za budućim aktivnostima s ciljem optimizacije i racionalizacije vodoopskrbnog sustava s aspekta potrošnje vode kao resursa i potrošnje električne energije korištene za transport vode do krajnjih korisnika.

Zadatak 2.1 Određivanje srednje potrošnje vode stanovništva za definirani planski period

U naselju živi 55 tisuća stanovnika. Specifična potrošnja iznosi 135 l/stanovnik/dan uključujući i gubitke. Godišnji prirast stanovništva iznosi 2,2 %.

Odrediti potrošnju vode u naselju za period od 25 godina koristeći linearnu i eksponencijalnu metodu proračuna budućih potreba za vodom.

Rješenje:

Sadašnja prosječna potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{sr,0} = \frac{55000 \text{ stanovnika} \cdot 135 \text{ l/stanovnik/dan} \cdot 365 \text{ dana}}{1000} = 2\,710\,125 \text{ m}^3/\text{godina} = \mathbf{7425 \text{ m}^3/\text{dan}}$$

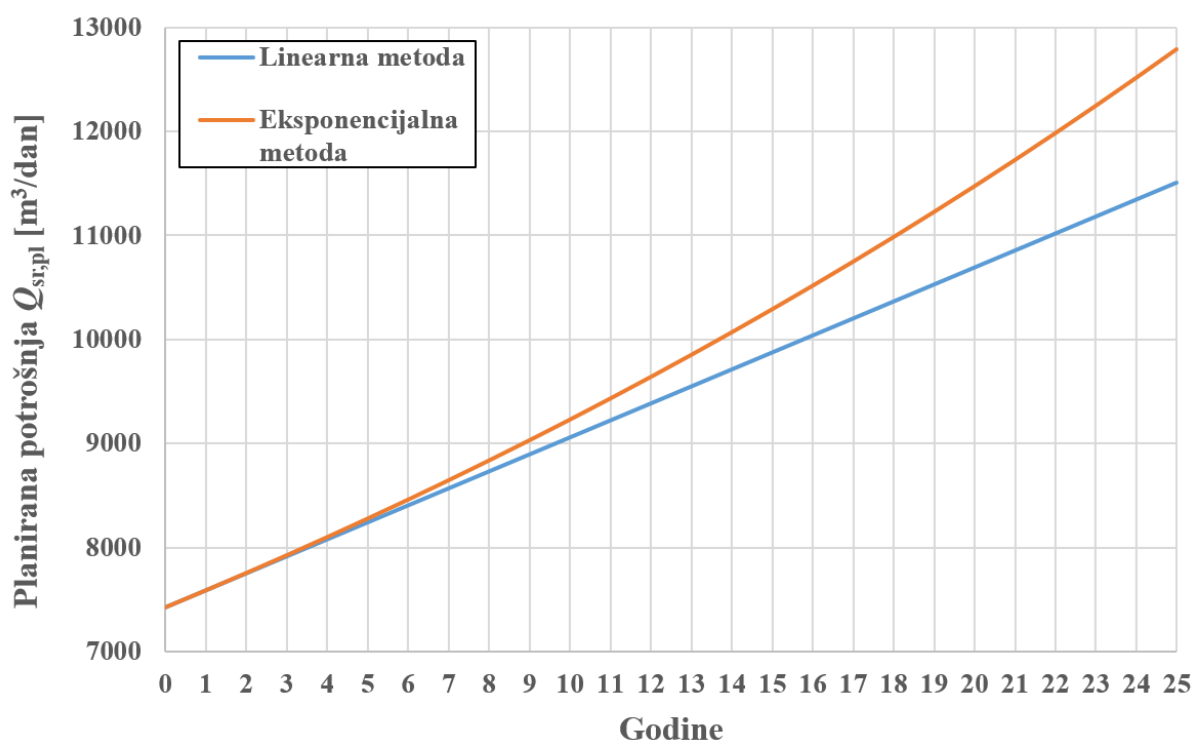
Planirana potrošnja određena linearnom metodom:

$$Q_{sr,pl} = Q_{sr,0} \left(1 + n \frac{p}{100}\right) = 7425 \text{ m}^3/\text{dan} \left(1 + 25 \frac{2,2}{100}\right) = \mathbf{11509 \text{ m}^3/\text{dan}} = 4\,200\,785 \text{ m}^3/\text{godina}$$

gdje je $Q_{sr,pl}$ prosječna potrošnja vode na kraju planskog razdoblja, $Q_{sr,0}$ početna potrošnja vode stanovništva, p postotak godišnjeg prirasta, n broj godina planskog razdoblja

Eksponencijalna metoda:

$$Q_{sr,pl} = Q_{sr,0} \left(1 + \frac{p}{100}\right)^n = 7425 \text{ m}^3/\text{dan} \left(1 + \frac{2,2}{100}\right)^{25} = \mathbf{12793 \text{ m}^3/\text{dan}} = 4\,669\,445 \text{ m}^3/\text{godina}$$



Slika 2.4 Trend promjene potrošnje u planskom razdoblju

Na kraju planskog razdoblja predviđa se porast potrošnje od 55 % (linearna metoda), tj. 72 % (eksponencijalna metoda) u odnosu na sadašnju potrošnju vode.

Zadatak 2.2 Određivanje specifične potrošnje vode po stanovniku

Za grad od 175 tisuća stanovnika potrebno je **odrediti specifičnu potrošnju vode po stanovniku** ako se zna da isporučitelj vodnih usluga godišnje isporučuje 10 milijuna m³ vode. Utvrđeno je da neprihodovana količina vode u vodovodnom sustavu iznosi 18 % ukupno isporučene vode. Također, u proračun uzeti u obzir i potrošnju vode za ostale potrebe (industrija, gašenje požara, rad i održavanje vodovodnog sustava) u iznosu od 800 tisuća m³/godina.

Rješenje:

$$Q_{\text{ukupno}} = 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{godina}$$

$$Q_{\text{stanovništvo}} = 10 \cdot 10^6 - (0,18 \cdot 10 \cdot 10^6) - 8 \cdot 10^5 = 7400 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{godina} = 20274 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Ova količina ujedno predstavlja i srednju dnevnu potrošnju vode od stanovnika.

$$q_{\text{sp}} = \frac{7400 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{godina}}{175 \cdot 1000 \cdot 365} = 116 \text{ l/stanovnik/dan}$$

Zadatak 2.3 Određivanje koeficijenta neravnomjernosti potrošnje u promatranom periodu

Za grad od 45 tisuća stanovnika specifična potrošnja iznosi 120 l/stanovnik/dan. Za vrijeme vrlo važne nogometne utakmice između Real Madrida i AC Milana registriran je protok od 104 l/s, što predstavlja povećanje od 35 % u odnosu na uobičajenu potrošnju u to doba dana.

Potrebno je odrediti koeficijent neravnomjernosti potrošnje u to doba dana u scenariju uobičajenih uvjeta (kada nema utakmice) i u promatranom scenariju kada se utakmica odigrava.

Rješenje:

Prosječna potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{\text{sr}} = \frac{45000 \cdot 120 \text{ l/stanovnik/dan}}{1000} = 5400 \text{ m}^3/\text{dan} = 62,5 \text{ l/s}$$

Uobičajeni protok za promatrano doba dana:

$$Q = \frac{104 \text{ l/s}}{1,35} = 77 \text{ l/s}$$

Koeficijent neravnomjernosti potrošnje za promatrano doba dana:

$$k = \frac{Q_{\text{h}}}{Q_{\text{sr}}} = \frac{104 \text{ l/s}}{62,5 \text{ l/s}} = 1,664 \text{ za vrijeme emitiranja nogometne utakmice}$$

$$k = \frac{Q_{\text{h}}}{Q_{\text{sr}}} = \frac{77 \text{ l/s}}{62,5 \text{ l/s}} = 1,232 \text{ u uobičajenim uvjetima}$$

Zadatak 2.4 Određivanje koeficijenta satne neravnomjernosti

Isporučitelj vodnih usluga isporučuje naselju 10,5 milijuna m³ vode godišnje u što su uključeni i gubici procijenjeni na 18 % od ukupne količine vode. U **Tablici 2.1** su prikazane vrijednosti potrošnje vode po satima u danu maksimalne potrošnje.

Potrebno je odrediti koeficijente satne neravnomjernosti.

Tablica 2.1 Isporučena voda u danu maksimalne potrošnje

Period [h]	Isporučena voda Q _{h,isp} [m ³ /h]	Period [h]	Isporučena voda Q _{h,isp} [m ³ /h]
0-1	650	12-13	1890
1-2	635	13-14	1750
2-3	580	14-15	1530
3-4	620	15-16	1250
4-5	850	16-17	1060
5-6	1250	17-18	1368
6-7	1890	18-19	1795
7-8	2105	19-20	2205
8-9	1850	20-21	2150
9-10	1995	21-22	1980
10-11	2120	22-23	1050
11-12	2320	23-24	920

Rješenje:

Prosječna godišnja isporučena količina vode u naselju iznosi:

$$Q_{sr,dn,isp} = \frac{10,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{365} = 28767 \text{ m}^3/\text{dan} = \mathbf{1199 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Iz **Tablice 1.1** moguće je odrediti vrijednost srednje isporučene vode u danu maksimalne potrošnje:

$$Q_{max,dn,isp} = \frac{650+635+580+620+\dots+920}{24} = \mathbf{1492 \text{ m}^3/\text{h}} = 35813 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Koeficijent maksimalne dnevne neravnomjernosti isporučene vode prema tome iznosi:

$$k_{max,dn,isp} = \frac{Q_{max,dn,isp}}{Q_{sr,dn,isp}} = \frac{1492 \text{ m}^3/\text{h}}{1199 \text{ m}^3/\text{h}} = \mathbf{1,244}$$

Procijenjeni godišnji gubitak vode iznosi 18 % od ukupno isporučene vode:

$$Q_{gubitak} = 0,18 \cdot 10,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 = 1,89 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Prema tome, prosječni dnevni i satni gubitak vode iznose:

$$Q_{gubitak} = 5178 \text{ m}^3/\text{dan} = \mathbf{216 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Koeficijent maksimalne dnevne neravnomjernosti potrošene vode prema tome iznosi:

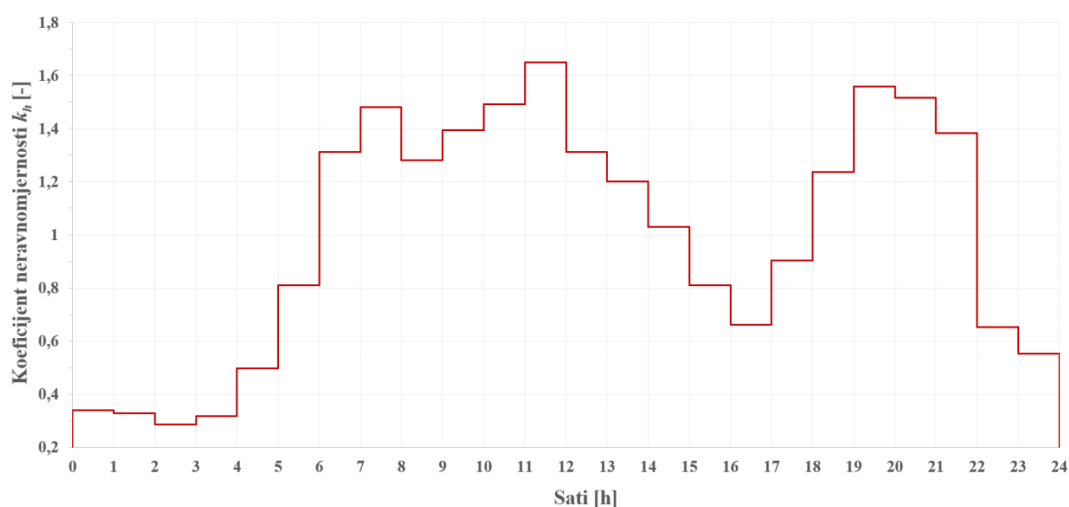
$$k_{max,dn} = \frac{Q_{max,dn}}{Q_{sr,dn}} = \frac{Q_{max,dn,isp} - Q_{gubitak}}{Q_{sr,dn,isp} - Q_{gubitak}} = \frac{35813 \text{ m}^3/\text{dan} - 5178 \text{ m}^3/\text{dan}}{28767 \text{ m}^3/\text{dan} - 5178 \text{ m}^3/\text{dan}} = \frac{30635 \text{ m}^3/\text{dan}}{23589 \text{ m}^3/\text{dan}} = \mathbf{1,298}$$

Uz poznatu vrijednost prosječnog gubitka vode od 216 m³/h moguće je korigirati stvarnu potrošnju stanovništva po satima $Q_h = Q_{h,isp} - Q_{gubitak}$ (**Tablica 2.2**). Tako određena srednja satna potrošnja u danu s maksimalnom potrošnjom iznosi **1276 m³/h** (vidi **Tablicu 2.2**). U **Tablici 2.2** određeni su koeficijenti satne neravnomjernosti za dan s maksimalnom potrošnjom. Koeficijent satne neravnomjernosti određen je na sljedeći način:

$$k_h = \frac{Q_h}{Q_{\max, \text{dn}}} = \frac{Q_h}{1276 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Tablica 2.2 Koeficijenti satne neravnomjernosti potrošnje k_h

Period [h]	Isporučena voda $Q_{h,isp}$ [m ³ /h]	Korigirana potrošnja Q_h [m ³ /h]	k_h
0-1	650	434	0,3402
1-2	635	419	0,3284
2-3	580	364	0,2854
3-4	620	404	0,3167
4-5	850	634	0,4969
5-6	1250	1034	0,8102
6-7	1890	1674	1,3116
7-8	2105	1889	1,4801
8-9	1850	1634	1,2803
9-10	1995	1779	1,3939
10-11	2120	1904	1,4918
11-12	2320	2104	1,6485
12-13	1890	1674	1,3116
13-14	1750	1534	1,2020
14-15	1530	1314	1,0296
15-16	1250	1034	0,8102
16-17	1060	844	0,6614
17-18	1368	1152	0,9027
18-19	1795	1579	1,2372
19-20	2205	1989	1,5584
20-21	2150	1934	1,5153
21-22	1980	1764	1,3821
22-23	1050	834	0,6536
23-24	920	704	0,5517
$Q_{\max, \text{dn}}$ [m ³ /dan]	35813	30635	
$Q_{\max, \text{dn}}$ [m ³ /h]	1492	1276	



Slika 2.5 Histogram koeficijenata neravnomjernosti k_h u toku dana

Iz **Tablice 2.2** vidljivo je da se maksimalna potrošnja vode javlja u periodu između 11 i 12 sati i iznosi 2104 m³/h. Na **Slici 2.5** prikazana je raspodjela koeficijenata satne neravnomjernosti. Maksimalni koeficijent satne neravnomjernosti iznosi $k_h = 1,649$ (period između 11 i 12 sati).

Zadatak 2.5 Određivanje mjerodavnih količina vode za dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava po pojedinim kategorijama potrošača

Za naselje sa 65 tisuća stanovnika, za plansko razdoblje od 25 godina, **potrebno je odrediti potrošnju vode po pojedinim kategorijama potrošača i mjerodavne količine vode za dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava.** Specifična potrošnja vode stanovništva za kućanske potrebe iznosi $q_{sp} = 130$ l/stanovnik/dan. Koeficijenti maksimalne dnevne i satne neravnomjernosti potrošnje vode za stanovništvo iznose $k_{max,dn} = k_{max,h} = 1,3$. U naselju se nalazi industrija čiji su zahtjevi za vodom prikazani u **Tablici 2.3**. Pretpostaviti da se maksimalna satna potrošnja industrije i stanovništva poklapa. Propisana količina vode za gašenje požara iznosi 15 l/s.

Tablica 2.3 Potrebne količine vode za industriju Q_{ind}

Vremensko razdoblje [h]	Q_{ind} [l/s]
0-6	10
6-12	15
12-18	25
18-24	20

Rješenje:

Stanovništvo:

Prosječna p potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{sr} = \frac{65\,000 \cdot 130 \text{ l/stanovnik/dan}}{1000} = 8450 \text{ m}^3/\text{dan} = 352 \text{ m}^3/\text{h}$$

Maksimalna dnevna potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{max,dn,st} = 8450 \text{ m}^3/\text{dan} \cdot 1,3 = 10985 \text{ m}^3/\text{dan} = 458 \text{ m}^3/\text{h}$$

Maksimalna satna potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{max,h,st} = \frac{Q_{max,dn} [\text{m}^3/\text{dan}]}{24} \cdot k_h = 458 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,3 = 595 \text{ m}^3/\text{h} = 165 \text{ l/s}$$

Industrija:

Prema režimu prikazanom u **Tablici 2.3** industrija zahtjeva različite količine vode tijekom dana. Režim potrošnje je podijeljen u 4 jednaka intervala trajanja 6 sati.

$$Q_{ind,0-6} = 10 \text{ l/s} = 36 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{ind,6-12} = 15 \text{ l/s} = 54 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{ind,12-18} = 25 \text{ l/s} = 90 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{ind,18-24} = 20 \text{ l/s} = 72 \text{ m}^3/\text{h}$$

Vidljivo je da maksimalna satna količina vode za industriju iznosi 25 l/s (u intervalu između 12h i 18h). Ukupna dnevna količina vode za industriju iznosi:

$$Q_{ind,dn} = 6 \text{ h} \cdot (36 + 54 + 90 + 72) = 1512 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Požar:

Protupožarna količina vode iznosi 15 l/s.

Ukupna maksimalna dnevna količina vode dobije se kao zbroj maksimalne dnevne potrošnje vode za stanovništvo i industriju:

$$Q_{\max, \text{dn}, \text{uk}} = Q_{\max, \text{dn}, \text{st}} + Q_{\text{ind}, \text{dn}} = 10985 \text{ m}^3/\text{dan} + 1512 \text{ m}^3/\text{dan} = 12497 \text{ m}^3/\text{dan} = 521 \text{ m}^3/\text{h}$$

Maksimalna dnevna količina vode osnova je za dimenzioniranje vodozahvata, crpnih stanica na vodozahvatu i dovodnom cjevovodu, uređaja za kondicioniranje vode, dovodnih cjevovoda (od izvorišta do vodospreme) i vodosprema.

Ukupna maksimalna satna količina vode dobije se kao zbroj maksimalne satne potrošnje vode od stanovništva, industrije te protupožarne količine vode:

$$Q_{\max, \text{h}, \text{uk}} = Q_{\max, \text{h}, \text{st}} + Q_{\text{ind}, \text{h}} + Q_{\text{pož}} = 165 \text{ l/s} + 25 \text{ l/s} + 15 \text{ l/s} = 205 \text{ l/s}$$

Maksimalna satna količina vode osnova je za dimenzioniranje glavnog opskrbnog cjevovoda, razdjelne mreže unutar naselja i crpnih stanica smještenih unutar razdjelne mreže.

Valja napomenuti da se u ovom primjeru maksimalna satna potrošnja od stanovništva i industrije vremenski poklapa. To ne mora biti pravilo, npr. turistička naselja u ljetnoj sezoni mogu imati maksimalnu satnu potrošnju od stanovništva u večernjim satima, a da tada industrija ne radi. U takvim slučajevima potrebno je napraviti satnu analizu potrošnje vode i odrediti maksimalnu vrijednost.

III

DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA

Hidrauličko dimenzioniranje cjevovoda

Hidrauličko dimenzioniranje cjevovoda vodoopskrbnog sustava odnosi se na određivanje promjera cjevovoda (unutarnjeg promjera) kojim će se voda distribuirati prema određenom objektu sustava ili krajnjem korisniku, tj. potrošaču. Promjer cjevovoda određuje se hidrauličkim proračunom strujanja pod tlakom ili sa slobodnim vodnim licem, uz pretpostavku stacionarnog strujanja promatranom dionicom. Hidraulički proračun strujanja sa slobodnim vodnim licem odnosi se na dovodne cjevovode (ili otvorene kanale) kojima se sirova voda dovodi do uređaja za kondicioniranje. Strujanje sa slobodnim vodnim licem moguće je i u slučaju dovoda čiste vode od uređaja za kondicioniranje do vodospreme ukoliko se radi o gravitacijskom dotoku. Iz vodospreme se prema potrošačima voda ne može distribuirati sa slobodnim vodnim licem zbog potrebe osiguranja opskrbnog tlaka u mreži. Hidraulički proračun strujanja pod tlakom najčešće se koristi za dimenzioniranje kompletnog cjevovoda u vodoopskrbnom sustavu (glavne dovodne i opskrbe cjevovode, razdjelnu mrežu).

Generalno, dimenzioniranje se vrši s obzirom na dva kriterija:

1. **Kriterij brzina** – brzina strujanja unutar cjevovoda bi trebala biti u granicama tzv. ekonomičkih brzina, između 0,8 i 2 m/s. Veće brzine od 2 m/s nisu poželjne zbog odnosa brzine strujanja i gubitka tlaka $\Delta p \sim v^2$. Gubitak tlaka je proporcionalan kvadratu brzine strujanja pa se pri većim brzinama strujanja znatno povećava i pad tlaka. Također, pri većim brzinama raste opasnost od abrazije unutar cjevovoda. Brzine manje od 0,8 m/s nisu poželjne zbog potencijalnog taloženja sitnih čestica na stijenke cijevi i opasnosti od smanjivanja protjecajnog (unutarnjeg) profila cjevovoda tijekom vremena. Dakle, hidrauličkim proračunom potrebno je odabrati profil cjevovoda kojim će mjerodavni protok protjecati brzinom između 0,8 i 2 m/s.
2. **Kriterij tlakova** – tlakovi u vodoopskrbnom cjevovodu trebaju biti u granicama minimalnih i maksimalnih dozvoljenih vrijednosti. Minimalni tlak treba biti takav da u vremenu maksimalne potrošnje osigura nesmetanu opskrbu vodom. Minimalni tlak u opskrbnom cjevovodu i razdjelnoj mreži treba iznositi 2,5 bara. Ta vrijednost propisana je *Pravilnikom o hidrantskoj mreži za gašenje požara*. Maksimalna dozvoljena vrijednost tlaka unutar opskrbe mreže ovisi o karakteristikama vodoopskrbnog sustava i obično iznosi od 6 do 8 bara (*Pravilnik* propisuje najvišu vrijednost tlaka i do 12 bara u određenim slučajevima). Cilj hidrauličkog dimenzioniranja je ostvariti optimalno stanje pri kojem će na rubnim dionicama vodoopskrbnog sustava tlak biti ne manji od 2,5 bara, uz ostvarenje što manjih tlakova na niskim zonama sustava (zone s očekivanim visokim tlakovima u sustavu). Ako se na određenim dionicama (npr. niske zone sustava) ne mogu izbjeći visoke vrijednosti tlaka (od 6 do 8 bara), onda se na tim dionicama mogu predvidjeti zasuni (armature) za reguliranje tlaka (vidi poglavlje **VI Armature, fazonski komadi i čvorišta**). Odnos gubitka tlaka i dimenzije cijevi je obrnuto proporcionalan, drugim riječima, za isti protok smanjenjem profila cijevi povećava se brzina strujanja, a samim time i gubitak tlaka na dionici. Preko vrijednosti tlakova unutar cjevovoda definiraju se sljedeće karakteristike cijevi: debljina stijenke, vanjski promjer, standardni dimenzijski omjer (SDR), minimalna potrebna čvrstoća (MRS), nazivni tlak.

U hidrauličkom dimenzioniranju cjevovoda i analizi strujanja vode kroz cjevovod koriste se dvije osnovne jednačbe (za nestišljivo, jednoliko strujanje) postavljene unutar kontrolnog volumena ili između dva kontrolna presjeka:

Jednačba očuvanja mase – jednačba kontinuiteta

$$Q = A \times v = \frac{D^2 \pi}{4} \times v$$

gdje je Q volumetrijski protok, v srednja brzina strujanja, D unutarnji profil cijevi.

Protok u gornjoj jednadžbi predstavlja mjerodavnu količinu za dimenzioniranje cjevovoda, jednaku ukupnom maksimalnom dnevnom protoku (uključuje potrošnju vode od stanovništva i privrede, vodne gubitke, vlastite potrebe isporučitelja vodnih usluga) ili maksimalnom satnom protoku (uključuje potrošnju vode od stanovništva i privrede, vodne gubitke, vlastite potrebe isporučitelja vodnih usluga, količine vode za gašenje požara).

Jednadžba očuvanja energije

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2}$$

gdje je z_i geodetska visina promatranog presjeka, $\frac{p_i}{\rho g}$ tlačna visina promatranog presjeka, $\frac{v_i^2}{2g}$ brzinska visina (kinetička energija) promatranog presjeka, Δh_{1-2} gubitak tlačne visine između promatranih presjeka.

Hidraulički gubitak Δh je direktna posljedica viskoznosti, odnosno posmičnog naprezanja koje se javlja između vode i stijenke cijevi duž toka. Hidraulički gubitak između dva promatrana presjeka u funkciji je srednje brzine strujanja v , dužine cijevi L , promjera cjevovoda D i viskoznosti vode μ . Iz razloga što su cjevovodi linijski objekti, lokalni se hidraulički gubici u hidrauličkom proračunu najčešće zanemaruju. Uz pojam hidrauličkog gubitka veže se i pojam hidrauličkog pada I . Hidraulički pad I definira se kao gubitak energije po duljini dionice:

$$I = \frac{\Delta h}{L}$$

Najčešće korištene jednadžbe za definiranje odnosa brzine v i hidrauličkog pada I su:

1. Darcy-Weisbachova jednadžba

2. Hazen-Williamsova jednadžba

3. Chezy-Manningova jednadžba

Svim navedenim jednadžbama je zajednički generalni oblik za proračun brzine strujanje:

$$v = k \cdot C \cdot R^x \cdot I^x$$

gdje je v srednja brzina strujanja, C koeficijent hrapavosti, R hidraulički radijus (za okrugle cijevi on iznosi $D/4$), I hidraulički pad (pad linije energije, kod ustaljenog strujanja, pad piezometaske i energetske linije je jednak), x eksponenti, k faktor koji uzima u obzir empirijski dobivene konstantne, konverzije mjernih veličina i dr.

Svim navedenim jednadžbama je zajednički generalni oblik za proračun hidrauličkog gubitka Δh prilikom tečenja kroz unutarnji profil cjevovoda:

$$\Delta h = C \cdot Q^B$$

gdje je Δh hidraulički gubitak, Q volumetrijski protok, C koeficijent hrapavosti, B eksponent protoka.

Darcy-Weisbachova jednadžba

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot R^{1/2} \cdot I^{1/2}$$

gdje je v brzina strujanja, λ koeficijent trenja, R hidraulički radijus, I hidraulički pad.

Koeficijent trenja λ je empirijski koeficijent kojim se opisuje gubitak tlaka uslijed strujanja vode kroz cjevovod. Njegova vrijednost ovisi o materijalu cijevi (relativnoj hrapavosti $\frac{k}{D}$) i Reynoldsovom broju. Koeficijent trenja λ se može odrediti uz pomoć Moodyjevog dijagrama (**Slika 3.1**). U uvjetima laminarnog strujanja ($Re < 2000$) gdje je posmično naprezanje neovisno o gustoći vode, viskoznost μ predstavlja jedino relevantno svojstvo. Prema tome, u uvjetima laminarnog strujanja, vrijednost koeficijenta trenja λ ne ovisi o relativnoj hrapavosti i može se odrediti na sljedeći način [2]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{\frac{\rho v D}{\mu}}$$

gdje je Re Reynoldsov broj, ρ gustoća vode, D unutarnji promjer cjevovoda, μ dinamički koeficijent viskoznosti.

Za cijeli nelinearni raspon unutar Moodyjevog dijagrama, tj. za turbulentni režim strujanja ($Re > 4000$), koeficijent trenja λ se može izračunati uz pomoć Colebrook-Whiteove jednačbe [3]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

gdje je k apsolutna hrapavost (označava se još i kao ε). Gornja jednačba je implicitna u ovisnosti od koeficijenta λ te se može riješiti iteracijskim postupkom.

