

# Numerička analiza sustava za prikupljanje kišnice

---

**Kovačić, Noa**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:922732>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE  
KIŠNICE**

Rijeka, rujan 2023.

Noa Kovačić  
0069087030

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA SUSTAVA ZA PRIKUPLJANJE  
KIŠNICE**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija, dipl. ing.  
Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin, dipl. ing.

Rijeka, rujan 2023.

Noa Kovačić  
0069087030

## **IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA**

Izjavljujem da sam završni rad s naslovom Numerička analiza sustava za iskorištavanje kišnice izradio samostalno pod mentorstvom prof.dr.sc Zorana Čarije i v. asist. dr. sc. Ivane Lučin, te sam u radu koristio samo literaturu koja je navedena na kraju završnog rada.

Noa Kovačić

---



## SADRŽAJ:

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....                                    | 2  |
| 2. POVIJEST SUSTAVA ZA SAKUPLJANJE KIŠNICE ..... | 4  |
| 3. GLAVNI ELEMENTI SUSTAVA .....                 | 7  |
| 3.1. Površina prikupljanja.....                  | 7  |
| 3.1.1. Krov s jednim nagibom .....               | 8  |
| 3.1.2. Krov s dva nagiba.....                    | 9  |
| 3.2. Cijevi .....                                | 10 |
| 3.2.1. Dovodne cijevi .....                      | 11 |
| 3.2.2. Tlačne cijevi .....                       | 12 |
| 3.2.3. Sigurnost.....                            | 12 |
| 3.3. Spremnik vode.....                          | 13 |
| 3.4. Sustavi za pročišćavanje i filtraciju.....  | 15 |
| 3.5. Crpka za distribuciju vode.....             | 16 |
| 4. DIMENZIONIRANJE SUSTAVA .....                 | 18 |
| 4.1. Proračun spremnika.....                     | 18 |
| 4.2. Izbor cijevi.....                           | 21 |
| 4.3. Karakteristike crpke .....                  | 22 |
| 5. SOFTVERSKA SIMULACIJA STRUJANJA.....          | 24 |
| 5.1. Općenito o programu.....                    | 24 |
| 5.1.1. Spremnik vode.....                        | 24 |
| 5.1.2. Čvorovi.....                              | 25 |
| 5.1.4. Ventili .....                             | 26 |
| 5.1.5. Crpka .....                               | 26 |
| 5.2. Izrada simulacije .....                     | 26 |
| 8. LITERATURA .....                              | 39 |

## 1. UVOD

Današnji suvremeni svijet se suočava s izazovima globalnih razmjera, jedan od značajnijih među njima je upravo sve veći pritisak na vodne resurse. Voda kao relativno obnovljiv resurs ima vrlo široku primjenu i ključna je za opstanak kako biljnog i životinjskog carstva tako i naravno ljudske vrste. Urbanizacija u kombinaciji s klimatskim promjenama, povećanom potrošnjom vode, te neodrživim praksama upravljanja vodnim resursima predstavlja ozbiljne prijetnje budućem opskrbljivanju vodom za milijarde ljudi širom svijeta.

Jedan od glavnih uzroka nestašice ovog resursa je neodgovorno gospodarenje njime odnosno upotreba čiste pitke vode u situacijama kada to nije prijeko potrebno. Neki od takvih primjera u kućanstvima su navodnjavanje vrta, pranje osobnog automobila, pranje rublja, pa čak i ispiranje sanitarnih čvorova. U industriji se pitka voda često koristi za ispiranje radne opreme, masovna navodnjavanja, te kao rashladni medij.

U tom kontekstu, sustavi za prikupljanje i ponovno korištenje oborinskih voda postaju ključnim rješenjem za održivo gospodarenje vodom i to pogotovo u urbanim područjima. Svjetska populacija konstantno raste, a urbanizacija se ubrzano širi. Prema podacima Ujedinjenih naroda iz 2018. godine, više od 55% svjetske populacije živi u urbanim područjima, a do 2050. godine se procjenjuje da bi taj broj trebao narasti i do skoro 70% [1]. Ovaj trend urbanizacije postavlja ogroman pritisak na vodoopskrbu, uz istovremeno sukobljavanje sa sve češćim i intenzivnijim sušama uzrokovane klimatskim promjenama. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) je 2022. godine objavila kako 2,1 milijarda ljudi nema uopće pristup čistoj pitkoj vodi, dok čak 4,5 milijarde ljudi nema adekvatno riješen sanitarni sustav.

Kako bi se čovječanstvo suočilo s navedenim izazovima nužno je promišljati o održivim praksama upravljanja vodenim resursima. Jedan od ključnih aspekata održivosti u urbanim okruženjima je učinkovito prikupljanje, pohrana i korištenje oborinskih voda, osobito kišnice. Sustavi za rekuperaciju kišnice predstavljaju dio rješenja za opskrbu pitkom vodom, smanjenje pritiska na vodoopskrbu kao i za očuvanje vodenih resursa za buduće generacije. Učinkovitost sustava za prikupljanje kišnice ovisi o nizu čimbenika. Glavni od tih čimbenika su prosječna količina i učestalost oborina, veličina površine prikupljanja, kapacitet spremnika, kvaliteta same kišnice i urbanističke karakteristike okoline. Cilj ovog istraživanja je detaljna obrada potrebnih elemenata za ovakav sustav, te njegova optimizacija pomoću alata modeliranje i simulaciju vodoopskrbnih sustava „Epanet“.

U drugom poglavlju ovog rada napravljen je kratki pregled povijesti upotrebe kišnice. U sljedećem poglavlju opisan je princip rada i prikaz svih potrebnih komponenti za ovakav sustav. U četvrtom poglavlju napravljen je proračun realnog sustava iskorištavanja kišnice za potrebe kućanstva s četiri člana. Provedeno je dimenzioniranje sustava temeljeno na očekivanim vrijednostima padalina i očekivanim zahtjevima za potrošnjom vode. U petom poglavlju napravljen je numerički model dizajniranog sustava kako bi se korištenjem programa EPANET provele simulacije realnog korištenja kišnice i punjenja spremnika u jednom danu. U šestom poglavlju prikazani su rezultati simulacije, uključujući odgovarajuće promjene protoka i padove tlakova u sustavu. U posljednjem poglavlju dan je zaključak provedenog rada.



## 2. POVIJEST SUSTAVA ZA SAKUPLJANJE KIŠNICE

Korištenje sustava za iskorištavanje kišnice seže još u doba drevne Kine i na području Bliskog Istoka 1000 godina prije Krista. U Kini sustavi su se koristili za usmjeravanje kišnice prema poljima i vrtovima. U bliskoistočnim pustinjama sustavi zvani „kanat<sup>1</sup>“ omogućavali su opskrbu pitkom vodom. Ove dvije vrste sustava prenosile su se s generacije na generaciju, te koristili stoljećima. Na slici 2.1. ispod prikazan je izgled jednog takvog sustava iz doba Perzijskog carstva. [2]



*Slika 2.1. Perzijski Kanat [3]*

Daljnja upotreba sličnih sistema zaživila je u doba antičkog Rima odnosno 3. stoljeća prije Krista do 5. stoljeća. Rimljani su razvili sustave za prijenos vode stručnog naziva akvadukti<sup>2</sup>. Takvi sustavi koristili su se za opskrbu vodom za stanovnike Rima i okolnih gradova. Najpoznatiji od njih je „Aqua Claudia“ izgrađen u 1. stoljeću prije Krista dužine 69 kilometara prikazan slikom 2.2.



*Slika 2.2. Aqua Claudia [4]*

<sup>1</sup>Vrsta vodovodnog sustava razvijenog od strane Perzijanaca koji služi za distribuciju pitke vode u vrućim i suhim naseljenim područjima. Sastoji se od niza okomitih okna koje povezuju blago nagnuti kanal.

<sup>2</sup> Sustav za prikupljanje, transport i distribuciju vode u antičkom Rimu.

U srednjem vijeku mnogi europski gradovi su koristili sustave za prikupljanje kišnice koji su također služili za osiguravanje pitke vode za stanovništvo. Navedeni sustavi najčešće su bili integrirani u zgrade i utvrde, te se voda pohranjivala u velikim kamenim spremnicima. Tijekom industrijske revolucije u 18. stoljeću opskrba vodom više se temeljila na rijekama i jezerima, te je u tom periodu sakupljanje kišnice gubilo na važnosti.

Učestalom pojavom suša i brzim rastom stanovništva u modernom dobu ponovno se vratilo zanimanje za rekuperacijom kišnice koji se razvija i danas. Rekuperacija kišnice postala je sastavni dio održivog gospodarenja vodnim resursima u urbanim okruženjima diljem svijeta. Statistički podaci pokazuju porast u implementaciji modernijih sustava za prikupljanje i pohranu kišnice uzrokovan brojnim tehničkim inovacijama, rješenjima i zakonskim regulativama kako bi se očuvali vodeni resursi i smanjio ekološki utjecaj. Danas se sustavi za rekuperaciju kišnice koriste u mjestima siromašnijima vodnim resursima, ali sve češće se mogu naći i kod ekološki osviještenih vlasnika privatnih kuća, kao i u velikim industrijskim postrojenjima i modernijim samoodrživim gradovima sa cijelom infrastrukturom prilagođenom za ove svrhe. Države koje danas predvode u implementaciji ovakvih sustava su Australija, Ujedinjeno Kraljevstvo, Indija i Kina. Jedan od najbližih primjera rekuperacije kišnice u većim postrojenjima je upravo centar za gospodarenje otpadom (CGO) Marišćina u Rijeci čiji je spremnik prikazan slikom 2.3.



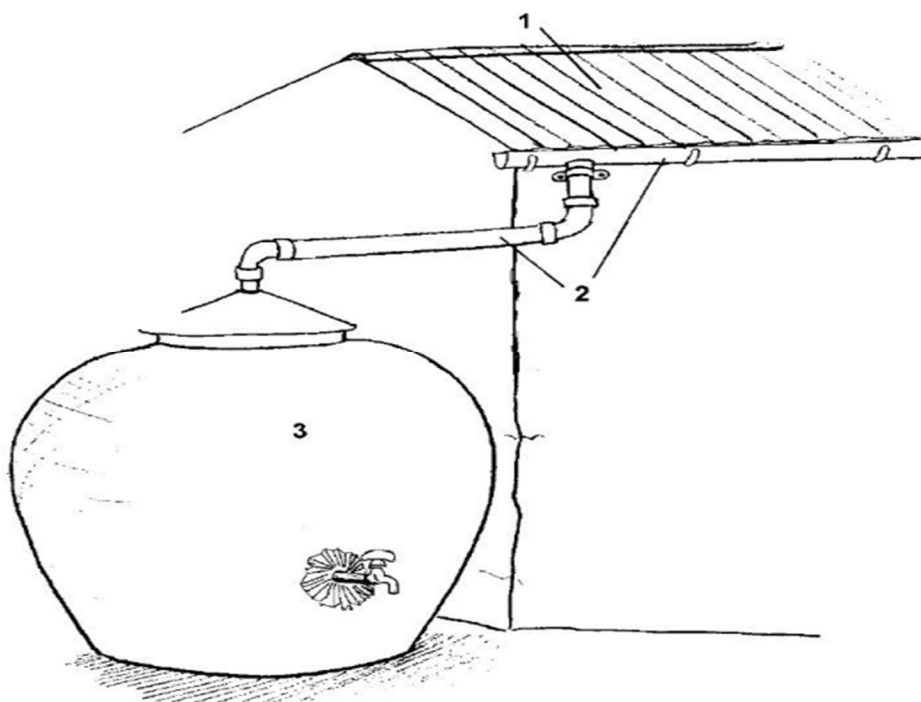
*Slika 2.3. Sakupljanje kišnice CGO Marišćina [5]*

Sustavi za rekuperaciju kišnice su se tek nedavno počeli regulirati zakonima u SAD-u i to samo državnim, a ne saveznim. U većini saveznih država sustavi ili nisu uopće regulirani ili su potaknuti od strane lokalnih vlasti. Postoji iznimka u saveznoj državi Colorado gdje na snazi 120 godina star zakon kojim je ukupni volumen spremnika za kišnicu po kućanstvu ograničen na 416

litara (110 galona). Sve preko toga smatra se kažnjivim zbog vjerovanja da kišnica treba imati svoj tok u sustavu i njenim sakupljanjem se uskraćuje izvor vode na drugim mjestima.[6]

### 3. GLAVNI ELEMENTI SUSTAVA

Za optimalan rad sustava za prikupljanje kišnice potrebno je detaljno proračunati sve elemente samog sustava uzimajući u obzir vanjske čimbenike kao što su količina i učestalost padalina. Razrada komponenti sustava ključna je za razumijevanje njihovih funkcija, uloge i tehničkih karakteristika. Glavni dijelovi sustava obuhvaćaju sustav za prikupljanje, usmjeravanje, pohranu, distribuciju i konačno filtraciju i upotrebu kišnice. Na slici 3.1. prikazan je pojednostavljeni prikaz ovakvog sustava.



