

# Analiza rada precrpne stanice u sklopu vodoopskrbnog sustava

---

Milovac, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:475876>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ante Milovac**

**Split, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ante Milovac**

**Analiza rada precrpnice u sklopu  
vodoopskrbnog sustava**

**Diplomski rad**

**Split, 2024.**



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,  
ARCHITECTURE AND GEODESY

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO  
KANDIDAT: Ante Milovac  
MATIČNI BROJ: 0083219949 (922)  
KATEDRA: Katedra za hidromehaniku i hidrauliku  
KOLEGIJ: Hidraulika

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Analiza rada precrpne stanice u sklopu vodoopskrbnog sustava

Opis zadatka: Za potrebe diplomskog rada potrebno je analizirati vodoopskrbni sustav naselja Drage . Nadalje, potrebno je opisati elemente sustava s naglaskom na precrpne stanice, opisati postupak hidrauličkog proračuna te dimenzioniranje i odabir odgovarajućih crpki temeljem mjerodavnih protoka i zahtjeva za minimalni tlak u mreži. Nadalje, potrebno je izvršiti hidraulički proračun precrpne stanice u svrhu određivanja potrebne visine podizanja piezometarske linije te proračun vodnog udara uslijed ispadanja precrpne stanice iz pogona.

U Splitu, 07. ožujka 2024.

Mentor:  
doc. dr. sc. Toni Kekez

Predsjednik Povjerenstva za završne i  
diplomske ispite studija Građevinarstvo:  
izv. prof. dr. sc. Ivan Balić



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,  
ARCHITECTURE AND GEODESY

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

kojom ja, Ante Milovac, JMBAG: 0083219949 , student Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, kao autor ovog diplomskog rada izjavljujem da sam ga izradio samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Tonija Kekeza.

U radu sam primijeni metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, zaključke, teorije, formulacije i grafičke prikaze koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u radu citirao sam i povezao s korištenim bibliografskim jedinicama.

---

(vlastoručni potpis studenta)

# **Analiza rada precrpne stanice u sklopu vodoopskrbnog sustava**

## ***Sažetak:***

U okviru ovog diplomskog rada analiziran je vodoopskrbni sustav naselja Drage te su opisani elementi sustava s naglaskom na precrpne stanice. Također, opisan je postupak hidrauličkog proračuna te dimenzioniranje i odabir odgovarajućih crpki temeljem mjerodavnih protoka i zahtjeva za minimalni tlak u mreži. Konačno, izvršen je hidraulički proračun precrpne stanice u svrhu određivanja potrebne visine podizanja piezometarske linije te proračun vodnog udara uslijed ispadanja precrpne stanice iz pogona.

## ***Ključne riječi:***

Vodoopskrbni sustav, precrpna stanica, hidraulički proračun, vodni udar

# **Analysis of the Pumping Station Operation within the Water Supply System**

## ***Abstract:***

In this thesis, the water supply system of the town of Draga was analyzed and the elements of the system were described with an emphasis on pumping stations. Additionally, the procedure for hydraulic calculation, pump sizing, and selection based on relevant flow rates and minimum pressure requirements in the network is outlined. Finally, a hydraulic calculation for the pump station was performed to determine the necessary height for raising the piezometric line, as well as a water hammer calculation due to pump station failure.

## ***Keywords:***

Water supply system, pump station, hydraulic calculation, water hammer

## S a d r Ź a j

<b>1. UVOD .....</b>	<b>2</b>
<b>2. CRPNE STANICE .....</b>	<b>3</b>
2.1 Tipovi i namjena .....	3
2.2 Proračun crpnih stanica .....	5
2.2.1 Ulazni podatci .....	5
2.2.2 Osnovna analiza crpki i crpnog sustava .....	6
2.3 Karakteristične krivulje .....	9
2.3.1 Odnos između crpke i crpnog sustava .....	11
2.4 Izbor crpki .....	12
2.4.1 Broj crpki .....	13
<b>3. PRECRPNICE .....</b>	<b>13</b>
3.1 Planiranje i projektiranje precrpnica .....	15
3.2 Hidraulički proračun .....	16
3.3 Projektiranje, izvedba i održavanje .....	16
3.4 Tipovi crpki .....	17
<b>4. HIDRAULIČKI PRORAČUN .....</b>	<b>20</b>
4.1. Hidraulički proračun visine dizanja precrpne stanice .....	25
4.2. Proračun vodnog udara prilikom ispadanja precrpne stanice .....	30
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>33</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>34</b>
<b>Popis slika i tablica .....</b>	<b>35</b>

## 1. UVOD

U ovom diplomskom radu analiziran je rad precrpne stanice u sklopu vodoopskrbnog sustava. Precrpnice imaju važnu ulogu u vodoopskrbnim sustavima te služe za osiguravanje potrebnog tlaka u vodovodnoj mreži na područjima gdje to nije moguće postići gravitacijski.