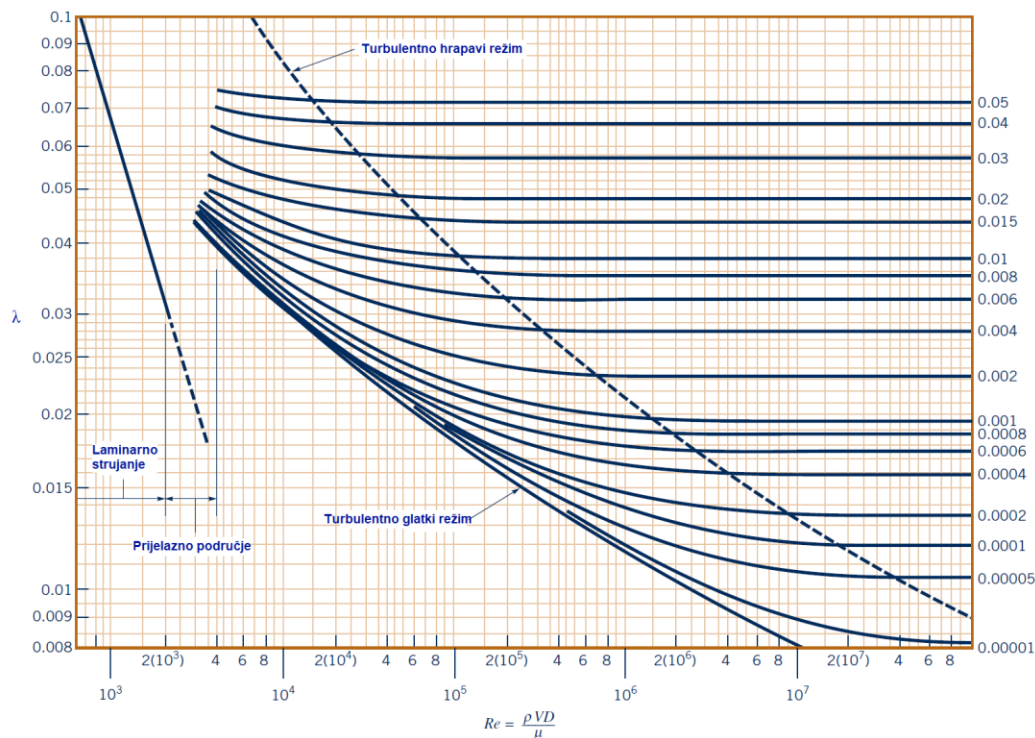
Uz pomoć eksplicitne aproksimacije Colebrook-Whiteove jednačbe moguće je jednostavnije odrediti vrijednost koeficijenta trenja λ . Najčešće korištena jest Swamee-Jain aproksimacija koja glasi [4]:

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2}$$

Hidraulički gubitak Δh se prema Darcy-Weisbachovoj jednačbi računa na sljedeći način [5]:

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{8L}{\pi^2 g D^5} Q^2 [m]$$

gdje je λ koeficijent trenja, L dužina dionice, D unutarnji promjer cjevovoda, v srednja brzina strujanja.



Slika 3.1 Moodyjev dijagram [5]

Hazen-Williamsova jednadžba

$$v = 0,849 \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot I^{0,54}$$

gdje je v brzina strujanja, C koeficijent hrapavosti, R hidraulički radijus, I hidraulički pad.

Prednost ove jednadžbe jest što koeficijent hrapavosti C ne ovisi o Reynoldsovom broju, a nedostatak je što nije primjenjiva niti za jedan drugi fluid osim za vodu. Koeficijent hrapavosti C je relativno konstantan za bilo koji tip cijevi. Veća hrapavost cijevi znači i manju vrijednost koeficijenta hrapavosti C (**Tablica 3.1**).

Gubitak energije Δh se prema Hazen-Williamsovoj jednadžbi računa na sljedeći način [6]:

$$\Delta h = \frac{10,67L}{D^{4,8704} C^{1,852}} Q^{1,852} [m]$$

gdje je C koeficijent hrapavosti, L dužina dionice, D unutarnji promjer cjevovoda, Q volumetrijski protok.

Chezy-Manningova jednadžba

Chezyeva jednadžba [5]:

$$v = C \cdot R^{1/2} \cdot I^{1/2}$$

gdje je v brzina strujanja, C Chezyev koeficijent hrapavosti, R hidraulički radijus, I hidraulički pad.

Chezy-Manningova jednadžba predstavlja proširenje Chezyeve jednadžbe i predstavlja empirijsku jednadžbu (nije bazirana na principima teorije fizike već je izvedena iz eksperimenata). Češće se koristi za analizu tečenja sa slobodnim vodnim licem nego za tečenje pod tlakom. Koristi se za opisivanje jednolikog strujanja vode, ne i drugih fluida. Teži ka dobroj aproksimaciji rezultata s Darcy-Weisbachovom jednadžbom pri strujanjima u područjima većih Reynoldsovih brojeva i veće hrapavosti (turbulentno hrapavi režim). Manning je iz eksperimenata uočio da je odnos brzine strujanja v i hidrauličkog radijusa R bliže $v \sim R^{2/3}$, nego $v \sim R^{1/2}$.

Chezy-Manningova jednadžba [5]:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

gdje je v brzina strujanja, n Manningov koeficijent hrapavosti, R hidraulički radijus, I hidraulički pad.

Odnos Chezyjevog koeficijenta hrapavosti i Manningovog koeficijenta hrapavosti je prema tome:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

Gubitak energije Δh se prema Chezy-Manningovoj jednadžbi računa na sljedeći način:

$$\Delta h = \frac{10,29Ln^2}{D^{16/3}} Q^2 [m]$$

U **Tablici 3.1** su dane okvirne vrijednosti koeficijenta hrapavosti ovisno o vrsti materijala cijevi [7]:

Tablica 3.1 Empirijske vrijednosti koeficijenta hrapavosti za nove cijevi

Materijal	Hazen-Williams C [-]	Darcy-Wisbach k (ε) [mm]	Chezy-Manning n [-]
Lijeivano željezo	130-140	0,1-0,4	0,012-0,015
Beton	120-140	0,3-3	0,012-0,017
Plastika	140-150	0,001-0,01	0,011-0,015
Čelik	140-150	0,04-0,05	0,015-0,017

Primjer

Izračunati linijski gubitak energije (uslijed trenja) tekućine koristeći Darcy-Weisbachovu, Hazen-Williamsovu i Manningovu jednadžbu. Tekućina protječe kroz cijev unutarnjeg promjera $D = 250$ mm, duljine $L = 550$ m. Protok iznosi 95 l/s. Pretpostaviti temperaturu vode od 12 °C, pogonska hrapavost $k (\varepsilon) = 0,4$ mm. Kod Manningove jednadžbe usvojiti koeficijent hrapavosti $n = 0,01 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, a kod Hazen-Williamsove koeficijent hrapavosti $C = 125$.

Rješenje:

Kinematički koeficijent viskoznosti je fizikalno svojstvo vode koje ovisi o temperaturi vode, T , a može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\nu = \frac{497 \cdot 10^{-6}}{(T + 42,5)^{1,5}} = 1,235 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Brzina vode u cjevovodu iznosi:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{0,25^2 \pi}{4}} = 1,94 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,94 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,235 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 392712,5$$

Budući da se radi o turbulentnom režimu tečenja koeficijent trenja λ može se izračunati na sljedeći način:

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,0227$$

Darcy-Weisbachova jednadžba:

$$\Delta h = \lambda \frac{8L}{\pi^2 g D^5} Q^2 = \mathbf{9,54 \text{ m}}$$

Manningova jednadžba:

$$\Delta h = \frac{10,29 L n^2}{D^{16/3}} Q^2 = \mathbf{8,3 \text{ m}}$$

Hazen-Williamsova jednadžba:

$$\Delta h = \frac{10,67 L}{D^{4,8704} C^{1,852}} Q^{1,852} = \mathbf{8,39 \text{ m}}$$

Napomena: S vremenom dolazi do narušavanja svojstava unutarnjih stijenci cijevi, a s obzirom da se cjevovod projektira za period od 30-ak godina, u kojem dolazi do narušavanja karakteristika (povećanja hrapavosti) u proračunu se koristi pogonska hrapavost, koja je veća od apsolutne (tvornički deklarirane). Iz tog se razloga vodovodne cijevi ne projektiraju u odnosu na apsolutnu hrapavost, već u odnosu na pogonsku hrapavost.

Dimenzioniranje razdjelne vodoopskrbne mreže

Dimenzioniranje razdjelne granate mreže

Mjerodavna veličina za dimenzioniranje dionica razdjelne mreže određuje se s obzirom na odnos maksimalne satne potrošnje naselja $Q_{\max,h}$ i protupožarnog protok $Q_{\text{pož}}$:

- kada je $Q_{\text{pož}} > Q_{\max,h,st}$ mjerodavna veličina bit će protupožarni protok $Q_{\text{pož}}$,
- kada je $Q_{\max,h} > Q_{\text{pož}}$ mjerodavna veličina bit će $Q_{\max,h}$.

U oba slučaju može se usvojiti zbroj $Q_{\text{pož}} + Q_{\max,h,st}$ kao mjerodavna veličina za dimenzioniranje razdjelne mreže. Takav način određivanja mjerodavnih protoka u praksi je prihvaćen jer je na strani sigurnosti.

Maksimalna satna potrošnja mjerodavna je za dimenzioniranje prvih, početnih dionica unutar naselja (u odnosu na vodospremu ili priključak na glavni opskrbni ili magistralni vod). Kako se duž naselja nalaze potrošači koji zahtijevaju i troše vodu, tako se i protok kroz cjevovod smanjuje kako napreduje prema nizvodnim dionicama mreže. Prema tome, najmanje vrijednosti protoka očekuju su na najnižvodnijim dionicama mreže.

Raspodjela potrošnje po dionicama razdjelne mreže može se odrediti na više načina. Najtočniji način bio bi poznavanje broja i vrste potrošača po svim dionicama mreže. Jednostavniji način predstavlja metoda linearnog uprosječivanja koja pretpostavlja ravnomjernu naseljenost stanovništva duž naselja.

U metodi linearnog uprosječivanja protok $Q_{\max,h,st}$ se linearno dijeli po cijeloj razdjelnoj mreži [1]:

$$q_{0,lin} = \frac{Q_{\max,h,st}}{\sum l_i} [l/s/m']$$

gdje je $q_{0,lin}$ specifični protok (protok po jedinici dužine mreže), $\sum l_i$ ukupna dužina razdjelne mreže.

Protok koji se troši na promatranoj dionici naziva se vlastiti protok, q_{vl} , i računa se kao:

$$q_{vl} = q_{0,lin} \cdot l_i$$

Protoci koji se troše na nizvodnim dionicama (od one promatrane) nazivaju se tranzitni protoci, q_{tr} :

$$q_{tr} = q_{0,lin} \cdot \sum l_{i,niz}$$

Važno je napomenuti da se uprosječuje samo potrošnja vode od stanovnika, dok se protupožarna količina vode i voda za industriju promatraju kao **tranzitni protoci** do mjesta potrošnje. Kod određivanja mjerodavnih protoka za dimenzioniranje cjevovoda razdjelne mreže potrebno je pretpostaviti mogućnost pojave požara na svim dijelovima pa tako i na najudaljenijim (najveći linijski gubitak tlaka) i najvišim dijelovima (najmanji statički tlak). Cjevovod treba biti takvog profila da u slučaju pojave požara brzine strujanja u cjevovodu ne budu prevelike i ne izazovu intenzivniji gubitak tlaka. Zbog toga je hidraulički proračun potrebno provesti za više slučajeva s obzirom na mjesto pojave požara, a kod većih gradova uvažiti i vjerojatnost istovremenog pojavljivanja više požara na različitim dionicama te u konačnici odabrati kritičan slučaj. Nakon određivanja mjerodavnih protoka na svim dionicama mreže pristupa se dimenzioniranju cjevovoda, određivanju gubitaka i vrijednosti tlaka u mreži.

Dimenzioniranje razdjelne prstenaste mreže

Postupak dimenzioniranja prstenaste mreže provodi se jednim od sljedećih postupaka: postupak ekvivalentnih cjevovoda, postupak presijecanja, Hardy-Crossov postupak proračuna. U praksi se najčešće koriste komercijalni računalni paketi poput EPANET-a u analizi i proračunu prstenastih mreža. U ovom priručniku metoda proračuna prstenaste mreže neće se dalje obrađivati.

Minimalan profil razdjelne mreže iznosi DN 90 zbog uvjeta priključenja hidranta (površinskog ili podzemnog) na mrežu, ali i zbog zadovoljenja kriterija brzina prilikom protjecanja protupožarnog protoka (minimalno 10 l/s). Paralelni vodovi ili manji priključni vodovi koji ne pripadaju hidrantskoj mreži mogu biti manjih profila (najčešće do DN 50).

Klasifikacija i nomenklatura cijevi

Prema materijalu od kojeg se izводе cijevi se dijele na lijevano-željezne, termoplastične, poliesterske, čelične, armiranobetonske, keramičke, betonske, armiranobetonske i azbest-cemente. Najčešće se koriste cijevi izrađene od termoplastičnog materijala i lijevanog željeza. U termoplastične cijevi spadaju cijevi od polietilena PE (PELD – eng. *Low Density PE*, PEHD – eng. *High Density PE*), tvrdog polivinil klorida PVC i polipropilena PP. Dvije vrste lijevano-željeznih cijevi najčešće se koriste u praksi, a to su cijevi od sivog lijeva i cijevi od nodularnog lijeva (tzv. duktilne cijevi). Međusobno se te dvije vrste razlikuju, osim po sastavu, po veličini vlačne čvrstoće koju posjeduju, a prema tome i radnom tlaku koji mogu podnijeti. Lijevano željezo kao materijal najčešću primjenu ima kod vodovodnih armatura i fazonskih komada (vidi poglavlje **VI Armature, fazonski komadi i čvorišta**). U funkciji su i koriste se i ostale vrste, npr. azbest-cementne cijev koje se više ne proizvode i tendencija je da se zamijene s lijevano-željeznim ili termoplastičnim cijevima.

Sve bitne karakteristike cijevi koje se koriste u vodoopskrbi definiraju se odgovarajućom normom (HRN EN). Detaljne karakteristike cijevi proizvođač prilaže u katalogima svojih proizvoda. Projektant vodoopskrbnog sustava u katalogima proizvođača može pronaći podatke o proizvodnom procesu, vrsti materijala od kojeg je cijev napravljena, normi (standardu) koju cijev zadovoljava, tehničkim karakteristikama kao što su dimenzije, masa, duljina cijevi, nazivni (nominalni) i radni tlak, SDR (standardni dimenzijski omjer – omjer vanjskog promjera i debljine stijenke cijevi) i MRD (minimalna potrebna čvrstoća). Proizvođač definira način transporta, skladištenja i ugradnje cijevi.

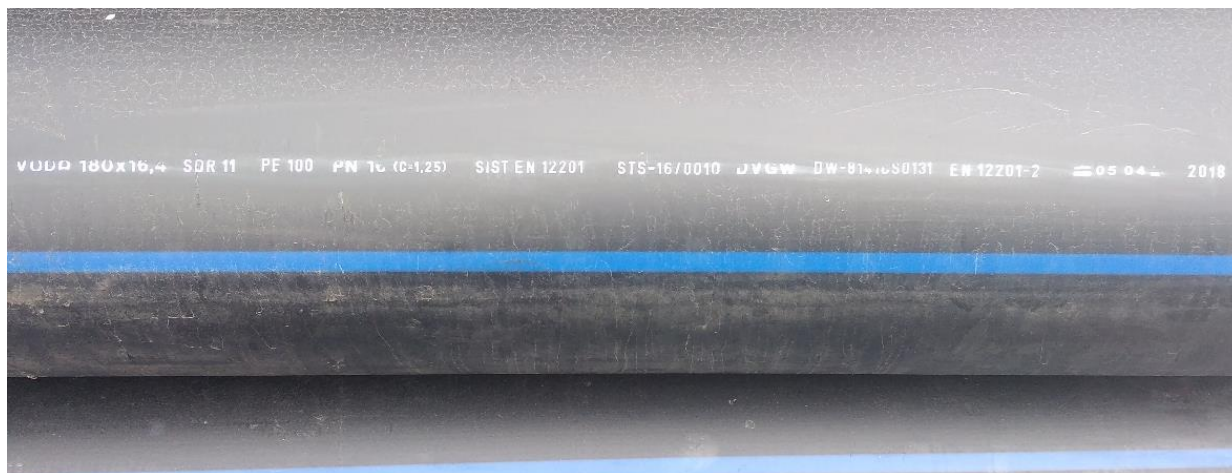
Nomenklatura cijevi sadrži podatak o normi po kojoj je izrađena, nazivu proizvođača, dimenzijama, nazivnom tlaku, SDR seriji, oznaci materijala (čvrstoći) i datumu proizvodnje. Na **Slikama 3.2, 3.3 i 3.4** dani su primjeri označavanja polietilenskih i lijevano-željeznih cijevi.

Slika 3.2: PEHD 90 × 5,4; SDR 17; PE 100; PN10, gdje PEHD predstavlja materijal cijevi, 90 × 5,4 vanjski promjer i debljina stijenke, SDR 17 standardni dimenzijski omjer, PE 100 minimalna potrebna čvrstoća 10 MPa, PN10 dopušteni radni tlak od 10 bara.



Slika 3.2 Primjer PE cijevi sa oznakama

Slika 3.3: Cijev za pitku vodu (*VODA*), vanjskog promjera 180 mm, debljine stijenke 16,4 mm, standardnog dimenzijskog omjera vanjskog promjera i debljine stijenke *SDR 11*, minimalne potrebne čvrstoće 10 MPa (*PE 100*), dopuštenog radnog tlaka 16 bara (*PN 16*), standarda proizvodnje i namjene cijevi (*EN 12201*), primjenjiva u transportu pitke vode (*DVGW*) s datumom proizvodnje 05. 04. 2018. godine.



Slika 3.3 Primjer PE cijevi s oznakama

Slika 3.4: Cijev od nodularnog lijeva (duktilne cijevi), vanjskog promjera 150 mm, standarda proizvodnje, zahtijeva i metode ispitivanja (*EN 12201, ISO 251*), klase *C40*.



Slika 3.4 Primjer duktilne cijevi s oznakama

U **Tablicama 3.2 i 3.3** dan je primjer kataloškog prikaza polietilenskih cijevi kakav se može naći u praksi. U **Tablicama 3.2 i 3.3** prikazani su dostupni profili cijevi (DN – nazivni promjeri) s vrijednostima debljine stijenke (*e*) za različite *SDR* vrijednosti. Vidljivo je da manja *SDR* vrijednost znači i deblju stijenku, drugim riječima, čvršća cijev je pogodnija za veće vrijednosti radnih tlakova. Profili iz **Tablica 3.2 i 3.3** međusobno se razlikuju prema *MRD* vrijednosti. **Tablica 3.2** odnosi se na *MRD*-a od 8 MPa (*PE 80*), a **Tablica 3.3** na vrijednost *MRD*-a od 10 MPa (*PE 100*). Vidljivo je da su za isti *SDR* broj cijevi *PE 100* pogodne za veće vrijednosti radnih tlakova u odnosu na *PE 80*. Obično se cijevi *PE 80* koriste za kućne priključke i razdjelnu mrežu, a cijevi *PE 100* za glavne dovodne i opskrbe cjevovode.

Tablica 3.2 Cijevi PE 80 – polietilen minimalne potrebne čvrstoće 8 MPA

DN	6 bar (SDR 21) e (mm)	8 bar (SDR 17) e (mm)	10 bar (SDR 13,6) e (mm)	12,5 bar (SDR 11) e (mm)	16 bar (SDR 9) e (mm)
90	4,3	5,4	6,7	8,2	10,1
110	5,3	6,6	8,1	10,0	12,3
125	6,0	7,4	9,2	11,4	14,0
140	6,7	8,3	10,3	12,7	15,7
160	7,7	9,5	11,8	14,6	17,9
180	8,6	10,7	13,3	16,4	20,1
200	9,6	11,9	14,7	18,2	22,4
225	10,8	13,4	16,6	20,5	25,2
250	11,9	14,8	18,4	22,7	27,9
280	13,4	16,6	20,6	25,4	
315	15,0	18,8	23,2	28,6	
355	16,9	21,1	26,1	32,2	
400	19,1	23,7	29,4	36,4	
450	21,5	26,7			

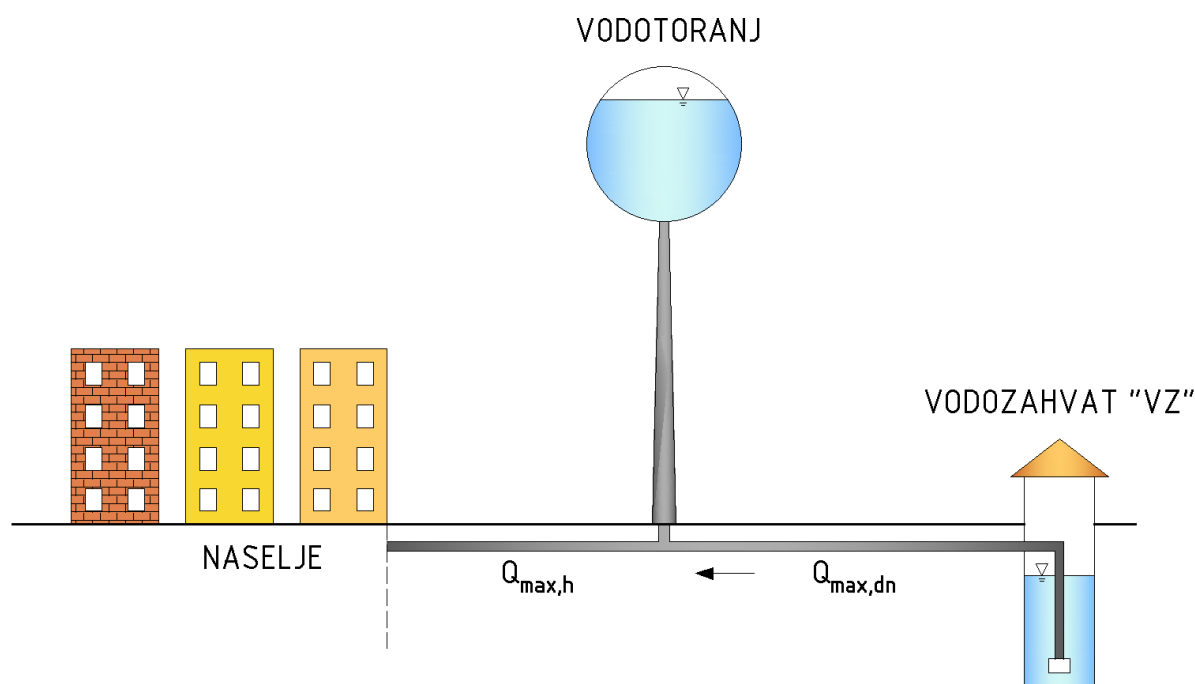
Tablica 3.3 Cijevi PE 100 – polietilen minimalne potrebne čvrstoće 10 MPA

DN	6 bar (SDR 26) e (mm)	8 bar (SDR 21) e (mm)	10 bar (SDR 17) e (mm)	12,5 bar (SDR 13,6) e (mm)	16 bar (SDR 11) e (mm)	20 bar (SDR 9) e (mm)
90	3,5	4,3	5,4	6,7	8,2	10,1
110	4,2	5,3	6,6	8,1	10,0	12,3
125	4,8	6,0	7,4	9,2	11,4	14,0
140	5,4	6,7	8,3	10,3	12,7	15,7
160	6,2	7,7	9,5	11,8	14,6	17,9
180	6,9	8,6	10,7	13,3	16,4	20,1
200	7,7	9,6	11,9	14,7	18,2	22,4
225	8,6	10,8	13,4	16,6	20,5	25,2
250	9,6	11,9	14,8	18,4	22,7	27,9
280	10,7	13,4	16,6	20,6	25,4	
315	12,1	15,0	18,8	23,2	28,6	
355	13,6	16,9	21,1	26,1	32,2	
400	15,3	19,1	23,7	29,4	36,4	
450	17,2	21,5	26,7			

Zadatak 3.1 Dimenzioniranje dovodnog i opskrbnog cjevovoda

Na **Slici 3.5** prikazana je shema kombiniranog vodoopskrbnog sustava. Crpka na vodozahvatu "VZ" radi 18 sati dnevno. Naselje broji 15 tisuća stanovnika sa specifičnom potrošnjom vode $q_{sp} = 130$ l/stanovnik/dan. U naselju se nalazi industrija koja zahtijeva 10 l/s tijekom cijelog dana. Usvojiti protupožarnu količinu vode od 20 l/s te koeficijente neravnomjernosti potrošnje stanovništva $k_{max,dn} = 1,5$ i $k_{max,h} = 2$.

Potrebno je dimenzionirati cjevovod od vodozahvata do naselja.



Slika 3.5 Shema vodoopskrbnog sustava

Rješenje:

Od vodozahvata do vodospreme (vodotornja) nema potrošača te je poželjno da protok kroz cjevovod, tj. protok crpljenja, bude konstantan tijekom radnog perioda crpke. Vodozahvat mora biti izdašnosti dovoljne da pokrije potrebe korisnika u danu najveće potrošnje. Dovodni cjevovod (od vodozahvata do vodotornja) potrebno je stoga dimenzionirati na $Q_{max,dn}$, a protok kroz cjevovod će osim o potrošnji naselja ovisiti i o režimu rada crpke.

Opskrbni cjevovod (od vodotornja do naselja) potrebno je dimenzionirati na maksimalnu satnu potrošnju $Q_{max,h}$. Protok kroz opskrbeni cjevovod ovisi o karakteru naselja, tj. režimu potrošnje vode u naselju. Kroz taj cjevovod mora proteći maksimum potrošnje ($Q_{max,h}$), brzinama koje neće izazvati velike gubitke tlaka, tzv. ekonomičnim brzinama. Preporučene vrijednosti brzine za dimenzioniranje vodoopskrbnih cjevovoda su između 0,8m/s i 2 m/s.

Mjerodavne količine vode za dimenzioniranje dovodnog i opskrbnog cjevovoda:

Stanovništvo:

$$Q_{sr} = \frac{15\,000 \cdot 130 \text{ l/stanovnik/dan}}{1000} = 1950 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{max,dn,st} = Q_{sr}[\text{m}^3/\text{dan}] \cdot k_{max,dn} = 1950 \text{ m}^3/\text{dan} \cdot 1,5 = 2925 \text{ m}^3/\text{dan} = 122 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{max,h,st} = Q_{max,dn,st}[\text{m}^3/\text{h}] \cdot k_{max,h} = 122 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2 = 244 \text{ m}^3/\text{h} = 68 \text{ l/s}$$

Industrija:

$$Q_{\text{ind,dn}} = 10 \text{ l/s} = 36 \text{ m}^3/\text{h} = 864 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Požar:

$$Q_{\text{požar}} = 20 \text{ l/s}$$

Ukupna maksimalna dnevna potrošnja vode:

$$Q_{\text{max,dn,uk}} = Q_{\text{max,dn,st}} + Q_{\text{ind,dn}} = 2925 \text{ m}^3/\text{dan} + 864 \text{ m}^3/\text{dan} = 3789 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Ukupna maksimalna satna potrošnja vode:

$$Q_{\text{max,h,uk}} = Q_{\text{max,h,st}} + Q_{\text{ind,h}} + Q_{\text{požar}} = 68 \text{ l/s} + 10 \text{ l/s} + 20 \text{ l/s} = 98 \text{ l/s}$$

Dimenzioniranje dovodnog i opskrbnog cjevovoda:

Dovodni cjevovod (od vodozahvata do vodotornja):

$$Q_{\text{mjerodavno}} = \frac{Q_{\text{max,dn,uk}}}{T_{\text{cr}}} = \frac{3789 \text{ m}^3/\text{dan}}{18 \text{ h}} = 210,5 \text{ m}^3/\text{h} = 58 \text{ l/s}$$

$$v_{\text{pretpostavljeno}} = 1,5 \text{ m/s}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{mjer.}}}{\pi \cdot v_{\text{pretp.}}}} = 0,22 \text{ m}$$

Usvojen je profil cjevovoda **DN 250 (e= 9,6 mm; DN ID 230,8; PE 100; SDR 26 – Tablica 3.3).**

$$v_{\text{stvarno}} = \frac{4 \cdot 0,058 \text{ m}^3/\text{s}}{(0,2308)^2 \cdot \pi} = 1,39 \text{ m/s}$$

Opskrbni cjevovod (od vodotornja do naselja):

$$Q_{\text{mjerodavno}} = Q_{\text{max,h,uk}} = 98 \text{ l/s}$$

$$v_{\text{pretpostavljeno}} = 1,5 \text{ m/s}$$

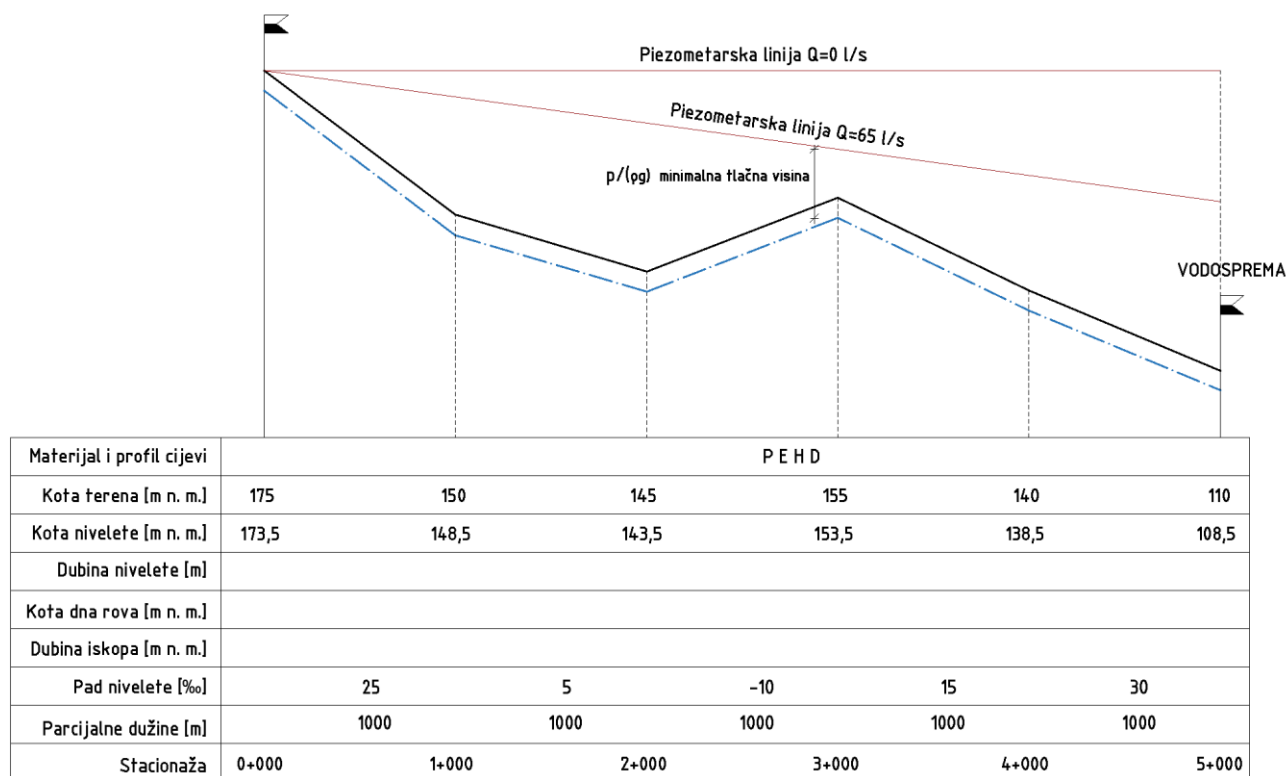
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{mjer.}}}{\pi \cdot v_{\text{pretp.}}}} = 0,29 \text{ m}$$

Usvojen je profil cjevovoda **DN 315 (e= 12,1 mm; DN ID 290,8; PE 100; SDR 26 – Tablica 3.3).**

$$v_{\text{stvarno}} = \frac{4 \cdot 0,098 \text{ m}^3/\text{s}}{(0,2908)^2 \cdot \pi} = 1,48 \text{ m/s}$$

Zadatak 3.2 Dimenzioniranje dovodnog cjevovoda uz poštivanje minimalno dozvoljenog tlaka

Na **Slici 3.6** prikazan je uzdužni profil terena između izvorišta i vodospreme. S obzirom na topografiju terena predviđen je gravitacijski dotok vode s izvorišta. **Potrebno je dimenzionirati dovodni cjevovod na protok od $Q_{\max, \text{dn}} = 65 \text{ l/s}$ uz uvjet da minimalna tlačna visina u cjevovodu iznosi 3 m.** Usvojiti pogonsku hrapavost cijevi $k(\epsilon) = 0,05 \text{ mm}$ i kinematički koeficijent hrapavosti $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Pretpostaviti da će se cijev polagati paralelno s terenom na cijeloj dužini dionice. Niveletu (os cijevi) postaviti na 1,5 m od kote terena. Podatke potrebne za proračun usvojiti sa **Slike 3.6**. Lokalne gubitke zanemariti.