Slika 3.1. Sustav za rekuperaciju kišnice; 1- Prikupna površina, 2- cijevi za dovod do spremnika, 3 spremnik [7]

#### 3.1. Površina prikupljanja

Površine za prikupljanje kišnice uključuju krovove kuća, poslovnih zgrada ili drugih objekata, a u posebnim slučajevima mogu biti i vrtovi ili ulice. Glavni čimbenici koji mogu utjecati na količinu prikupljene kišnice su materijal, oblik i nagib krova koji ima ulogu prikupljajuće površine.

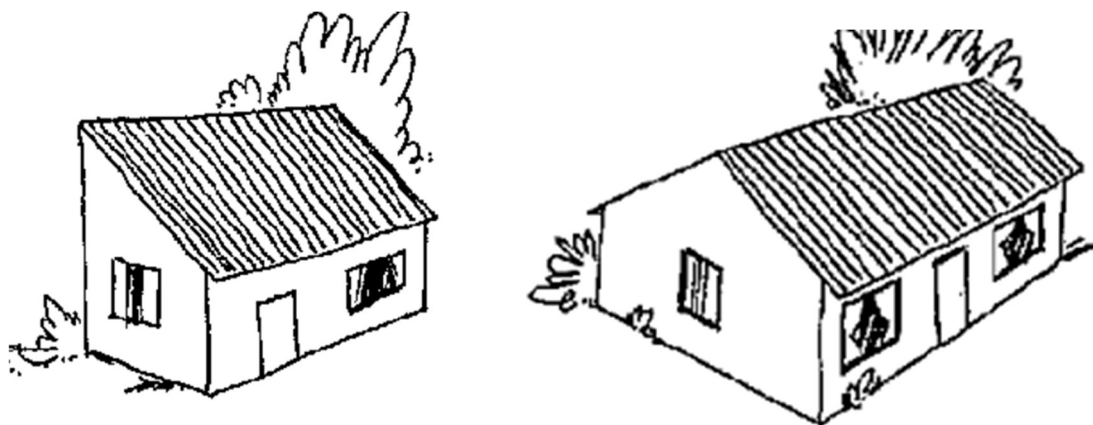
Materijal krova ima značajan utjecaj na kvalitetu prikupljene kišnice. Potrebno je izbjegavati dugoročno topive materijale, pogotovo one koji otapanjem u vodi daju za čovjeka toksične

spojeve. Najučinkovitiji materijali za ove svrhe su valoviti pocinčani čelični lim, aluminijske obloge i cigla koja ima nešto manju učinkovitost zbog višeg faktora trenja.

Nagib krova utječe na brzinu i način na koji fluid struji. Prema obliku krovovi se mogu podijeliti u više skupina od kojih svaka ima drugačiji izračun površine i različitu ukupnu duljinu i raspored oluka potrebnih za odvodnju. Ravni krovovi se u praksi izbjegavaju zbog otežane odvodnje.

### 3.1.1. Krov s jednim nagibom

Na slici 3.2. prikazan je izgled krova s jednim nagibom s koje je vidljivo da je za sakupljanje kišnice s cijele površine potreban samo jedan oluk.



Slika 3.2 Krov s jednim nagibom (lijevo) i s dva nagiba (desno) [8]

Površina prikupljanja označena sa  $A_{co}$  [m<sup>2</sup>] računa se pomoću formule (3.1.) za površinu pravokutnika.

$$A_{co} = w \cdot l \quad (3.1.)$$

gdje su:

$w$  - širina krova [m]

$l$  – duljina krova [m]

### 3.1.2. Krov s dva nagiba

Površina prikupljanja za krov s dva nagiba prikazan na slici 3.2. dobije se pomoću formule (3.2.). Kod krovova s dva nagiba potrebno je postaviti dva oluka za maksimalnu iskoristivost prikupne površine.

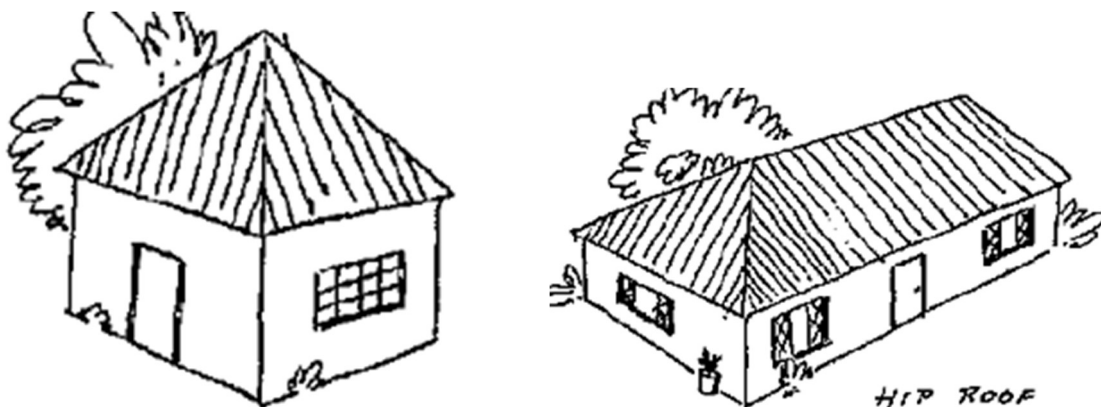
$$A_{cd} = l_d \cdot w \quad (3.2.)$$

gdje je:

$l_d$  – ukupna širina krova [m]

### 3.1.3. Krov s četiri nagiba

Postoje više izvedbi krovova s četiri nagiba, te prema tome varira i formula za računanje njihove ukupne površine. Dva osnovna modela su potpuno simetrični i polusimetrični prikazani na slici 3.3.



Slika 3.3. Simetrični (lijevo) i polusimetrični (desno) četverostrani krov [8]

Potrebno je naglasiti da u praksi postoje puno složeniji modeli krovova. Osvrtom na osnovne modele strukture krovova dolazi se do općeg izraza za izračun površine krova  $A_c$  [m<sup>2</sup>] prikazanog formulom (3.3.), te zaključka da je oluke potrebno postaviti na donji rub svake klizne površine.

$$A_c = \sum_{i=1}^n A_{pi}$$

(3.3.)

gdje je:

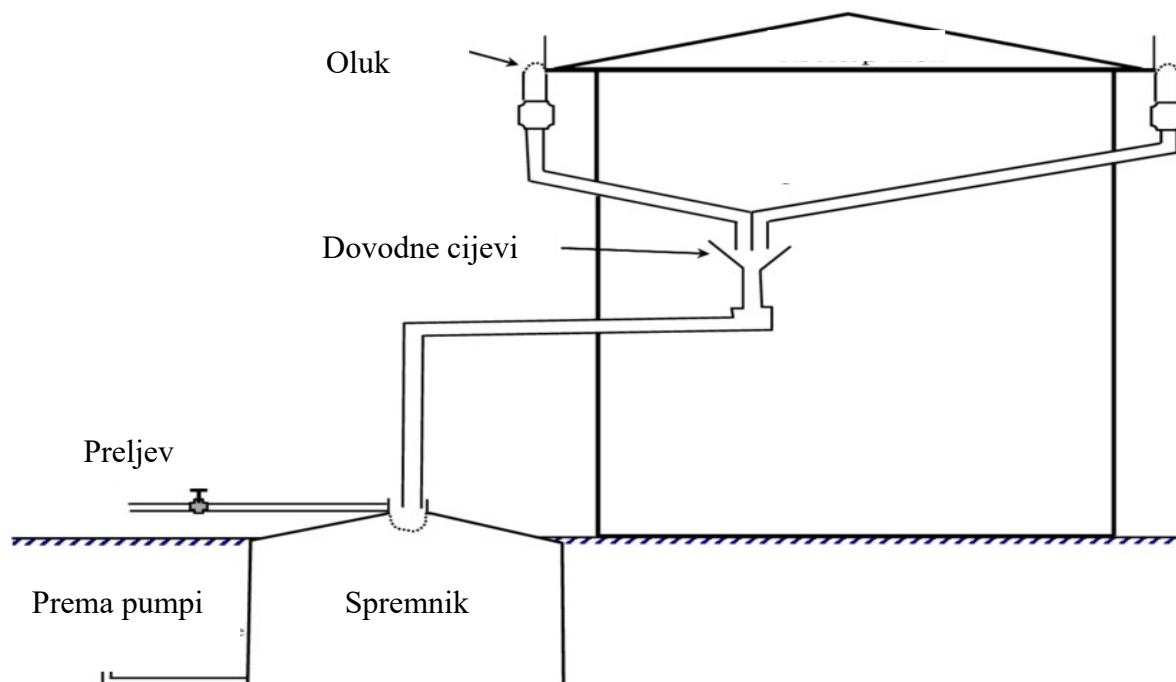
$A_{pi}$  – površina pojedinog segmenta krova [m<sup>2</sup>] izraženog kao jednostavni geometrijski lik (pravokutnik kod jednostranih i dvostranih krovova, a trokut kod višestраниh krovova)

### 3.2. Cijevi

Sustav (slika 3.4.) se sastoji od cijevi za sakupljanje, odnosno oluka, vertikalnih cijevi, cijevi za sigurnosni preljev, tlačne cijevi i mreže cijevi za distribuciju do trošila. Vrste cijevi razlikuju se prema namijeni, promjerima i materijalu.

Vrsta spoja između dijelova također ovisi o odabranom materijalu cijevi. Plastične i čelične cijevi se spajaju odvojivim spojevima kao što su spojke i zatvarači, aluminijske se spajaju zakovicama i brtve silikonom, a ostale mekim odnosno tvrdim lemljenjem.

Kod dimenzioniranja cijevi potrebno je voditi računa o koeficijentu otpora koji je određen materijalom. Potrebna čvrstoća cijevi određuje se prema standardu HRN ISO 9969.



Slika 3.4. Shema cijevi sustava za rekuperaciju kišnice na modelu kuće [9]

### 3.2.1. Dovodne cijevi

Dovodnim cijevima smatraju se oluci i vertikalne cijevi čija je zajednička funkcija dopremanje kišnice s površine sakupljanja do glavnog spremnika. Primjer svih potrebnih komponenti ovog dijela sustava prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5. Raščlanjeni sustav dovodnih cijevi [10]

Pri izboru materijala potrebno je voditi računa o konstantnoj izloženosti vanjskim klimatskim faktorima. Najoptimalniji materijal za njihovu izradu je PVC plastika zbog svoje trajnosti, male cijene, lakog spajanja i otpornosti na sunčevu svjetlost. Ostale vrste materijala dovodnih cijevi su aluminiji, čelični lim, te legure cinka, bakra i titana koji se koristi samo u situacijama kada je potrebna velika trajnost.

Po obliku oluci mogu biti kutnog i polukružnog poprečnog presjeka. Bitno je naglasiti kako žljebovi imaju standardno propisani nagib koji iznosi 3% odnosno 3mm po jednom m duljine. Slikom 3.6. dan je primjer postavljenih oluka.





*Slika 3.6. Postavljene dovodne cijevi [11]*

### 3.2.2. Tlačne cijevi

Dio sustava zadužen za transport vode iz glavnog spremnika prema uređaju za povišenje tlaka odnosno pumpi naziva se usisna ili tlačna cijev. Njena uloga je održavanje konstantnog tlaka u sustavu za daljnju distribuciju vode prema trošilima, te je stoga potrebno postaviti nepovratni ventil na spoj spremnika i ove cijevi. Materijal koji se najčešće koristi za izradu ovih cijevi je PVC.

### 3.2.3. Sigurnost

Dva glavna dijela odgovorna za sigurnost i održavanje sustava su cijev za sigurnosni preljev i cijev za pranje krova. Uloga cijevi za sigurnosni preljev je omogućavanje oticanja viška vode u trenucima kada potrošnja ne može stići količinu padaline, te se stvara višak vode u spremniku. Promjer joj mora biti veći od promjera dovodne cijevi kako bi se spriječilo nekontrolirano istjecanje kišnice.

Sustav za pranje krova konstruira se na način da određenu količinu prve kiše nakon sušnog razdoblja ne vodi u spremnik zbog veće koncentracije nečistoća. Ove komponente se također izrađuju od PVC-a.

### 3.3. Spremnik vode

Uloga spremnika vode je pohrana čiste kišnice u razdobljima između padalina. Prema položaju se mogu podijeliti na nadzemne i podzemne, prema orijentaciji na horizontalne i vertikalne.

Osnovni materijali korišteni za njegovu izradu su beton, plastike i/ili metali. Spremnike je također moguće raščlaniti i prema obliku, najčešće korišteni su cilindrični, pravokutni, spremnici u obliku kugle i fleksibilni spremnici. Neke od vrsta nadzemnih spremnika prikazane su slikom 3.7.



a.)



b.)



c.)



d.)

Slika 3.7. a.) betonski spremnik, b.) cilindrični plastični spremnik, c.) cilindrični glineni spremnik, d.) pravokutni plastični spremnik [12]

Odabir odgovarajućeg spremnika ovisi o njegovoj namjeni, potrebnom kapacitetu, uvjetima u kojima će se nalaziti, te još mnogo drugih faktora. Potrebno je naglasiti kako sustavi mogu biti izvedeni i s više spremnika ukoliko su zahtjevi za potražnjom vode takvi. Cilindrični spremnici se izrađuju od metala ili plastike, te se najčešće nalaze pod zemljom.