Podloge za diplomski rad preuzete su iz glavnog projekta precrpne stanice „Drage 2“, za naselje Drage u Zadarskoj županiji. S obzirom na postojeće izazove u vodoopskrbi, osobito u višim nadmorskim dijelovima naselja Drage, izgradnja ove crpne stanice ima za cilj poboljšanje tlaka u mreži i time rješavanje problema nedostatka tlaka. Projekt se fokusira na unapređenje infrastrukture vodoopskrbe i optimizaciju distribucije vode, što će rezultirati značajnim poboljšanjem usluga za korisnike u tom području. Uz to, u diplomskom radu je detaljno objašnjena uloga precrpnih stanica, tipovi i namjena te način projektiranja. Također, prikazani su određeni tipovi crpki proizvođača Grundfos, koji se mogu koristiti za ugradnju u precrpnim stanicama za podizanje tlaka.

Temeljem prikupljenih podloga, odabran je jedan dio vodoopskrbnog sustava koji je korišten za daljnju analizu. Izabrana je jedna od najnepovoljnijih lokacija izljevnom mjestu za koji su provedene hidrauličke analize. Za definirane uvjete proveden je proračun ukupne potrebne visine dizanja koji precrpna stanica mora ostvariti na izljevnom mjestu, uz zadovoljavanje uvjeta minimalnog tlaka za potrebe protupožarne zaštite.

Analiziran je scenarij uključivanja precrpne stanice u pogon kako bi se utvrdilo vrijeme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje u vodoopskrbnom sustavu. Konačno, izvršen je proračun vodnog udara u slučaju ispadanja sustava iz pogona.



## 2. CRPNE STANICE

Crpne stanice su objekti koji u sustavima vodoopskrbe upravljaju premještanjem vode. Njihova osnovna funkcija je omogućiti prijenos vode s niže na višu nadmorsku visinu. Vodoopsrbni sustav danas je teško zamisliti bez crpnih stanica zbog velikih udaljenosti i visinskih razlika između objekata vodoopsrbnog sustava.

### 2.1 Tipovi i namjena

Crpne stanice dijelimo na:

- crpne stanice sirove vode
- crpne stanice čiste vode
- crpne stanice u vodovodnoj mreži

Crpne stanice se primarno koriste za transport vode od zahvata do postrojenja za obradu vode, te od postrojenja za obradu vode do vodospremnika. Crpne stanice također služe u vodovodnoj mreži za transport vode u više zone ili za regulaciju tlaka tijekom sati vršne potrošnje. Crpke se upotrebljavaju i na samom zahvatu vode, jer se voda često nalazi duboko ispod površine terena.

Koriste se različite vrste crpki od kojih su najčešće radijalne i centrifugalne crpke. Najčešće se koriste centrifugalne crpke, koje obuhvaćaju radijalne, mješovite i aksijalne crpke. Karakterizirane su sa elementima:

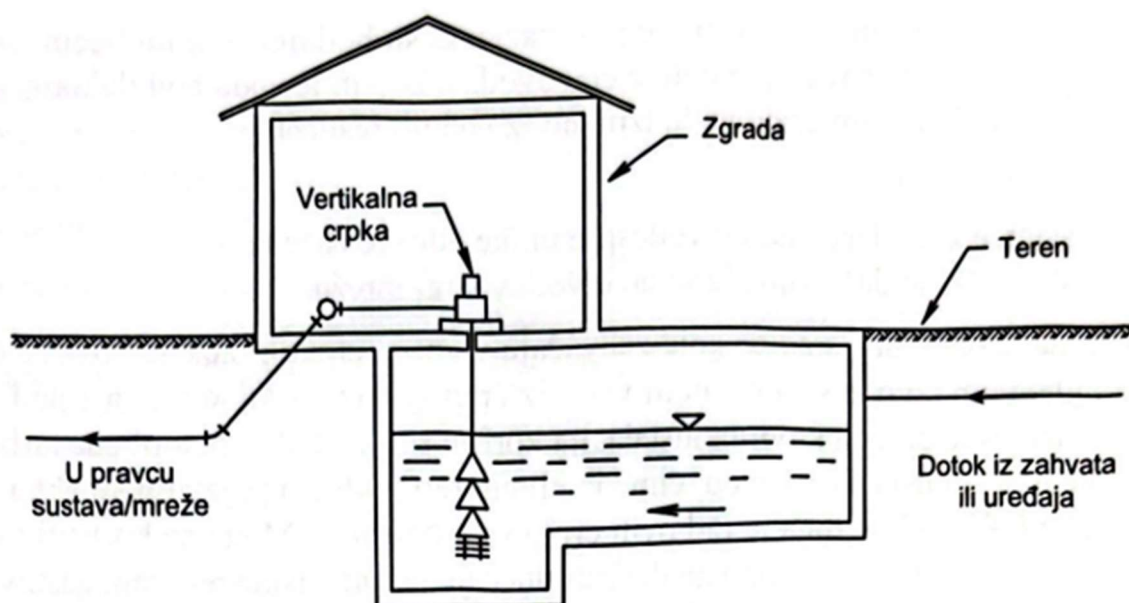
- rotor koji pokreće tekućinu u rotacijsko gibanje, a najčešće se izrađuje od bronce ili sličnih legura
- kućište koje usmjerava tekućinu prema rotoru i vodi je van kućišta, a najčešće se izvodi iz čelika