Slika 3.6 Uzdužni presjek terena s naznačenom niveletom cijevi (plava isprekidana linija)

Rješenje:

S obzirom na topografiju terena vidljivo je da je stacionaža 3+000 kritična stacionaža/točka. Kritična točka je mjesto gdje postoji najveća opasnost od nedostatka potrebnog tlaka, bilo zbog velike udaljenosti točke od mjesta izvora, bilo zbog visinskog položaja (najmanji hidrostatski tlak). Kritična točka je najviša i/ili najudaljenija točka (od mjesta izvora) na cjevovodu. S obzirom na to, proračunat će se posebno dionica od izvora (0+000) do kritične točke (3+000), a potom i dionica od kritične točke (3+000) do vodospreme (5+000).

Minimalna tlačna visina u cjevovodu:

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\min} = 3 \text{ m}$$

Dionica od izvorišta (0+000) do kritične točke (3+000):

Minimalna dozvoljena piezometarska kota u kritičnoj točki (stacionaža 3+000):

$$\Pi_{K.T.} = z_{K.T.} + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\min} = 153,5 \text{ m n. m.} + 3 \text{ m} = 156,5 \text{ m n. m.}$$

Dozvoljeni gubitak tlaka od izvorišta (0+000) do kritične točke (3+000):

$$\Delta h_{\text{doz}} = \Pi_I - \Pi_{\text{K.T.}} = 175 \text{ m n. m.} - 156,5 \text{ m n. m.} = 18,5 \text{ m}$$

Potrebno je odabrati takav profil cjevovoda na kojem će prilikom protjecanja $Q_{\text{max,dn}} = 65 \text{ l/s}$ gubitci tlaka (linijski) biti manji od 18,5 m.

1. pretpostavka DN 200 (DN ID 200 mm)

$$v = \frac{4 \cdot 65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{(0,2 \text{ m})^2 \pi} = 2,07 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{2,07 \text{ m/s} \cdot 0,2 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 258750$$

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_1^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,0169$$

Gubitak tlaka na dionici od izvorišta (0+000) do kritične točke (3+000):

$$\Delta h_{\text{I-K.T.}} = 0,0169 \frac{3000}{0,2} \frac{2,07^2}{2g} = 55,36 \text{ m} > \Delta h_{\text{doz}}$$

2. pretpostavka DN 250 (DN ID 250 mm)

$$v = \frac{4 \cdot 65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{(0,25 \text{ m})^2 \pi} = 1,32 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,32 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 206250$$

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_1^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,017$$

Gubitak tlaka na dionici od izvorišta (0+000) do kritične točke (3+000):

$$\Delta h_{\text{I-K.T.}} = 0,017 \frac{3000}{0,25} \frac{1,32^2}{2g} = 18,12 \text{ m} < \Delta h_{\text{doz}}$$

Usvojen je profil cjevovoda **DN 250** na dionici od izvorišta (0+000) do kritične točke (3+000).

Dionica od kritične točke (3+000) do vodospreme (5+000):

Piezometarska kota u kritičnoj točki (stacionaža 3+000):

$$\pi_{\text{K.T.}} = z_I - \Delta h_{\text{I-K.T.}} = 175 \text{ m n. m.} - 18,12 \text{ m} = 156,88 \text{ m n. m.}$$

Minimalna dozvoljena piezometarska kota u kritičnoj točki (stacionaža 5+000):

$$\pi_V = z_{\text{K.T.}} + \left(\frac{p}{\rho g} \right)_{\text{min}} = 108,5 \text{ m n. m.} + 3 \text{ m} = 111,5 \text{ m n. m.}$$

Dozvoljeni gubitak tlaka od kritične točke (3+000) do vodospreme (5+000):

$$\Delta h_{\text{doz}} = \pi_{\text{K.T.}} - \pi_V = 156,88 \text{ m n. m.} - 111,5 \text{ m n. m.} = 45,38 \text{ m}$$

Potrebno je odabrati takav profil cjevovoda na kojem će prilikom protjecanja $Q_{\text{max,dn}} = 65 \text{ l/s}$ gubitci tlaka (linijski) biti manji od 45,38 m.

1. pretpostavka DN 200 (DN ID 200 mm)

$$v = \frac{4 \cdot 65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{(0,2\text{ m})^2 \pi} = 2,07 \text{ m/s}$$

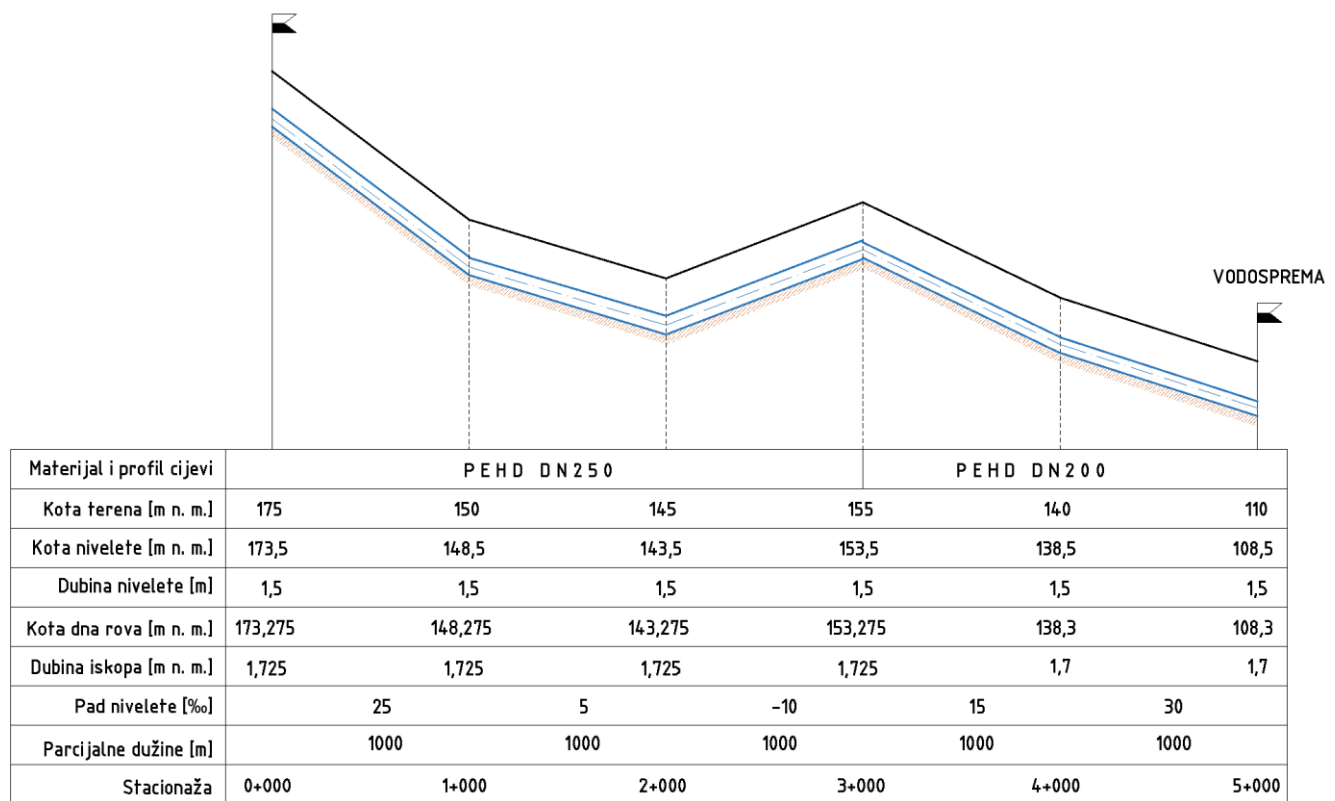
$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{2,07 \text{ m/s} \cdot 0,2 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 258750$$

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,0169$$

Gubitak tlaka na dionici od kritične točke (3+000) do vodospreme (5+000):

$$\Delta h_{I-K.T.} = 0,0169 \frac{2000}{0,2} \frac{2,07^2}{2g} = 36,9 \text{ m} < \Delta h_{doz}$$

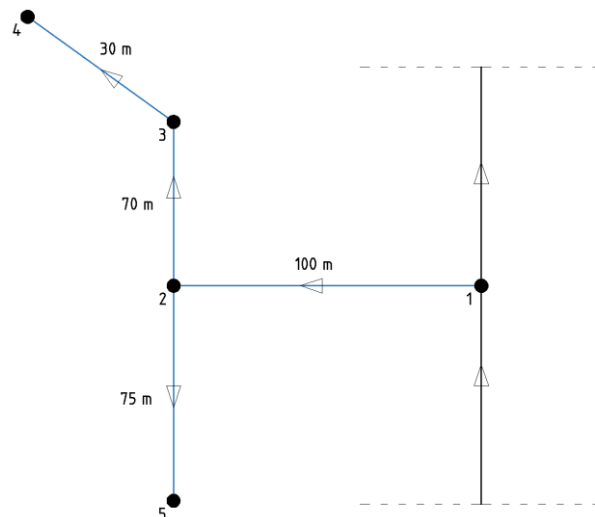
Usvojen je profil cjevovoda **DN 200** na dionici od kritične točke (3+000) do vodospreme (5+000).



Slika 3.7 Uzdužni presjek dovodnog cjevovoda

Zadatak 3.3 Dimenzioniranje granate mreže i određivanje tlaka u kritičnoj točki mreže

Potrebno je dimenzionirati granatu mrežu naselja (Slika 3.8) i odrediti vrijednost tlaka u kritičnoj točki mreže. Da bi se osigurala nesmetana opskrba vodom domaćinstava u naselju te zadovoljio protupožarni zahtjev, minimalan tlak u mreži mora iznositi 2,5 bara. Naselje ima 650 stanovnika sa specifičnom potrošnjom $q_{sp} = 120$ l/stanovnik/dan. Usvojiti koeficijente neravnomjernosti: $k_{max,dn} = 1,5$; $k_{max,h} = 2$. Tlak na priključku razdjelne mreže na magistralni, opskrbeni cjevovod (čvor 1) iznosi 4 bara. Potrošnja vode počinje od čvora 1. Nadmorske visine terena usvojiti prema **Tablici 3.4**. Usvojiti protupožarni protok od $Q_{poz} = 10$ l/s. Usvojiti pogonsku hrapavost cijevi $k(\epsilon) = 0,05$ mm i kinematički koeficijent hrapavosti $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s.



Slika 3.8 Shematski prikaz razdjelne mreže unutar naselja

Tablica 3.4 Nadmorske visine čvorova

Čvor	Nadmorska visina [m n.m.]
1	70
2	70
3	72
4	69
5	80

Rješenje:

Mjerodavni protoci za dimenzioniranje razdjelne mreže odredit će se postupkom linearnog uprosječivanja.

Potrošnja vode od stanovništva:

$$Q_{sr} = \frac{650 \cdot 120 \text{ l/stanovnik/dan}}{1000} = 78 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{max,dn,st} = 78 \text{ m}^3/\text{dan} \cdot 1,5 = 117 \text{ m}^3/\text{dan} = 4,875 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{max,h,st} = Q_{max,dn,st} [\text{m}^3/\text{h}] \cdot k_{max,h} = 4,875 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2 = 9,75 \text{ m}^3/\text{h} = 2,71 \text{ l/s}$$

Kako je $Q_{max,h,st} < Q_{poz}$, tako će se razdjelna mreža dimenzionirati na zbroj $Q_{max,h,st}$ i Q_{poz} .

Protoci za stanovništvo odredit će se metodom linearnog uprosječivanja:

$$q_{0,lin} = \frac{2,71 \text{ l/s}}{275 \text{ m}} = 0,00985 \text{ l/s/m'}$$

Raspodjela protoka po dionicama prikazana je u **Tablici 3.5**.

Tablica 3.5 Proračun mjerodavnih protoka za dimenzioniranje

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Specifični protok $q_{o,lin}$ [l/s/m']	Vlastiti protok q_{vl} [l/s]	Tranzitni protok q_{tr} [l/s]	Protok za stanovništvo Q_{st} [l/s]	Protupožarni protok Q_{poz} [l/s]	Mjerodavan protok $Q_{mjer.}$ [l/s]
1-2	100	0,00985	0,98	1,72	2,7	10	12,7
2-3	70		0,69	0,3	0,99	10	10,99
3-4	30		0,3	/	0,3	10	10,3
2-5	75		0,74	/	0,74	10	10,74

Dimenzioniranje cijevi razdjelne mreže i proračun linijskih gubitaka prikazan je u **Tablici 3.6**. U proračunu su korišteni podaci o profilima cijevi iz **Tablice 3.2 (PE 80, SDR 17)**.

Tablica 3.6 Dimenzioniranje cijevi i proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{mjer.}$ [l/s]	DN [mm]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Reynoldsov broj Re [-]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
1-2	100	12,71	110	96,8	1,73	104665	0,0203	3,20
2-3	70	10,99	110	96,8	1,5	90750	0,0207	1,72
3-4	30	10,3	110	96,8	1,4	84700	0,0209	0,65
2-5	75	10,74	110	96,8	1,46	88330	0,0207	1,74

Kritična točka s aspekta pojave požara je najviša i/ili najudaljenija točka na mreži. Iz **Slike 3.8** i **Tablice 3.4** vidljivo je da je najudaljenija točka Čvor 4, a najviša točka Čvor 5, stoga će se provjeriti vrijednost tlaka u obje točke:

Jednadžba očuvanja energije između čvorova 1 i 4:

$$p_{4,din} = \rho g \left[\left(z + \frac{p}{\rho g} \right)_1 - z_4 - \sum \Delta h_{1-4} \right]$$

$$\sum \Delta h_{1-4} = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-3} + \Delta h_{3-4}$$

Jednadžba očuvanja energije između čvorova 1 i 5:

$$p_{5,din} = \rho g \left[\left(z + \frac{p}{\rho g} \right)_1 - z_5 - \sum \Delta h_{1-5} \right]$$

$$\sum \Delta h_{1-5} = \Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-5}$$

Vrijednosti hidrostatskog i hidrodinamičkog tlaka po čvorovima prikazane su u **Tablici 3.7**.

Tablica 3.7 Vrijednosti tlakova po čvorovima

Čvor	Hidrostatski tlak $p_{i,st}$ [bar]	Hidrodinamički tlak $p_{i,din}$ [bar]
1	-	4
2	4	3,68
3	3,8	3,32
4	4,1	3,55
5	3,02	2,53

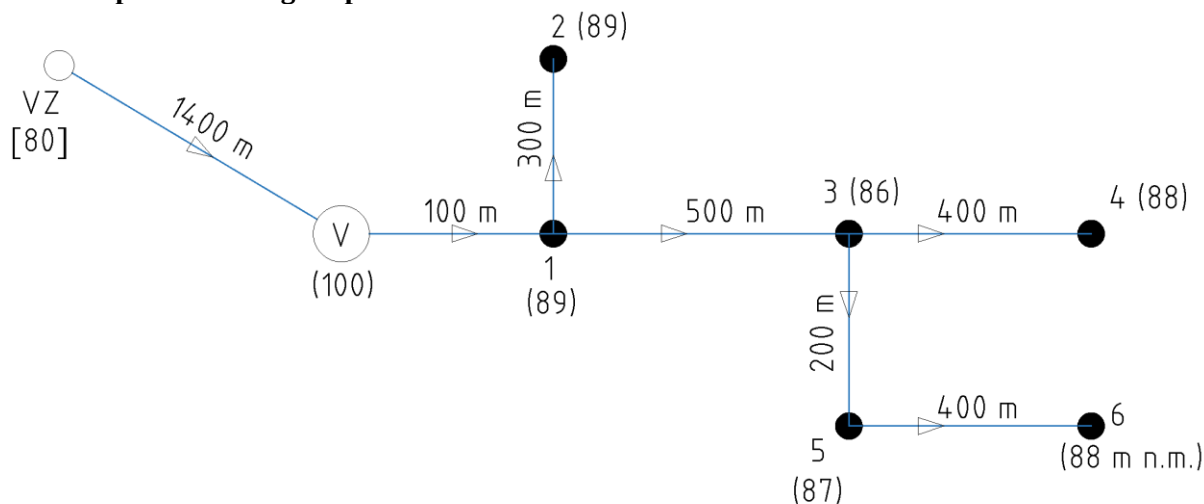
Prema rezultatima iz **Tablice 3.7** vidljivo je da je kritična točka Čvor 5. U slučaju maksimalnog očekivanog protoka ($Q_{poz} + Q_{max,h,st}$) tlak u mreži zadovoljit će protupožarni zahtjev od minimalno 2,5 bara. U slučaju normalnih uvjeta kada će kroz cjevovod protjecati samo protok za stanovništvo, brzine tečenja u cijevima bit će manje, kao i linijski gubici tlaka, dok će vrijednosti dinamičkog tlaka biti veće.

Zadatak 3.4 Dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava uz određivanje minimalne razine vode u vodospremi i snage crpke na vodozahvatu

Na **Slici 3.9** prikazana je shema vodoopskrbnog sustava. Voda se s vodozahvata „VZ“ upućuje prema vodospremi „V“ (vodotornju) odakle se gravitacijski distribuira po razdjelnoj mreži. Naselje broji 8 tisuća stanovnika sa specifičnom potrošnjom od $q_{sp} = 130$ l/stanovnik/dan i koeficijentima neravnomjernosti $k_{max,dn} = 1,8$ i $k_{max,h} = 2,3$. U čvoru 6 nalazi se tvornica koja zahtijeva 10 l/s vode u razdoblju između 8 i 22 sata. Protupožarni protok iznosi $Q_{poz} = 15$ l/s. Crpka na vodozahvatu radi 16 h u periodu od 21 h do 13 h. Usvojiti koeficijent korisnog djelovanja crpke $\eta = 0,75$. Podzemna voda se crpi s kote od 80 m n.m. Potrošnja vode počinje od čvora 1. Sve cijevi su od polietilena visoke gustoće (PEHD). Usvojiti koeficijent trenja $\lambda = 0.018$. U zgradama su na **Slici 3.9** napisane nadmorske visine čvorova. Na mjestu vodotornja „V“, nadmorska visina od 100 m n.m. predstavlja kotu terena.

Potrebno je:

- odrediti najnižu razinu vode u vodotornju h_v koja će osigurati tlak minimalno 2,5 bara u kritičnoj točki naselja
- dimenzionirati dovodni cjevovod od vodozahvata („VZ“) do vodotornja („V“)
- odrediti potrebnu snagu crpke na vodozahvatu.



Slika 3.9 Shema vodoopskrbnog sustava

Rješenje

a) najniža razina vode u vodotornju h_v

Kako bi se odredila razina vode u vodotornju koja će osigurati vrijednost tlaka u mreži od minimalno 2,5 bara, potrebno je za početak odrediti mjerodavne veličine za dimenzioniranje opskrbnog cjevovoda i razdjelne mreže. Nakon dimenzioniranja potrebno je odrediti gubitak tlaka do kritične točke vodoopskrbnog sustava. Visina vodotornja mora biti takva da zadovolji uvjet minimalnog tlaka u mreži i nadomjesti gubitke tlaka uslijed tečenja vode. Najmanju razinu vode u vodotornju vezati uz maksimalnu satnu potrošnju u naselju. Nakon određivanja potrebne visine vodospreme moguće je odrediti snagu crpke na vodozahvatu koja će distribuirati vodu do vodospreme.

Mjerodavne količine vode za dimenzioniranje dovodnog i opskrbnog cjevovoda:

Stanovništvo:

$$Q_{sr} = \frac{8\,000 \cdot 130 \text{ l/stanovnik/dan}}{1000} = 1040 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{\max, \text{dn}, \text{st}} = 1040 \text{ m}^3/\text{dan} \cdot 1,8 = 1872 \text{ m}^3/\text{dan} = 78 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\max, \text{h}, \text{st}} = Q_{\max, \text{dn}, \text{st}} [\text{m}^3/\text{h}] \cdot k_{\max, \text{h}} = 78 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2,3 = 179 \text{ m}^3/\text{h} = 50 \text{ l/s}$$

Industrija:

$$Q_{\text{ind}, \text{dn}} = 10 \text{ l/s} = 36 \text{ m}^3/\text{h} = 36 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 14 \text{ h} = 504 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Požar:

$$Q_{\text{požar}} = 15 \text{ l/s}$$

Ukupna maksimalna dnevna potrošnja vode:

$$Q_{\max, \text{dn}, \text{uk}} = Q_{\max, \text{dn}, \text{st}} + Q_{\text{ind}, \text{dn}} = 1872 \text{ m}^3/\text{dan} + 504 \text{ m}^3/\text{dan} = 2376 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Ukupna maksimalna satna potrošnja vode:

$$Q_{\max, \text{h}, \text{uk}} = Q_{\max, \text{h}, \text{st}} + Q_{\text{ind}, \text{h}} + Q_{\text{požar}} = 50 \text{ l/s} + 10 \text{ l/s} + 15 \text{ l/s} = 75 \text{ l/s}$$

Budući da je $Q_{\max, \text{h}, \text{st}} > Q_{\text{pož}}$, kod određivanja mjerodavnog protoka za dimenzioniranje izostavit će se protupožarna količina vode (ne bi bilo netočno da se za mjerodavan protok usvoji zbroj $Q_{\max, \text{h}, \text{st}}$ i $Q_{\text{pož}}$, naprotiv, bili bi na strani sigurnosti). Samo na dionicama gdje je potrošnja od stanovništva (i industrije) manja od protupožarne količine vode, mjerodavan protok za dimenzioniranje bit će protupožarni (vidi dionicu 1-2 u **Tablici 3.8**).

Specifičan protok po jedinici duljine razdjelne mreže (od čvora gdje počinje potrošnja) iznosi:

$$q_{0, \text{lin}} = \frac{50 \text{ l/s}}{1800 \text{ m}} = 0,028 \text{ l/s/m'}$$

Proračun mjerodavnih veličina za dimenzioniranje provedeni su u **Tablici 3.8**, a dimenzioniranje i proračun linijskih gubitaka tlaka prikazani su u **Tablici 3.9**. U proračunu su korišteni podaci o profilima cijevi iz **Tablice 3.3 (PE 100, SDR 21)**.

Tablica 3.8 Proračun mjerodavnih protoka za dimenzioniranje

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Specifični protok $q_{0, \text{lin}}$ [l/s/m']	Stanovništvo			Tranzitni potrošači		Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]
			q_v [l/s]	q_{tr} [l/s]	Q_{st} [l/s]	Industrija Q_{ind} [l/s]	Protupožarni protok $Q_{\text{pož}}$ [l/s]	
V-1	100	0,028	-	-	50	10	-	60
1-2	300		8,4	-	8,4	-	15	15
1-3	500		14	28	42	10	-	52
3-4	400		11,2	-	11,2	-	15	15
3-5	200		5,6	11,2	16,8	10	-	27
5-6	400		11,2	-	11,2	10	-	21

Prema rezultatima iz **Tablice 3.8** vidljivo je da na dionicama 1-2 i 3-4 potrebe za vodom stanovništva nisu veće od protupožarnog zahtjeva te će se ta dionica dimenzionirati na $Q_{\text{pož}}$.

Tablica 3.9 Dimenzioniranje cijevi i proračun linijskih gubitaka po dionicama

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{mjer.}$ [l/s]	DN [mm]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
V-1	100	60	280	253,2	1,19	0,018	0,51
1-2	300	15	140	126,6	1,19	0,018	3,08
1-3	500	52	280	253,2	1,03	0,018	1,92
3-4	400	15	140	126,6	1,19	0,018	4,11
3-5	200	27	200	180,8	1,05	0,018	1,12
5-6	400	21	160	144,6	1,28	0,018	4,16

Prema rezultatima iz **Tablice 3.9** vidljivo je da su linijski gubitci tlaka najveći do čvora 6. Čvor 6 tako predstavlja kritičnu točku sustava i s obzirom na nju odredit će se visina vode u vodotoranju. Važno je skrenuti pozornost na to da su gubitci tlaka po dionicama proračunati s pretpostavkom konstantnog protoka kroz dionicu. To naravno nije slučaj te se vrijednost mjerodavnog protoka smanjuje kako napreduje prema kraju dionice, a ovisno o rasporedu potrošača (kućnih priključaka) duž dionice. Ovakav proračun neizbježno daje veće vrijednosti pada tlaka i na strani je sigurnosti. Za potrebe realnije analize raspodjele tlakova duž mreže uvodi se pojam ekvivalentnog protoka Q_{ekv} i on će se obraditi u kasnijim primjerima.

Minimalna visina vode u vodotoranju dobivena je *Jednadžbom očuvanja energije* postavljenom između presjeka vodotoranja („V“) i Čvora 6 (kritična točka):

$$z_V + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_V = z_6 + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\min} + \sum \Delta h_{V-6}$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_V = \text{visina vode u vodotoranju} = h_V$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\min} = 25 \text{ m}$$

$$\sum \Delta h_{V-6} = \Delta h_{V-1} + \Delta h_{1-3} + \Delta h_{3-5} + \Delta h_{5-6} = 0,51 \text{ m} + 1,92 \text{ m} + 1,12 \text{ m} + 4,16 \text{ m} = 7,71 \text{ m}$$

$$h_V = z_6 - z_V + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\min} + \sum \Delta h_{V-6} = 88 \text{ m n. m.} - 100 \text{ m n. m.} + 25 \text{ m} + 7,71 \text{ m} = \mathbf{20,71 \text{ m}}$$

$$\pi_V = z_V + h_V = 100 \text{ m n. m.} + 20,71 \text{ m} = \mathbf{120,71 \text{ m n. m.}}$$

Minimalna visina vode u vodotoranju treba biti na koti 120,71 m n.m. kako bi se za vrijeme maksimalne satne potrošnje u naselju osigurala vrijednost tlaka od 2,5 bara. Najniža razina vode u vodotoranju dosegne se neposredno prije početka rada crpke koja je puni vodom. Vodotoranj se puni vodom u vremenu kada je otjecanje iz vodospreme (potrošnja) manje od dotoka u nju. Kada je potrošnja u naselju veća od dotoka u vodotoranj i kada crpka kojom se puni vodotoranj ne radi, vodotoranj se prazni. Promjena visine i volumena vode u vodotoranju ovisi dakle o režimu dotoka i otjecanja iz njega (*jednadžba očuvanja mase*) i detaljno će se obraditi u poglavlju **V Vodospreme**. Za sada je važno shvatiti da razina vode tijekom dana oscilira, što utječe na snagu crpke koja s vodozahvata distribuira vodu do vodospreme. Iz izraza za snagu crpke vidljivo je da ona ovisi o karakteristikama fluida koje se crpi, protoku, manometarskoj visini i koeficijentu korisnog djelovanja crpke:

$$P_{izl} = \rho g Q_{cr} H_{man} \text{ izlazna snaga crpke}$$

$$P_{ul} = \frac{\rho g Q_{cr} H_{man}}{\eta} \text{ ulazna snaga crpke}$$

Ulazna snaga crpke (potrebna) ili snaga na osovini crpke je snaga koju crpki predaje pogonski stroj (najčešće elektromotor). Ta se snaga troši na stvaranje korisne ili izlazne snage te svladavanje hidrauličkih, mehaničkih i volumenskih gubitaka. Ukupni gubici izražavaju se koeficijentom iskoristivosti crpke η .

b) i c) dimenzija dovodnog cjevovoda i snaga crpke

Kapacitet (izdašnost) izvorišta (vodozahvata) mora biti dovoljan da zadovolji potrebe korisnika u danu maksimalne potrošnje. Računski protok koji se crpi i transportira dovodnim cjevovodom do vodospreme ovisi o vremenu rada crpke:

$$Q_{cr} = \frac{Q_{\max, \text{dn, uk}}}{T_{cr}} = \frac{2376 \text{ m}^3/\text{dan}}{16 \text{ h}} = 148,5 \text{ m}^3/\text{h} = 41 \text{ l/s}$$

Kako se razina vode u vodotornju tijekom dana mijenja, mijenja se i potrebna manometarska visina crpke. Ovdje će se proračunati samo slučaj kada je razina vode u vodospremi na koti 120,71 m n.m.:

$$H_{\text{man}} = \Delta H + \Delta h_{i-v} = (120,71 \text{ m n. m.} - 80 \text{ m n. m.}) + \Delta h_{i-v}$$

Dimenzioniranje dovodnog cjevovoda:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_{cr}}{\pi \cdot 1,5 \text{ m/s}}} = 0,187 \text{ m}$$

U prvom koraku pretpostavljena je računaska brzina od 1,5 m/s.