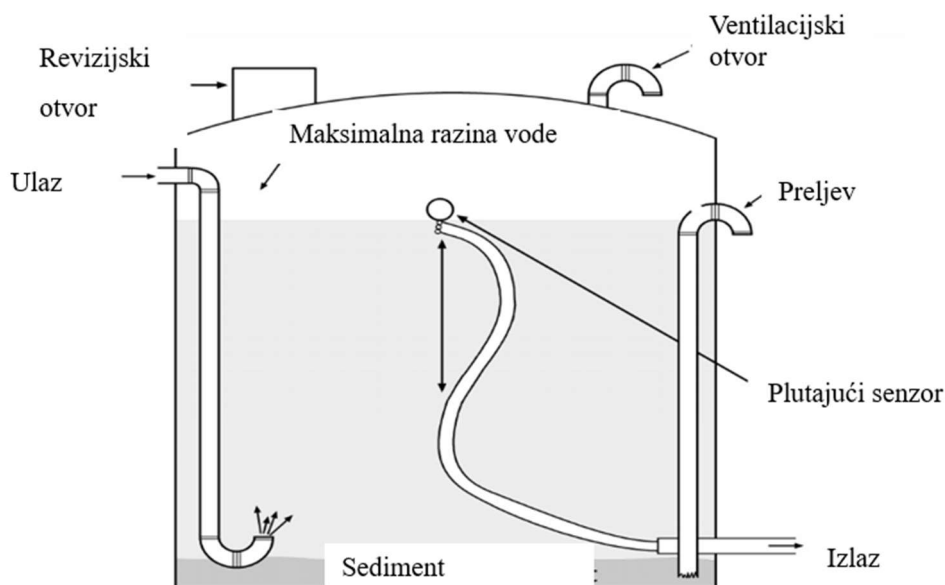
Betonski su uvijek pravokutni, te se pretežito nalaze pod zemljom što im omogućuje najveću iskoristivost dostupnog prostora.

Spremnici u obliku kugle se rjeđe koriste, a njihova prednost je mala površina izložena sunčevom zračenju što otežava nastanak suvišne vegetacije na unutarnjoj strani spremnika.

Fleksibilni spremnici koriste se kada je ograničen prostor rezerviran za pohranu, izrađeni su od elastičnih polimera što im omogućuje skupljanje i širenje ovisno o potrebnom volumenu, najčešće se nalaze u mobilni sustavima kao na primjer kamp kućicama.

Prvo se odabire potrebni kapacitet spremnika prema podacima o lokalnim klimatskim uvjetima i planiranoj potrošnji vode, zatim se uzevši u obzir mjesto na kojem će se nalaziti i potrebni volumen određuje materijal spremnika. U proračun je poželjno uvrstiti i karakteristike tla ukoliko se spremnik nalazi pod zemljom kako ne bi došlo do njegovog pomicanja. Unutarnja strana spremnika nikad ne smije biti izložena djelovanju sunčeve energije kako bi se izbjegao nastanak algi. Dovodna cijev se u pravilu izvodi zavijena na dnu kako bi se izbjegle turbulencije i time zaštitila unutarnja strana samog spremnika. Također usisna cijev mora biti najmanje 40 centimetara uzdignuta od dna spremnika zbog skupljanja taloga.

Spremnici moraju biti prilagođeni za njihovo održavanje što se postiže ugradnjom odgovarajućih otvora za reviziju, drenažu i ventilaciju, te uređajima koji mjere količinu vode u spremniku. Građa cilindričnog spremnika s ravnim dnom prikazana je na slici 3.8.



Slika 3.8. Građa spremnika [13]

### 3.4. Sustavi za pročišćavanje i filtraciju

Građa sustava za filtraciju kišnice ovisi o početnoj kvaliteti kišnice i daljnjim zahtjevima njene kvalitete za korištenje. Zahtjevi za kvalitetom određeni su zakonskim regulativama. Nedovoljnim tretiranjem kišnice dolazi do pojave neugodnih mirisa, preuranjenog otkazivanja određenih komponenti (na primjer začepljenje crpke) i povećava se rizik od nastanka zaraznih bolesti.

Sustav započinje filterom za odvajanje lišća koji se sastoji od krupnog sita, služi za odvajanje lišća, grana i drugih većih nečistoća u kišnici. Ovaj dio mora biti lako dostupan za ručno čišćenje.

Sljedeći na red dolazi filter za odvajanje krhotina, građen je od sitnijeg sita kako bi skupio i manje čestice nečistoća prije ulaska kišnice u spremnik, prikazan je na slici 3.9. Po potrebi se ugrađuje još i uređaj za obogaćivanje vode kisikom za sprječavanje anaerobnih uvjeta u kojima nastaju štetne bakterije. Uređaj za obogaćivanje vode kisikom često je izveden Venturijevom cijevi.

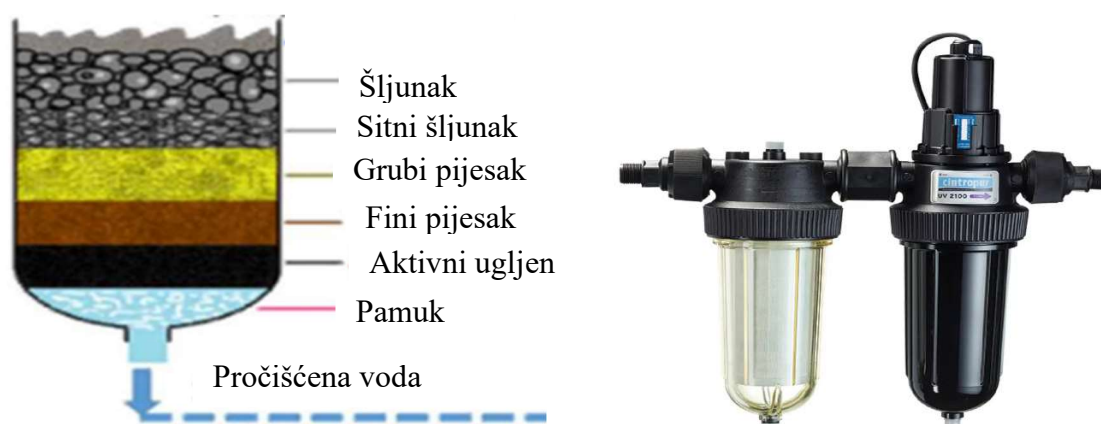


Slika 3.9. Separator krhotina i aerator [14]

Nakon spremnika stavlja se filter propusnosti  $5\mu\text{m}$  koji odvaja i najsitnije čestice. Prije same distribucije vode po trošilima moguće je dodati filter s aktivnim ugljenom za dodatno uklanjanje organskih tvari i kemikalija iz vode. U jako sušnim područjima sustav se može proširiti i uređajem za tretiranje vode ultraljubičastim (UV) zračenjem, tako obrađena kišnica pogodna je čak i za piće zbog visoke stope učinkovitosti uklanjanja bakterija i ostalih mikroorganizama.

Razlog zašto se kišnica koristi za piće samo u ekstremno sušnim područjima je jer su ovakvi načini obrade zahtijevaju skupe adaptacije u sustavu, a svejedno postoji rizik od zaraza.

U područjima sa slabije razvijenom tehnologijom cijeli sustav se može izvesti od slojevitog filtera sastavljenog od krupnog šljunka do najfinijeg pijeska i završetkom od sloja pamuka. Građa ovakvog filtera prikazana je na slici 3.10. Njegova prednost je jeftina izgradnja i velika dostupnost potrebnih materijala, a konačna čistoća je prihvatljiva, ali i manja od standardnog sustava za pročišćavanje.



Slika 3.10. a.) Jednostavni uređaj za filtraciju kišnice [15], b.) Moderni filter s UV lampom [16]

### 3.5. Crpka za distribuciju vode

Kišnica s krova do glavnog spremnika u većini izvedbi struji zbog utjecaja gravitacije. U kućnim sustavima manjih kapaciteta dovoljno je postaviti jednu crpku koja je zadužena za povišenje tlaka i distribuciju kišnice od spremnika do trošila ili kućne mreže cijevi.

Ukoliko je sustav izveden s dva spremnika od kojih je jedan gornji, a drugi donji, potrebno je koristiti crpku samo za dovod do gornjeg spremnika najčešće smještenog u potkrovlju te daljnja distribucija ide utjecajem gravitacijske sile. Ovim načinom izvedbe bolje su prilagođeni intervali paljenja crpke što joj povećava trajnost.

Projektiranje i odabir odgovarajuće crpke vrši se prema potrebnim protocima na trošilima, visini na koju se voda mora dovesti i intervalima paljenja. Crpke se često prodaju kao kompletni uređaji sastavljeni od centrifugalne crpke pokretane elektromotorom, tlačnog spremnika i regulatora tlaka. Pri dimenzioniranju je potrebno u obzir uzeti i koeficijent trenja unutar cijevi.

Prije crpke pogodno je spojiti i dodatan dotok vode iz gradske mreže čime se sprječava mogućnost suhog rada crpke koji može dovesti do oštećenja njenih komponenti. Najčešće korištene vrste pumpi vidljive su na slici 3.11.



*Slika 3.11. Pumpe za distribuciju kišnice [17]*

## 4. DIMENZIONIRANJE SUSTAVA

Početne varijable koje se određuju za implementaciju sustava za rekuperaciju kišnice su količina i učestalost padalina, te potrebe za vodom cjelokupnog kućanstva ili industrijskog postrojenja.

Za primjer protoka fluida u ovom dijelu rada uzimaju se podaci o padalinama za grad Rijeku, te potrebe jednog kućanstva s četiri člana.

Sve potrebne cijevi izrađene su od polivinil klorida (PVC-a) kako bi se maksimalno reducirao faktor trenja i olakšalo održavanje samog sustava. Podaci o padalinama uzeti su od državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ-a) [18] za područje grada Rijeke. Temperature u prosjeku ne padaju ispod 0°C pa sustav nije potrebno dodatno zaštititi od zamrzavanja.

### 4.1. Proračun spremnika

Prije odabira spremnika potrebno je izraziti ukupne potrebne kućanstva za vodom i njenu svrhu. U ovom primjeru prikupljena kišnica biti će korištena za ispiranje sanitarnih čvorova, zalijevanje vrta, te pranje rublja i čišćenje kuće okućnice i osobnog automobila. Ukupna dnevna potreba za vodom  $V_{\text{puk}}$  računa se pomoću formule (4.1.).

$$V_{\text{puk}} = \frac{V_{\text{pp}}}{n_p} + 4 \cdot 4 \cdot V_{\text{ps}} + 2 \cdot V_{\text{pv}} + 2 \cdot V_{\text{pr}} \quad (4.1.)$$

gdje su:

$V_{\text{pp}}$  - volumen vode potrebne za jedno čišćenje kuće i pranje automobila [l]

$n_p$  – prosječni broj dana između dva pranja auta i kuće (pod pretpostavkom da se obje radnje vrše isti dan)

$V_{\text{ps}}$  – volumen vode potreban za ispiranje sanitarnih čvorova po ispiranju [l]

$V_{\text{pv}}$  – volumen vode potrebne za jedno zalijevanje vrta [l]

$V_{\text{pr}}$  - volumen vode potrebne za jedan ciklus perilice rublja [l]

Iz navedenog ukupna dnevna količina potrebne vode u litrama za navedeno kućanstvo iznosi:

$$V_{\text{puk}} = \frac{200}{7} + 16 \cdot 7 + 2 \cdot 100 + 2 \cdot 45 = 430,571$$

Rezultat se množi s 30 kako bi se dobila prosječna mjesečna potražnja za vodom.

$$V_{\text{puk}} = 430,57 \cdot 30 = 12917,11$$

Potrošnja vode tokom dana je varijabilna i zavisi o dobu dana. U jutarnjim i večernjim satima potrebe za vodom su veće, dok tokom sredine dana mogu biti i jednake nuli zbog nebivanja ukućana doma. Maksimalna potreba za vodom  $V_{\text{pmax}}$  izražena u litrama po satu računa se pomoću formule (4.2.)

$$V_{\text{pmax}} = 4 \cdot V_{\text{ps}} + V_{\text{pv}} + V_{\text{pr}} \quad (4.2.)$$

$$V_{\text{pmax}} = 4 \cdot 7 + 100 + 50 = 1781$$

Izračun je napravljen pod pretpostavkom da se u razdoblju od jednog sata sanitarni čvorovi koristili četiri puta, zaliven je vrt i okrenut je jedan ciklus perilice rublja.

Za odabir odgovarajućeg spremnika, u tablici 4.1. prikazani su mjesečni podaci o količini padalina za grad Rijeku u razdoblju od 2019. do 2022. godine izraženi u  $[l/m^2]$ . Crvenom bojom u tablici su označene maksimalne vrijednosti dok zelena boja označava minimalnu mjesečnu vrijednost padalina za pojedinu godinu. Vidljivo je kako godišnji prosjek ne varira jako tokom godina, dok su razlike ekstrema ogromne.