Prilikom planiranja crpnih stanica, cilj je pronaći najbolje rješenje koje omogućuje automatski rad, osigurava pouzdanost i učinkovitost te zahtijeva minimalno održavanje i niske troškove rada i održavanja. Da bi se postigli ovi ciljevi, crpne stanice i crpni sustavi projektiraju se na različite načine. Glavni fokus je na smanjenju hidrauličkih gubitaka u sustavu te na sprječavanju pojave kavitacije i podtlaka u usisnom cjevovodu. Crpne stanice se mogu projektirati na razne načine, a njihov dizajn i konstrukcija uvelike ovise o položaju, vrsti usisnog dijela, i načinu na koji se voda zahvaća. Tako razlikujemo crpne stanice:

- koje su opremljene bazenom sa slobodnim vodnim licem
- koje preuzimaju vodu iz cjevovoda u kojem je voda pod pritiskom
- koje preuzimaju vodu izravno iz prirodnih vodnih izvora
- koje pumpaju vodu u vodospremnike
- koje pumpaju vodu izravno u vodovodnu mrežu.

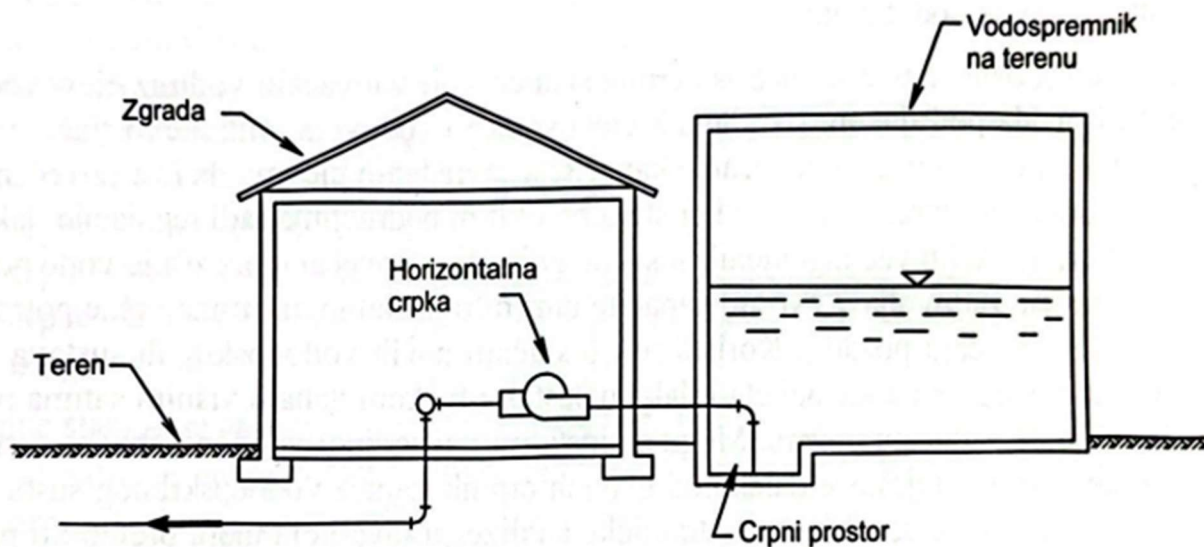
U suvremenim crpnim stanicama najčešće se koristi sustav za preuzimanje vode iz crpnog bazena. Ove crpne stanice obično su projektirane s vodom uzetom iz crpnog bazena smještenog ispod razine same stanice.

Najefikasnije rješenje za ovu primjenu predstavljaju vertikalne turbinske crpke (Slika 1), koje ne zahtijevaju usisni cjevovod. Ovim dizajnom eliminira se problem podtlaka i kavitacije, čime se osigurava pouzdaniji rad i veća učinkovitost sustava.