Odabran je profil dovodnog cjevovoda **DN 225 (DN ID 203,4)**. Stvarna brzina prema tome iznosi:

$$v_{\text{stv}} = 1,26 \text{ m/s}$$

Gubitak tlaka na dionici dovodnog cjevovoda:

$$\Delta h_{i-v} = 0,018 \cdot \frac{1400}{0,2034} \frac{1,26^2}{2g} = 10,03 \text{ m}$$

Manometarska visina iznosi:

$$H_{\text{man}} = 50,74 \text{ m}$$

Izlazna snaga crpke u tom trenutku iznosi:

$$P_{\text{izl}} = \frac{9,81 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,041 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 50,71 \text{ m}}{0,75} = 27,2 \text{ kW}$$

Zadatak 3.5 Proračun gubitka tlaka preko ekvivalentnog protoka

Kroz dionicu cjevovoda dužine 700 m protječe voda potrebna za opskrbu 300 kućanstava koja su ravnomjerno raspoređena po toj dionici cjevovoda. Prosječan broj ljudi u kućanstvu je 3, specifična potrošnja po stanovniku je $q_{sp} = 120$ l/stanovnik/dan, a koeficijenti neravnomjernosti iznose $k_{max,dn} = 1,5$ i $k_{max,h} = 2,0$. Istim cjevovodom prolazi i voda potrebna za drugi dio naselja koji broji 500 kućanstava (identične q_{sp} , $k_{max,dn}$ i $k_{max,h}$). Usvojiti pogonsku hrapavost cijevi $k(\epsilon) = 0,05$ mm i kinematički koeficijent hrapavosti $v = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Potrebno je dimenzionirati promatranu dionicu cjevovoda uz uvjet da pad tlaka na promatranoj dionici ne bude veći od 1,2 bara. Cijev dimenzionirati samo na potrošnju od stanovništva.

Rješenje:

Maksimalni satni protok od stanovništva priključenih na promatranu dionicu (vlastiti protok):

$$Q_{max,h,vl} = q_{sp} \cdot 300 \cdot 3 \cdot k_{max,h} \cdot k_{max,dn} = 3,75 \text{ l/s}$$

Maksimalni satni protok od stanovništva nizvodno od promatrane dionice (tranzitni protok):

$$Q_{max,h,tr} = q_{sp} \cdot 500 \cdot 3 \cdot k_{max,h} \cdot k_{max,dn} = 6,25 \text{ l/s}$$

Ukupni protok od stanovništva kroz promatranu dionicu:

$$Q = Q_{max,h,vl} + Q_{max,h,tr} = 10 \text{ l/s}$$

Dimenzioniranje promatranog cjevovoda izvršit će se prema kriteriju ekonomičnih brzina i ukupnom protoku od stanovništva kroz promatranu dionicu:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,01 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 1,5 \text{ m/s}}} = 0,092 \text{ m}$$

Pretpostavljena je računaska brzina od 1,5 m/s.

Usvojen je profil cjevovoda **DN 110 (e= 5,3 mm; DN ID 99,4; PE 80; SDR 21 – Tablica 3.2).**

Maksimalni satni protok od stanovništva priključenih na promatranu dionicu (vlastiti protok) $Q_{max,h,vl} = 3,75$ l/s nije konstantan duž promatrane dionice cjevovoda već linearno opada prema kraju dionice (zbog pretpostavke jednolike naseljenosti stanovništva duž dionice i kućnih priključaka na javni vodovod). Kako se mijenja protok, mijenja se i brzina tečenja u cjevovodu (za konstantnu dimenziju cijevi, brzina duž dionice opada), a prema tome mijenjaju se i hidraulički gubici, tj. nagib hidrauličke linije (hidraulički pad). Zbog kvadrata brzine u izrazu za hidrauličke gubitke, hidraulički pad mijenja se nelinearno. Teorijski, hidrauličke gubitke bi onda trebalo rješavati diferencijalno (kroz segmente) pa se zbog pojednostavljenja proračuna uvodi pojam ekvivalentne brzine i protoka. Ekvivalentni protok iznosi oko 50 % (usvojeno 55 % iz razloga dodatne sigurnosti) vrijednosti mjerodavnog protoka koji se troši na analiziranoj dionici. Na taj način izravna se hidraulički pad na dionici (podcjenjuje se vrijednost hidrauličkih gubitaka na početku dionice, a precjenjuje na kraju dionice). Izraz za ekvivalentnu brzinu i protok glasi [8]:

$$v_e = \frac{Q_e}{A}$$

$$Q_e = 0,55 \cdot Q_{mjer.,vl} + Q_{tr}$$

gdje je $Q_{mjer.,vl}$ mjerodavni vlastiti protok na promatranoj dionici, a Q_{tr} tranzitni, nizvodni protok.

U ovom slučaju ekvivalentni protok i brzina iznose:

$$Q_e = 0,55 \cdot Q_{\max,h,vl} + Q_{\max,h,tr} = 0,55 \cdot 3,75 \text{ l/s} + 6,25 \text{ l/s} = 8,12 \text{ l/s}$$

$$v_e = \frac{4 \cdot 0,00812 \text{ m}^3/\text{s}}{(0,0994)^2 \pi} = 1,05 \text{ m/s}$$

Gubitak tlaka na promatranoj dionici izračunat preko ekvivalente brzine iznosi:

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,05 \text{ m/s} \cdot 0,0994 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 65231,25$$

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} = 0,0217$$

$$\Delta h = 0,0217 \frac{700}{0,0994} \frac{1,05^2}{2g} = \mathbf{8,59 \text{ m}}$$

$$\Delta p = \rho g \Delta h = \mathbf{0,84 \text{ bara}}$$

Usvojen profil DN 110 odgovara s obzirom na brzinu tečenja i gubitak tlaka koji se razviju protjecanjem vode kroz analiziranu dionicu.

IV

RASPODJELA TLAKA

U

VODOOPSKRBNOM SUSTAVU

Zadatak 4.1 Određivanje vrijednosti tlaka na dovodnom cjevovodu

Voda se s vodozahvata „VZ“ distribuira glavnim dovodnim (magistralnim) cjevovodom prema naseljima A i B te vodotornju „V“ koja se nalazi nizvodno od spomenutih naselja. U čvoru 1 nalazi se priključak za naselje A, a u čvoru 2 priključak za naselje B. **Za vodoopskrbni sustav sa Slike 4.1 potrebno je dimenzionirati cjevovod te odrediti vrijednosti tlaka na vodozahvatu i čvorovima 1 i 2, za slučajeve:**

- kada je potrošnja vode u naseljima A i B jednaka maksimalnoj satnoj potrošnji, a razina vode u vodotornju je na 130 m n.m.,
- nema potrošnje u naseljima A i B, a razina vode u vodotornju je na 135 m n.m.

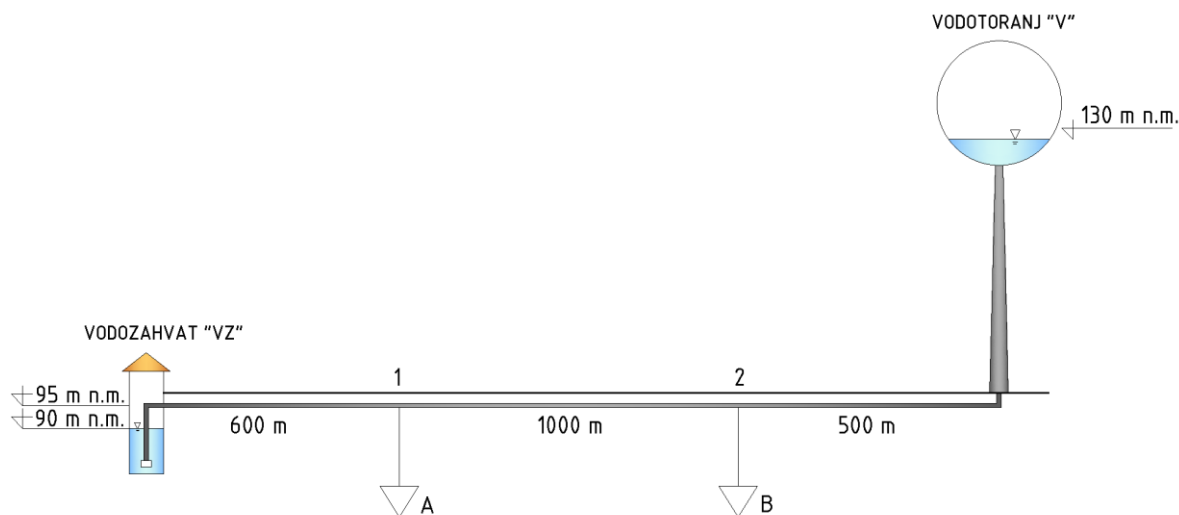
Također, za zadane uvjete odrediti potrebnu snagu crpke na vodozahvatu, ako je protok crpke tijekom dana konstantan.

Zadano je:

Naselje A: 5000 stanovnika, $q_{sp} = 130$ l/stanovnik/dan, $k_{max,dn} = 1,5$; $k_{max,h} = 2,0$, nema industrije.

Naselje B: 3102 stanovnika, $q_{sp} = 130$ l/stanovnik/dan, $k_{max,dn} = 1,5$; $k_{max,h} = 2,0$, $q_{ind} = 14,4$ m³/h.

U analizi ne uzimati vrijednost protupožarne količine vode. Usvojiti koeficijent trenja od 0,018. Brzina tečenja u cjevovodu ne smije biti veća od 1,5 m/s. Usvojiti koeficijent korisnog djelovanja crpke $\eta = 0,75$. Pod b) usvojiti pretpostavku o nepostojanju volumskih gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži.



Slika 4.1 Shema vodoopskrbnog sustava

Rješenje:

Naselje A:

$$Q_{sr,A} = 650 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{max,dn,A} = 975 \text{ m}^3/\text{dan} = 40,625 \text{ m}^3/\text{h} = 11,28 \text{ l/s}$$

$$Q_{max,h,A} = 22,57 \text{ l/s}$$

Naselje B:

$$Q_{sr,st,B} = 403,26 \text{ m}^3/\text{dan}$$

$$Q_{max,dn,st,B} = 604,89 \text{ m}^3/\text{dan} = 25,2 \text{ m}^3/\text{h} = 7 \text{ l/s}$$

$$Q_{max,h,st,B} = 14 \text{ l/s}$$

$$Q_{ind} = 14,4 \text{ m}^3/\text{h} = 345,6 \text{ m}^3/\text{dan} = 4 \text{ l/s}$$

$$Q_{max,dn,B} = 950,49 \text{ m}^3/\text{dan} = 39,6 \text{ m}^3/\text{h} = 11 \text{ l/s}$$

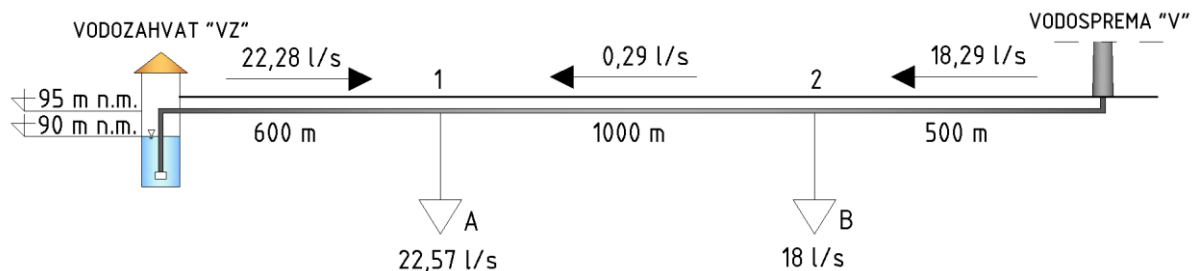
$$Q_{max,h,B} = 18 \text{ l/s}$$

Crpka na vodozahvatu radi cijeli dan s kapacitetom:

$$Q_{VZ} = Q_{cr} = Q_{max,dn,A} + Q_{max,dn,B} = 22,28 \text{ l/s}$$

a) potrošnja vode u naseljima A i B jednaka maksimalnoj satnoj potrošnji $Q_{max,h}$

Raspodjela protoka za analizirane uvjete prikazana je na Slici 4.2.



Slika 4.2 Raspodjela protoka u trenutku maksimalne satne potrošnje u naseljima A i B

Dimenzioniranje cijevi:

Iz **Slike 4.2.** vidljiva je raspodjela protoka u trenutku maksimalne satne potrošnje. Najveći protok javlja se na dionici između vodozahvata i čvora 1, a najmanji na dionici između čvorova 1 i 2. U trenutku maksimalne satne potrošnje protok koji dolazi iz vodozahvata nije dovoljan da opskrbi vodom oba naselja pa se manjak vode uzima iz vodotoranja. U trenutku kada nema potrošnje u naseljima A i B, protok koji se crpi s vodozahvata protječe skroz do vodotoranja te se u tim satima vodotoranj puni. Prema tome, najveći protok kroz sve dionice iznosi $Q_{VZ} = Q_{cr} = 22,28 \text{ l/s}$ i na taj će se protok dimenzionirati cjevovod.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{cr}}{\pi \cdot 1,5}} = 0,137 \text{ m}$$

Pretpostavljena je računaska brzina od 1,5 m/s.

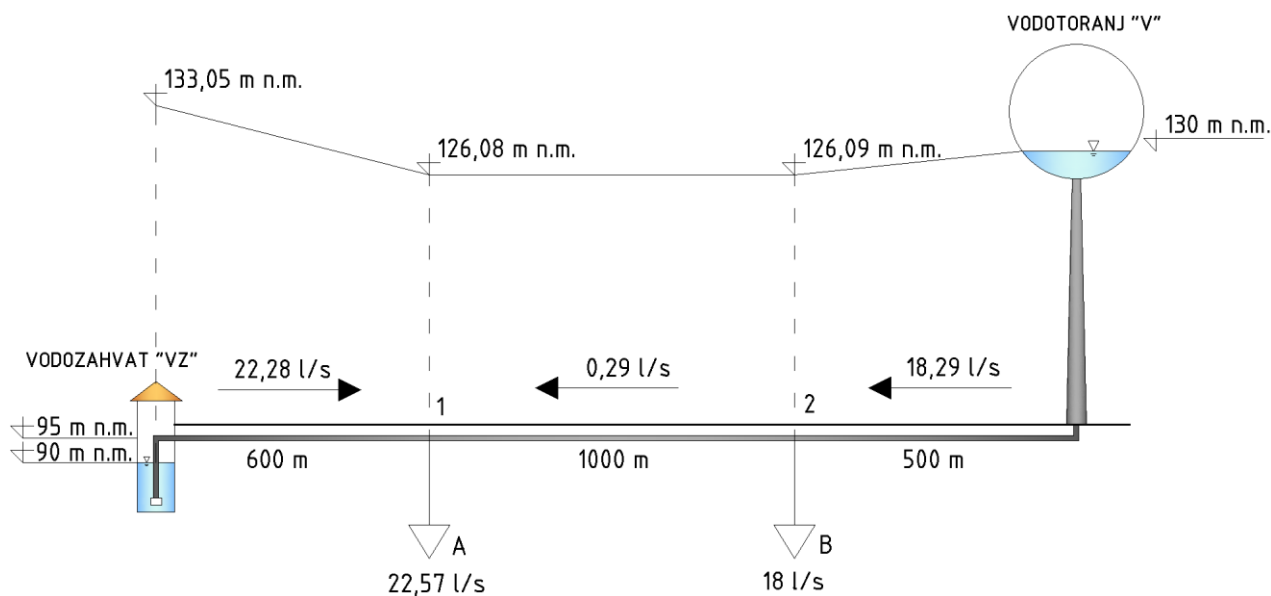
Usvojen je profil cjevovoda **DN 160 (e= 7,7 mm; DN ID 144,6; PE 100; SDR 21 – Tablica 3.3).**

U **Tablici 4.1** prikazani su hidraulički gubici po dionicama vodoopskrbnog sustava za slučaj maksimalne satne potrošnje.

Tablica 4.1 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{\max,h}$

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ-1	600	22,28	144,6	1,35	0,018	6,94
2-1	1000	0,29	144,6	0,017	0,018	0,0018
V-2	500	18,29	144,6	1,11	0,018	3,91

Na **Slici 4.3** prikazana je raspodjela tlakova duž cjevovoda za slučaj $Q_{\max,h}$.



Slika 4.3 Raspodjela tlakova za slučaj $Q_{\max,h}$

Vrijednosti tlakova na vodozahvatu i u čvorovima 1 i 2:

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_{VZ} = \Pi_{VZ} - z_{VZ} = 133,05 - 90 = 43,05 \text{ m} \rightarrow p_1 = 4,22 \text{ bara}$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_1 = \Pi_1 - z_1 = 126,11 - 95 = 31,11 \text{ m} \rightarrow p_1 = 3,05 \text{ bara}$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_2 = \Pi_2 - z_2 = 126,09 - 95 = 31,09 \text{ m} \rightarrow p_2 = 3,05 \text{ bara}$$

Potrebna snaga crpke za slučaj $Q_{\max,h}$:

$$H_{\text{man}} = \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{VZ} = 43,05 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man}} Q_{\text{cr}}}{0,75} = 12,55 \text{ kW}$$

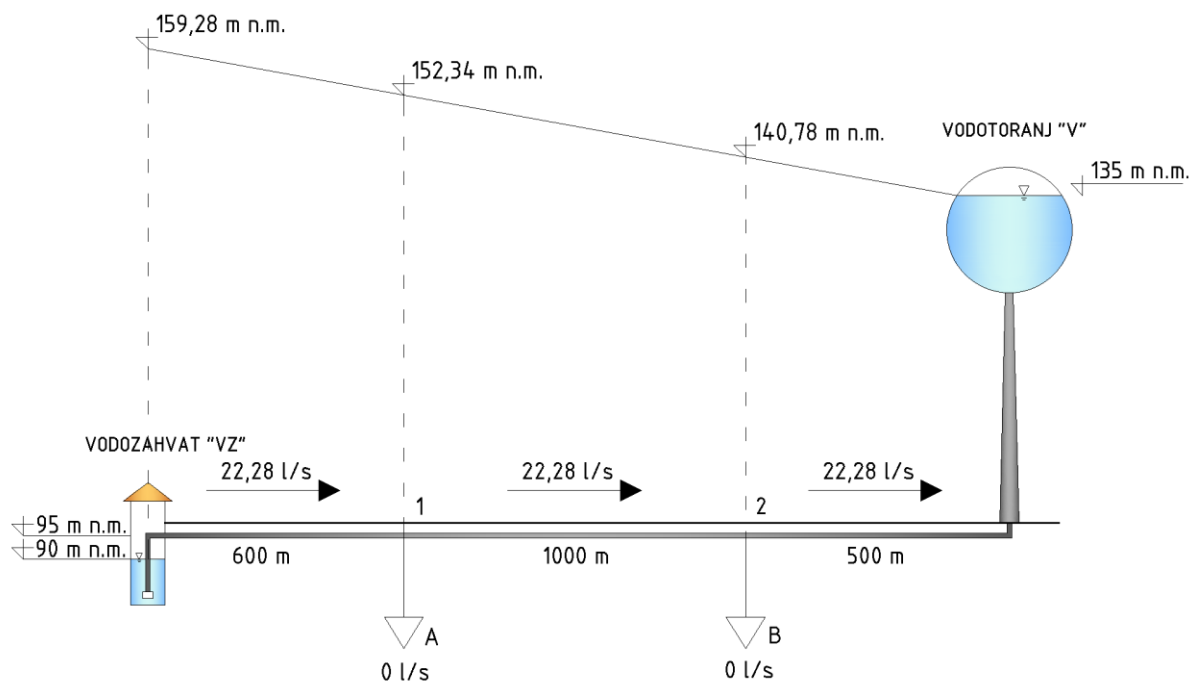
b) nema potrošnje vode u naseljima A i B

U **Tablici 4.2** prikazani su hidraulički linijski gubici po dionicama vodoopskrbnog sustava za slučaj maksimalne satne potrošnje.

Tablica 4.2 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj kada nema potrošnje vode

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{mjer.}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ-1	600	22,28	144,6	1,35	0,018	6,94
1-2	1000	22,28	144,6	1,35	0,018	11,56
2-V	500	22,28	144,6	1,35	0,018	5,78

Na **Slici 4.4** prikazana je raspodjela tlakova duž cjevovoda za slučaj kada nema potrošnje u naseljima.



Slika 4.4 Raspodjela tlakova za slučaj $Q = 0$

Vrijednosti tlakova na vodozahvatu i u čvorovima 1 i 2:

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_{VZ} = 69,28 \text{ m} \rightarrow p_1 = 6,79 \text{ bara}$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_1 = 57,34 \text{ m} \rightarrow p_1 = 5,62 \text{ bara}$$

$$\left(\frac{p}{\rho g}\right)_2 = 45,78 \text{ m} \rightarrow p_2 = 4,49 \text{ bara}$$

Potrebna snaga crpke za slučaj kada nema potrošnje u naselju:

$$H_{\text{man}} = \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{VZ} = 69,28 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man}} Q_{\text{cr}}}{0,75} = 20,18 \text{ kW}$$

Zadatak 4.2 Određivanje minimalne razine vode u vodotornju

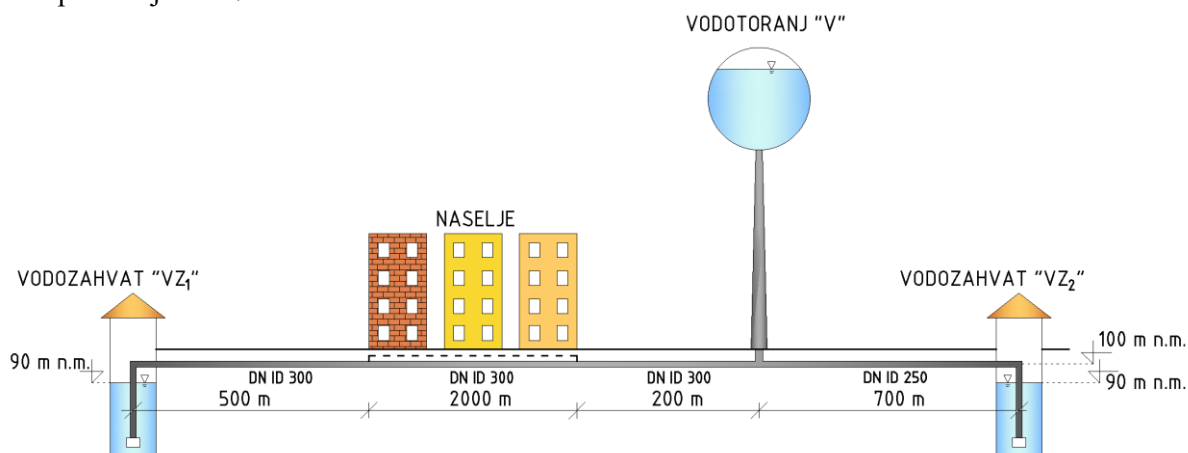
Za zadanu shemu vodoopskrbnog sustava jednog ravničarskog kraja potrebno je **odrediti minimalnu razinu vode u vodotornju „V“** koja će osigurati tlačnu visinu od 25 m u sustavu (minimalna piezometarska kota $\Pi_{\min} = 125$ m n.m.). Na vodozahvatu VZ_1 nalazi se crpka koja radi s protokom od $Q_{cr,1} = 70$ l/s i distribuira ga prema naselju i vodotornju „V“ kontinuirano tijekom dana. Izvorište na vodozahvatu VZ_2 je izdašnosti 50 l/s i taj se protok tijekom cijelog dana distribuira prema vodotornju „V“. Maksimalna dnevna potrošnja vode naselja iznosi $Q_{\max, \text{dn}} = 120$ l/s, a maksimalna satna $Q_{\max, \text{h}} = 200$ l/s.

Potrebno je skicirati piezometarske linije, naznačiti karakteristične piezometarske vrijednosti te **odrediti potrebnu snagu crpke na vodozahvatima i to za:**

a) vrijeme satnog maksimuma potrošnje $Q_{\max, \text{h}} = 200$ l/s

b) vrijeme kada je potrošnja u naselju jednaka nuli.

Dimenzije cijevi i ostale potrebne podatke usvojiti sa **Slike 4.5**. Za vrijeme kada nema potrošnje vode u naselju vodosprema se puni, a nivo vode pretpostaviti da je 3 m viši od nivoa određenog pri $Q_{\max, \text{h}}$. Pretpostaviti da je stanovništvo ravnomjerno naseljeno po naselju. Usvojiti koeficijent trenja $\lambda = 0,018$ i koeficijent korisnog djelovanja crpke $\eta = 0,75$. Pod b) usvojiti pretpostavku o nepostojanju gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži.



Slika 4.5 Shema vodoopskrbnog sustava

Rješenje:

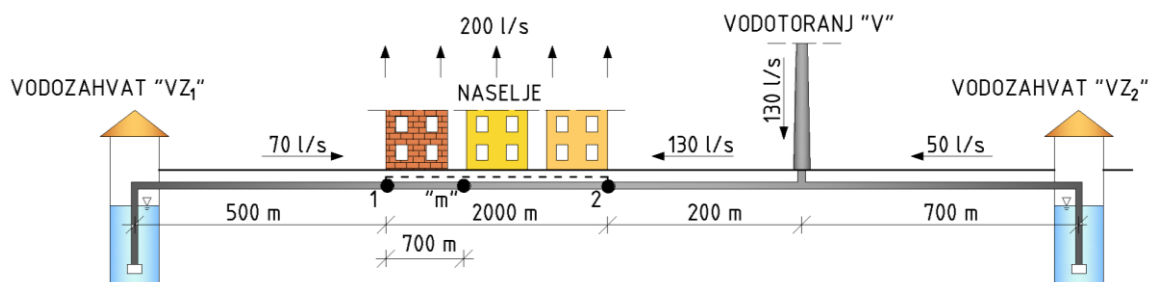
U zadatku će se analizirati dva kritična slučaja, $Q_{\max, \text{h}}$ i $Q = 0$. Prvo je potrebno odrediti minimalnu razinu vode u vodotornju koja će osigurati minimalni potreban tlak u mreži (2,5 bara). Proračun minimalne razine vode u vodotornju provest će se za slučaj maksimalne satne potrošnje u naselju $Q_{\max, \text{h}}$ jer je tada otjecanje iz vodotornja najveće.

Ulazni podaci:

$Q_{\max, \text{dn}} = 120$ l/s; $Q_{\max, \text{h}} = 200$ l/s; $Q_{cs,1} = Q_{VZ1} = 70$ l/s; $Q_{cs,2} = Q_{VZ2} = 50$ l/s; $DN ID_{VZ1-V} = 300$ mm; $DN ID_{VZ2-V} = 250$ mm.

a) potrošnja vode u naselju jednaka maksimalnoj satnoj potrošnji $Q_{\max, \text{h}}$

Najprije je potrebno odrediti položaj točke najnižeg tlaka u sustavu (kritična točka). S obzirom na položaj vodozahvata, naselja i vodospreme ta točka bit će u naselju. Budući da naselje zahtjeva 200 l/s, a iz vodozahvata VZ_1 dotječe protok od 70 l/s, ostatak vode mora se osigurati iz vodotornja. Raspodjela protoka prikazana je na **Slici 4.6**. Najniža vrijednost tlaka (kritična točka) pojavit će na mjestu gdje će se potrošiti protoci iz oba smjera (iz vodozahvata i iz vodotornja). U toj točki protok je jednak nuli $Q = 0$, a točka se naziva "mrtva" točka (m).



Slika 4.6 Raspodjela protoka i položaj "mrtve" točke

Položaj "mrtve" točke:

$$m = \frac{Q_{VZ1-1}}{Q_{\max,h}} L = \frac{70}{200} L = 0,35L = 700 \text{ m}$$

ili

$$m = \frac{Q_{V-2}}{Q_{\max,h}} L = \frac{130}{200} L = 0,65L = 1300 \text{ m}$$

Zadano je da minimalna tlačna visina u sustavu mora iznositi minimalno 25 m, pa prema tome piezometarska kota u točki "m" iznosi $\Pi_m = 125 \text{ m n.m.}$ S obzirom na tu kotu odredit će se minimalna razina vode u vodotornja (i visina vodospreme), nakon proračuna hidrauličkih gubitaka.