U rujnu 2022. je pala rekordna količina padalina u Rijeci, koji kao što se vidi u tablici iznosi čak  $593 l/m^2$ . Lipanj 2021. je najsuši mjesec u promatrane četiri godine sa samo  $5,1 l/m^2$ . Iz tablice se također može vidjeti kako sušni mjeseci padaju ljeti, dok se u jesen pojavljuje najveća količina padalina.



Promatrajući izvučene podatke zaključuje se da je najpouzdaniji podatak za odabir spremnika upravo ukupni mjesečni prosjek zbog puno manjeg odstupanja. Dalje u proračunu veličina spremnika se odabire upravo prema prosjeku u 2022. godini, dok su minimalna i maksimalna vrijednost sakupljene kišnice izračunate samo kako bi se dodatno naglasilo veliko variranje ovih vrijednosti.

Tablica 4.1. Količine oborina za grad Rijeku; 2019.-2022.

| Količine padalina po mjesecima u [l/m <sup>2</sup> ] |     |      |     |      |     |     |     |    |     |     |     |     |          | Σ      | Mjesečni prosjek |
|--|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----------|--------|------------------|
| Godina   | 1.  | 2.   | 3.  | 4.   | 5.  | 6.  | 7.  | 8. | 9.  | 10. | 11. | 12. |          |        |                  |
| 2022.  | 34  | 84,8 | 37  | 117  | 53  | 27  | 49  | 24 | 593 | 67  | 147 | 336 | 1.567,10 | 130,59 |                  |
| 2021.  | 174 | 131  | 105 | 112  | 156 | 5,1 | 109 | 30 | 55  | 84  | 193 | 177 | 1.331,30 | 110,94 |                  |
| 2020.  | 28  | 44,4 | 93  | 55,5 | 71  | 177 | 39  | 87 | 221 | 339 | 86  | 188 | 1.427,40 | 118,95 |                  |
| 2019.  | 54  | 136  | 33  | 102  | 288 | 17  | 159 | 53 | 77  | 113 | 416 | 245 | 1.690,70 | 140,89 |                  |

Vrsta krova je krov s jednim nagibom izrađen od čeličnog lima, te je potrebno instalirati samo jedan oluk. Ukupna površina krova  $A_c$  iznosi 150 m<sup>2</sup>. Maksimalna količina prikupljene kišnice  $V_{smax}$  tokom jednog mjeseca, izražene u litrama izračunava se pomoću formule (4.3.).

$$V_{smax} = A_c \cdot Q_{pmax} \cdot k_o \quad (4.3.)$$

gdje su:

$k_o$ - koeficijent gubitaka kišnice za prikupljanje, iz prakse se uzima 0,80 (dobiva se kao umnožak faktora trenja skupljajuće površine i faktora generalnog gubitka zbog otjecanja van oluka.)

$Q_{pmax}$  - količina padalina u mjesecu s najviše padalina, [l/m<sup>2</sup>]

$$V_{smax} = 150 \cdot 592,6 \cdot 0,8 = 71112 \text{ l}$$

Na sličan način računaju se prosječna i minimalna, samo je potrebno prilagoditi vrijednosti prosječne (za 2022. godinu) i minimalne (lipanj 2021.) mjesečne količine padalina.

$$V_{\text{min}} = 150 \cdot 5,1 \cdot 0,8 = 612 \text{ l}$$

$$V_{\text{avg}} = 150 \cdot 130,59 \cdot 0,8 = 15600 \text{ l}$$

Dobivenim rezultatima se potvrđuje gore spomenuto veliko variranje minimuma i maksimuma te se kao reprezentativna vrijednost za odabir spremnika koristi prosječna količina skupljene kišnice. Uzimajući u obzir i mjesečne potrebe kućanstva za vodom odabire se spremnik volumena  $V_t = 6000$  litara odnosno  $6 \text{ m}^3$ . Ovakav spremnik svojim kapacitetom osigurava izdržavanje kućanstva pola mjeseca u potpunosti bez padalina. Za vrijeme jesenskih kišnih perioda dolazit će do preljeva spremnika.

## 4.2. Izbor cijevi

Kako se radi o krovu sa samo jednim nagibom duljina oluka biti će jednaka širini krovne površine, odnosno 10 metara. Odabrana je standardna dimenzija oluka cilindričnog poprečnog presjeka, nazivne veličine 115 milimetara ( $4 \frac{1}{2}$ “).

Cijevi potrebne za dovod kišnice do glavnog spremnika također su nazivne veličine 115mm. Duljina ovih cijevi budući da se spremnik nalazi pod zemljom mora biti nešto veća od visine najnižeg dijela oluka, te iznosi 8 metara.

Koeficijent otpora oluka i dovodnih cijevi izgrađene od PVC-a varira između 0,008 i 0,014. Za potrebe daljnje simulacije uzima se vrijednost od 0,01.

U praksi tlačne cijevi koje se koriste za distribuciju vode iz glavnog spremnika do trošila proračunavaju se uzevši u obzir potrebne minimalne protoke za pojedino trošilo. Formula (4.4.) poznata još kao jednadžba Thomas-Box opisuje ovisnost specifičnog protoka na izlazu cijevi  $q$  [l/s] s ostalim dimenzijama.

$$q = \sqrt{\frac{d^5 \cdot H}{25 \cdot L \cdot 10^5}} \quad (4.4.)$$

gdje su:

$d$  – promjer cijevi [mm]

$H$  – ukupna visina vode [m]

$L$  – ukupna duljina cijevi [m]

Podaci o minimalnim potrebnim protocima za različita trošila dani su tablicom 4.2.

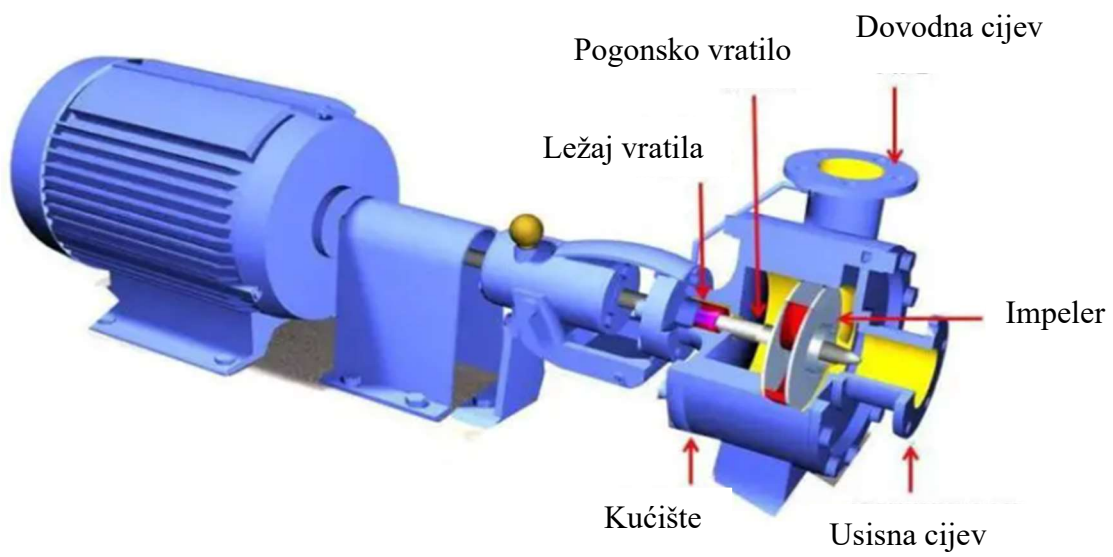
Tablica 4.1. Minimalni potrebni protoci na različitim trošilima

| Vrta trošila                      | Protok [l/s] |
|-----------------------------------|--------------|
| Vodokotlić                        | 0,12         |
| Špina                             | 0,15         |
| Špina s perlatorom                | 0,04         |
| Tuš (s mlaznicom)                 | 0,12         |
| Sudoper s 13 milimetarskom špinom | 0,20         |
| Sudoper s 19 milimetarskom špinom | 0,30         |
| Sudoper s 25 milimetarskom špinom | 0,60         |

Za daljnje potrebe simulacije odabrana je standardna dimenzija cijevi za distribuciju vode po kući koja iznosi  $d = 20$  mm (3/4“).

### 4.3. Karakteristike crpke

Odabrani stroj za distribuciju vode od glavnog spremnika do trošila je centrifugalna crpka sa ugrađenim automatskim paljenjem samo kada je djelovanje crpke nužno što joj može produjiti vijek trajanja. Maksimalna visina na koju ovakva crpka može pumpati vodu je 46 metara. Maksimalni protok koji postiže je 95 litara po minuti. Također iz sigurnosnih razloga crpka je opremljena zaštitom od pregrijavanja i zaštitom od suhog rada. Osnovne komponente ovakve crpke prikazane su na slici 4.1.



*Slika 4.1. Građa crpke [19]*

## 5. SOFTVERSKA SIMULACIJA STRUJANJA

### 5.1. Općenito o programu

Simulacija toka kišnice kroz sustav biti će izvedena u računalnom programu Epanet. To je besplatan i otvoren izvor softvera za modeliranje i analizu vodoopskrbnih sustava koji se koristi za planiranje, projektiranje i analizu vodovodnih mreža.

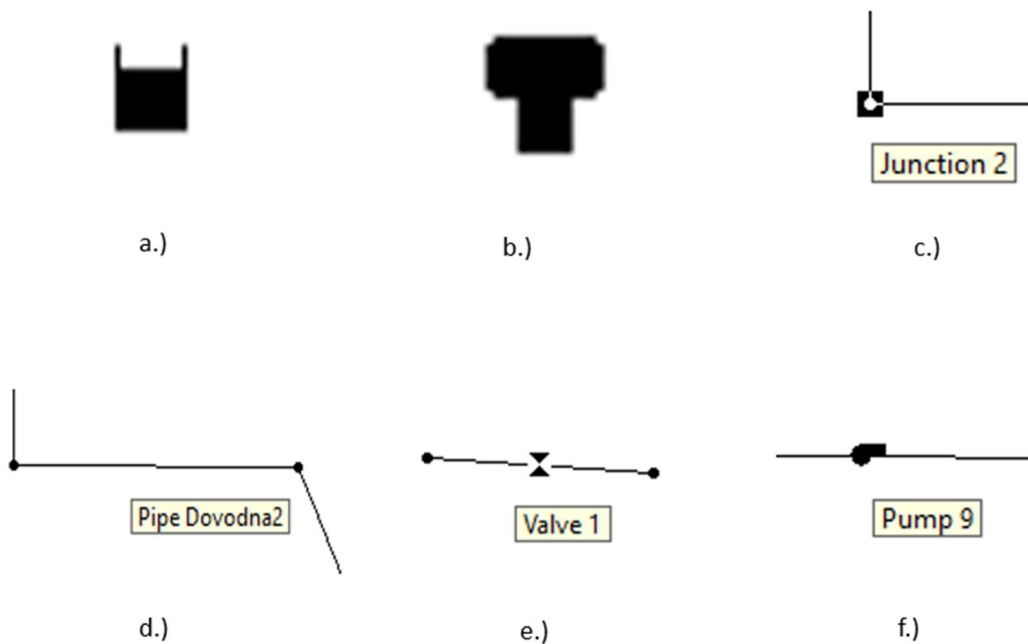
Sastoji se od grafičkog korisničkog sučelja i računalnih algoritama za rješavanje hidrauličkih i vodoopskrbnih problema. Omogućuje korisnicima modeliranje cijevi, čvorova, čvorišta i spremnika u vodoopskrbnim sustavima te simuliraju protok vode, pritisak i kvalitetu vode.

Može se koristiti za rješavanje problema poput praćenja tlaka u mreži, pronalaženja propusnih cijevi, optimizacije rasporeda crpki, i analize vodoopskrbnih scenarija. Epanet je popularan među inženjerima za vodoopskrbu i istraživačima u tom području. Također se koristi za obuku i obrazovanje u hidroiženjerstvu.

Softver ima aktivnu zajednicu korisnika i kontinuirano se razvija kako bi se poboljšale funkcionalnosti i performanse. Glavni elementi koje je moguće prikazati u ovakvom softveru su sljedeći.

#### 5.1.1. Spremnik vode

Za omogućavanje pohrane i dotoka vode u sustav koristi se spremnik vode. U epanetu je moguće kreirati spremnike dva tipa. Otvoreni spremnik ponaša se kao nepresušan izvor vode, dok je za zatvoreni spremnik potrebno definirati početnu razinu vode koja kada se potroši automatski zaustavlja simulaciju. Drugi parametar koji je potrebno unijeti za spremnik je visina vode u spremniku koja se definira upisom odgovarajuće vrijednosti u polje *Total Head*. Na slici 5.1. prikazane su glavne komponente sustava u Epanetu. Za potrebe simulacije biti će korišten samo zatvoreni spremnik koji predstavlja tank ispod zemlje.