Slika 1: Shema instalacije crpne stanice s vertikalnim potpljenim crpkama (izvor: *Vodoopsrka naselja, J. Margeta*)

Horizontalne centrifugalne crpke (Slika 2) najčešće se koriste kada se voda preuzima iz crpnog bazena smještenog iznad terena ili djelomično ukopanog. U takvim slučajevima, problemi povezani s usisnim cjevovodom su manje izraženi, jer je usisna visina vrlo mala ili je usisni cjevovod pod tlakom. Ova konfiguracija omogućuje učinkovit rad crpki uz minimalne poteškoće u vezi s kavitacijom i podtlakom.



Slika 2: Shema instalacije crpne stanice s horizontalnim crpkama (izvor: Vodoopsrka naselja, J. Margeta)

## 2.2 Proračun crpnih stanica

Proračun crpnih stanica je ključan je za dizajn i optimizaciju sustava crpljenja vode. Ovaj proces uključuje nekoliko ključnih koraka kako bi se osigurala učinkovitost, pouzdanost i dugovječnost crpne stanice.

### 2.2.1 Ulazni podatci

Za pouzdano i precizno određivanje svih parametara i karakteristika crpnih stanica potrebno je prikupiti sljedeće informacije:

- veličine i svojstva protoka: odrediti količinu vode koju je potrebno crpiti te njezine karakteristike
- kvaliteta vode: analizirati kemijska i fizička svojstva vode koja se crpi
- lokacija i karakteristike odredišta: istražiti mjesto na koje se voda transportira, uključujući uvjete terena
- radni ciklus crpki i kapacitet crpnog bazena: razmotrite ciklus rada crpki i izračunajte potrebni volumen retencijskog prostora u crpnom bazenu.
- karakteristike tlačnog cjevovoda: istražite parametre tlačnog cjevovoda, uključujući njegovu dužinu, promjer i materijal
- potrebne prilagodbe za buduće širenje: planirati mogućnosti za buduće proširenje sustava

- karakteristike terena: razmotriti fizičke uvjete terena na kojem su smještene crpne stanice i tlačni cjevovod
- uvjeti opskrbe energijom: provjerite dostupnost i pouzdanost izvora energije za rad crpki
- zaštita okoliša: uzeti u obzir sve posebne uvjete izvedbe vezane uz zaštitu okoliša

Količina i kvaliteta dostupnih podataka ključni su za valjanost rješenja, stoga je temeljito prikupljanje i analiza ovih informacija osnovni preduvjet za uspješno projektiranje crpnih stanica.

Osnovni ulazni podaci za projektiranje uključuju:

- protoci:
  - Godišnji prosječni dnevni protok.
  - Godišnji maksimalni dnevni protok.
  - Maksimalni satni protok u najopterećenijem danu.
  - Maksimalni satni protok uz dodatak količine za protupožarne potrebe.
- tlakovi:
  - Maksimalni dozvoljeni tlak u mreži (60-80 m v.s.).
  - Minimalni potreban tlak u mreži (30 m v.s.).
  - Minimalni tlak na hidrantima (25 m v.s.).

Na temelju rada crpnog sustava u različitim uvjetima, crtaju se konture tlačnih visina u području opskrbe vodom i analiziraju se tlakovi unutar sustava. Na osnovi dobivenih rezultata, mogu se provesti potrebna poboljšanja tlakova promjenama u karakteristikama crpnog sustava.

### 2.2.2 Osnovna analiza crpki i crpnog sustava

Osnovna analiza crpki i crpnog sustava uključuje procjenu ključnih parametara koji osiguravaju učinkovito i pouzdano funkcioniranje sustava, a to su:

- 1) Kapacitet ( $m^3/s$ ) - volumen tekućine koja se crpi u jedinici vremena gdje razlikujemo nominalni protok  $Q_n$ , protok koji crpka daje na točki optimalne djelotvornosti  $Q_{optimalni}$ , minimalni dozvoljeni protok  $Q_{min}$  i maksimalni dozvoljeni protok  $Q_{max}$

$$m = \rho \cdot Q \quad (1)$$

gdje je  $m$ -maseni protok,  $Q$ -protok,  $\rho$ -gustoća tekućine

- 2) Visina podizanja crpke (m)- iskorišteni mehanički rad koji crpka pretvara u energiju za pomicanje tekućine izražava se po jedinici težine precrpljene tekućine, uzimajući u obzir lokalnu gravitacijsku konstantu. Za svaku crpku razlikujemo nominalnu visinu podizanja za koju je crpka predviđena  $H_n$ , optimalnu visinu podizanja koju crpka daje u točki maksimalne učinkovitosti  $H_{optimalno}$  i visinu podizanja kada nema protoka  $H_0$ .

$$H = \frac{E(Nm)}{G(N)} (m) \quad (2)$$

Ukupna visina podizanja crpke  $H$  predstavlja razliku u mehaničkoj energiji  $E$  te protoka po jedinici težine  $G$  između ulaza i izlaza crpke.