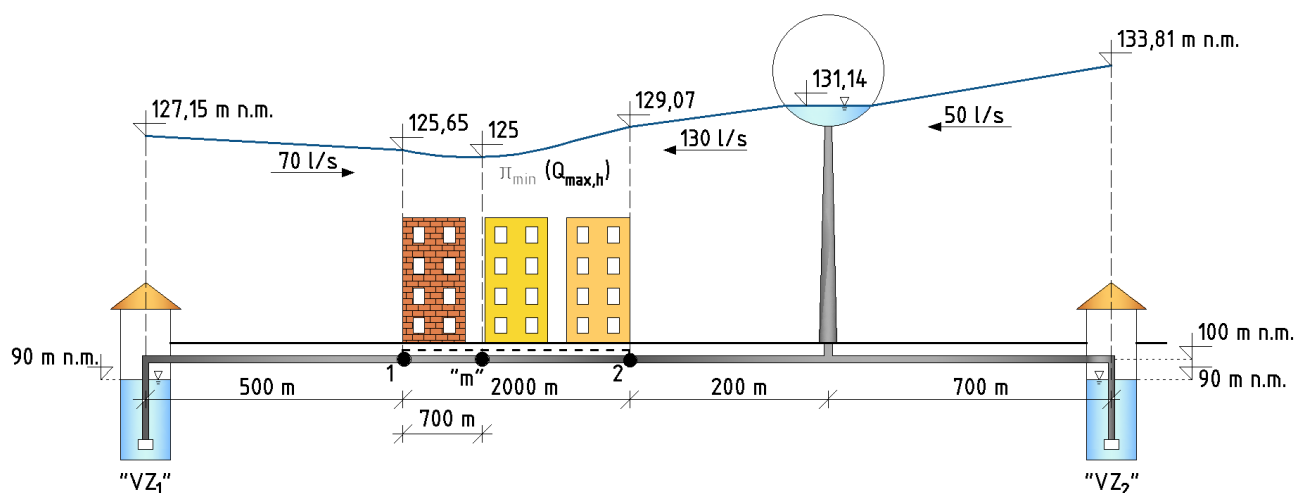
U **Tablici 4.3** prikazan je proračun linijskih gubitaka tlaka po pojedinim dionicama. Valja napomenuti da je za proračun linijskih gubitaka tlaka na dionicama 1-m i 2-m korišten ekvivalentni protok Q_{ekv} , tj. ekvivalentna brzina v_{ekv} (vidi **Zadatak 3.5**).

Tablica 4.3 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{\max,h}$

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ ₁ -1	500	70	300	0,99	0,018	1,5
1-m	700	38,5*	300	0,55	0,018	0,65
2-m	1300	71,5*	300	1,012	0,018	4,07
V-2	200	130	300	1,84	0,018	2,07
VZ ₂ -V	700	50	250	1,02	0,018	2,67

* ekvivalentni protok

Na temelju podataka iz **Tablice 4.3** moguće je odrediti raspodjelu tlaka duž vodoopskrbnog sustava za vrijeme $Q_{\max,h}$. Piezometarska linija za vrijeme satnog maksimuma potrošnje prikazana je na **Slici 4.7**. Podaci sa **Slike 4.7** korišteni su za proračun minimalne razine vode u vodotornju i snage crpki na vodozahvatima.

Slika 4.7 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$

Minimalna razina vode u vodotornju iznosi:

$$\Pi_{V,\min} = \Pi_m + \sum \Delta h_{V-m} = 125 \text{ m n.m.} + 4,07 \text{ m} + 2,07 \text{ m} = \mathbf{131,14 \text{ m n.m.}}$$

Potrebna snaga crpke:

Vodozahvat VZ₁:

$$H_{\text{man},VZ_1} = \Pi_{VZ_1} - z_{VZ_1} = 127,15 \text{ m n.m.} - 90 \text{ m n.m.} = 37,15 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man},VZ_1} Q_{cs,1}}{0,75} = 34,01 \text{ kW}$$

Vodozahvat VZ₂:

$$H_{\text{man},VZ_2} = \Pi_{VZ_2} - z_{VZ_2} = 133,81 \text{ m n.m.} - 90 \text{ m n.m.} = 43,81 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man},VZ_2} Q_{cs,2}}{0,75} = 28,65 \text{ kW}$$

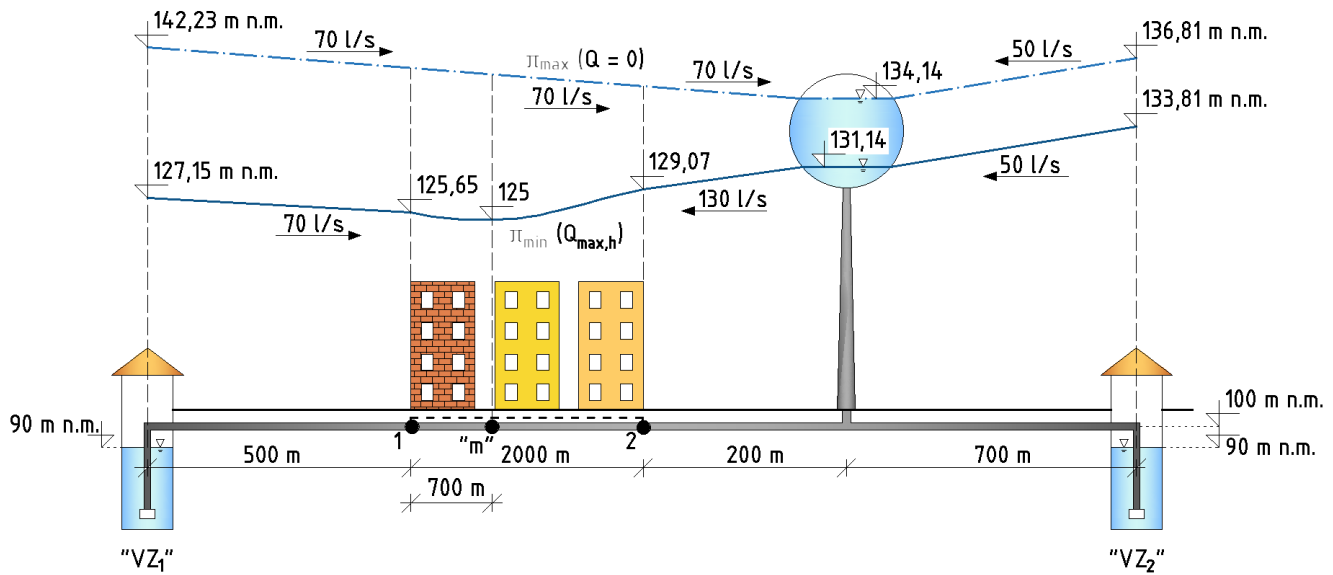
b) nema potrošnje vode u naselju

Kako u naselju nema potrošnje, protok od vodozahvata VZ₁ do vodotornja je konstantan i iznosi 70 l/s. Proračun linijskih gubitaka tlaka proveden je i prikazan u **Tablici 4.4**.

Tablica 4.4 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj kada nema potrošnje u naselju

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ ₁ -V	2700	70	300	0,99	0,018	8,092
VZ ₂ -V	700	50	250	1,02	0,018	2,67

Piezometarska linija za vrijeme kada nema potrošnje u naselju ($Q=0$) prikazana je na **Slici 4.8**. Podaci sa **Slike 4.8** korišteni su za proračun snage crpki na vodozahvatima. Pretpostavljeno je da nivo vode u vodospremi 3 m iznad minimalnog radnog nivoa.



Slika 4.8 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$ i $Q=0$

Potrebna snaga crpke:

Vodozahvat VZ₁:

$$H_{\text{man,VZ}_1} = \Pi_{\text{VZ}_1} - z_{\text{VZ}_1} = (\Pi_{V,\text{max}} + \Delta h_{\text{VZ}_1-V}) - z_{\text{I1}} = (134,14 + 8,092) - 90 \text{ m n. m.} = 52,23 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man,VZ}_1} Q_{\text{cs},1}}{0,75} = 47,81 \text{ kW}$$

Vodozahvat VZ₂:

$$H_{\text{man,VZ}_2} = \Pi_{\text{VZ}_2} - z_{\text{VZ}_2} = 136,81 \text{ m n. m.} - 90 \text{ m n. m.} = 46,81 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man,VZ}_2} Q_{\text{cs},2}}{0,75} = 30,61 \text{ kW}$$

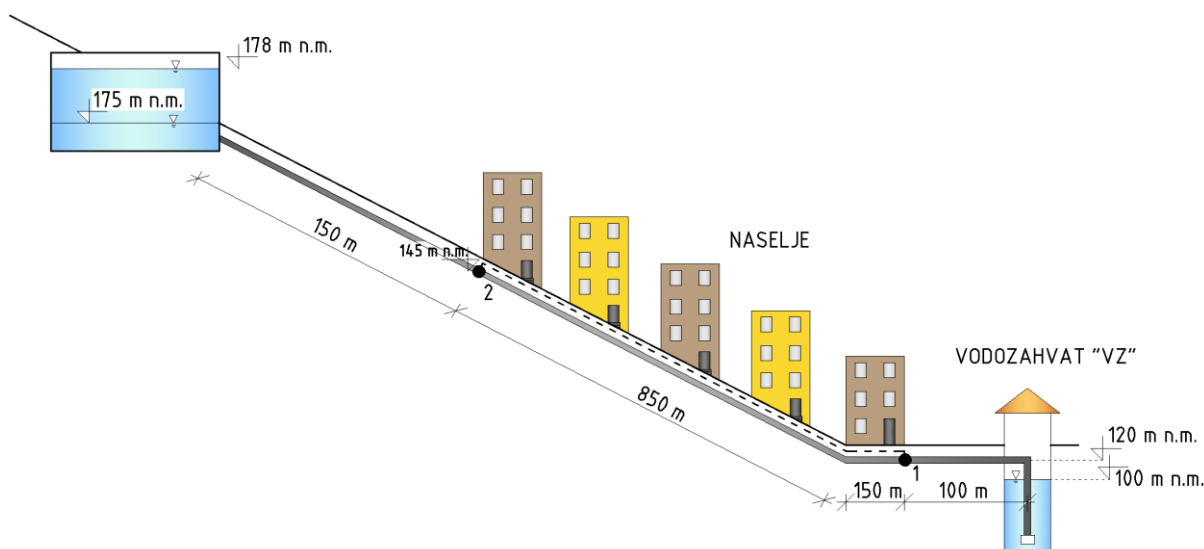
Zadatak 4.3 Dimenzioniranje cjevovoda i određivanje vrijednosti tlaka u točkama sustava

Za zadanu shemu vodoopskrbnog sustava jednog brdovitog kraja **potrebno je dimenzionirati cjevovod, skicirati piezometarske linije, odrediti vrijednosti tlaka na vodozahvatu „VZ“ i točkama 1 i 2 te odrediti potrebnu snagu crpke na vodozahvatu i to za:**

- vrijeme satnog maksimuma potrošnje $Q_{\max,h} = 90$ l/s**
- vrijeme kada je potrošnja u naselju jednaka nuli.**

Na vodozahvatu "VZ" se nalazi crpka koja crpi protok od $Q_{cr} = 60$ l/s i distribuira ga prema naselju i vodospremi „V“ kontinuirano tijekom dana. Maksimalna satna potrošnja vode naselja iznosi $Q_{\max,h} = 90$ l/s i u tom se trenutku deficit vode nadomješta iz vodospreme. Minimalna radna visina vodospreme iznosi 175 m n.m. Pri proračunu minimalni radni nivo vode u vodospremi vezati uz vrijeme maksimalne satne potrošnje u naselju. Preljev na vodospremi se nalazi na koti 178 m n.m. Najviša razina vode u vodospremi javlja se u noćnim satima, kada je potrošnja u naselju vrlo mala (u proračunu usvojiti da je pri maksimalnoj razini u vodospremi potrošnja u naselju jednaka nuli; usvojena pretpostavka o nepostojanju gubitaka vode u vodoopskrbnoj mreži).

Pretpostaviti da je stanovništvo ravnomjerno naseljeno po naselju. Usvojiti koeficijent trenja $\lambda = 0,018$ i koeficijent korisnog djelovanja crpke $\eta = 0,8$. Potrebno je dimenzionirati cijevi uz uvjet da brzina tečenja vode u cijevima ne bude veća od 1,5 m/s.



Slika 4.9 Shema vodoopskrbnog sustava

Rješenje:

Dimenzioniranje cijevi:

Prvo će se analizirati raspodjela i veličina protoka po dionicama u intervalu potrošnje vode u naselju od $Q = 0$ l/s do $Q_{\max,h} = 90$ l/s.

Dionica VZ – 1 → protok od 60 l/s tijekom cijelog dana, neovisno o potrošnji vode u naselju.

Dionica 1 – 2 → protok se mijenja u zavisnosti od potrošnje vode u naselju; od 60 l/s (kada nema potrošnje vode u naselju) do 0 l/s (kada je potrošnja u naselju na razini $Q_{\max,h}$). Tijekom $Q_{\max,h}$ iz vodospreme dotječe 30 l/s, a sav se protok razdijeli stanovnicima do tzv. „mrtve“ točke.

Dionica R – 2 (2 – R) → protok od 60 l/s (kada nema potrošnje vode u naselju) do 30 l/s (kada je potrošnja u naselju na razini $Q_{\max,h}$).

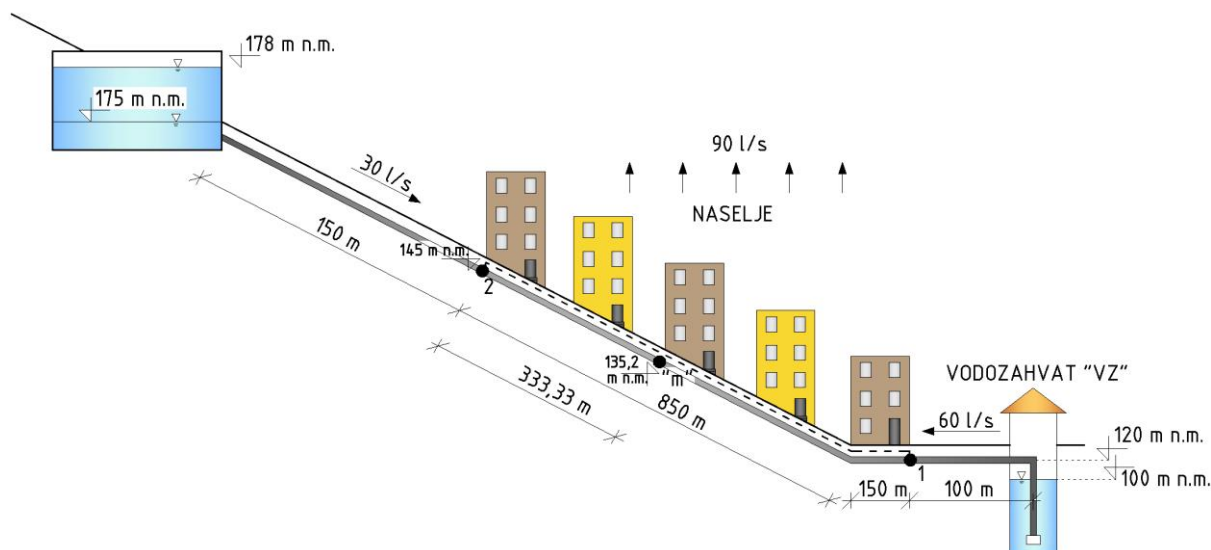
Vidljivo je da na svakoj dionici maksimalan protok iznosi 60 l/s. Prema tome, potrebna dimenzija cijevi odredit će se na sljedeći način:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,06 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 1,5 \text{ m/s}}} = 0,225 \text{ m}$$

Usvojen je profil cjevovoda **DN 250 (e= 11,9 mm; DN ID 226,2; PE 100; SDR 21 – Tablica 3.3).**

a) potrošnja vode u naselju jednaka maksimalnoj satnoj potrošnji $Q_{\max,h}$

Najprije je potrebno odrediti položaj „mrtve“ točke u naselju. Budući da naselje zahtijeva 90 l/s, a iz vodozahvata "VZ" dotječe protok od 60 l/s, ostatak vode mora se osigurati iz vodospreme. Raspodjela protoka prikazana je na **Slici 4.10**.



Slika 4.10 Raspodjela protoka i položaj "mrtve" točke za slučaj $Q_{\max,h}$

Položaj "mrtve" točke:

$$m = \frac{Q_{V-2}}{Q_{\max,h}} L = \frac{30}{90} L = 0,33L = 333,33 \text{ m}$$

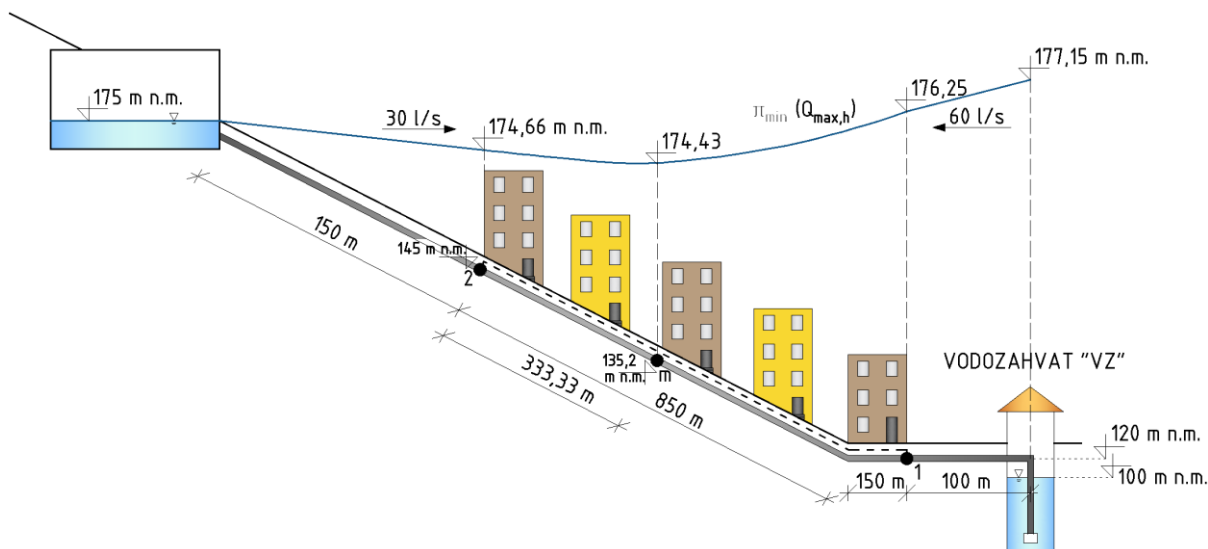
U **Tablici 4.5** prikazan je proračun linijskih gubitaka tlaka po pojedinim dionicama. Za proračun linijskih gubitaka tlaka na dionicama 2-m i 1-m korišten je ekvivalentni protok Q_{ekv} , tj. ekvivalentna brzina v_{ekv} .

Tablica 4.5 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{\max,h}$

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ-1	100	60	226,2	1,49	0,018	0,9
1-m	666,67	33*	226,2	0,82	0,018	1,82
2-m	333,33	16,5*	226,2	0,41	0,018	0,227
V-2	150	30	226,2	0,747	0,018	0,34

* ekvivalentni protok

Na temelju podataka iz **Tablice 4.5** moguće je odrediti raspodjelu tlaka duž vodoopskrbnog sustava za vrijeme $Q_{\max,h}$. Piezometarska linija za vrijeme satnog maksimuma potrošnje prikazana je na **Slici 4.11**. Podaci sa **Slike 4.11** korišteni su za proračun tlaka u točkama i snagu crpki na vodozahvatu.

Slika 4.11 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$

Vrijednosti tlaka na vodozahvatu i u točkama 1 i 2 prikazani su u **Tablici 4.6**.

Tablica 4.6 Proračun tlaka u karakterističnim točkama sustava

Točka	z_i [m n.m.]	Π_i [m n.m.]	$p_i/(\rho g)$ [m]	p_i [bar]
VZ	100	177,15	77,15	7,57
1	120	176,25	56,25	5,52
m	135,2	174,43	39,23	3,85
2	145	174,66	29,66	2,91

Prema rezultatima iz **Tablice 4.6** vidljivo je da je točka 2 kritična točka sustava, gdje se javlja minimalni tlak od 2,91 bara.

Potrebna snaga crpke:

$$H_{\text{man}} = \Pi_{\text{VZ}} - z_{\text{VZ}} = 177,15 \text{ m n.m.} - 100 \text{ m n.m.} = 77,15 \text{ m}$$

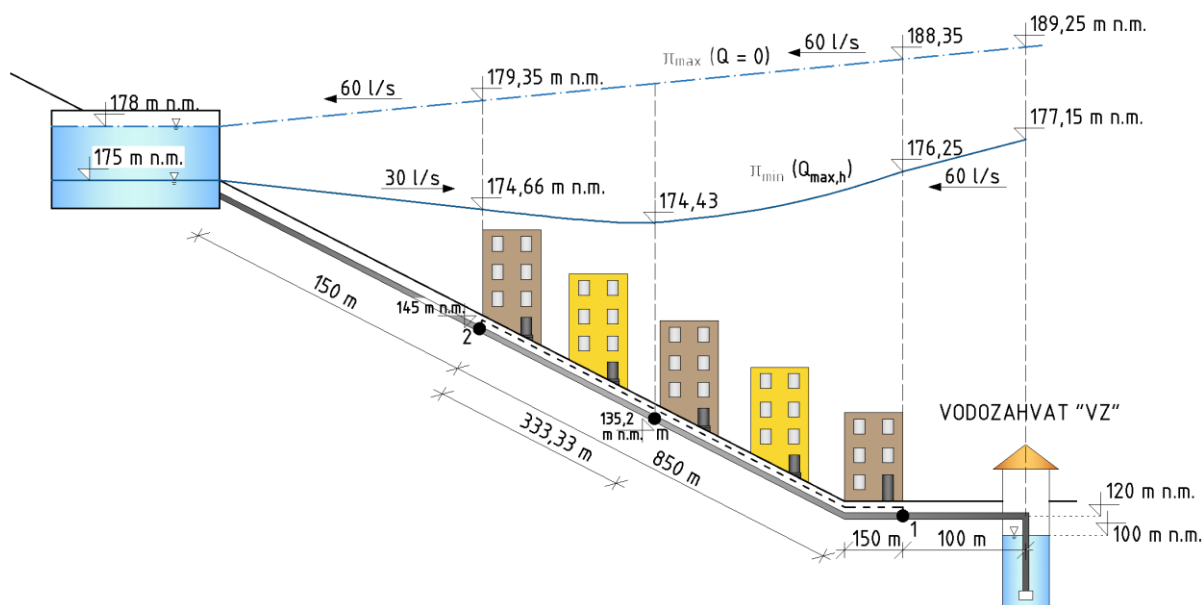
$$P = \frac{\rho g H_{\text{man}} Q_{\text{cs}}}{0,8} = 56,76 \text{ kW}$$

b) nema potrošnje vode u naselju $Q=0$

Kako u naselju nema potrošnje, protok od vodozahvata "VZ" do vodospreme je konstantan i iznosi 60 l/s. Proračun linijskih gubitaka tlaka proveden je i prikazan u **Tablici 4.7**.

Tablica 4.7 Proračun linijskih gubitaka tlaka po dionicama za slučaj $Q_{\max,h}$

Dionica	Dužina dionice l_i [m]	Mjerodavan protok $Q_{\text{mjer.}}$ [l/s]	DN ID [mm]	Brzina [m/s]	Koeficijent trenja λ [-]	Linijski gubitak Δh [m]
VZ-V	1250	60	226,2	1,49	0,018	11,25

Slika 4.12 Raspodjela tlaka za vrijeme $Q_{\max,h}$ i $Q=0$

Piezometarska kota na vodozahvatu iznosi:

$$\Pi_{VZ} = \Pi_{V,\max} + \Delta h = 178 \text{ m n.m.} + 11,25 \text{ m} = 189,25 \text{ m n.m.}$$

Vrijednosti tlaka na vodozahvatu i u točkama 1 i 2 prikazani su u **Tablici 4.8**.

Tablica 4.8 Proračun tlaka u karakterističnim točkama sustava

Točka	z_i [m n.m.]	Π_i [m n.m.]	$p_i/(\rho g)$ [m]	p_i [bar]
VZ	100	189,25	89,25	8,75
1	120	188,35	68,35	6,71
2	145	179,35	34,35	3,37

Potrebna snaga crpke:

$$H_{\text{man}} = \Pi_{VZ} - z_{VZ} = 89,25 \text{ m}$$

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man}} Q_{cs}}{0,8} = 65,66 \text{ kW}$$

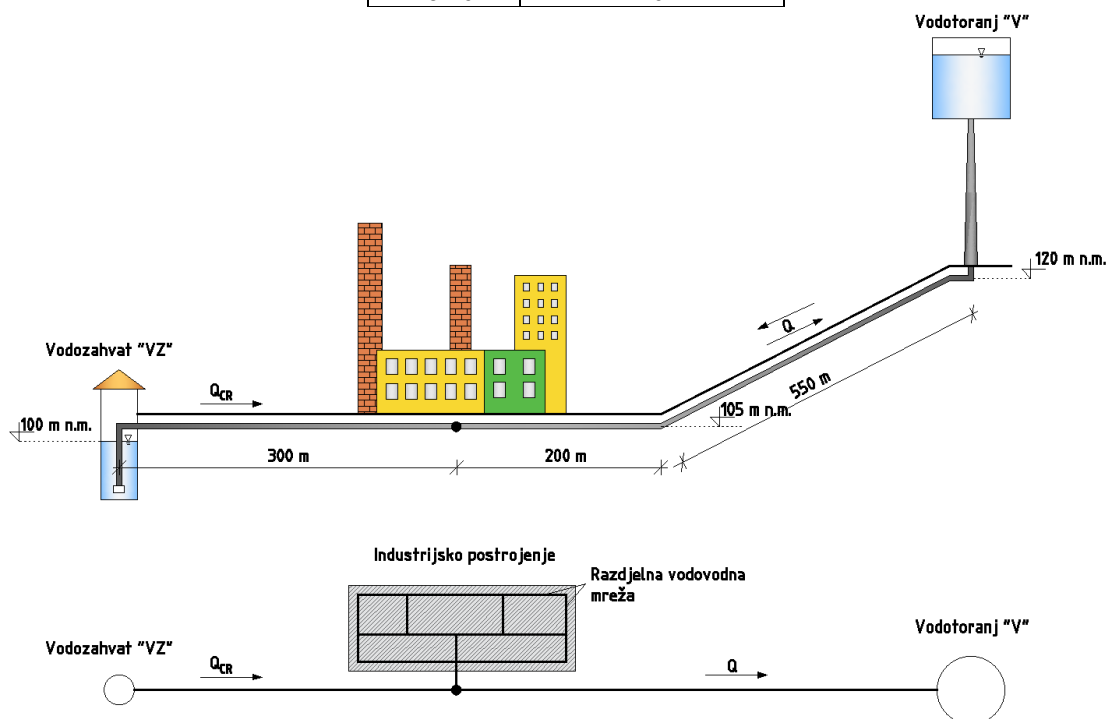
S obzirom da se za razliku od slučaja pod a), ovdje voda distribuira skroz do vodospreme, u ovoj su varijanti hidraulički gubitci koje crpka treba savladati veći. Osim toga, viša je i geodetska razlika koju crpka treba savladati (sa 100 m n.m. potrebno je vodu dopremiti na 178 m n.m.). Iz tog je razloga potrebna snaga crpke u ovoj varijanti veća.

Zadatak 4.4 Raspodjela tlaka u vodoopskrbnom sustavu industrijskog postrojenja

Na **Slici 4.13** prikazan je vodoopskrbni sustav industrijskog postrojenja. Potrebe industrije za vodom prikazane su u **Tablici 4.9**. Crpka na vodozahvatu „VZ“ radi neprekidno s konstantnim protokom tijekom 8 sati u periodu od 6 do 14 sati. Rezervoar u vodotornju „V“ je cilindričnog oblika s korisnom visinom H jednakom polovini promjera D . Usvojiti vrijednost radnog (operativnog, korisnog) volumena vodotornja od 972 m^3 . Kod proračuna gubitaka tlaka, lokalne gubitke zanemariti, a uzeti u obzir samo linijske. Usvojiti pogonsku hrapavost cijevi $k(\epsilon) = 0,1 \text{ mm}$ i kinematički koeficijent viskoznosti $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Minimalna tlačna visina u industrijskom postrojenju treba iznositi 25 m . Usvojiti koeficijent korisnog djelovanja crpke $\eta = 0,75$. U zadatku se razmatra scenarij bez pojave požara, tj. analiziraju se samo potrebe za vodom industrijskog postrojenja. Kod proračuna hidrauličkih gubitaka u obzir uzeti i linijske gubitke koji nastaju na vertikalnoj dionici do ulaska u spremnik vodotornja.