Slika 5.1. Komponente cjevovoda u Epanetu: a.) otvoreni spremnik (rezervoar), b.) zatvoreni spremnik, c.) čvor, d.) cijev, e.) ventil, f.) crpka

### 5.1.2 Čvorovi

Mjesta spajanja cijevi nazivaju se čvorovima. Zadani parametri koji opisuju čvorove su njihova elevacija, odnosno visina i njihova potreba za vodom. Također čvorovi su izrazito važni jer služe kao senzori, to jest u njima se prate tlakovi i protoci u cjevovodu. Slika 5.1. prikazuje istaknuti čvor u cjevovodu. Ukoliko se čvoru definira negativna potreba za vodom ponašat će se kao dotok vode u sustav.

### 5.1.3 Cijevi

Cijevi služe za usmjeravanje vode kroz sustav. Određene su s hrapavosti, duljinom i promjerom. Da bi se kreirala cijev potrebno je prethodno kreirati početni i završni čvor, te ih zatim spojiti. Primjer cijevi vidljiv je na slici 5.1.

#### 5.1.4. Ventili

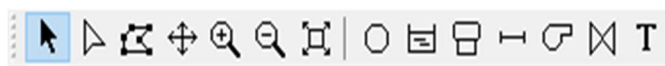
Dio sustava zadužen za reguliranje protoka i isključivanje dijelova cjevovoda naziva se ventilima. U epanetu postoji više vrsta ventila. Za svaku od vrsta ventila potrebno je uvesti drugačije parametre za ispravan rad simulacije. Na slici 5.1. prikazan je TCV (Throttle Control Valve) ventil za koji je potrebno definirati njegovu zatvorenost.

#### 5.1.5. Crpka

Ukoliko se sustav ne može odvijati samo uz pomoć gravitacije potrebno je ugraditi crpku. Kao i za cijevi i ventile potrebno je prvo kreirati rubne čvorove, te ih zatim spojiti u smjeru strujanja fluida. Karakteristike pumpe dobivaju se od proizvođača i za izabranu za ovaj sustav njen protok iznosi 95 litara u sekundi, a maksimalna visina pumpanja 46 metara. Crpke su potpuno definirane, kada sadrže krivulju pumpe koja se dobiva kao skup radnih točaka. Izgled simbola pumpe prikazan je na slici 5.1. Na svim segmentima je moguće definiranje i kvalitetu vode na ulazu i na izlazu, u koju softver sam kasnije uračunava i starost vode.

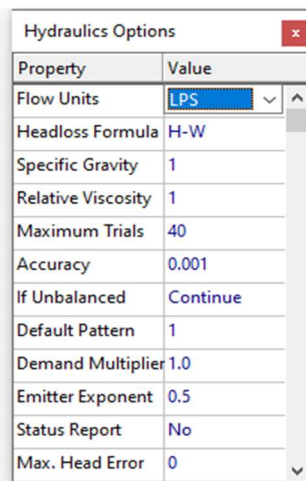
## 5.2. Izrada simulacije

Pojedini dijelovi sustava objašnjeni u prošlom potpoglavlju dodaju se odabirom potrebnog dijela u traci naredbi prikazanoj na slici 5.2.



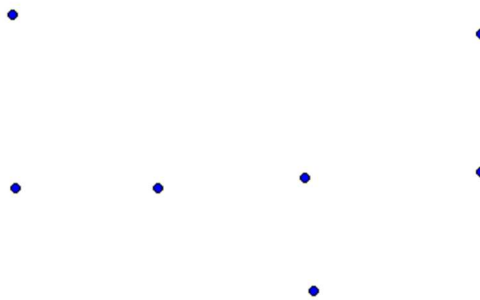
Slika 5.2. Ikone segmenata cjevovoda

Prije konstruiranja sheme sistema za rekuperaciju kišnice potrebno je prvo prilagoditi mjernu jedinicu za protok. Zadana mjerna jedinica za protok u softveru epanet je GPM (galoni po minuti) što je potrebno promijeniti u LPM (litre u minuti). Navedene postavke mijenjaju se pod izbornikom Project >Analysis options vidljivom na slici 5.3.



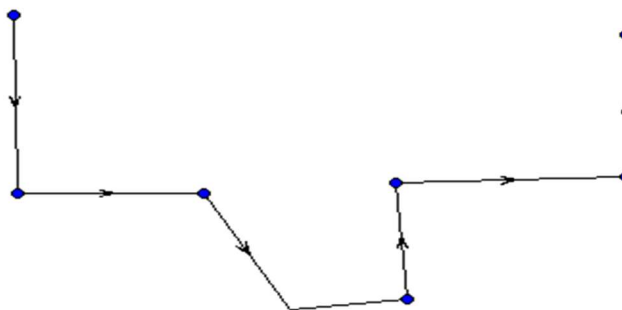
Slika 5.3. Promjena mjernih jedinica

Prvi korak izrade sheme sustava je definiranje čvorova prikazano slikom 5.4.



Slika 5.4. Shema čvorova

Nakon čvorova u sustav se dodaju cijevi, što je vidljivo na slici 5.5.

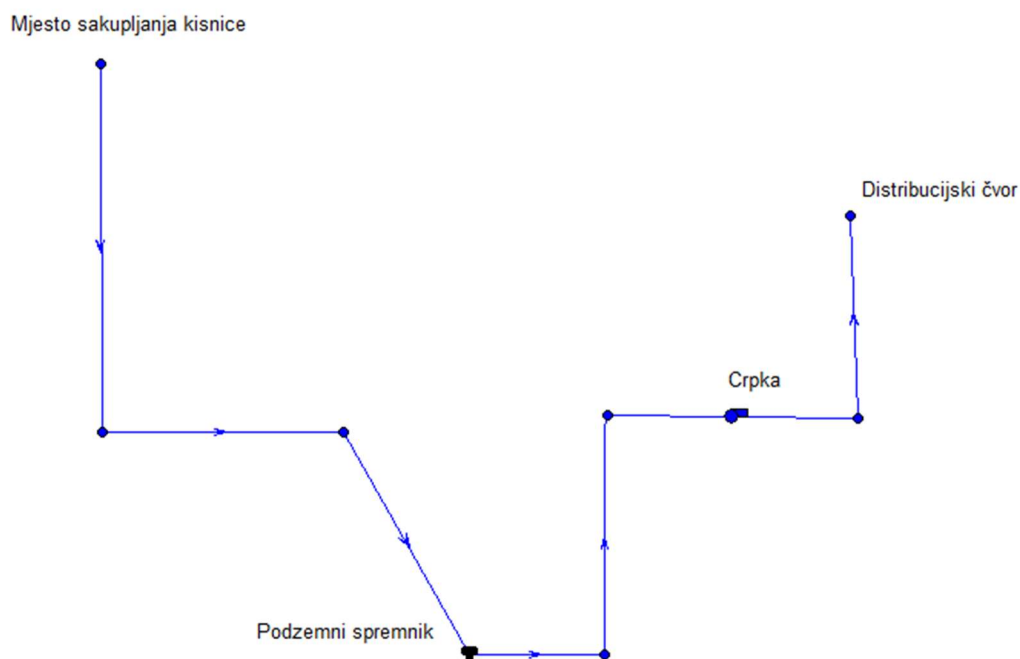


Slika 5.5. Spajanje čvorova cijevima



Potrebno je naglasiti kako se raspored cijevi i čvorova u stvarnosti razlikuje od shematskog prikaza, te se duljina cijevi i visina čvorova definiraju u dodatnim opcijama.

Po završetku postavljanja cijevi i čvorova dodaju se i ostali potrebni segmenti. Za potrebe ove simulacije to su zatvoreni spremnik i električna crpka. Konačna shema sustava prikazana je slikom 5.6. Strelice na cijevima označavaju tok fluida kroz sustav.



Slika 5.6. Kompletirana shema sustava izrađena u epanetu

Sljedeći dio obuhvaća zadavanje potrebnih parametara. Kreće se od dimenzija i visine pojedinih cijevi i čvorova. Duljine i promjeri cijevi dani su tablicom 5.1.

Tablica 5.1. Duljine i promjeri cijevi (lijevo) i visine čvorova (desno)

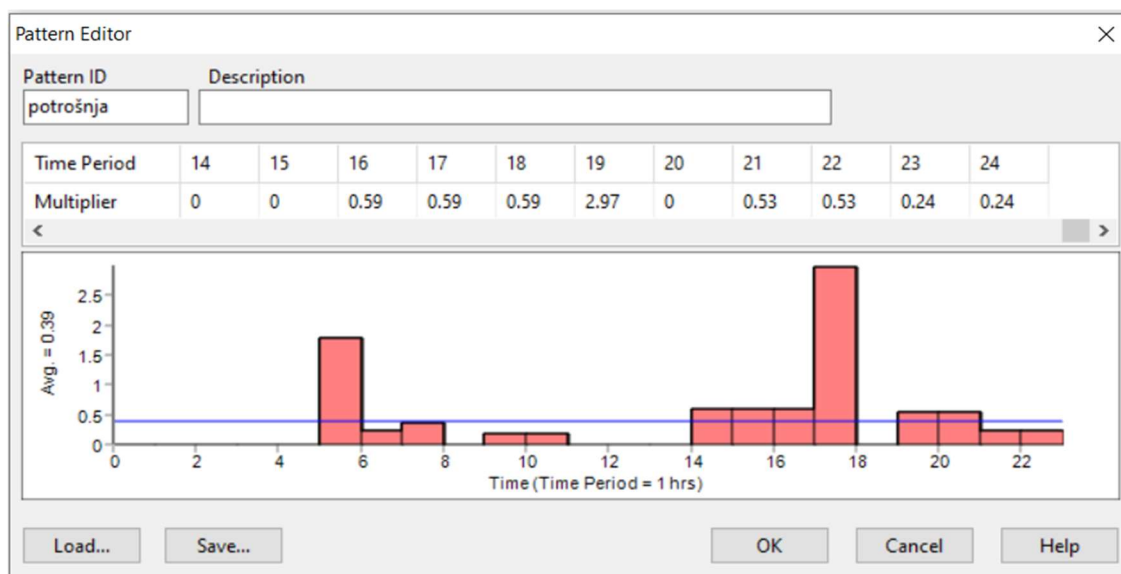
| ID cijevi      | Duljina [m] | Promjer [mm] | Status   | ID čvora     | Visina [m] |
|----------------|-------------|--------------|----------|--------------|------------|
| Distribucijska | 7           | 20           | Otvorena | Ulaz         | 10         |
| Tlačna 1       | 1           | 20           | Otvorena | Čvor 2       | 2          |
| Tlačna 2       | 3           | 20           | Otvorena | Čvor 3       | 0          |
| Dovodna 1      | 8           | 110          | Otvorena | Spremnik     | 0          |
| Dovodna 2      | 2           | 110          | Otvorena | Čvor 4       | 0          |
| Dovodna 3      | 1           | 110          | Otvorena | Čvor 5       | 3          |
|                |             |              |          | Čvor 6       | 3          |
|                |             |              |          | Distribucija | 6          |

Simulacija će biti provedena u trajanju od jednog dana s vremenskim intervalom od jednog sata. Kreiranjem obrazaca potrebe za vodom („Demand pattern“) u ulaznom i distribucijskom čvoru opisat će se promjene u sustavu zavisno o količini padalina i variranju potrošnje kroz dan. Podvrste intenziteta kiše zajedno s prosječnom skupljenom kišnicom [l/min] prikazane su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Intenzitet kiše

| Količina kiše [mm/h/m2] | Naziv podvrste | Skupljena količina [l/min] (prosjek) |
|-------------------------|----------------|--------------------------------------|
| <2                      | Slaba kiša     | <4                                   |
| 2,1 - 15                | Umjerena kiša  | 4,2 - 30 (17,1)                      |
| 15,1 - 30               | Jaka kiša      | 30,2 - 60 (45,1)                     |
| 30,1 - 60               | Vrlo jaka kiša | 60,2 - 120 (90,1)                    |

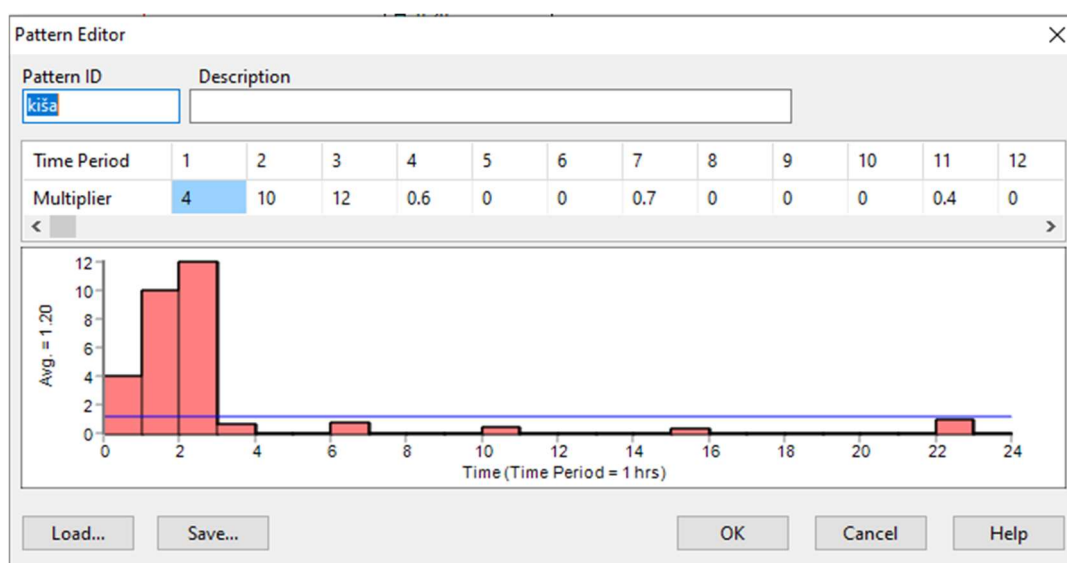
Prosječna skupljena količina u minuti dobivena je množenjem količine, površine krova i koeficijenta gubitaka (i dijeljenjem s 60 kako bi se sati pretvorili u minute). U intervalnim vrijednostima prosjek prikazan u zagradi je dobiven aritmetičkom sredinom gornje i donje vrijednosti. Na slici 5.7. prikazan je kreirani obrazac potrošnje unutar 24 sata.