Ukupna visina  $H$  podizanja crpke je:

$$H = (Z_t - Z_u) + \frac{p_t - p_u}{\rho \cdot g} + \frac{v_t^2 - v_u^2}{2g} \quad (3)$$

gdje je:

$Z_t - Z_u$  – visinska razlika ulaza crpke  $u$  i izlaza crpke  $t$

$\frac{p_t - p_u}{\rho \cdot g}$  – razlika tlačne visine tekućine na ulazu crpke  $u$  i na izlazu crpke  $t$

$\frac{v_t^2 - v_u^2}{2g}$  – razlika vrzinske visine tekućine na ulazu crpke  $u$  i na izlazu crpke  $t$

Ukupna dinamička ili manometarska visina  $H_{ukupno}$  predstavlja visinu koju crpka mora savladati kako bi se tekućina mogla precrpljivati. Ona uključuje statičku visinu, brzinsku visinu i visinu gubitaka.

$$H_{ukupno} = H_{stat,tlač} - H_{stat,usis} + h_{lin,tlač} + h_{lin,usis} + h_{lok,usis} + h_{lok,tlač} + \frac{v_{tlač}^2}{2g} \quad (4)$$

gdje je:

$H_{stat}$ - visina podizanja crpnog sustava tj. visinska razlika između dviju slobodnih površina vode.

Sastoji se od usisne statičke visine podizanja  $H_{usis} = Z_{osi} - Z_{d,vode}$  i tlačne statičke visine podizanja

$H_{tlač} = Z_{g,vode} - Z_{osi}$

$h_{lin}$  - visina izgubljena na linijskim gubiticima što je rezultat tečenja u cjevovodu kod usisa  $i$  u tlačnom cjevovodu

$h_{lin} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$  gdje je  $\lambda$ -koeficijent otpora,  $L$ -duljina cjevovoda,  $D$ -promjer cjevovoda,  $v$ -

brzina u cjevovodu,  $g$ - ubrzanje sile teže

$h_{lok}$ - lokalni visinski gubitci koji nastaju kao rezultat tečenja kroz armature i spojne komade

$h_{lok} = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}$  gdje je  $\xi$ - koeficijent lokalnih gubitaka

$h_{brzin}$ -brzinska visina izražena u visini stupca tekućine

$$h_{brzin} = \frac{v^2}{2g}$$

Gubici na usisu uključuju sve gubitke od usisnog dijela do usisne prirubnice crpke, dok gubici na tlaku obuhvaćaju sve gubitke od izlazne prirubnice do izlaza vode.

Neto pozitivna usisna visina (NPSH) je najmanja vrijednost za koju ukupna visina podizanja na referentnoj razini za NPSH mora biti veća od tlaka isparavanja tekućine koja se crpi, a sve kako bi se osigurao rad crpke bez kavitacije za nominalnu brzinu rotacije  $n_N$ , nominalni protok  $Q_N$  za tekućinu za koju je crpka projektirana.

Da bi izbjegli probleme u radu crpke i iz sigurnosnih razloga povećanje od 0,5m vrijedi:

$$NPSH_{dostupno} \geq NPSH_{potrebno} + 0,5 \quad (5)$$

$$NPSH_{dostupno} = \frac{p_u + p_b}{\rho \cdot g} + \frac{v_u^2}{2g} - \frac{p_D}{\rho \cdot g} + Z'_u \quad (6)$$

$$NPSH_{dostupno} = h_A + \frac{v_0^2}{2g} + \Delta h \quad (7)$$

Gdje je:

$p_b$ -atmosferski tlak na razini usisa

$p_D$ -tlak isparavanja na razmatranoj temperaturi zraka

$Z'_u$ -udaljenost između prirubnice usisa i referentne brzine NPSH veličine

$h_A$ - visinska razlika između osi osovine i ishodišta krilca rotora

$\frac{v_0^2}{2g}$  -pad tlaga zbog ulazne brzine

$\Delta h$ - lokalni pad tlaka na ishodištu lopatice rotora

- 3) Učinkovitost crpke ( $\eta$ ), ili koeficijent iskorištenja, predstavlja omjer između dobivene snage i utrošene snage

$$\eta = \frac{P_u}{P_p} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{uk}}{P_p} \quad (8)$$

gdje je:

$\eta_{cp}$  – učinkovitost crpke

$P_u$ - ulazna snaga

$P_p$ - izlazna snaga

$\rho$ - gustoća tekućine

$g$ - ubrzanje sile teže

$Q$ -protok

$H_{uk}$ -manometarska visina podizanja

Izlazna snaga crpke  $P_p$  je u kW i računa se kao:

$$P_p = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367} \quad (9)$$

Ulazna snaga crpke  $P_u$  uvijek je veća od izlazne i računa se kao:

$$P_p = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{367 \cdot \eta} \quad (10)$$