Tablica 4.9 Potrošnja vode za industriju tijekom dana

Period [h]	Potrošnja vode [l/s]
6-11	50
11-13	65
13-16	55
16-20	40

**Slika 4.13** Shema vodoopskrbnog sustava industrijskog postrojenja u presjeku (iznad) i tlocrtu (ispod)**Potrebno je:**

- odrediti promjer cjevovoda (od vodozahvata do rezervoara) takav da brzina tečenja vode prilikom crpljenja ne bude veća od $1,5 \text{ m/s}$
- odrediti minimalnu razinu vode u vodotornju takvu da osigura nesmetanu opskrbu vodom (pretpostaviti da se minimalna razina vode u vodotornju podudara s dnom vodotornja)
- odrediti maksimalnu razinu vode u vodotornju
- odrediti snagu crpke
- skicirati piezometarske linije za vrijeme:
 - maksimalne satne potrošnje u postrojenju (opskrba vodom s vodozahvata i vodotornja)
 - kada crpka ne radi (opskrba vodom samo iz vodotornja).

Rješenje:**a) promjer cjevovoda**

Uvjetom zadatka je zadano da brzina vode ne smije biti veća od 1,5 m/s prilikom crpljenja vode s vodozahvata prema industrijskom postrojenju i rezervoaru. Također, zadano je da crpka na vodozahvatu radi konstantnim protokom tijekom 8 sati.

Ukupna potrošnja industrije iznosi:

$$V_{\text{pot}} = (5 \text{ h} \cdot 0,05 \text{ m}^3/\text{s} + 2 \text{ h} \cdot 0,065 \text{ m}^3/\text{s} + 3 \text{ h} \cdot 0,055 \text{ m}^3/\text{s} + 4 \text{ h} \cdot 0,04 \text{ m}^3/\text{s}) \cdot 3600 \text{ s} = 2538 \text{ m}^3$$

Prema tome, protok crpljenja iznosi:

$$Q_{\text{CR}} = \frac{V_{\text{pot}}}{T_{\text{CR}}} = \frac{2538 \text{ m}^3}{8 \text{ h}} = 317,25 \text{ m}^3/\text{h} = 88,125 \text{ l/s}$$

Promjer cjevovoda iznosi:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{CR}}}{\pi \cdot 1,5 \text{ m/s}}} = 0,273 \text{ m}$$

Pretpostavljena je računaska brzina od 1,5 m/s.

Usvojen je profil cjevovoda **DN 315 (e= 15 mm; DN ID 285; PE 100; SDR 21 – Tablica 3.3).**

Stvarna brzina tečenja vode iznosi:

$$v_{\text{stv}} = \frac{Q_{\text{CR}}}{\frac{0,285^2 \pi}{4}} = 1,382 \text{ m/s}$$

b) minimalna razina vode u vodotornju potrebna za nesmetanu opskrbu vodom

Minimalna razina vode u vodotornju odredit će se za najnepovoljniji uvjet, a to je situacija kada crpka ne radi (poslije 14 sati), a potrošnja industrije od 55 l/s (više od 40 l/s koliko zahtijeva u periodu između 16 i 20 sati) se osigurava direktno iz vodotornja.

Minimalna piezometarska kota u industrijskom postrojenju iznosi:

$$\Pi_{\text{ind,min}} = z_{\text{ind}} + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\text{min}} = 105 \text{ m n. m.} + 25 \text{ m} = 130 \text{ m n. m.}$$

Minimalna razina vode u vodotornju se određuje prema:

$$\Pi_{\text{V,min}} = \Pi_{\text{ind,min}} + \Delta h_{\text{lin}}$$

Gubitci tlaka računaju se s protokom od 55 l/s, tj. brzinom tečenja od:

$$v = \frac{0,055 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{0,285^2 \pi}{4}} = 0,8625 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{0,8625 \text{ m/s} \cdot 0,285 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 153632,8$$

$$\Delta h_{\text{lin}} = 0,0186 \cdot \frac{750 \text{ m}}{0,285 \text{ m}} \cdot \frac{(0,8625 \text{ m/s})^2}{2g} = 1,85 \text{ m}$$

Minimalna razina vode u vodotornju prema tome iznosi:

$$\Pi_{\text{V,min}} = 130 \text{ m n. m.} + 1,85 \text{ m} = 131,85 \text{ m n. m.}$$

Kako je cijev prije ulaska u vodotoranj na koti 120 m n.m., a minimalna razina vode u vodotoranju na koti 131,85 m n.m., može se reći da vertikalna dionica cjevovoda iznosi 11,85 m. Prema tome, gubitak na toj dionici iznosi:

$$\Delta h_{\text{lin},v} = 0,0186 \cdot \frac{11,85 \text{ m}}{0,285 \text{ m}} \cdot \frac{\left(0,8625 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2g} = 0,03 \text{ m}$$

Iz priloženog se vidi da je hidraulički gubitak na vertikalnoj dionici vrlo mali, ali u slučajevima većih vrijednosti protoka i brzina on može biti značajniji. Pošto hidraulički gubitak ovisi o dužini cijevi, a isti se opet koristi za određivanje visine vertikalne dionice i posljedično vodotornja, ovaj se problem rješava iteracijski. Ovdje će usvojiti izračunati gubitak, a korigirana minimalna razina vode u vodotoranju iznosi:

$$\Pi_{V,\text{min}} = 130 \text{ m n. m.} + 1,85 \text{ m} + 0,03 \text{ m} = 131,88 \text{ m n. m.}$$

Vertikalna dionica cjevovoda prema tome iznosi 11,88 m.

c) maksimalna razina vode u vodotoranju

Da bi se odredila maksimalna razina vode u vodotoranju, potrebno je provesti proračun dimenzioniranja vodospremnickog prostora. Postupak proračuna opisan je u poglavlju **V Vodospreme**. Ovdje će se usvojiti vrijednost radnog volumena vodotornja od 972 m³. Zadano je da je vodotoranj "V" cilindričnog oblika s korisnom visinom H jednakom polovini promjera D pa se prema tome može napisati sljedeće:

$$V_V = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot H = 972 \text{ m}^3$$

kako je $D = 2H$, slijedi da je visina korisnog prostora u vodotoranju:

$$H = 6,76 \text{ m}$$

Prema tome, maksimalna razina vode u vodotoranju iznosi:

$$\Pi_{V,\text{max}} = \Pi_{V,\text{min}} + H = 131,88 \text{ m n. m.} + 6,76 \text{ m} = 138,64 \text{ m n. m.}$$

d) potrebna snaga crpke

Proračun snage crpke provest će se za slučaj crpljenja na maksimalnu kotu vode u vodotoranju $\Pi_{V,\text{max}} = 138,64 \text{ m n. m.}$ Visina dizanja, tj. manometarska visina crpke određuje se prema:

$$H_{\text{man}} = \Pi_{V,\text{max}} - \Pi_I + \Delta h_{\text{lin},VZ-V}$$

Gubici tlaka od vodozahvata "VZ" do vodotornja "V":

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{1,382 \text{ m/s} \cdot 0,285 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 246168,75$$

$$\lambda = \frac{1,325}{\left(\ln\left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right)^2} = 0,0177$$

$$\Delta h_{\text{lin},VZ-V} = 0,0177 \cdot \frac{1050 \text{ m} + 11,88 \text{ m}}{0,285 \text{ m}} \cdot \frac{\left(1,382 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2g} = 6,42 \text{ m}$$

Manometarska visina crpke prema tome iznosi:

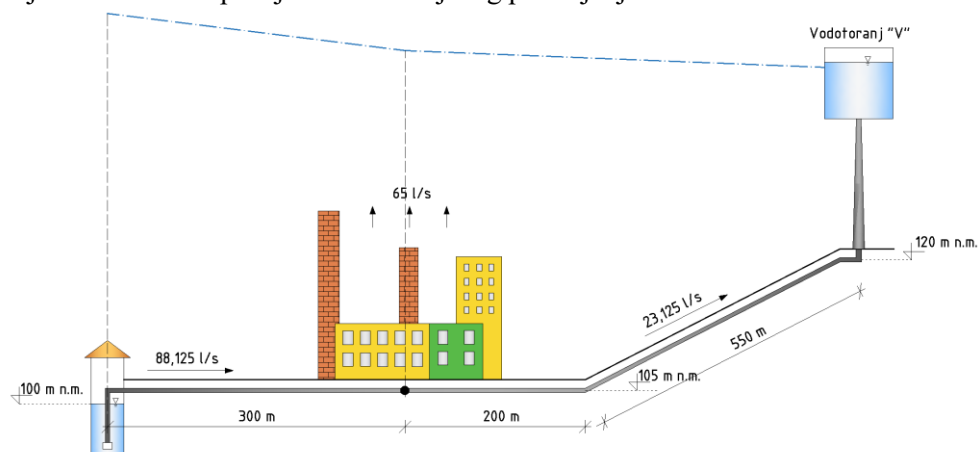
$$H_{\text{man}} = 138,64 \text{ m n. m.} - 100 \text{ m n. m.} + 6,42 \text{ m} = 45,06 \text{ m}$$

Potrebna maksimalna snaga crpke u toku dana iznosi:

$$P = \frac{\rho g H_{\text{man}} Q_{\text{CR}}}{\eta} = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 45,06 \text{ m} \cdot 0,088125 \text{ m}^3/\text{s}}{0,75} = 51,94 \text{ kW}$$

e1) piezometarska linija za vrijeme maksimalne satne potrošnje u postrojenju (opskrba vodom iz vodozahvata i vodotoranja)

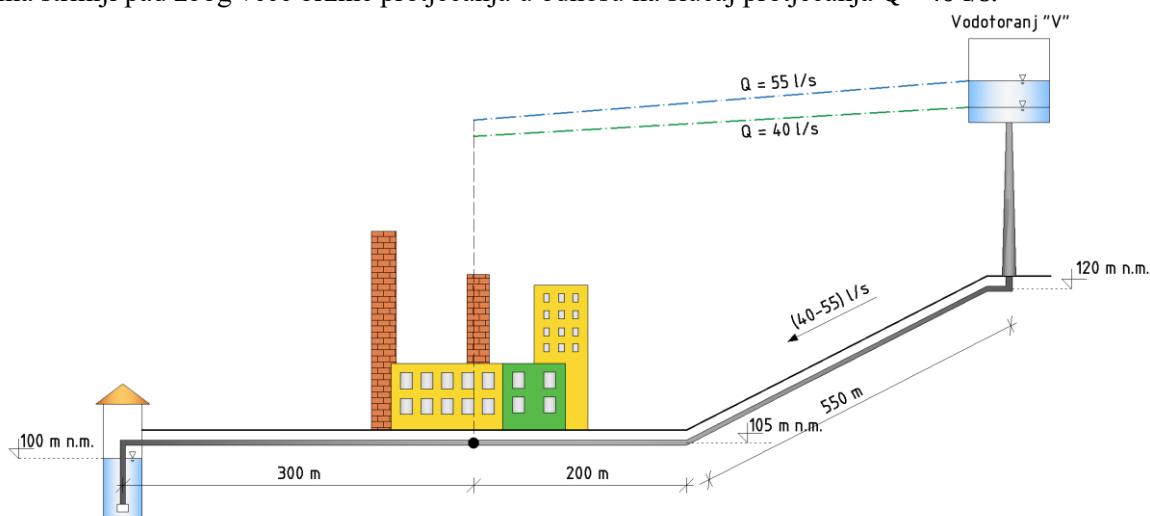
Maksimalna satna potrošnja industrijskog postrojenja iznosi 65 l/s (**Tablica 4.9**). Industrija taj protok zahtijeva u periodu između 11 i 13 sati. U tom periodu crpka radi s protokom od 88,125 l/s. Višak vode odlazi u vodospremu i vodosprema se tada puni. Visina vode u vodospremi može se odrediti uz poznat volumen vode unutar nje te poznatu površinu vodospreme, tj. vodne komore. Proračun nivograma prikazan je u poglavlju **V Vodospreme (Zadatak 5.3)**. Preko poznate visine vode u vodospremi moguće je odrediti vrijednost tlaka na priključku industrijskog postrojenja te na vodozahvatu "VZ".



Slika 4.14 Piezometarska linija za vrijeme maksimalne satne potrošnje u postrojenju

e2) piezometarska linija za vrijeme kada crpka ne radi (opskrba vodom samo iz vodotoranja)

U periodu kada crpka ne radi (od 14 h do 6 h) industrijsko postrojenje zahtijeva 55 l/s (između 13 i 16 h) i 40 l/s (između 16 i 20 h). Na **Slici 4.15** prikazane su piezometarske linije za oba slučaja. S obzirom na dinamiku potrošnje vodotoranj se puni sve dok crpka radi. Nakon što crpka prestane s radom, opskrba vodom se odvija samo preko vodotoranja. Razina vode u vodotoranju je u periodu između 16 i 20 h ($Q = 40$ l/s) niža u odnosu na period između 13 i 16 h ($Q = 55$ l/s) iz razloga što nije bilo dotoka u vodotoranj (crpka na vodozahvatu ne radi) te se on od 14 h prazni. Piezometarska linija za slučaj protjecanja $Q = 55$ l/s ima strmiji pad zbog veće brzine protjecanja u odnosu na slučaj protjecanja $Q = 40$ l/s.



Slika 4.15 Piezometarska linija za vrijeme kada crpka ne radi

Zadatak 4.5 Usporedba varijantnih rješenja opskrbe vodom naselja

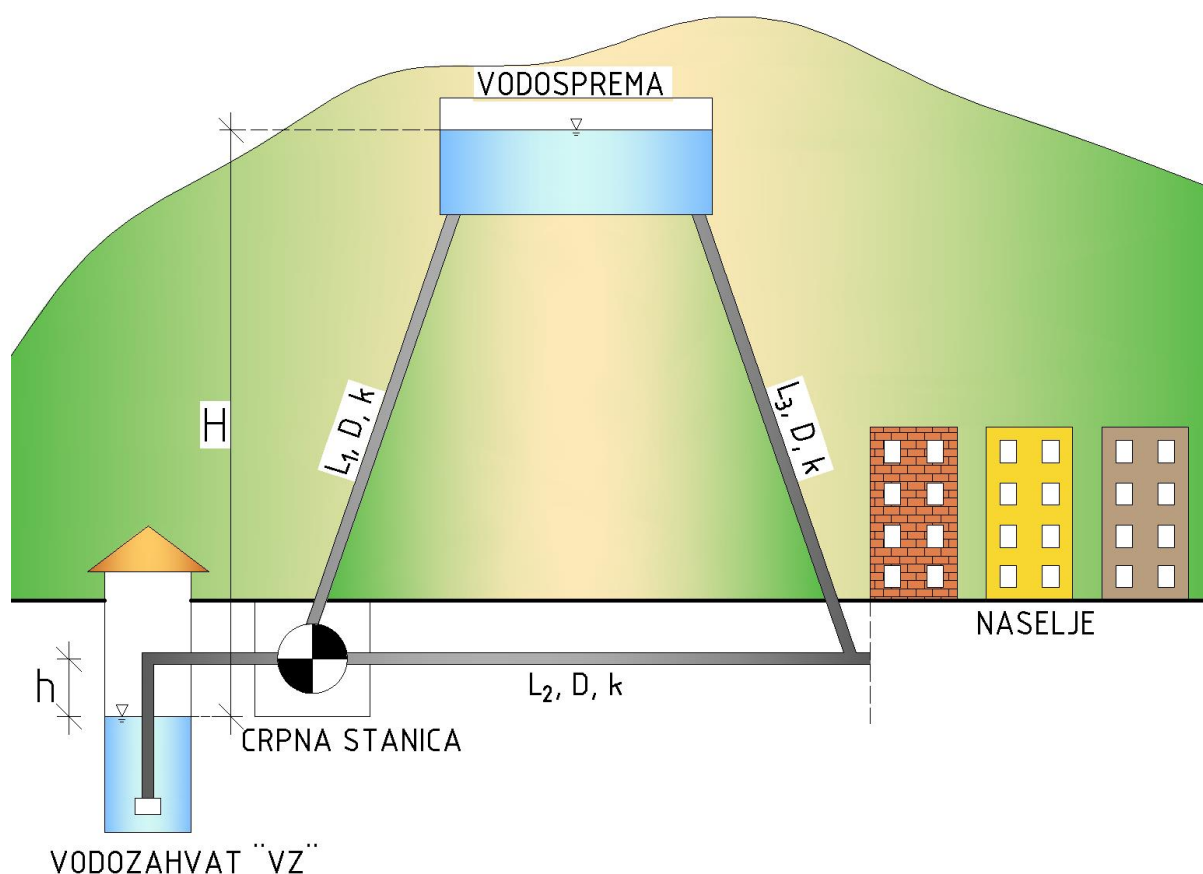
Naselje se opskrbljuje vodom s vodozahvata "VZ" koje se nalazi na otprilike 5 km udaljenosti od naselja. **Potrebno je usporediti dva varijantna rješenja opskrbe vodom naselja u vidu troškova pogona i radnih tlakova ispred naselja:**

Varijanta 1: naselje se tijekom 24 sata opskrbljuje vodom iz vodozahvata – 16 sati se za pogon crpke koristi električna energija standardne cijene, 8 sati električna energija 35 % jeftinija.

Varijanta 2: naselje se 16 sati opskrbljuje vodom iz vodospreme smještene iznad naselja, a 8 sati (za vrijeme jeftinije cijene električne energije) crpka s vodozahvata istovremeno opskrbljuje naselje te puni vodospremu. U tom periodu izlaz iz vodospreme se zatvara.

Pretpostaviti da je potrošnja vode u naselju konstantna tijekom 24 sata i iznosi 30 l/s. Traženi tlak na ulazu u naselje treba iznositi 3,5 bara.

Zadano je: $H = 45$ m, $h = 5$ m, $L_1 = 2,5$ km, $L_2 = 4,7$ km, $L_3 = 2,6$ km, $DN ID = 250$ mm, $k(\epsilon) = 0,016$ mm, $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Lokalne gubitke zanemariti.



Slika 4.16 Shematski prikaz vodoopskrbnog sustava

Rješenje:

Potrebno je odrediti snagu crpke za obje varijante opskrbe vodom. Da bi se odredila manometarska visina dizanja, a posljedično i snaga crpke, potrebno je riješiti *Jednadžbu očuvanja energije* između presjeka postavljenih kod vodozahvata, ispred naselja i u vodospremi (ovisno od varijante) te odrediti manometarsku visinu (potisnu visinu).

Varijanta 1

Jednadžba očuvanja energije između vodozahvata i naselja (referentna ravnina postavljena je na razinu vode u vodozahvatu „VZ“:

$$H_{\text{man},1} = z_{\text{naselje}} + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\text{naselje}} + \lambda_2 \frac{L_2}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{0,049 \text{ m}^2} = 0,61 \text{ m/s}$$

$$Re_2 = \frac{vD}{\nu} = \frac{0,61 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 95312,5$$

$$\lambda_2 = \frac{1,325}{\left(\ln\left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_2^{0,9}}\right)\right)^2} = 0,0184$$

$$H_{\text{man},1} = 5 \text{ m} + \left(\frac{3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{\rho g}\right)_{\text{naselje}} + 0,0184 \frac{4700}{0,25} \frac{0,61^2}{2g} = \mathbf{47,23 \text{ m}}$$

Varijanta 2

Crpka u ovoj varijanti radi s protokom 3 puta većim od protoka iz Varijante 1. Budući da situacija zahtijeva da se tijekom 16 h (kada crpka ne radi) naselje opskrbljuje vodom iz vodospreme, tu istu vodospremu je potrebno napuniti za 8 h. Za isti volumen vode crpka mora tlačiti dvostruko veći protok prema vodospremi u odnosu na onaj koji otječe iz vodospreme (kada crpka ne radi, a naselje se opskrbljuje iz vodospreme). Također, opskrba vodom naselja ne smije stati pa jedna trećina ukupnog protoka kojeg crpka tlači prolazi kroz cijev L_2 prema naselju (naselje zahtijeva konstantnu opskrbu vodom tijekom dana u iznosu od 30 l/s).

Jednadžba očuvanja energije između vodozahvata i vodospreme:

$$H_{\text{man},2} = H + \lambda_1 \frac{L_1}{D} \frac{v_1^2}{2g}$$

$$v_1 = \frac{Q}{A} = \frac{60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{0,049 \text{ m}^2} = 1,22 \text{ m/s}$$

$$Re_1 = \frac{v_1 D}{\nu} = \frac{1,22 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 190625$$

$$\lambda_1 = \frac{1,325}{\left(\ln\left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re_1^{0,9}}\right)\right)^2} = 0,0162$$

$$H_{\text{man},2} = 45 + 0,0162 \frac{2500}{0,25} \frac{1,22^2}{2g} = \mathbf{57,29 \text{ m}}$$

Vrijednost tlaka ispred naselja u slučaju Varijante 2:

Tijekom 16 h opskrbe iz vodospreme:

$$H = z_{\text{naselje}} + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\text{naselje}} + \lambda_3 \frac{L_3}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 = 0,0184$$

$$p_{\text{naselje}} = \rho g \left(H - z_{\text{naselje}} - \lambda_3 \frac{L_3}{D} \frac{v^2}{2g} \right) = 3,568 \text{ bara}$$

Tijekom 8 h opskrbe iz vodozahvata:

$$H_{\text{man},2} = z_{\text{naselje}} + \left(\frac{p}{\rho g}\right)_{\text{naselje}} + \lambda_2 \frac{L_2}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$p_{\text{naselje}} = \rho g \left(H_{\text{man},2} - z_{\text{naselje}} - \lambda_2 \frac{L_2}{D} \frac{v^2}{2g} \right) = 4,48 \text{ bara}$$

Relativna ušteda u troškovima pogona odredit će se iz odnosa uložениh snaga crpki pomnoženih s relativnom cijenom električne energije:

$$\eta = \frac{H_{\text{man},2}(3 \cdot Q \cdot 8 \cdot 0,65)}{H_{\text{man},1} \cdot Q(16 + 8 \cdot 0,65)} = \frac{26,81}{30,04} = 0,892$$

Iz rezultata je vidljivo da ušteda u Varijanti 2 iznosi oko 10,8 %. Također, vidljivo je da tlak ispred naselja u Varijanti 2 oscilira tijekom dana (od 3,568 bara do 4,48 bara) u odnosu na Varijantu 1 gdje je on konstantan. Postavlja se pitanje isplativosti uključivanja vodospreme u vodoopskrbni sustav s obzirom na malu vrijednost uštede, ali i neravnomjernost pritiska u cjevovodu tijekom dana. Kako bi se došlo do konačnog odgovora potrebno je izvršiti daljnje analize te odrediti vrijednost investicijskih troškova izgradnje obje varijante te ih usporediti s troškovima pogona i održavanja sustava za planirani projektni period. Tek nakon tako provedene cjelovite analize može se donijeti konačna odluka o odabiru optimalne opskrbe vodom naselja.

V

VODOSPROME

Ukupan volumen vodospreme sastoji se od tri dijela:

- 1) operativni ili koristan volumen – potreban za izravnavanje razlike dotoka vode s izvorišta (vodozahvata) ili uređaja za kondicioniranje i potrošnje naselja
- 2) protupožarni volumen – potreban za skladištenje vode za gašenje požara, određuje se prema *Pravilniku o hidrantskoj mreži za gašenje požara*
- 3) sigurnosni volumen – u slučaju nestanka struje, nemogućnosti crpljenja vode s izvorišta (vodozahvata), kvarova na cjevovodu, preporuča se uzeti kao vrijednost 20-25 % zbroja operativnog i protupožarnog volumena.

Postupak proračuna operativnog volumena provodi se za dan s maksimalnom potrošnjom vode $Q_{\max, \text{dn}}$. Proračun se svodi na rješavanje jednadžbe kontinuiteta (jednadžba očuvanja mase, jednadžba bilance vode):

$$Q_{\text{dot}} - Q_{\text{pot}} = \frac{dV}{dt}$$

gdje je Q_{dot} protok vode koja dolazi s izvorišta i puni vodospremu, a Q_{pot} protok vode koji izlazi iz vodospreme (jednak potrošnji vode u naselju).

Ako se protoci na ulazu i izlazu iz vodospreme promatraju u sukcesivnim intervalima Δt diferencijalna jednadžba se može predstaviti u diferencijalnoj formi:

$$\overline{Q_{\text{dot}}} - \overline{Q_{\text{pot}}} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Vodosprema se koristi za dnevno izravnavanje dotoka i potrošnje te je promatrani period pri dimenzioniranju jedan dan. Drugim riječima, sve što doteče u vodospremu tijekom dana, treba i isteći, tj. potrošiti se. Proračun se provodi u intervalima od 1 h, a najpreglednije ga je raditi tablično. Prvo se rješava bilanca vode po zasebnim intervalima tijekom cijelog dana, tj. određuje se suficit ili deficit vode (višak ili manjak) u vodospremi po intervalima. Nakon toga, proračunava se sumarna promjena volumena vode u vodospremi. U proračunu sumarne promjene volumena vode u vodospremi potrebno je pretpostaviti početni volumen vode u vodospremi. Obično se usvaja pretpostavka da je vodosprema na početku bila prazna te se stoga u proračunu sumarne promjene može pojaviti i negativna vrijednost volumena. Operativni volumen vodospreme predstavlja razliku između najviše i najniže vrijednosti volumena vode u vodospremi:

$$V_O = V_{\max} - |V_{\min}|$$

Proračun je ispravan ako se na kraju promatranog razdoblja dobije vrijednost volumena vode u vodospremi kao i na početku. Drugim riječima, ukoliko se pretpostavi $V_0 = 0 \text{ m}^3$, onda treba biti i $V_{24} = 0 \text{ m}^3$.

Zadatak 5.1 Određivanje operativnog volumena vodospreme

Potrebno je odrediti operativan volumen vodospreme ako su zadani koeficijenti satne neravnomjernosti potrošnje vode stanovnika u naselju (**Tablica 5.1**). Također, poznata je i maksimalna dnevna potrošnja vode stanovnika koja iznosi $Q_{\max, \text{dn}} = 15\,552 \text{ m}^3/\text{dan}$.

Potrebno je provesti proračun operativnog volumena za sljedeće slučajeve:

- a) dotok vode s izvorišta je konstantan i nepromjenjiv tijekom dana
- b) voda s izvorišta dotječe u periodu od 22h do 10h
- c) voda s izvorišta dotječe u periodu od 10h do 22h
- d) kao pod a) ali se u naselju nalazi industrija čija godišnja potrošnja vode iznosi 15 l/s, a koeficijenti neravnomjernosti su dani u Tablici 5.2.

Tablica 5.1 Koeficijenti satne neravnomjernosti k_h potrošnje vode stanovnika u naselju

Period [h]	k_h [-]	Period [h]	k_h [-]
0-1	0,40	12-13	1,25
1-2	0,20	13-14	1,15
2-3	0,15	14-15	1,25
3-4	0,20	15-16	1,40
4-5	0,70	16-17	1,30
5-6	1,10	17-18	1,35
6-7	1,40	18-19	1,40
7-8	1,60	19-20	1,45
8-9	1,20	20-21	1,35
9-10	1,15	21-22	0,80
10-11	1,10	22-23	0,65
11-12	0,80	23-24	0,65

Tablica 5.2 Koeficijenti satne neravnomjernosti k_h potrošnje vode za industriju

Period [h]	k_h [-]
0-5	0,5
5-15	1,6
15-19	0,5
19-24	0,7

Rješenje:

a) dotok vode s izvorišta je konstantan i nepromjenjiv tijekom dana

U **Tablici 5.3.** prikazan je proračun operativnog volumena vodospreme. Dotok u vodospremu je konstantan i iznosi:

$$Q_{\text{dot}} = \frac{Q_{\max, \text{dn}}}{24 \text{ h}} = 648 \text{ m}^3/\text{h} = 180 \text{ l/s}$$

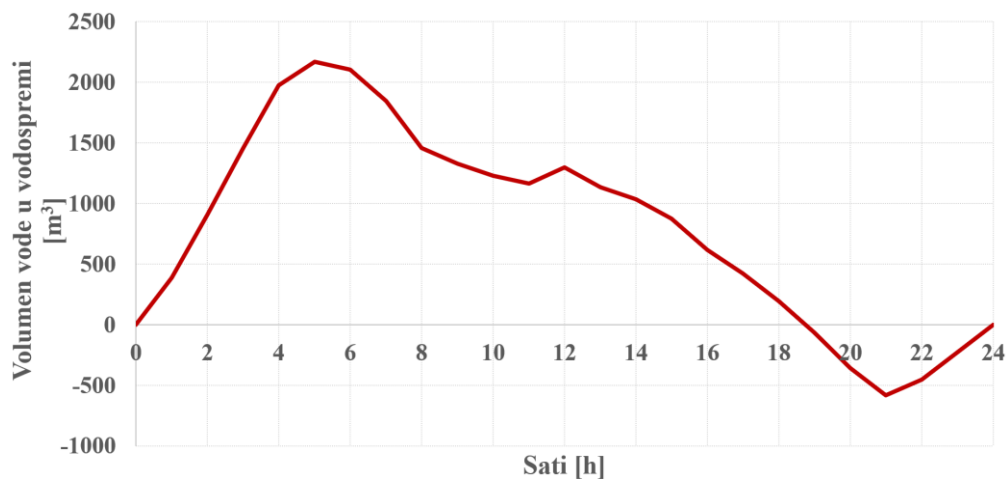
Potrošnja vode u pojedinom intervalu računa se kao umnožak koeficijenta satne neravnomjernosti i prosječne potrošnje u danu s najvećom potrošnjom:

$$Q_{\text{pot}, i} = k_h \cdot Q_{\max, \text{dn}} = k_h \cdot 648 \text{ m}^3/\text{h} = k_h \cdot 180 \text{ l/s}$$

Tablica 5.3 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj konstantnog dotoka

Period [h]	k_h [-]	Potrošnja Q_{pot} [l/s]	Volumen potrošnje V_{pot} [m ³]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]
0-1	0,40	72	259,2	648	388,8	388,8
1-2	0,20	36	129,6	648	518,4	907,2
2-3	0,15	27	97,2	648	550,8	1458
3-4	0,20	36	129,6	648	518,4	1976,4
4-5	0,70	126	453,6	648	194,4	2170,8
5-6	1,10	198	712,8	648	-64,8	2106
6-7	1,40	252	907,2	648	-259,2	1846,8
7-8	1,60	288	1036,8	648	-388,8	1458
8-9	1,20	216	777,6	648	-129,6	1328,4
9-10	1,15	207	745,2	648	-97,2	1231,2
10-11	1,10	198	712,8	648	-64,8	1166,4
11-12	0,80	144	518,4	648	129,6	1296
12-13	1,25	225	810	648	-162	1134
13-14	1,15	207	745,2	648	-97,2	1036,8
14-15	1,25	225	810	648	-162	874,8
15-16	1,40	252	907,2	648	-259,2	615,6
16-17	1,30	234	842,4	648	-194,4	421,2
17-18	1,35	243	874,8	648	-226,8	194,4
18-19	1,40	252	907,2	648	-259,2	-64,8
19-20	1,45	261	939,6	648	-291,6	-356,4
20-21	1,35	243	874,8	648	-226,8	-583,2
21-22	0,80	144	518,4	648	129,6	-453,6
22-23	0,65	117	421,2	648	226,8	-226,8
23-24	0,65	117	421,2	648	226,8	0
		$Q_{sr} = 180$ l/s	$\Sigma 15552$ m ³	$\Sigma 15552$ m ³		

Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi tijekom dana prikazana je na **Slici 4.1**.