Slika 5.7. Obrazac potrošnje

Gore navedene vrijednosti uzimaju u obzir povećanu potrošnju ujutro i navečer te dijelove bez potrošnje kroz sredine dana i noći. Maksimalna potrošnja u razdoblju od 17 – 18 sati je izračunata kako je navedeno u poglavlju 4.1. dok su ostale potrošnje dobivene zbrajanjem potrošača po satima i pretvorbom u litre po minuti.

Slikom 5.8. prikazana je potreba za vodom na ulaznom čvoru. Kroz dan se kombiniraju različiti intenziteti kišnice prema tablici 5.2. Ovako kreirani obrazac obuhvaća 2 sata umjerene kiše na početku promatranog intervala i isprekidana razdoblja slabe kiše kroz ostatak intervala.



Slika 5.8.. Obrazac kišnice

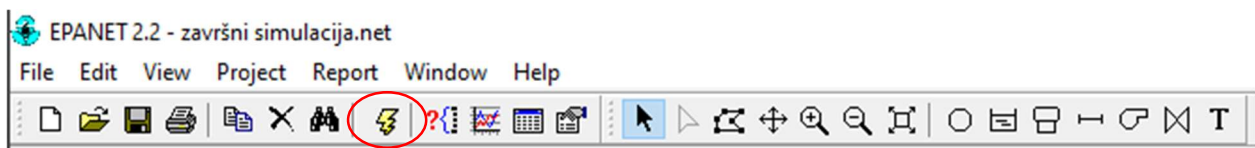
Nakon kreiranja odabranih obrazaca potrebno je povezati pojedini obrazac sa odgovarajućim čvorom. Povezivanje se postiže upisivanjem naziva obrasca u polje obrazac potrošnje („Demand pattern“) u izborniku odgovarajućeg čvora što je prikazano slikom 5.9. Bitno je napomenuti kako je osnovna potreba za vodom („Base Demand“) u čvoru „Ulaz“ izražena negativnim predznakom što označava dotok vode u sustav.

| Junction Ulaz   |           |
|-----------------|-----------|
| Property        | Value     |
| *Junction ID    | Ulaz      |
| X-Coordinate    | -9378.299 |
| Y-Coordinate    | 12146.646 |
| Description     |           |
| Tag             |           |
| *Elevation      | 10        |
| Base Demand     | -1        |
| Demand Pattern  | kiša      |
| Demand Category | 1         |
| Emitter Coeff.  |           |
| Initial Quality |           |
| Source Quality  |           |

| Junction Distribucija |              |
|-----------------------|--------------|
| Property              | Value        |
| *Junction ID          | Distribucija |
| X-Coordinate          | -6776.356    |
| Y-Coordinate          | 11615.651    |
| Description           |              |
| Tag                   |              |
| *Elevation            | 6            |
| Base Demand           | 1            |
| Demand Pattern        | potrošnja    |
| Demand Category       | 1            |
| Emitter Coeff.        |              |
| Initial Quality       |              |
| Source Quality        |              |

Slika 5.9. Povezivanje obrasca s čvorom

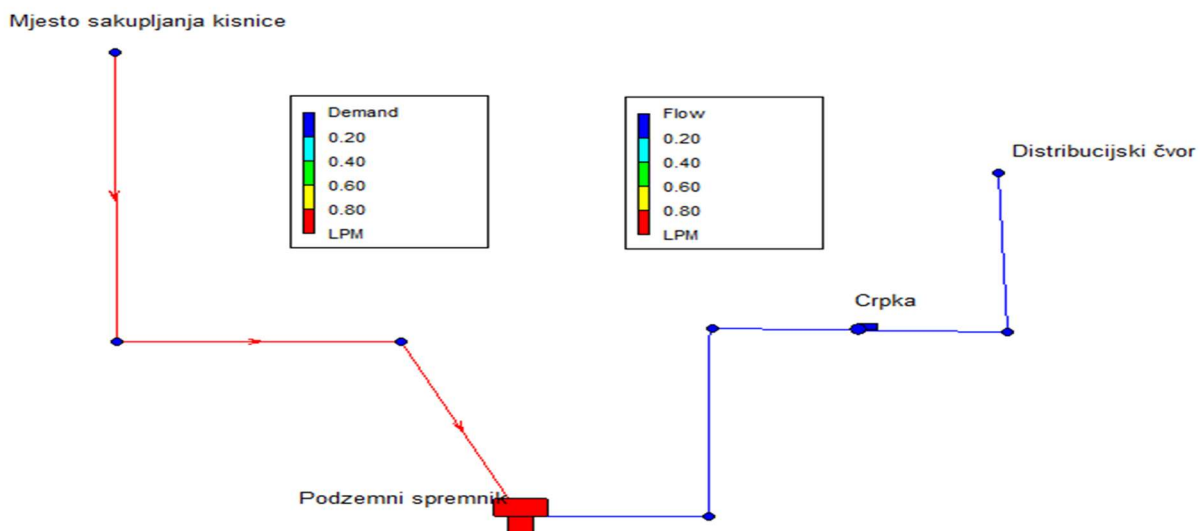
Po završetku zadavanja svih potrebnih parametara počinje se simulacija klikom na ikonu munje u alatnoj traci prikazanoj slikom 5.10.



Slika 5.10. Pokretanje simulacije

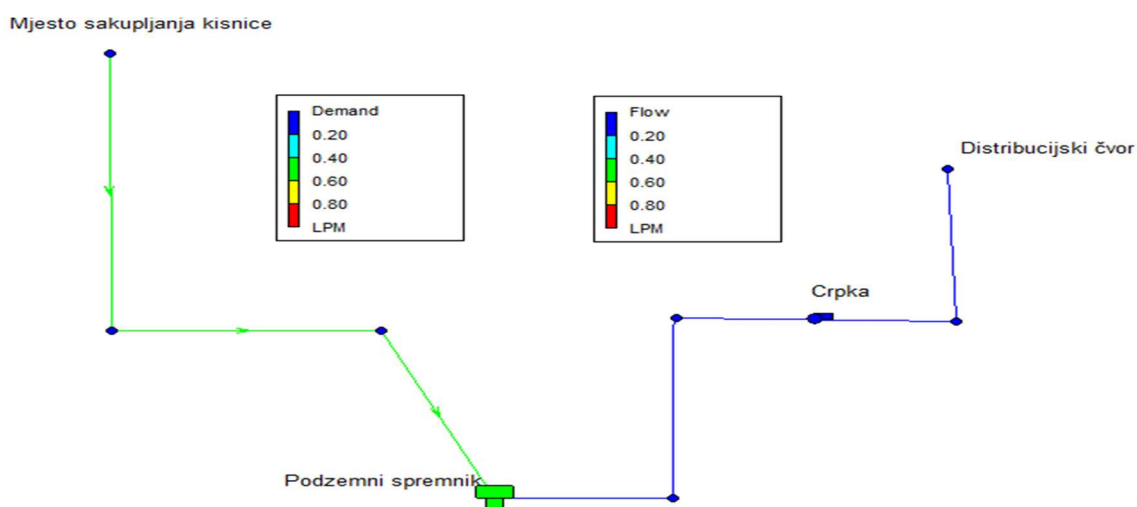
## 6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Promatrani interval traje 24 sata počevši od 00:00. U početku nema potrošača i kišnica je usmjerena samo u spremnik što je prikazano slikom 6.1. Navedena slika također bojom prikazuje protok kroz cijevi te potrebu za vodom po čvorovima. Dane vrijednosti u zagradama označavaju vrijeme u simulaciji. U ovom slučaju crvena boja označava veliki protok kroz dovodne cijevi i veliku potrebu za vodom u spremniku.



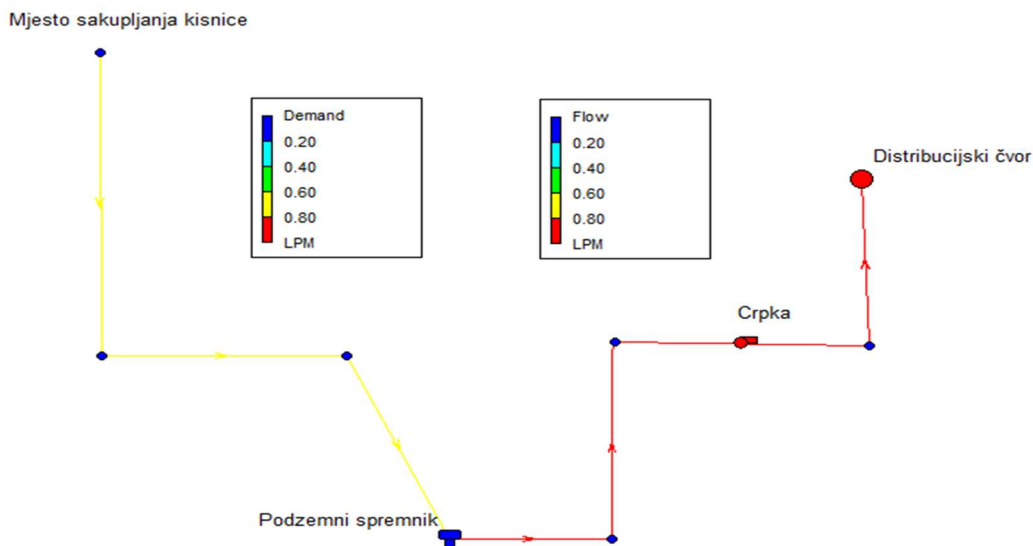
Slika 6.1. Punjenje spremnika (1:00)

Protok do spremnika ovisi o intenzitetu kiše, te je na slici 6.2. vidljivo kako dovodne cijevi i spremnik mijenjaju boju za slabiji dotok kišnice.



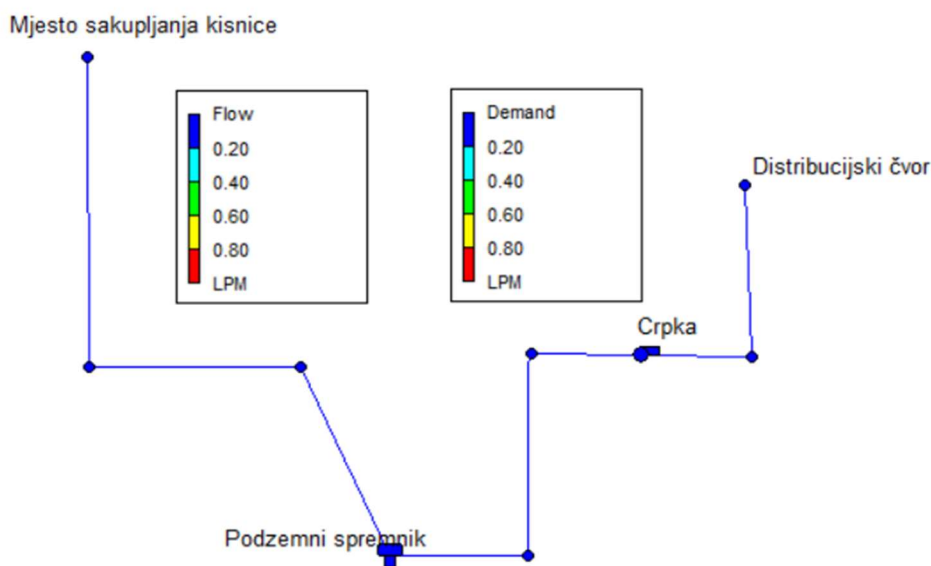
Slika 6.2. Punjenje spremnika (4:00)

Prva veća potrošnja nastupila je u 6:00 čiji su protoci prikazani slikom 6.3. Distribucijski čvor ima najveću potrebu za vodom u sustavu pa su sukladno tome i protoci u tlačnim cijevima veći nego u dovodnim. Strujanje vode prema željenom distribucijskom čvoru omogućeno je paljenjem pumpe. U ovom dijelu dolazi do preljevanja spremnika.