### 2.3 Karakteristične krivulje

Osnovne karakteristike crpke ( $P$ ,  $H$ ,  $\eta$ , NPSH) pri konstantnoj brzini okretaja prikazuju se u ovisnosti o protoku  $Q$ . Na taj način, svaku crpku opisuju četiri glavne krivulje:  $Q$ - $H$ ,  $Q$ - $P$ ,  $\eta$ / $Q$  i NPSH/ $Q$  (Slika 6.54). Oblik ovih krivulja, koje karakteriziraju centrifugalne crpke, primarno ovisi o specifičnoj brzini. Visina podizanja u odnosu na protok pri konstantnoj brzini rotacije određuje se eksperimentalno. Ovaj eksperiment temelji se na mjerenju visine podizanja pomoću Bernoullijeve jednadžbe, koristeći jednadžbu energetske jednakosti na usisnom i izlaznom dijelu.

$$H_t = \frac{p_t}{\rho \cdot g} + \frac{v_t^2}{2g} + Z_t - \frac{p_u}{\rho \cdot g} + \frac{v_u^2}{2g} + Z_u \quad (11)$$

Gdje je:

$H_t$ - ukupna visina podizanja(m)

$P_t$ ( $p_u$ )- tlak na ispustu(usisu)(Pa,bar)

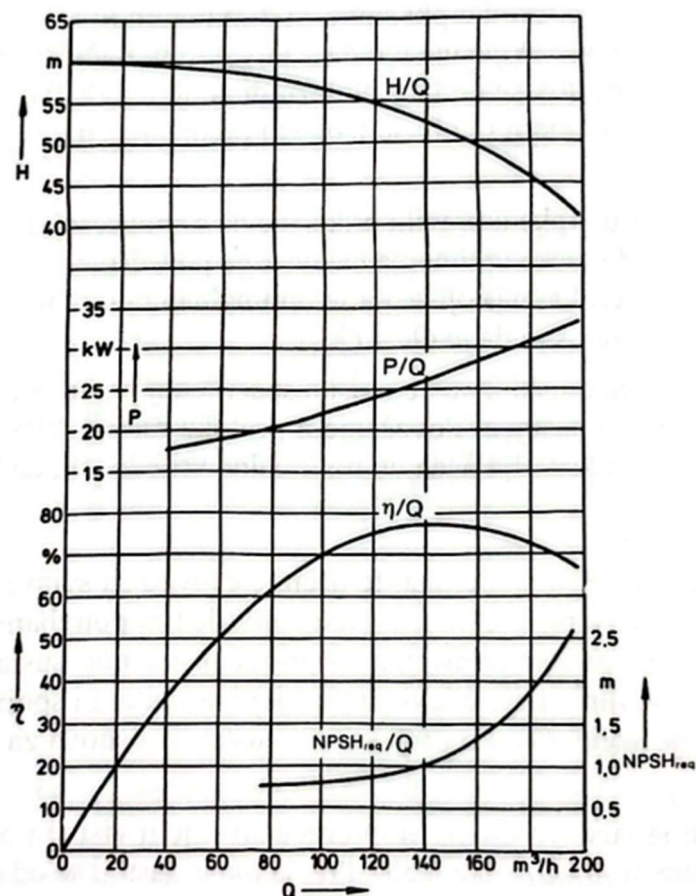
$\rho$ - gustoća tekućine(kg/m<sup>2</sup>)

$g$ -ubrzanje sile teže

$v_t(v_u)$ - brzina na ispustu(usisu)(m/s)

$Z_t(T_u)$ - visinski položaj izlaza(ulaza)(m n.m.)

Testiranje se provodi zatvaranjem ventila kako bi se promijenio kapacitet crpke, dok se istovremeno mjeri visina podizanja. Rezultati se bilježe i na temelju njih nastaje krivulja koja prikazuje odnos visine podizanja i protoka. Istodobno se prate i bilježe učinkovitost i potrošnja energije, te se na temelju tih mjerenja izrađuju odgovarajuće krivulje. Svaki proizvođač crpki dostavlja ove osnovne krivulje.