**Slika 5.1** Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi

Operativni volumen vodospreme iznosi:

$$V_0 = 2170,80 \text{ m}^3 + |-583,2 \text{ m}^3| = \mathbf{2754 \text{ m}^3}$$

b) voda s izvorišta dotječe u periodu od 22h do 10h

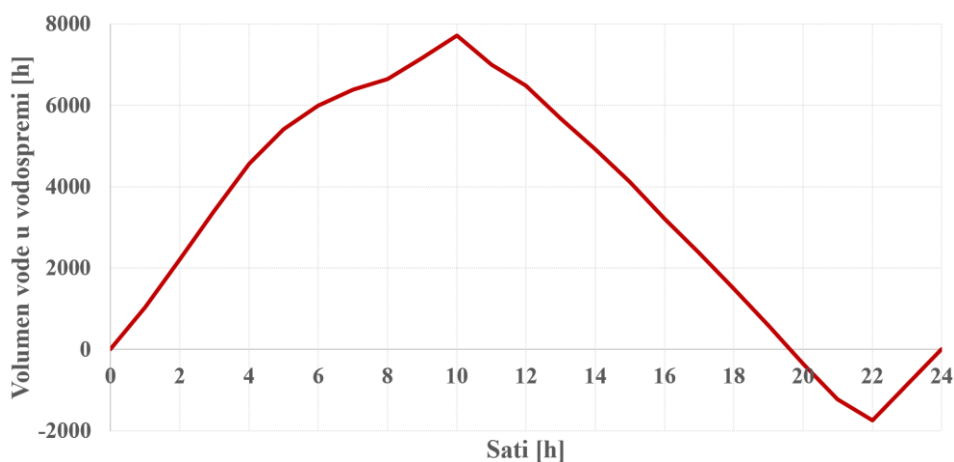
U **Tablici 5.4.** prikazan je proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj dotoka u vodospremu tijekom 12 h (22 h -10 h). Dotok u tom periodu iznosi:

$$Q_{\text{dot}} = \frac{Q_{\text{max,dn}}}{12 \text{ h}} = 1296 \text{ m}^3/\text{h} = 360 \text{ l/s}$$

Tablica 5.4 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj dotoka od 22 h do 10 h

Period [h]	k_h [-]	Potrošnja Q_{pot} [l/s]	Volumen potrošnje V_{pot} [m ³]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]
0-1	0,40	72	259,2	1296	1036,8	1036,8
1-2	0,20	36	129,6	1296	1166,4	2203,2
2-3	0,15	27	97,2	1296	1198,8	3402
3-4	0,20	36	129,6	1296	1166,4	4568,4
4-5	0,70	126	453,6	1296	842,4	5410,8
5-6	1,10	198	712,8	1296	583,2	5994
6-7	1,40	252	907,2	1296	388,8	6382,8
7-8	1,60	288	1036,8	1296	259,2	6642
8-9	1,20	216	777,6	1296	518,4	7160,4
9-10	1,15	207	745,2	1296	550,8	7711,2
10-11	1,10	198	712,8	0	-712,8	6998,4
11-12	0,80	144	518,4	0	-518,4	6480
12-13	1,25	225	810	0	-810	5670
13-14	1,15	207	745,2	0	-745,2	4924,8
14-15	1,25	225	810	0	-810	4114,8
15-16	1,40	252	907,2	0	-907,2	3207,6
16-17	1,30	234	842,4	0	-842,4	2365,2
17-18	1,35	243	874,8	0	-874,8	1490,4
18-19	1,40	252	907,2	0	-907,2	583,2
19-20	1,45	261	939,6	0	-939,6	-356,4
20-21	1,35	243	874,8	0	-874,8	-1231,2
21-22	0,80	144	518,4	0	-518,4	-1749,6
22-23	0,65	117	421,2	1296	874,8	-874,8
23-24	0,65	117	421,2	1296	874,8	0
		$Q_{\text{sr}} = 180 \text{ l/s}$	$\Sigma 15552 \text{ m}^3$	$\Sigma 15552 \text{ m}^3$		

Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi tijekom dana prikazana je na **Slici 5.2.**



Slika 5.2 Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi

Operativni volumen vodospreme iznosi:

$$V_0 = 7711,2 \text{ m}^3 + |-1749,6 \text{ m}^3| = \mathbf{9460,80 \text{ m}^3}$$

c) voda s izvorišta dotječe u periodu od 10h do 22h

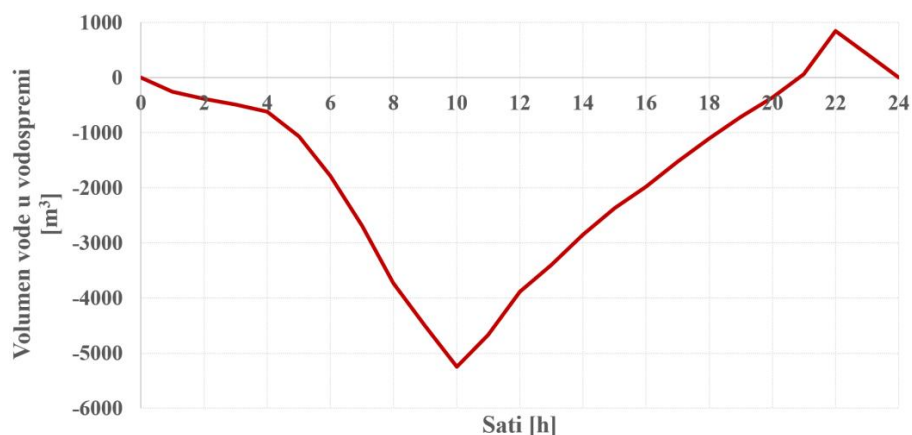
U **Tablici 5.5.** prikazan je proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj dotoka u vodospremu tijekom 12 h (10 h – 22 h). Dotok u tom periodu iznosi:

$$Q_{\text{dot}} = \frac{Q_{\text{max,dn}}}{12 \text{ h}} = 1296 \text{ m}^3/\text{h} = 360 \text{ l/s}$$

Tablica 5.5 Proračun operativnog volumena vodospreme za dotoka od 10 h do 22 h

Period [h]	k_h [-]	Potrošnja Q_{pot} [l/s]	Volumen potrošnje V_{pot} [m ³]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]
0-1	0,40	72	259,2	0	-259,2	-259,2
1-2	0,20	36	129,6	0	-129,6	-388,8
2-3	0,15	27	97,2	0	-97,2	-486
3-4	0,20	36	129,6	0	-129,6	-615,6
4-5	0,70	126	453,6	0	-453,6	-1069,2
5-6	1,10	198	712,8	0	-712,8	-1782
6-7	1,40	252	907,2	0	-907,2	-2689,2
7-8	1,60	288	1036,8	0	-1036,8	-3726
8-9	1,20	216	777,6	0	-777,6	-4503,6
9-10	1,15	207	745,2	0	-745,2	-5248,8
10-11	1,10	198	712,8	1296	583,2	-4665,6
11-12	0,80	144	518,4	1296	777,6	-3888
12-13	1,25	225	810	1296	486	-3402
13-14	1,15	207	745,2	1296	550,8	-2851,2
14-15	1,25	225	810	1296	486	-2365,2
15-16	1,40	252	907,2	1296	388,8	-1976,4
16-17	1,30	234	842,4	1296	453,6	-1522,8
17-18	1,35	243	874,8	1296	421,2	-1101,6
18-19	1,40	252	907,2	1296	388,8	-712,8
19-20	1,45	261	939,6	1296	356,4	-356,4
20-21	1,35	243	874,8	1296	421,2	64,8
21-22	0,80	144	518,4	1296	777,6	842,4
22-23	0,65	117	421,2	0	-421,2	421,2
23-24	0,65	117	421,2	0	-421,2	0
		$Q_{\text{sr}} = 180 \text{ l/s}$	$\Sigma 15552 \text{ m}^3$	$\Sigma 15552 \text{ m}^3$		

Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi tijekom dana prikazana je na **Slici 5.3.**

**Slika 5.3** Sumarna krivulja promjene volumena vode u vodospremi

Operativni volumen vodospreme iznosi:

$$V_0 = 842,4 \text{ m}^3 + |-5248,8 \text{ m}^3| = \mathbf{6091,2 \text{ m}^3}$$

U **Tablici 5.6** prikazane su vrijednosti operativnog volumena vodospreme prema analiziranim varijantama a), b) i c). Najmanji volumen ostvaren je u slučaju konstantnog dotoka vode u vodospremu. U varijantama kada je dotok uvjetovan vremenom rada crpke, manja vrijednost volumena vodospreme dobivena je kada se dotok u vodospremu uskladi s vremenom veće potrošnje vode u naselju. U noćnim satima potrošnja vode u naselju nije velika i vodosprema se puni. Tako se u varijanti b) u noćnim satima „skladišti“ voda koja će se potrošiti tijekom dana. U varijanti c) dotok je usklađen s vremenom veće potrošnje vode u naselju i potreba za „skladištenjem“ vode je manja pa je stoga i dobiven operativni volumen manji.

Tablica 5.6 Vrijednosti operativnog volumena vodospreme prema analiziranim varijantama

Varijanta	Vrijeme dotoka [od - do]	V_o [m ³]
a)	0 h – 24 h	2754
b)	22 h – 10 h	9460,8
c)	10 h – 22 h	6091,2

d) dotok vode s izvorišta je konstantan i nepromjenjiv tijekom dana; u naselju se nalazi industrija čija godišnja potrošnja vode iznosi 15 l/s

$$Q_{\text{ind}} = 15 \text{ l/s} = 1296 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Proračun potrošnje vode za industriju po satima prikazana je u **Tablici 5.7**.

Tablica 5.7 Proračun satne potrošnje u industriji

Period [h]	k_h [-]	Potrošnja $Q_{\text{pot, ind}}$ [l/s]	Volumen potrošnje $V_{\text{pot, ind}}$ [m ³]	Period [h]	k_h [-]	Potrošnja $Q_{\text{pot, ind}}$ [l/s]	Volumen potrošnje $V_{\text{pot, ind}}$ [m ³]
0-1	0,5	7,5	27	12-13	1,6	24	86,4
1-2	0,5	7,5	27	13-14	1,6	24	86,4
2-3	0,5	7,5	27	14-15	1,6	24	86,4
3-4	0,5	7,5	27	15-16	0,5	7,5	27
4-5	0,5	7,5	27	16-17	0,5	7,5	27
5-6	1,6	24	86,4	17-18	0,5	7,5	27
6-7	1,6	24	86,4	18-19	0,5	7,5	27
7-8	1,6	24	86,4	19-20	0,7	10,5	37,8
8-9	1,6	24	86,4	20-21	0,7	10,5	37,8
9-10	1,6	24	86,4	21-22	0,7	10,5	37,8
10-11	1,6	24	86,4	22-23	0,7	10,5	37,8
11-12	1,6	24	86,4	23-24	0,7	10,5	37,8
						$Q_{\text{sr}} = 15 \text{ l/s}$	$\Sigma 1296 \text{ m}^3$

Maksimalna dnevna ukupna potrošnja vode u naselju iznosi:

$$Q_{\text{max,dn,uk}} = Q_{\text{max,dn,st}} + Q_{\text{ind}} = 15552 \text{ m}^3/\text{dan} + 1296 \text{ m}^3/\text{dan} = 16848 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Dotok u vodospremu u tom slučaju iznosi:

$$Q_{\text{dot}} = \frac{Q_{\text{max,dn,uk}}}{24 \text{ h}} = 702 \text{ m}^3/\text{h}$$

U **Tablici 5.8** prikazan je proračun operativnog volumena vodospreme.

Tablica 5.8 Proračun operativnog volumena vodospreme za slučaj konstantnog dotoka

Period [h]	Potrošnja			Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/ manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]
	Stanovništvo [m ³]	Industrija [m ³]	Ukupno V_{pot} [m ³]			
0-1	259,2	27	286,2	702	415,8	415,8
1-2	129,6	27	156,6	702	545,4	961,2
2-3	97,2	27	124,2	702	577,8	1539
3-4	129,6	27	156,6	702	545,4	2084,4
4-5	453,6	27	480,6	702	221,4	2305,8
5-6	712,8	86,4	799,2	702	-97,2	2208,6
6-7	907,2	86,4	993,6	702	-291,6	1917
7-8	1036,8	86,4	1123,2	702	-421,2	1495,8
8-9	777,6	86,4	864	702	-162	1333,8
9-10	745,2	86,4	831,6	702	-129,6	1204,2
10-11	712,8	86,4	799,2	702	-97,2	1107
11-12	518,4	86,4	604,8	702	97,2	1204,2
12-13	810	86,4	896,4	702	-194,4	1009,8
13-14	745,2	86,4	831,6	702	-129,6	880,2
14-15	810	86,4	896,4	702	-194,4	685,8
15-16	907,2	27	934,2	702	-232,2	453,6
16-17	842,4	27	869,4	702	-167,4	286,2
17-18	874,8	27	901,8	702	-199,8	86,4
18-19	907,2	27	934,2	702	-232,2	-145,8
19-20	939,6	37,8	977,4	702	-275,4	-421,2
20-21	874,8	37,8	912,6	702	-210,6	-631,8
21-22	518,4	37,8	556,2	702	145,8	-486
22-23	421,2	37,8	459	702	243	-243
23-24	421,2	37,8	459	702	243	0
Σ	15552	1296	16848	16848		

Operativni volumen vodospreme iznosi:

$$V_0 = 2305,8 \text{ m}^3 + |-631,8 \text{ m}^3| = \mathbf{2937,6 \text{ m}^3}$$

Zadatak 5.2 Određivanje parametara potrošnje vode preko analiziranog rada vodospreme

Voda se iz uređaja za kondicioniranje preko crpne stanice CS1 transportira prema vodospremi. Na glavnom, tlačnom cjevovodu, nema priključaka. Unutar crpne stanice CS1 instalirane su dvije crpke. Od ponoći do 6 sati ujutro radi samo jedna crpka s protokom od 30 l/s, dok u ostalom dijelu dana rade obje crpke s ukupnim protokom od 35 l/s. Iz vodospreme se opskrbljuje naselje koje broji 12 tisuća stanovnika. Kako bi se odredila potrošnja vode u naselju tijekom dana, izvršena su mjerenja dubina vode, h_v , u vodospremi pravokutnog oblika (**Tablica 5.9**). Operativan (koristan) volumen vodospreme iznosi 875 m^3 pri maksimalnoj dubini vode od 3,5 m.

Potrebno je odrediti:

- dijagram koeficijenta satne neravnomjernosti potrošnje vode tijekom analiziranog dana
- maksimalnu satnu potrošnju
- specifičnu potrošnju vode, ako se zna da je u danu kada su izvršena mjerenja razine vode u vodospremi, prosječna potrošnja bila 45 % veća od prosječne godišnje potrošnje

Tablica 5.9 Izmjerene vrijednosti dubine vode h_v u vodospremi tijekom dana

Vrijeme [h]	h_v [m]	Vrijeme [h]	h_v [m]
0	2,1	12	2
1	2,5	13	1,8
2	2,8	14	1,5
3	3,1	15	1,15
4	3,25	16	0,9
5	3,5	17	1
6	3,3	18	1,2
7	3,1	19	1,4
8	2,7	20	1,5
9	2,45	21	1,52
10	2,1	22	1,68
11	2	23	1,92
		24	2,1

Rješenje:

Za razliku od **Zadatka 5.1**, u ovom su oscilacije razine i volumena vode tijekom dana u vodospremi poznate. Cilj je odrediti potrošnju po satima i na temelju toga dobiti vrijednosti koeficijenta satne neravnomjernosti.

$$\overline{Q}_{\text{pot}} = \overline{Q}_{\text{dot}} - \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$V_{\text{pot}} = V_{\text{dot}} - \Delta V$$

Poznat je volumen vode u vodospremi (875 m^3) pri maksimalnoj razini vode (3,5 m). Prema tome, efektivna površina vodospreme iznosi:

$$A_v = \frac{V_{\text{max}}}{h_{\text{max}}} = \frac{875 \text{ m}^3}{3,5 \text{ m}} = 250 \text{ m}^2$$

Proračun potrošnje vode u naselju proveden je u **Tablici 5.10**.

Tablica 5.10 Proračun potrošnje vode u naselju

Vrijeme [h]	h_v [m]	Volumen vode [m ³]	Period [h]	Promjena volumena ΔV [m ³]	Dotok Q_{dot} [l/s]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Potrošnja vode V_{pot} [m ³]
0	2,1	525					
1	2,5	625	0-1	100	30	108	8
2	2,8	700	1-2	75	30	108	33
3	3,1	775	2-3	75	30	108	33
4	3,25	812,5	3-4	37,5	30	108	70,5
5	3,5	875	4-5	62,5	30	108	45,5
6	3,3	825	5-6	-50	30	108	158
7	3,1	775	6-7	-50	35	126	176
8	2,7	675	7-8	-100	35	126	226
9	2,45	612,5	8-9	-62,5	35	126	188,5
10	2,1	525	9-10	-87,5	35	126	213,5
11	2	500	10-11	-25	35	126	151
12	2	500	11-12	0	35	126	126
13	1,8	450	12-13	-50	35	126	176
14	1,5	375	13-14	-75	35	126	201
15	1,15	287,5	14-15	-87,5	35	126	213,5
16	0,9	225	15-16	-62,5	35	126	188,5
17	1	250	16-17	25	35	126	101
18	1,2	300	17-18	50	35	126	76
19	1,4	350	18-19	50	35	126	76
20	1,5	375	19-20	25	35	126	101
21	1,52	380	20-21	5	35	126	121
22	1,68	420	21-22	40	35	126	86
23	1,92	480	22-23	60	35	126	66
24	2,1	525	23-24	45	35	126	81
							Σ2916 m³

a) dijagram koeficijenta satne neravnomjernost potrošnje vode tijekom analiziranog dana

Ukupna dnevna potrošnja naselja iznosi 2916 m³. Prosječan protok prema tome iznosi:

$$Q_{sr,dn} = \frac{Q_{dn}}{24 \text{ h}} = \frac{2916 \text{ m}^3}{24 \text{ h}} = 121,5 \text{ m}^3/\text{h} = 33,8 \text{ l/s}$$

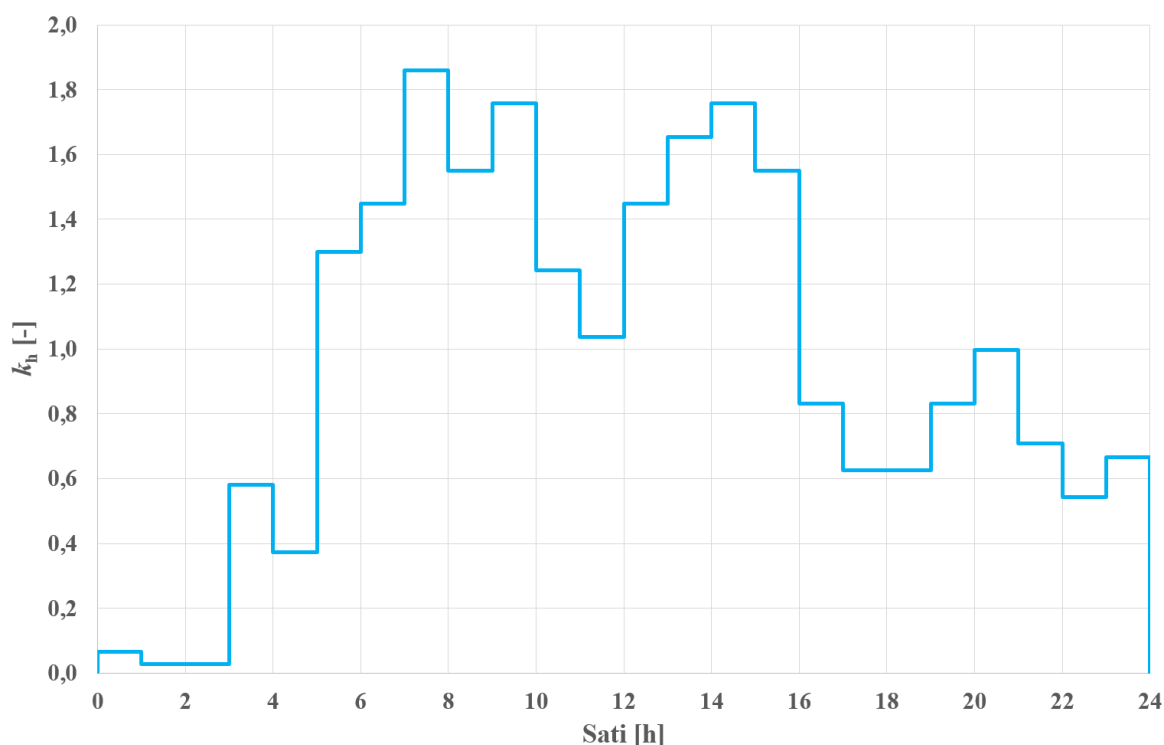
Koeficijenti neravnomjernosti odredit će se kao odnos:

$$k_h = \frac{Q_i}{Q_{sr,dn}}$$

Proračun koeficijenata satne neravnomjernosti prikazani su u **Tablici 5.11**.

Tablica 5.11 Proračun koeficijenta satne neravnomjernosti potrošnje vode

Period [h]	Potrošnja vode $V_{\text{pot}} [\text{m}^3]$	k_h [-]	Period [h]	Potrošnja vode $V_{\text{pot}} [\text{m}^3]$	k_h [-]
0-1	8	0,066	12-13	176	1,449
1-2	33	0,272	13-14	201	1,654
2-3	33	0,272	14-15	213,5	1,757
3-4	70,5	0,580	15-16	188,5	1,551
4-5	45,5	0,374	16-17	101	0,831
5-6	158	1,300	17-18	76	0,626
6-7	176	1,449	18-19	76	0,626
7-8	226	1,860	19-20	101	0,831
8-9	188,5	1,551	20-21	121	0,996
9-10	213,5	1,757	21-22	86	0,708
10-11	151	1,243	22-23	66	0,543
11-12	126	1,037	23-24	81	0,667

**Slika 5.4** Koeficijenti satne neravnomjernosti potrošnje vode**b) maksimalna satna potrošnja**

Prema rezultatima iz **Tablice 5.10** maksimalna potrošnja javlja se u periodu između 7 i 8 sati i iznosi 226 m³/h, tj. 62,78 l/s. Maksimalni koeficijent satne neravnomjernosti iznosi $k_{\text{max,h}} = 1,86$.

c) specifična potrošnja vode

Prosječna potrošnja u analiziranom danu bila je 45 % veća od prosječne godišnje potrošnje:

$$Q_{\text{sr,dn,god}} = \frac{Q_{\text{sr,dn}}}{1,45} = \frac{2916 \text{ m}^3/\text{dan}}{1,45} = 2011,03 \text{ m}^3/\text{dan} = 83,79 \text{ m}^3/\text{h} = 23,28 \text{ l/s}$$

$$q_{\text{sp}} = \frac{Q_{\text{sr,dn,god}}}{M} = \frac{2011,03 \text{ m}^3/\text{dan} \cdot 1000}{12000} = \mathbf{167,59 \text{ l/stanovnik/dan}}$$

Zadatak 5.3 Dimenzioniranje vodospreme za zadani režim rada industrijskog postrojenja

Voda se s izvorišta preko crpne stanice transportira prema vodospremi konstantno tijekom perioda od 8 sati. Vodosprema služi za dnevno izravnanje dotoka i potrošnje vode za potrebe industrijskog postrojenja. Zahtijevana potrošnja vode za potrebe industrije prikazana je u **Tablici 5.12**.

Tablica 5.12 Potrošnja vode za industriju tijekom dana

Period [h]	Potrošnja vode [l/s]
6-11	250
11-13	280
13-16	220
16-20	150

Potrebno je odrediti:

- osmosatni (konstantan) period rada crpne stanice koji će osigurati minimalni volumen vodospreme
- nivogram u vodospremi u tijeku dana za usvojeni volumen vodospreme (pretpostaviti da je vodosprema cilindričnog oblika s korisnom visinom H jednakom $1/4$ promjera D).

Rješenje:

a) osmosatni (konstantan) period rada crpne stanice

Ukupna potrošnja industrije iznosi:

$$V_{\text{pot}} = (5 \text{ h} \cdot 0,25 \text{ m}^3/\text{s} + 2 \text{ h} \cdot 0,28 \text{ m}^3/\text{s} + 3 \text{ h} \cdot 0,22 \text{ m}^3/\text{s} + 4 \text{ h} \cdot 0,15 \text{ m}^3/\text{s}) \cdot 3600 \text{ s} = 11052 \text{ m}^3$$

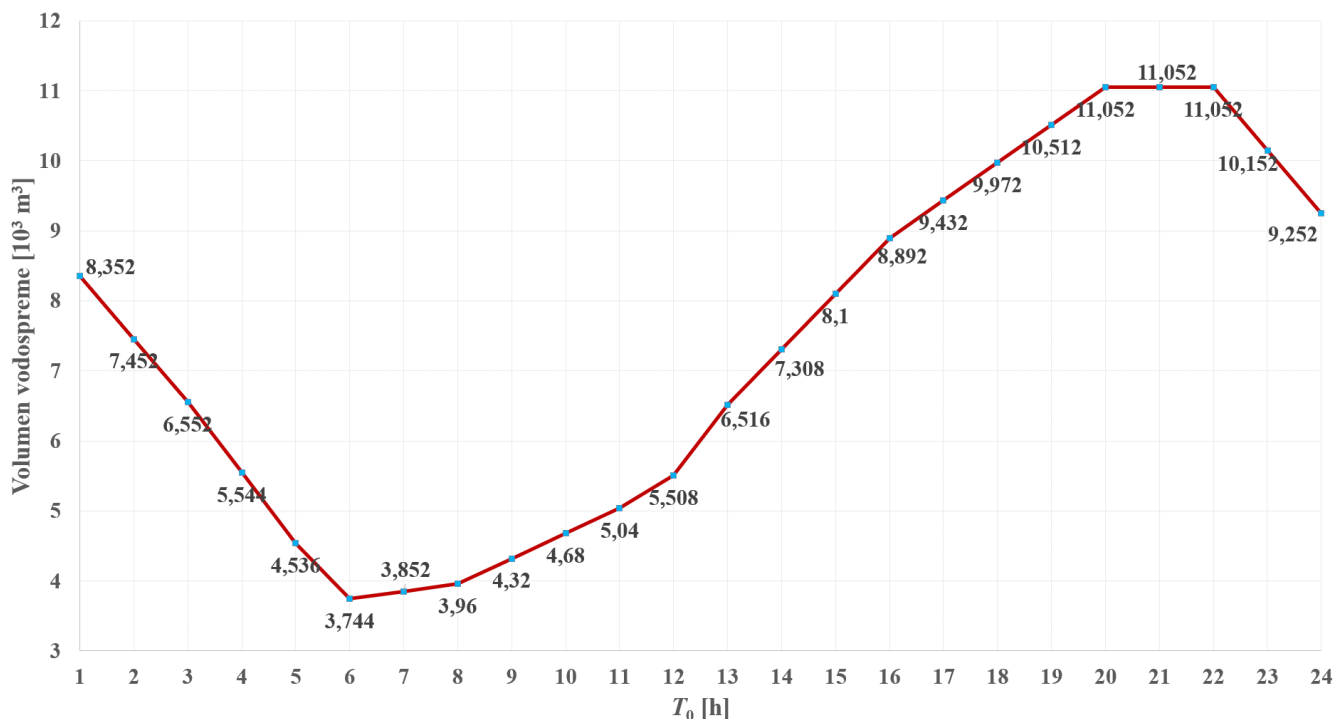
Crpna stanica radi 8 sati i protok tijekom tog perioda iznosi:

$$Q_{\text{CR}} = V_{\text{dot}} = \frac{V_{\text{pot}}}{T_{\text{CR}}} = \frac{11052 \text{ m}^3}{8 \text{ h}} = 1381,5 \text{ m}^3/\text{h} = 383,75 \text{ l/s}$$

U **Tablici 5.13** prikazan je proračun volumena vodospreme u zavisnosti od početka rada crpne stanice i to za vremena $T_0 = 5, 6$ i 20 h. Na isti način proračunate su i ostale varijante. Odnos početka rada crpne stanice i volumena vodospreme prikazani su na **Slici 5.5**. Najmanji volumen vodospreme (3744 m^3) dobiven je za slučaj kada crpna stanica počinje s radom u $T_0 = 6$ h i radi do 14 h. Iz rezultata sa **Slike 5.5** vidljivo je da je, generalno, manji volumen vodospreme dobiven kada se vrijeme rada crpne stanice uskladi s vremenom potrošnje vode u industrijskom postrojenju. Najveći volumen vodospreme ($11\,052 \text{ m}^3$) dobiven je u varijantama $T_0 = 20, 21$ i 22 h. U tim slučajevima crpna stanica radi kada u industrijskom postrojenju nema potrošnje te je tada volumen vodospreme jednak ukupnoj dnevnoj potrošnji vode industrijskog postrojenja. Ako bi jedini kriterij za odabir rješenja bio volumen vodospreme, tada bi se usvojila varijanta kada crpna stanica počinje s radom u $T_0 = 6$ h. Prilikom odabira optimalne varijante u obzir treba uzeti i godišnju potrošnju energije i cijenu održavanja vodospreme. Iz tog razloga potrebno je provesti financijsku analizu godišnje potrošnje električne energije prilikom dnevnog i noćnog rada crpne stanice. Uzme li se u obzir da je cijena električne energije znatno jeftinija u noćnim satima, postoji vjerojatnost da će se varijante $T_0 = 22, 23$ ili 24 h pokazati financijski prihvatljivije.