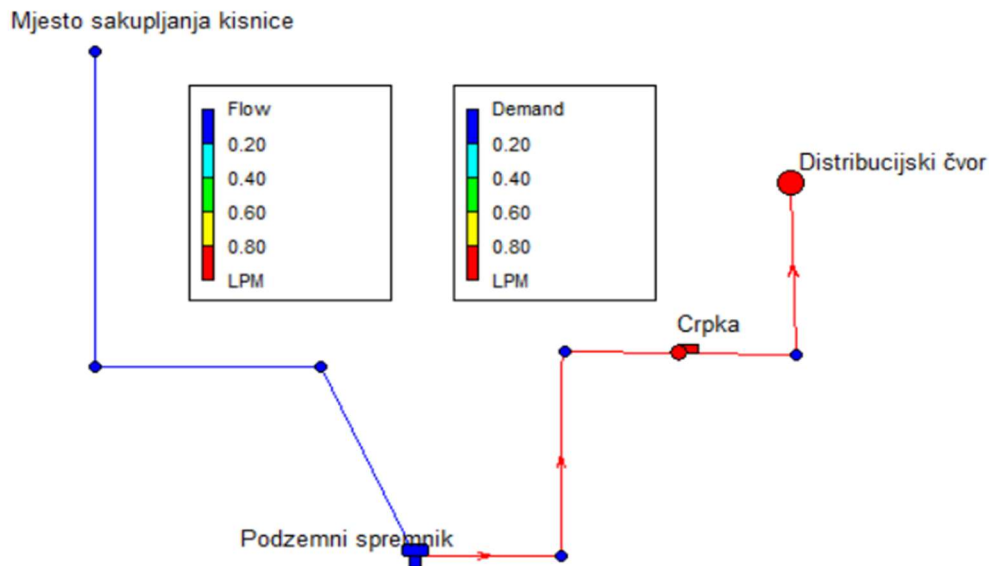
Slika 6.3. Dotok, velika potrošnja i preljev (6:00)

U doba dana kad nema ni padalina ni potrošnje vode cijevi su plave što označava da nema nikakvog protoka. Navedeni slučaj prikazan je slikom 6.4. U ovoj fazi je i crpka ugašena.



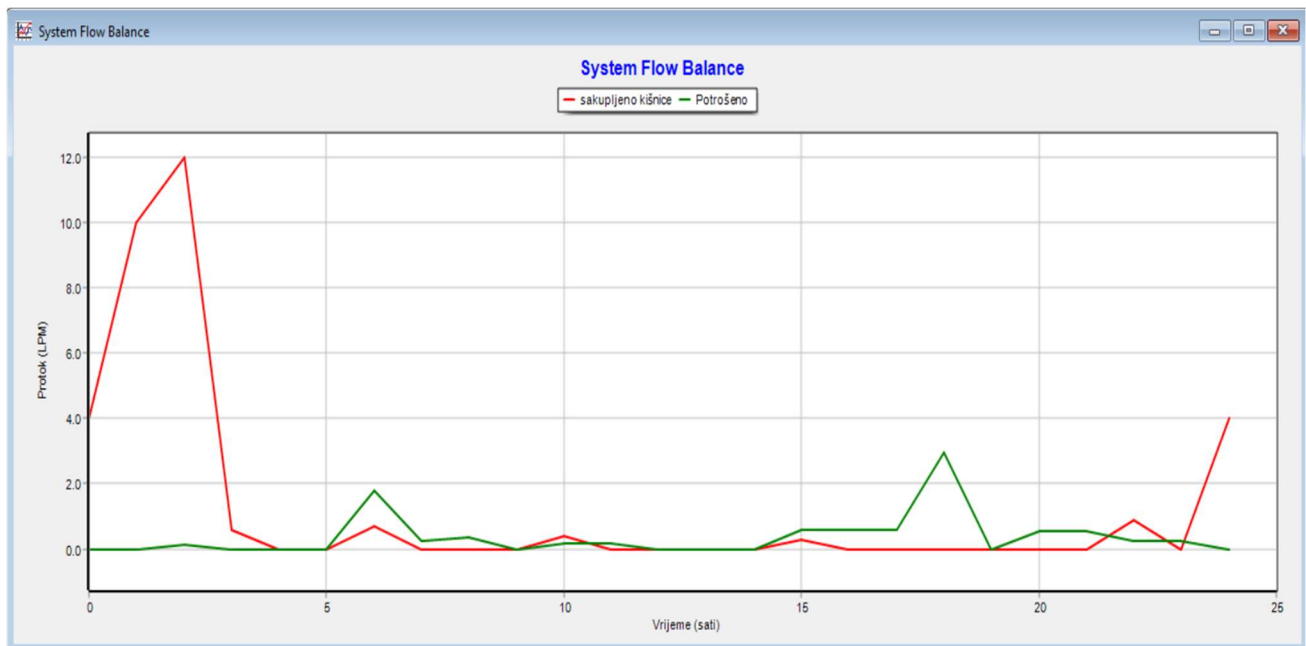
Slika 6.4. Podinterval u potpunosti bez protoka (9:00)

Situacija kada se za potrošnju koristi skupljena kišnica iz spremnika bez trenutnih padalina prikazana je slikom 6.5. Vidljivo je kako nema strelica na dovodnim cijevima i njihova boja je plava što označava da nema protoka. S druge strane pumpa je upaljena te crpi vodu iz spremnika prema distribucijskom čvoru.



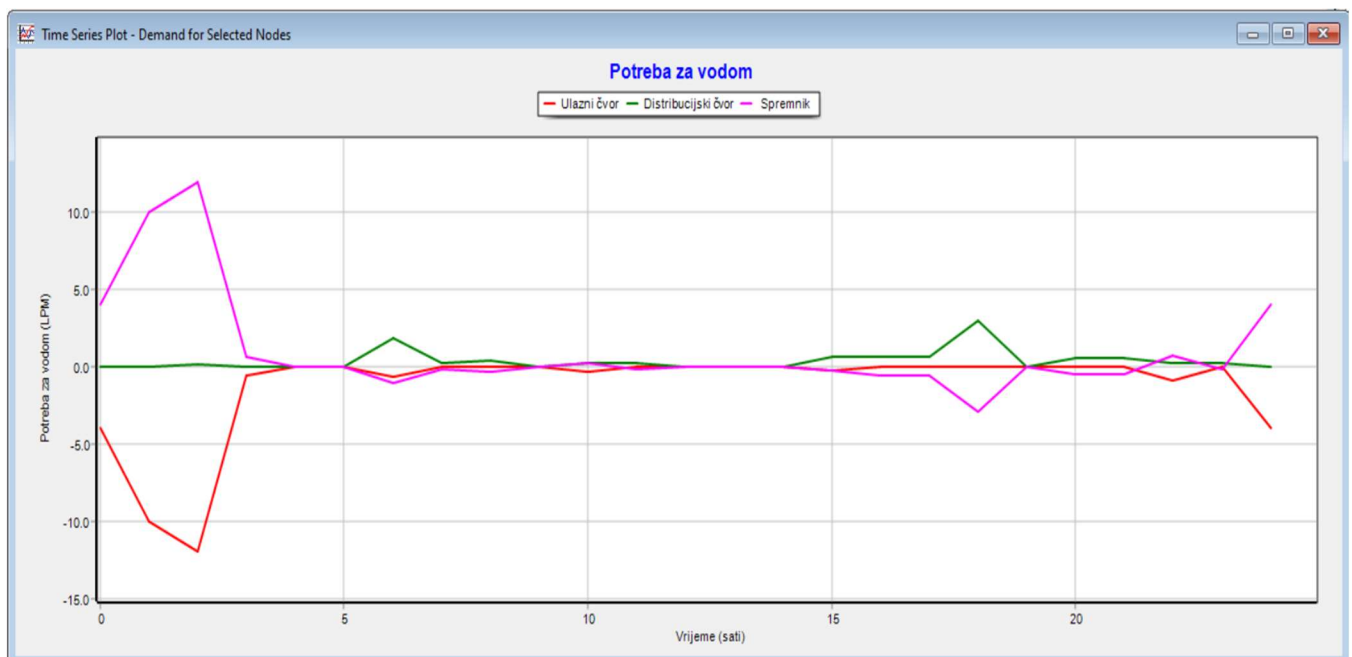
Slika 6.5. Pražnjenje spremnika (18:00)

Promjenu protoka u sustavu kroz vrijeme moguće je prikazati i grafom. Za odabrani interval ukupni omjeri dovedene i potrošene kišnice dani su slikom 6.6. Crvenom bojom je označena krivulja protoka sakupljene kišnice, a zelenom krivulja potrošnje u intervalu od 24 sata.



Slika 6.6. Omjeri sakupljene i potrošene kišnice

Potrebe za vodom po satima dane za tri glavna čvora: ulazni, distribucijski i spremnik dane su grafički po satima slikom 6.7. Krivulja spremnika označena rozom bojom definira punjenje i pražnjenje spremnika. Dok su vrijednosti protoka pozitivne spremnik se puni, a kada padnu ispod nule spremnik se prazni.



Slika 6.7. Potrebe za vodom



U tablici 6.1. dani su numerički podaci o protocima, tlakovima i visinama za interval simulacije 24 sata. Prva tri stupca odnose se na čvor spremnik, druga tri na ulazni čvor, te treća tri na distribucijski čvor.

Tablica 6.1. Protoci i tlakovi u glavnim čvorovima

| Vrijeme [h] | SPREMNIK          |       |          | ULAZ              |       |          | DISTRIBUCIJA      |       |          |
|-------------|-------------------|-------|----------|-------------------|-------|----------|-------------------|-------|----------|
|             | Potrošnja [l/min] | H [m] | Tlak [m] | Potrošnja [l/min] | H [m] | Tlak [m] | Potrošnja [l/min] | H [m] | Tlak [m] |
| 0:00        | 4,00              | 0,20  | 0,20     | -4,00             | 0,20  | -9,80    | 0,00              | 20,20 | 14,20    |
| 1:00        | 10,00             | 0,81  | 0,81     | -10,00            | 0,81  | -9,19    | 0,00              | 20,81 | 14,81    |
| 2:00        | 11,88             | 2,32  | 2,32     | -12,00            | 2,32  | -7,68    | 0,12              | 22,32 | 16,32    |
| 3:00        | 0,60              | 3,00  | 3,00     | -0,60             | 3,00  | -7,00    | 0,00              | 23,00 | 17,00    |
| 4:00        | 0,00              | 3,00  | 3,00     | 0,00              | 3,00  | -7,00    | 0,00              | 23,00 | 17,00    |
| 5:00        | 0,00              | 3,00  | 3,00     | 0,00              | 3,00  | -7,00    | 0,00              | 23,00 | 17,00    |
| 6:00        | -1,08             | 3,00  | 3,00     | -0,70             | 3,00  | -7,00    | 1,78              | 21,99 | 15,99    |
| 7:00        | -0,23             | 2,84  | 2,84     | 0,00              | 2,84  | -7,16    | 0,23              | 22,82 | 16,82    |
| 8:00        | -0,35             | 2,80  | 2,80     | 0,00              | 2,80  | -7,20    | 0,35              | 22,77 | 16,77    |
| 9:00        | 0,00              | 2,75  | 2,75     | 0,00              | 2,75  | -7,25    | 0,00              | 22,75 | 16,75    |
| 10:00       | 0,22              | 2,75  | 2,75     | -0,40             | 2,75  | -7,25    | 0,17              | 22,74 | 16,74    |
| 11:00       | -0,17             | 2,78  | 2,78     | 0,00              | 2,78  | -7,22    | 0,17              | 22,77 | 16,77    |
| 12:00       | 0,00              | 2,76  | 2,76     | 0,00              | 2,76  | -7,24    | 0,00              | 22,76 | 16,76    |
| 13:00       | 0,00              | 2,76  | 2,76     | 0,00              | 2,76  | -7,24    | 0,00              | 22,76 | 16,76    |
| 14:00       | 0,00              | 2,76  | 2,76     | 0,00              | 2,76  | -7,24    | 0,00              | 22,76 | 16,76    |
| 15:00       | -0,29             | 2,76  | 2,76     | -0,30             | 2,76  | -7,24    | 0,59              | 22,65 | 16,65    |
| 16:00       | -0,59             | 2,71  | 2,71     | 0,00              | 2,71  | -7,29    | 0,59              | 22,60 | 16,60    |
| 17:00       | -0,59             | 2,62  | 2,62     | 0,00              | 2,62  | -7,38    | 0,59              | 22,51 | 16,51    |
| 18:00       | -2,97             | 2,53  | 2,53     | 0,00              | 2,53  | -7,47    | 2,97              | 19,74 | 13,74    |
| 19:00       | 0,00              | 2,08  | 2,08     | 0,00              | 2,08  | -7,92    | 0,00              | 22,08 | 16,08    |
| 20:00       | -0,53             | 2,08  | 2,08     | 0,00              | 2,08  | -7,92    | 0,53              | 21,99 | 15,99    |
| 21:00       | -0,53             | 2,00  | 2,00     | 0,00              | 2,00  | -8,00    | 0,53              | 21,91 | 15,91    |
| 22:00       | 0,66              | 1,92  | 1,92     | -0,90             | 1,92  | -8,08    | 0,24              | 21,90 | 15,90    |
| 23:00       | -0,24             | 2,02  | 2,02     | 0,00              | 2,02  | -7,98    | 0,24              | 22,00 | 16,00    |
| 24:00       | 4,00              | 1,99  | 1,99     | -4,00             | 1,99  | -8,01    | 0,00              | 21,99 | 15,99    |

Za cijevi „ulazna“, „distribucijska“ i pumpa, tablicom 6.2. prikazani su podaci o protoku i padovima tlaka kroz trajanje simulacije.