Slika 3: Osnovne krivulje centrifugalne crpke (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)

Općenito, visina podizanja se smanjuje s povećanjem protoka, a pad se može odrediti pomoću omjera  $(H-H_0)/H$ , ovisno o specifičnoj brzini. Za crpke s obilaznim vodom, pad je između 1 i 3, za radialne crpke između 0,1 i 0,25, za crpke s mješovitim tokom između 0,25 i 0,8, a za



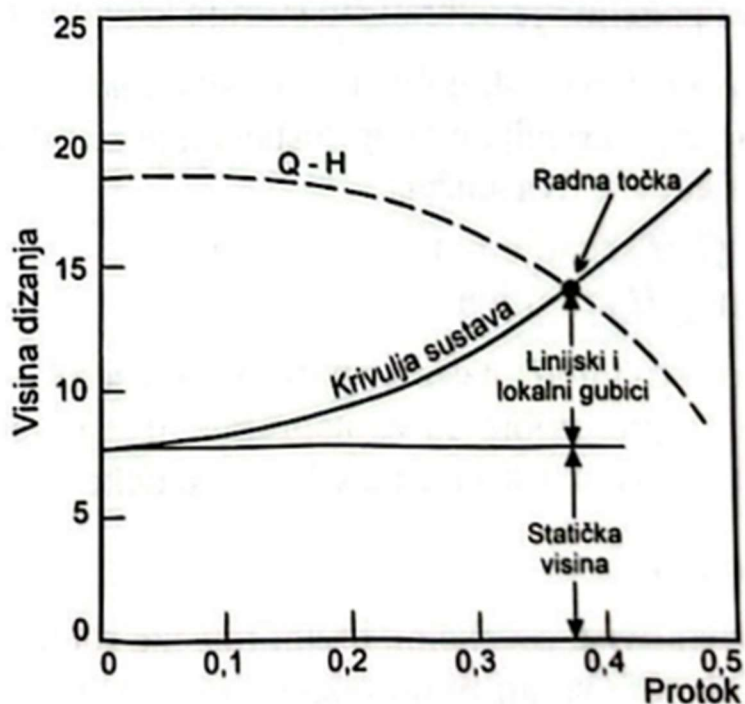
aksijalne crpke veći od 0,8. Nagib krivulje Q-H stoga ovisi o vrsti crpke i obliku rotora, pa se ne može slobodno odabrati. Krivulja može biti stabilna ili nestabilna, gdje za istu visinu podizanja H mogu postojati dvije različite vrijednosti protoka Q.

Krivulja Q/P prikazuje odnos između ulazne snage i protoka. Oblik ove krivulje varira s tipom crpke i specifičnom brzinom. Kod crpki s obilaznim vodom i aksijalnih crpki, najveća ulazna snaga se troši kada je protok  $Q=0$ , dok je kod radijalnih crpki potrošnja energije najveća pri povećanom protoku.

Krivulja učinkovitosti  $\eta/Q$  pokazuje da se učinkovitost crpke povećava s povećanjem protoka do optimalne točke, nakon čega daljnje povećanje protoka smanjuje učinkovitost. NPSH/Q krivulja također ovisi o specifičnoj brzini i karakteristikama crpnog sustava, a povećanjem protoka NPSH raste, osim kod aksijalnih crpki, gdje krivulja opada do minimalne vrijednosti.

### 2.3.1 Odnos između crpke i crpnog sustava

Ako se na Q-H grafu prikaže krivulja visine podizanja u odnosu na protok crpke, radna točka crpnog sustava određuje se kao presjek tih dviju krivulja. Radna točka predstavlja kapacitet crpke i visinu podizanja koja se postiže pri tom kapacitetu. To je točka gdje visina podizanja koju postiže crpka odgovara visini koju sustav zahtijeva. Ova točka određuje protok Q koji sustav može osigurati, kao i brzinu tekućine u tlačnom cjevovodu. Osim toga, radna točka određuje potrebnu snagu P, učinkovitost  $\eta$  koju crpka može postići, te potrebnu NPSH vrijednost, koja mora biti manja od one navedene od strane proizvođača.



Slika 4: Krivulja crpnog sustava i radna točka (izvor: *Vodoopskrba naselja*, J. Margeta)

## 2.4 Izbor crpki

Izbor opreme je složen proces koji ovisi o mnogim faktorima, često međusobno suprotstavljenima. Cilj je odabrati najekonomičnije crpke za planirano trajanje rada. Ovaj postupak uključuje odabir veličine crpke, broja crpki, pogonskog stroja i optimalnih karakteristika tlačnog cjevovoda. Izbor mora biti prilagođen svim potrebama sustava, a najvažniji čimbenici su protoci, lokacija crpne stanice, karakteristike tlačnog cjevovoda i krivulja crpnog sustava. Za precrpne stanice smještene iznad terena obično se koriste centrifugalne crpke koje zahvaćaju vodu iz opskrbnog cjevovoda, dok se za one koje su izravno na mreži koriste potopljene turbinske crpke s potopljenim elektromotorima.