Tablica 5.13 Proračun volumena vodospreme za vrijeme početka rada crpne stanice $T_0 = 5, 6$ i 20 h

Period [h]	Volumen potrošnje V_{pot} [m ³]	$T_0 = 5$ h			$T_0 = 6$ h			$T_0 = 20$ h		
		Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]	Volumen dotoka V_{dot} [m ³]	Višak/manjak ΔV [m ³]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V$ [m ³]
0-1	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	1381,5
1-2	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	2763
2-3	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	4144,5
3-4	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	5526
4-5	0		0	0		0	0		0	5526
5-6	0	1381,5	1381,5	1381,5		0	0		0	5526
6-7	900	1381,5	481,5	1863	1381,5	481,5	481,5		-900	4626
7-8	900	1381,5	481,5	2344,5	1381,5	481,5	963		-900	3726
8-9	900	1381,5	481,5	2826	1381,5	481,5	1444,5		-900	2826
9-10	900	1381,5	481,5	3307,5	1381,5	481,5	1926		-900	1926
10-11	900	1381,5	481,5	3789	1381,5	481,5	2407,5		-900	1026
11-12	1008	1381,5	373,5	4162,5	1381,5	373,5	2781		-1008	18
12-13	1008	1381,5	373,5	4536	1381,5	373,5	3154,5		-1008	-990
13-14	792		-792	3744	1381,5	589,5	3744		-792	-1782
14-15	792		-792	2952		-792	2952		-792	-2574
15-16	792		-792	2160		-792	2160		-792	-3366
16-17	540		-540	1620		-540	1620		-540	-3906
17-18	540		-540	1080		-540	1080		-540	-4446
18-19	540		-540	540		-540	540		-540	-4986
19-20	540		-540	0		-540	0		-540	-5526
20-21	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	-4144,5
21-22	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	-2763
22-23	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	-1381,5
23-24	0		0	0		0	0	1381,5	1381,5	0
$V_V = 4536 \text{ m}^3$				$V_V = 3744 \text{ m}^3$				$V_V = 11\,052 \text{ m}^3$		



Slika 5.5 Odnos početka rada crpne stanice i volumena vodospreme

b) nivogram u vodospremi

Određen je nivogram (promjene razine vode u vremenu) u vodospremi za operativni volumen vodospreme dobiven pod a) koji iznosi $V_V = 3744 \text{ m}^3$ ($T_0 = 6 \text{ h}$). Prema uvjetima zadatka vodosprema je cilindričnog oblika gdje je $D = 4 H$ pa prema tome slijedi da je maksimalna visina vode H u vodospremi:

$$V_V = 3744 \text{ m}^3 = A_V \cdot H = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot H = \frac{16 H^2 \pi}{4} \cdot H$$

$$H = 6,68 \text{ m}$$

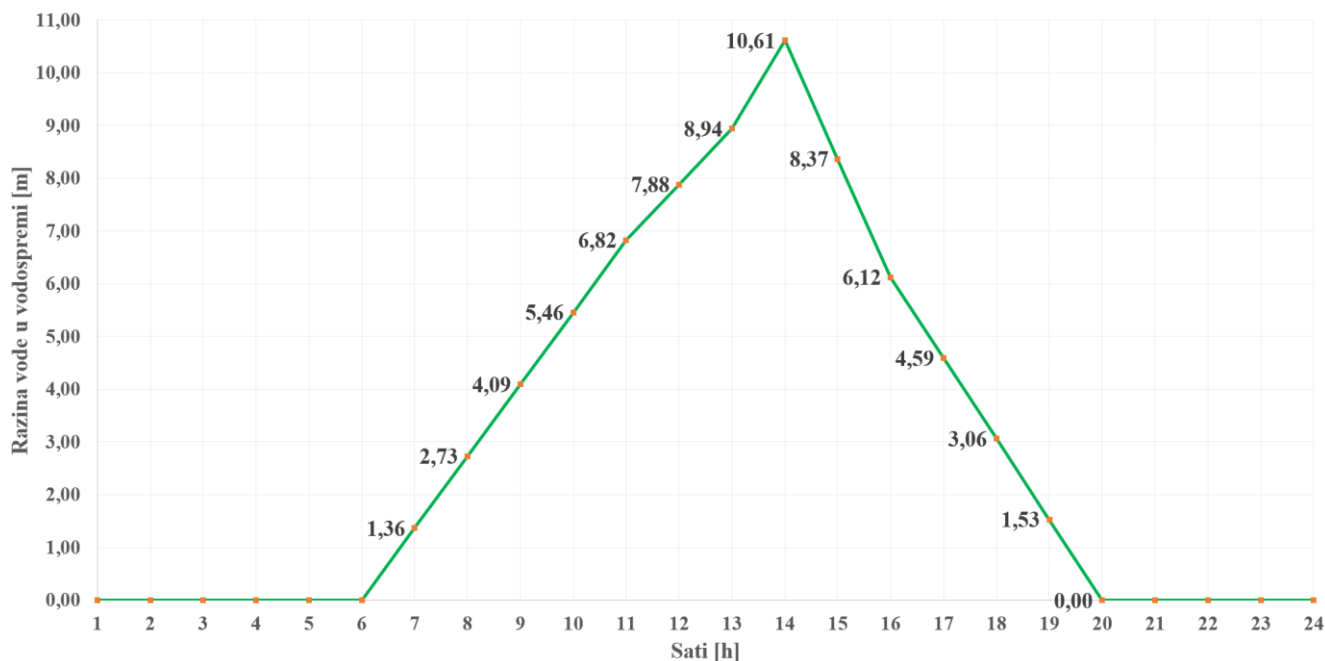
Površina vodospreme iznosi:

$$A_V = \frac{26,72^2 \pi}{4} = 560,457 \text{ m}^2$$

U **Tablici 5.14** prikazan je proračun nivograma u vodospremi. S obzirom na dinamiku dotoka i potrošnje vodosprema je na početku prazna i puni se do 14 sati. Nakon toga crpka na izvoristu prestaje s radom i industrijsko postrojenje se opskrbljuje samo iz vodospreme. Nivogram je prikazan na **Slici 5.6**.

Tablica 5.14 Proračun nivograma u vodospremi

Period [h]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V [\text{m}^3]$	Razina vode u vodospremi [m]	Period [h]	Volumen vode u vodospremi $\Sigma \Delta V [\text{m}^3]$	Razina vode u vodospremi [m]
0-1	0	0,00	12-13	3154,5	5,63
1-2	0	0,00	13-14	3744	6,68
2-3	0	0,00	14-15	2952	5,27
3-4	0	0,00	15-16	2160	3,85
4-5	0	0,00	16-17	1620	2,89
5-6	0	0,00	17-18	1080	1,93
6-7	481,5	0,86	18-19	540	0,96
7-8	963	1,72	19-20	0	0,00
8-9	1444,5	2,58	20-21	0	0,00
9-10	1926	3,44	21-22	0	0,00
10-11	2407,5	4,30	22-23	0	0,00
11-12	2781	4,96	23-24	0	0,00



Slika 5.6 Nivogram u vodospremi

VI

ARMATURE FAZONSKI KOMADI ČVORIŠTA

Armature [9]



EV zasun F4-kratki

Eliptični zasun, upravlja se s ručnim kolom, T zatvaračem s ugradbenom garniturom ili elektromotorom.



Plovni ventil – prirubnički

Ventil s plovkom koji automatski kontrolira stalan nivo unutar spremnika, bez obzira na varijacije u uzvodnom tlaku te se zatvara kod postignutog maksimalnog nivoa.



EV zasun F5-dugi

Eliptični zasun, upravlja se s ručnim kolom, T zatvaračem s ugradbenom garniturom ili elektromotorom.



Prirubnički odzračnik s jednom kuglom

Prirubnički odzračnik je uređaj koji se koristi za uklanjanje zraka ili plina iz cijevnog sustava. Sastoji se od prirubnice, ventila i kućišta za zrak.



EV Ručno kolo za zasun

Služi za otvaranje – zatvaranje EV zasuna u oknima ili u prostorima.



Usisna košara s nepovratnim ventilom

Uređaj koji se koristi u sustavima za crpljenje vode ili drugih tekućina iz otvorenih izvora poput rijeke, jezera ili bunara. Sastoji se od košare i nepovratnog ventila koji omogućuje ulazak tekućine u košaru, ali sprječava njezin povratak natrag u izvor.



Ugradbena garnitura

Montažni pribor čija konstrukcija omogućuje brzu i jednostavnu prilagodbu ugradbene dubine na svim terenima. Nalazi se između ventila i ulične kape. Često se primjenjuje na mjestima gdje nema okna.



Ventili za smanjenje tlaka - hidraulički

Reduktori tlaka namijenjeni su za smanjenje tlaka u tlačnim cjevovodima. Koriste se uglavnom na dionicama gdje nema korisnika niti hidrantske mreže (dionice sa stalnim protokom). Ventil smanjuje ulazni tlak na nižu konstantnu vrijednost bez obzira na protok kroz ventil i fluktuaciju tlaka na ulaznoj strani ventila.



Nepovratni ventil

Uređaj koji omogućuje protok tekućine u samo jednom smjeru i sprječava njezin povratak natrag. Postoje različite vrste nepovratnih ventila, kao što su kuglasti ventili, ventil s klapnom, ventili sa zakretnim krilom.



Zasun s elektromotornim pogonom

Meduprirubnički leptirasti zasun namijenjen je za čistu i otpadnu vodu. Osiguravaju obostrano brtvljenje i mogućnost upravljanja elektromotornim pogonom.



Odvračno-dozačni ventil

ODV ventil osigurava uklanjanje zraka i drugih plinova iz sustava te dozračivanje s kisikom, što sprječava koroziju i oksidaciju te održava dugotrajnost i učinkovitost sustava.



Zasun s PSG pogonom

Međuprirubnički leptirasti zasun namijenjen je za pitku i otpadnu vodu. Osigurava obostrano brtvljenje.

Fazonski komadi [9]



EBS spojnica

Prirubnički komad od nodularnog lijeva. Prijelazna spojnica s fazona s prirubnicom na duktilne, čelične i salonične cijevi.



MMA-KS

Služi za spajanje PVC cijevi pomoću naglavaka, ima prirubnicu na ogranku i dva naglavka (mufe) na drugom kraju.



E-KS spojnica

Prijelazni komad s jednom prirubnicom standarda PN-EN 1092:1999 (DIN 2501), radnog tlaka PN10 - PN16 s naglavkom za spajanje na PVC cijev.



MMQ-KS

Služi za spajanje PVC cijevi koje se nalaze pod pravim kutom, koje su međusobno spojene pomoću naglavka (mufe) i brtve.



EPHD

Prijelazna spojnica s fazona s prirubnicom na tlačnu PE cijev.



Montážno-demontažni komad MDK-kompensator

Zahvaljujući svojoj strukturi, jedinica za proširenje cijevi osigurava fleksibilno spajanje prirubnica na cjevovod, koji štiti cijev od pritiska.



EU komad

Prijelazna spojnica s fazona s prirubnicom na duktilnu cijev.



N komad

Služi za spajanje podzemnih i nadzemnih hidranata sa ostatkom hidrantske mreže; tzv. „stopalo“.



FF(FFG/FFS) komad

Spojni komad (cijev) s dvije prirubnice, služi za spajanje fazona/armatura iste dimenzije u različitim duljinama.



Q komad

Koljeno sa spojnim prirubnicama pod kutom od 90°. Služi za promjenu smjera cjevovoda.



FFK 11°

Lučni komad s prirubnicama koji ima kut od 11°, često se koristi u vodovodnim sustavima za promjenu smjera ili za priključivanje cijevi koje nisu u istoj ravnini.



FFK 45°

Lučni komad s prirubnicama koji ima kut od 45°, često se koristi u vodovodnim sustavima za promjenu smjera ili za priključivanje cijevi koje nisu u istoj ravnini.



FFQ LooseFlange

Koljeno s prirubnicama pod kutom od 90°. Služi za promjenu smjera cjevovoda.



FFR

Redukcijski komad s prirubnicama. FFR omogućuje spajanje cijevi koje nisu jednake veličine.



FFRe

Ista svrha kao i za FFR, razlika je u obliku (ekscentrična oblika).



F-komad

Komad s jednom prirubnicom standarda PN-EN 1092:1999 (DIN 2501), raspon dimenzija cijevi je DN 50- DN 1200, L=340-1000 po standardu PN-EN 545:2010.



Reparaturna obujmica

Služe za jednostavno i trajno popravljivanje puknutih, rastavljenih i oštećenih cijevi (vodovodnih, plinskih i dr.).



Spojnica za PE cijevi

Mehanička spojnica (Ž/Ž) za spajanje dvije PE cijevi.



Spojnica GF MultiJoint XL

Služi za spajanje cijevnih elemenata različitih nazivnih promjera DN 350- DN 600. Gumeni prsten dizajniran je za nazivni promjer unutar određenog raspona. Kada se spojnica montira na najmanju dopuštenu dimenziju, guma je sabijena, kada se montira na gornju dimenziju, gume se produžuje.



Spojnica GF MultiJoint

Može spajati cijevi različitih promjera. Razlika između dva promjera može biti do 43 mm. Do dimenzije DN 300.



Spojnica - zupčasta

Služi za spajanje PEHD cijev. Unutrašnjost spojnice u koju se ugura, cijev je nazubljena.



T komad

Prirubnički spojni element koji se koristi kada je potreban dodatan ogranak.



F-KS

Prirubnička prijelazna spojnica koja se koristi za spajanje PVC vodovodne cijevi na prirubnicu.



Hvatač nečistoća - navojni

Filter za vodu namijenjen za mehaničko pročišćavanje vode.



Hvatač nečistoća - prirubnički

Uređaj koji se koristi za uklanjanje krutih tijela i drugih nečistoća iz otpadne vode, industrijske, tehnološke vode i sl. Hvatač nečistoća se sastoji od spremnika koji ima ugrađene rešetke koje zadržavaju veće čestice, poput grana, kamenja, listova koji se mogu nalaziti u vodi.



Komadi s kolčakom

Komadi koji se primjenjuju za međusobno spajanje duktilnih cijevi (utični spojevi).



MMA komad

Služi za spajanje duktilnih cijevi pomoću naglavaka, ima prirubnicu na ogranku i dva naglavka na istomvodu.



TT komad

Prirubnički spojni element (križni) koji se koristi kada su potrebna 2 dodatna ogranka.



U komad

Komad s dva naglavka. Raspon dimenzija komada je DN 80-DN 600, L=160-210 po standardu PN-EN 1563 i PN-EN 545.



U-BS

Spojnica (Ž/Ž) koja služi za spajanje dvije cijevi različitog materijala. Tijelo i tlačni prsten od nodularnog lijeva.



X komad

Slijepa prirubnica ili reducirana slijepa prirubnica (bušeni X komad).



Žablji poklopac

Služi za istjecanje tekućine iz cijevi, a štiti od vanjskih utjecaja, poput životinja, kiše ili ostalih predmeta koji mogu ući u otvor.

Hidranti [9]



Nadzemni

Nadzemni hidrant se ugrađuje u vodovodnu mrežu te se koristi prilikom gašenja požara, navodnjavanja i punjenja cjevovoda.



Podzemni

Ista funkcija kao i nadzemni hidrant, ali se najčešće koristi na javnim trgovima i mjestima gdje nije pogodna ugradnja nadzemnog hidranta.

Kućni i višestambeni vodovod [9]



Kućni ventil

Konstrukcija mu omogućuje ugradnju između korisnika i magistralnog voda (u vodovodnom oknu).



Pocinčani T komad

Pocinčani spojni element.



Koljeno PP-R

Materijal: polipropilen. Koristi u sustavima vodoopskrbe, grijanja i hlađenja u građevinskim objektima. Obično ima kut od 90°, ali može biti dostupno i u drugim kutovima, poput 45° ili 60°. Spajaju se na druge cijevi i spojnice pomoću toplog zavarivanja.



PP-R prijelazni komad

Spojni dio koji se koristi za povezivanje PPR cijevi s drugim vrstama cijevi, kao što su čelične cijevi, bakrene cijevi, PVC cijevi, itd. PPR prijelazni komad ima navojni priključak na jednom kraju, koji se spaja na drugu vrstu cijevi, dok drugi kraj ima spojnicu za toplo zavarivanje, koja se koristi za spajanje PPR cijevi.



Ogrlica za kućni priključak – klasična montaža

Ogrlica za PE/PVC cijevi s navojem za spajanje na kućni priključak.



PP-R propusni ventil

Materijal: polipropilen. Primjenjuje se za vodovodne instalacije za toplu i hladnu vodu unutar objekta.



Ogrlica s pojasom i ventilom za kućni priključak – FE, SAL

Služi za montažu pod pritiskom, za brzo spajanje manjih korisnika na glavni vod cjevovoda. Za duktilne, čelične i salonitne cijevi.



Press T komad

PEX sustav, kombinacija plastike i aluminija.



Ogrlica s pojasom i ventilom za kućni priključak -PVC, PE

Služi za montažu pod pritiskom, za brzo spajanje manjih korisnika na glavni vod cjevovoda. Za PE i PVC cijevi.



Ventil za regulaciju tlaka – mehanički

Ventil koji održava konstantan izlazni tlak bez obzira na široke raspone ulaznih pritisaka. Idealan za pitku vodu i navodnjavanje za instalacije koje zahtijevaju preciznu regulaciju. Širok raspon regulacije izlaznog tlaka.



Ogrlica s ventilom - kućni priključak

Ogrlica s ventilom s poteznim osiguranjem. Služi za brzo spajanje manjih korisnika na glavni vod cjevovoda. Za PE i PVC cijevi.



Vodomjerno okno

Za ugradnju vodomjera za kuće i zgrade. Konstrukcija štiti vodomjer od hladnoće. Bez dna je što omogućuje prolaz topline iz zemlje direktno do termoizolacijskog pokrova, gdje se akumulira te sprječava smrzavanje.



Kuglasti ventil

S obostrano unutarnjim navojem, namijenjen je za instalacije vodovoda, grijanja, klimatizacije, komprimiranog zraka. Ručka ventila je aluminijska. Tijelo ventila je izrađeno od poniklanog mesinga.



Vodomjer - navojni

Upotrebljavaju se za mjerenje korištenja vode u dimenzijama DN 15-DN 50. Iznad DN 50 se koriste prirubnički vodomjeri. Vodomjer za vodu do 50°C.



Kuglasti ventil s ispustom (zimskom slavinom)

Koristi se za pražnjenje mreže u slučaju opasnosti od smrzavanja vode.



Vodomjer - prirubnički

Upotrebljavaju se za mjerenje korištenja vode u dimenzijama iznad DN 50.

Primjeri armatura i fazonskih komada iz prakse



Slika 6.1 Primjer izvedbe hidrantske mreže od glavnog voda PEHD DN 110 sa spojnim komadima i armaturom, do nadzemnog hidranta DN 100

(1. Nadzemni hidrant, 2. N komad, 3. FF komad, 4. EV zasun, 5. Ugradbena garnitura, 6. Ulična kapa za zasun, 7. T komad, 8. EPHD komad, 9. Cijev PEHD DN 110)



Slika 6.2 Završno slaganje fazonskih komada magistralnog cjevovoda DN 800

(1. T komad DN 800/150, 2. FF komad DN 800, L= 1000 mm, 3. Leptirasti zatvarač s el. motornim pogonom DN 800, 4. MDK komad DN 800, 5. F komad DN 800, 6. EU komad DN 800, 7. Automatski odzračno-usisni ventil s 2 kugle DN 150, 8. Cijev duktil DN 800) [10]



Slika 6.3 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 s koljenom i zaštitnom čeličnom cijevi izvan okna (1. T komad DN 800/300, 2. FF komad DN 800 L= 1000 mm, 3. FFR komad DN 300/150, 4. EV zasun DN 150, 5. MDK komad DN 800, 6. F komad DN 800, 7. E komad ST system (prirubnička spojnica / redukcija za duktil DN 800 / DN 700), 8. Leptirasti zatvarač s el. motornim DN 800, 9. FFK komad DN 800 22¹/₂, 10. Zaštitna čelična cijev s distancerima) [10]



Slika 6.4 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 s postavljenim fazonskim komadima i armaturama (betonirana donja ploča i pripremljena armatura za zidove okna) sa spojem na opskrbi cjevovodu (DN 200). Iznad glavnog voda vidljiv je priključak (vertikalna cijev) za ogranke na vodoopskrbnoj mreži s postavljenim leptirastim zasunom na početku pojedinog ogranka [10]



Slika 6.5 Čvorište magistralnog cjevovoda DN 800 na kojem se vrši spajanje novog cjevovoda na postojeći cjevovod DN 400

(1. T komad DN 800/150, 2. FF komad DN 800, L= 1000 mm, 3. F komad DN 800, 4. Leptirasti zatvarač s el. motornim pogonom DN 800, 5. MDK komad DN 800, 6. FFR komad DN 800/600, 7. FFR komad DN 600/400, 8. Leptirasti zatvarač s el. motornim pogonom DN 400, 9. FF komad DN 400, L=1000mm, 10. Q komad DN 400, 11. Spojnica WAGA DN 400, 12. FF komad DN 400×500mm) [10]



Slika 6.6 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i izbetoniranom donjom pločom i pripremljenom armaturom za zidove okna

- (1. T komad DN 800/150, 2. FF komad DN 800, L= 1000 mm, 3. FF komad DN 800, L= 500 mm, 4. FF komad DN 150, L= 800 mm, 5. FF komad DN 150, L= 500 mm, 6. Leptirasti zatvarač s el. Motornim pogonom DN 800, 7. Leptirasti zatvarač s el. Motornim pogonom DN 150, 8. MDK komad DN 800, 9. F komad DN 800, 10. EU komad DN 800) [10]



Slika 6.7 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i betoniranom donjom pločom i pripremljenom armaturom za zidove okna

- (1. T komad DN 800/800, 2. T komad DN 800/150, 3. FF komad DN 800, L= 1000 mm, 4. FF komad DN 400, L= 800 mm, 5. FF komad DN 150, L= 1000 mm, 6. FFR komad DN 800/600, 7. FFR komad DN 600/400, 8. Leptirasti zatvarač s elektromotornim pogonom DN 800, 9. Leptirasti zatvarač s elektromotornim pogonom DN 400, 10. Leptirasti zatvarač s elektromotornim pogonom DN 150, 11. Montažno demontažni komad DN 800, 12. F komad FN 800, 13. EU komad DN 800, 14. Dukt DN 800, 15. FF komad DN 150, 16. FF komad DN 800, L= 300 mm, 17. FF komad DN 800, L= 400 mm, 18. FFK komad DN 800 $11\frac{1}{4}$) [10]



Slika 6.8 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima i armaturama; vidljiva podzemna voda unutar građevne jame [10]



Slika 6.9 Prikaz elemenata vodoopskrbe mreže izvan okna
(elementi: FF komad, Q komad, FFR komad; EPHD spojnica, PE cijev, spojnica GF MultiJoint) [10]



Slika 6.10 Čvorište s postavljenim fazonskim komadima, armaturama i pripremljenom oplatom; vidljiva podzemna voda unutar građevne jame uslijed gašenja crpke za snižavanje podzemnih voda [10]



Slika 6.11 Polaganje duktilne cijevi u širokom rovu i povezivanja dionica cjevovoda s FF i MDK komadom [10]



Slika 6.12 Prikaz utiskivanja vodoopskrbne cijevi kroz zaštitnu čeličnu cijev s distancerima, prijenosna crpka osigurava rad u suhom unutar građevne jame [10]



Slika 6.13 Primjer vodovodnih čvorišta

(1. Leptirasti zasun, 2. T komad, 3. Q komad, 4. PE cijev, 5. Prijelazna spojnica s armature na PE cijev, 6. EV zasun F4, 7. FF komad) [11]



Slika 6.14 Potopljeno vodomjerno okno, u oknu se nalaze 3 EV zasuna, T komad i FF komadi
- pojava vode u oknu moguća je uslijed vodopropusnosti okna ili curenja (gubitaka) vode na spojevima [11]



Slika 6.15 Primjer vodovodnih čvorišta

(1. EV zasun F5, 2. TT komad, 3. FF komad, 4. EV zasun F4, 5. T komad, 6. Priključna cijev, 7. Odzračno-dozračni ventil, 8. PE cijev, 9. EPHD spojница, 10. Montažno-demontažni komad MDK) [11]



Slika 6.16 Unutrašnjost PEHD okna u koje su smješteni EV zasun mjerači tlaka i protoka spojeni na nadzorno upravljački sustav vodoopskrbe [11]



Slika 6.17 Unutrašnjost PEHD okna u koje su smješteni mjerači tlaka i protoka spojeni na nadzorno upravljački sustav vodoopskrbe, okno se nalazi neposredno uz izvorište vode [11]



Slika 6.18 Prikaz priključnog okna u stambenoj zgradi sa zasebnim razvodom i mjeračima protoka za unutarnju hidrantsku i opskrbnu mrežu
(1. EV zasun, 2. Vodomjeri, 3. Priključak za zgradu, 4. Kuglasti ventil, 5. Priključna cijev prema potrošačima DN 32, 6. Unutrašnji hidrantski vod, 7. Potopna crpka)

Literatura

- [1] Gulić, I., (2000.), *Opskrba vodom*, Zagreb, Hrvatski savez građevinskih inženjera.
- [2] Jović, V., (2006.), *Osnove hidromehanike*, Zagreb, Element.
- [3] Colebrook, C. F., White, C. M., (1937.), Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes, *Proc. Roy. Soc. London*, 161, 367-381.
- [4] Zeghadnia, L., Robert, J. L., Achour, B., (2019.), Explicit solutions for turbulent flow friction factor: A review, assessment and approaches classification, *Ain Shams Engineering Journal*, 10, pp. 243-252.
- [5] Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, T. H., Rothmayer, A. P., (2001.), *Fundamentals of Fluid Mechanics* - 7th edition, Wiley.
- [6] Jamil, R., Mujeebu, M. A., (2019.), Empirical Relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach Equations for Cold and Hot Water Flow in Plastic Pipes, *Water*, 10, pp. 104-114.
- [7] Rossman, L. A. i ostali, *Epanet User Manual*, Water Infrastructure Division Center for Environmental Solutions and Emergency Response U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- [8] Ljubisavljević, D., Babić, B., Đukić, A., Jovanović, B., (2001.), *Komunalna hidrotehnika – primjeri iz teorije i prakse*, Beograd, Beogradsko mašinsko-grafičko preduzeće i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [9] Vodoplast promet d.o.o., *Katalog vodoopskrbnih elemenata: armature, fazonski elementi, ventili, hidranti, kućni priključci, vodomjerna okna*, <https://www.vodoplast-promet.hr/hr/vodovod>, [pristupljeno 23. veljače 2023.].
- [10] IDT d.o.o. (2016.), *Vodoopskrbni sustav Osijek – izgradnja južnog magistralnog cjevovoda pitke vode DN 800 od pogona za proizvodnju vode do Ulice J. R. Kira*, Projekt izvedenog stanja (p-514/16-PIS).
- [11] IDT d.o.o., Hidroprojekt-ing d.o.o., Prongrad biro d.o.o. (2022.), *Koncepcijsko rješenje s uspostavom GIS tehničkog informacijskog sustava, matematičkog modela sadašnjeg i budućeg stanja te predstudijom izvodljivosti (s-641/20)*.