Tablica 6.2. Podaci o cijevima

| Vrijeme [h] | DOVODNA 1      |                  | CRPKA          |                  | DISTRIBUCIJA   |                  |
|-------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|             | Protok [l/min] | Pad tlaka [m/km] | Protok [l/min] | Pad tlaka [m/km] | Protok [l/min] | Pad tlaka [m/km] |
| 0:00        | 4,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 1:00        | 10,00          | 0,01             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 2:00        | 12,00          | 0,01             | 0,12           | -20,00           | 0,12           | 0,01             |
| 3:00        | 0,60           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 4:00        | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 5:00        | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 6:00        | 0,70           | 0,00             | 1,78           | -19,01           | 1,78           | 1,64             |
| 7:00        | 0,00           | 0,00             | 0,23           | -19,98           | 0,23           | 0,04             |
| 8:00        | 0,00           | 0,00             | 0,35           | -19,97           | 0,35           | 0,07             |
| 9:00        | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 10:00       | 0,40           | 0,00             | 0,17           | 19,99            | 0,17           | 0,02             |
| 11:00       | 0,00           | 0,00             | 0,17           | -19,99           | 0,17           | 0,02             |
| 12:00       | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 13:00       | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 14:00       | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 15:00       | 0,30           | 0,00             | 0,59           | -19,89           | 0,59           | 0,21             |
| 16:00       | 0,00           | 0,00             | 0,59           | -19,89           | 0,59           | 0,21             |
| 17:00       | 0,00           | 0,00             | 0,59           | -19,89           | 0,59           | 0,21             |
| 18:00       | 0,00           | 0,00             | 2,97           | -17,24           | 2,97           | 4,23             |
| 19:00       | 0,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |
| 20:00       | 0,00           | 0,00             | 0,53           | -19,91           | 0,53           | 0,17             |
| 21:00       | 0,00           | 0,00             | 0,53           | -19,91           | 0,53           | 0,17             |
| 22:00       | 0,90           | 0,00             | 0,24           | -19,98           | 0,24           | 0,04             |
| 23:00       | 0,00           | 0,00             | 0,24           | 19,98            | 0,24           | 0,04             |
| 24:00       | 4,00           | 0,00             | 0,00           | -20,00           | 0,00           | 0,00             |

## 7. ZAKLJUČAK

Rekuperacija kišnice je održiv način gospodarenja oborinskim vodama. Donosi brojne ekonomske i ekološke prednosti. Implementacijom ovakvih sustava u kućanstva i industrijska postrojenja diljem svijeta moguće je smanjiti potrošnju pitke vode i do 50%, što je vrlo korisno u današnje doba s puno suša, sve slabijim izvorima vode i velikim rastom potrošnje. Sakupljanje kišnice također smanjuje rizik od poplava i rasterećuje odvodne sustave.

U ovom radu napravljen je pregled građe sustava za rekuperaciju kišnice, kao i analiza protoka i padova tlaka na konkretnom primjeru kuće u kojoj živi četveročlana obitelj. Simulacija i analiza su rađene u softveru Epanet, koji omogućuje brzo i jednostavno mijenjanje i prilagođavanje svih parametara i dimenzija, što je od velike važnosti jer se na taj način mogu provesti izračuni za svaku vrstu objekta. Osim mijenjanja dimenzija softver također omogućuje i promjene potreba za vodom u promatranim vremenskim intervalima, što se u ovom radu koristilo za variranje potrošnje i količine padalina kroz dan. Epanet je vrlo fleksibilan s ukupnom veličinom sustava te se njime mogu provesti simulacije i za čitave gradove.

Korištenjem numeričke analize na način na koji je prikazano kroz ovaj rad moguće je maksimalno optimizirati ovakve sisteme i time im povećati učinkovitost. Kombiniranjem tehnologije prikupljanja kišnice s naprednim računalnim modeliranjem omogućuje bolju upravljivost, veću efikasnost i održivost ovog važnog resursa.

## 8. LITERATURA

- [1] – globalna konferencija o održivoj urbanizaciji, s interneta: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-72-2022-7-8-kongr.pdf>
- [2] – Mark Manuel: „The sustainability of ancient water control techniques in Iran“, s interneta: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12685-017-0200-7>
- [3] - slika preuzeta s interneta: <https://www.greenprophet.com/2022/05/ancient-aqueduct-of-jerusalem-uncovered/>
- [4] – slika s interneta: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aqua\\_Claudia](https://en.wikipedia.org/wiki/Aqua_Claudia)
- [5] – slika s interneta: <https://www.novilist.hr/rijeka-regija/rijeka>
- [6] – s interneta: <https://smartwateronline.com/news/is-it-illegal-to-collect-rainwater-in-the-us>
- [7] – Narula Institute of Technology: „Draft Project Proposal on Rainwater Harvesting at NIT Campus“, s interneta: [https://www.nit.ac.in/pdf/Rainwater\\_harvesting.pdf](https://www.nit.ac.in/pdf/Rainwater_harvesting.pdf), 10.rujna 2023.
- [8] – slika s interneta: <https://wgbis.ces.iisc.ac.in/energy/water/paper/drinkingwater/rainwater>
- [9] - Sanjay Kumar Ray: „Promotion of Improved Cultivation Practices in Agri & Allied Sector for Food and Nutritional Security“, s interneta: [https://www.researchgate.net/figure/deal-schematic-diagram-of-a-rooftop-rainwater-harvesting-structure\\_fig1\\_341641104](https://www.researchgate.net/figure/deal-schematic-diagram-of-a-rooftop-rainwater-harvesting-structure_fig1_341641104), 10.rujna 2023.
- [10] – slika s interneta: <https://hourstrong.com/pravila-i-redoslijed-za-ugradnju-oluka/>
- [11] - slika s interneta: <https://www.pinterest.com/pin/pinterest--413486809513885298/>
- [12] – slika s interneta: <https://www.slideshare.net/zarandean/rain-water-harvesting-45114852>
- [13] – slika s interneta: <https://rainwaterharvesting.tamu.edu/inlets-outlets-and-other-openings/>
- [14] – slika s interneta: <https://rainharvesting.co.uk/portfolio/wisy-vortex-wff100/>
- [15] – D.R. Samayamanthula, C. Sabarathinam, H. Bhandary: „Treatment and effective utilization of greywater“, s interneta: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-019-0966-0> 10.rujna 2023.
- [16] – s interneta: <https://aqua3m.com/proizvod/uv-lampa-za-dezinfekciju-vode/>
- [17] – slika s interneta: <https://blog.enduraplas.com/water-storage-rain-harvesting/how-to-choose-the-right-pump-for-your-rain-harvesting-system>
- [18] - s interneta: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k2\\_1&Godina=2022](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k2_1&Godina=2022)

[19] – s interneta: <https://engineeringexploration.com/centrifugal-pump-components-types-and-application/>

- Teston, T. P. Scolaro: „Comprehensive Environmental Assessment of Rainwater Harvesting Systems“, s interneta: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/17/2716> 10.rujna 2023.
- C. Vialle, C. Sablayrolles, M. Lovera: „Modelling of a roof runoff harvesting system: The use of rainwater for toilet flushing“, s interneta: <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2011.031> 10.rujna 2023.
- S. Ward, F. A. Memon and D. Butler: „Rainwater harvesting: model-based design evaluation“, s interneta: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/bitstream/handle/10036/4263/Rainwater%20harvesting%20-%20model-based%20design%20evaluation.pdf;jsessionid=8B7EBC06DC1B88B7DA87F68D19802938?sequence=5>, 10.rujna 2023.
- S interneta: <https://www.water.gov.my/jps/resources/auto%20download%20images/5840fdbf25442.pdf>

## 9. SAŽETAK

Sustavi za rekuperaciju kišnice predstavljaju održiv način vodoopskrbe. Kroz ovaj rad u početnom dijelu kratko je prezentiran razvoj ovakvih sustava kroz povijest ljudske civilizacije. U središnjem dijelu navedeni su osnovni dijelovi sustava i njihove uloge, kao i dimenzioniranje cjelokupnog sustava. Rad također obuhvaća provedenu jednodimenzionalnu numeričku analizu sustava za ponovno korištenje kišnice kojoj je svrha optimizacija i postizanje maksimalne učinkovitosti kao i jednostavna prilagodba sustava ovisno o mjestu implementacije. Navedena analiza izvršena je pomoću softverskog programa Epanet.

Ključne riječi: Rekuperacija kišnice, numerička analiza, oborinske vode, Epanet

## 10. SUMMARY

Rainwater harvesting systems represent a sustainable approach to water supply. In this study, the initial section briefly presents the development of such systems throughout the history of human civilization. The central part outlines the basic components of the system and their roles, as well as the sizing of the entire system. The paper also includes a conducted one-dimensional numerical analysis of the rainwater reuse system, aimed at optimizing and achieving maximum efficiency, as well as providing easy adaptation of the system depending on the implementation location. Analysis was performed using the software Epanet.

Keywords: Rainwater harvesting, numerical analysis, stormwater, Epanet

# 11. PRILOG

## 11.1. Popis slika i tablica

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Perzijski Kanat [3] .....   | 4  |
| Slika 2.2. Aqua Claudia [4] .....  | 4  |
| Slika 2.3. Sakupljanje kišnice CGO Marišćina [5] .....   | 5  |
| Slika 3.1. Sustav za rekuperaciju kišnice; 1- Prikupna površina, 2- cijevi za dovod do spremnika, 3 spremnik [7] .....                                 | 7  |
| Slika 3.2 Krov s jednim nagibom (lijevo) i s dva nagiba (desno) [8] .....  | 8  |
| Slika 3.3. Simetrični (lijevo) i polusimetrični (desno) četverostrani krov [8] .....   | 9  |
| Slika 3.4. Shema cijevi sustava za rekuperaciju kišnice na modelu kuće [9] .....   | 10 |
| Slika 3.5. Raščlanjeni sustav dovodnih cijevi [10] .....   | 11 |
| Slika 3.6. Postavljene dovodne cijevi [11] .....   | 12 |
| Slika 3.7. a.) betonski spremnik, b.) cilindrični plastični spremnik, c.) spremnik izrađen od gline, d.) pravokutni plastični spremnik [12] .....      | 13 |
| Slika 3.8. Građa spremnika [13].....   | 14 |
| Slika 3.9. Separator krhotina i aerator [14] .....   | 15 |
| Slika 3.10. a.) Jednostavni uređaj za filtraciju kišnice [15], b.) Moderni filter s UV lampom [16] .....   | 16 |
| Slika 3.11. Pumpe za distribuciju kišnice [17] .....   | 17 |
| Tablica 4.1. Količine oborina za grad Rijeku; 2019.-2022. ....   | 20 |
| Tablica 4.1. Minimalni potrebni protoci na različitim trošilima .....  | 22 |
| Slika 4.1. Građa crpke [19] .....  | 23 |
| Slika 5.1. Komponente cjevovoda u Epanetu: a.) otvoreni spremnik (rezervoar), b.) zatvoreni spremnik, c.) čvor, d.) cijev, e.) ventil, f.) crpka ..... | 25 |
| Slika 5.2. Ikone segmenata cjevovoda .....   | 26 |
| Slika 5.3. Promjena mjernih jedinica .....   | 27 |
| Slika 5.4. Shema čvorova .....   | 27 |
| Slika 5.5. Spajanje čvorova cijevima .....   | 27 |
| Slika 5.6. Kompletirana shema sustava izrađena u epanetu.....  | 28 |
| Tablica 5.1. Duljine i promjeri cijevi (lijevo) i visine čvorova (desno) .....   | 28 |
| Tablica 5.2. Intenzitet kiše.....  | 29 |
| Slika 5.7. Obrazac potrošnje .....   | 29 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 5.8.. Obrazac kišnice .....                           | 30 |
| Slika 5.9. Povezivanje obrasca s čvorom .....               | 31 |
| Slika 5.10. Pokretanje simulacije .....                     | 31 |
| Slika 6.1. Punjenje spremnika (1:00) .....                  | 32 |
| Slika 6.2. Punjenje spremnika (4:00) .....                  | 32 |
| Slika 6.3. Dotok, velika potrošnja i preljev (6:00) .....   | 33 |
| Slika 6.4. Podinterval u potpunosti bez protoka (9:00)..... | 33 |
| Slika 6.5. Pražnjenje spremnika (18:00) .....               | 34 |
| Slika 6.6. Omjeri sakupljene i potrošene kišnice .....      | 35 |
| Slika 6.7. Potrebe za vodom.....                            | 35 |
| Tablica 6.1. Protoci i tlakovi u glavnim čvorovima .....    | 36 |
| Tablica 6.2. Podaci o cijevima.....                         | 37 |