Ključni podatak za dimenzioniranje crpke, uz visinu podizanja, je kapacitet crpljenja, koji se određuje pri projektiranju vodoopskrbnog sustava. Za projektanta crpne stanice, kapacitet je unaprijed utvrđen i ne podliježe daljnjoj analizi.

Crpne stanice mogu biti dizajnirane s jednom crpkom ili s više crpki koje rade zajedno u sustavu. Kod zajedničkog rada više crpki mogu biti povezane paralelno gdje se povisuje protok ili serijski gdje se podiže visinu dizanja. Češće su stanice povezane paralelno.

### 2.4.1 Broj crpki

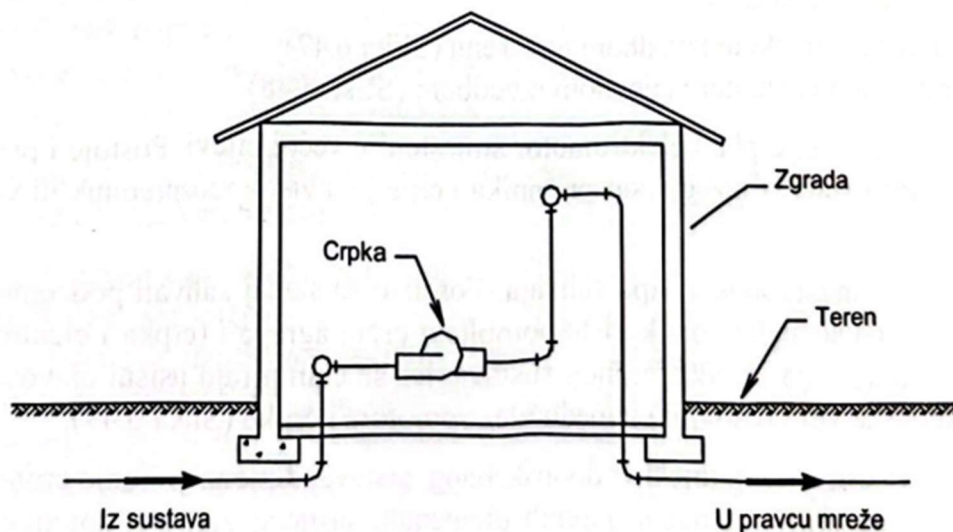
Izbor broja crpki u stanici ovisi o načinu rada, sigurnosti pogona, ekonomskim čimbenicima i režimu crpljenja. Ugradnjom rezervnih crpki povećava se sigurnost. Broj rezervnih crpki obično se smanjuje s povećanjem broja radnih crpki, budući da je manja vjerojatnost istovremenih kvarova. Preporučeni omjeri su:

- 1 radna + 1 rezervna (100% rezervna),
- 2 radne + 1 rezervna (50% rezervna),
- 3 radne + 1-2 rezervne (33-50% rezervna),
- 4 radne + 1-2 rezervne (25-50% rezervna),
- 5 radnih + 2 rezervne (40% rezervna),
- 6 radnih + 2 rezervne (30% rezervna).

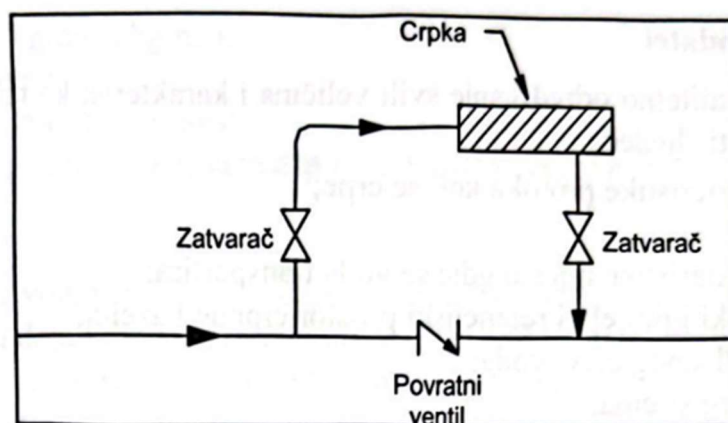
Odnos može varirati ovisno o specifičnostima lokacije i potrebnoj razini sigurnosti. Također, broj crpki može biti prilagođen promjenama kapaciteta tijekom dana ili se mogu koristiti crpke s promjenjivim brzinama. Odabir broja crpki treba se temeljiti na ekonomsko-tehničkim analizama.

## 3. PRECRPNICE

Precrpnice su crpne stanice koje uzimaju vodu iz cjevovoda pod tlakom i isporučuju je u vodovodnu mrežu. Koriste se za povećanje kapaciteta cjevovoda i tlaka u vodovodnoj mreži, često u brdovitim područjima za regulaciju tlaka ili za poboljšanje postojećih sustava zbog povećane potrošnje vode. Također se koriste za povremeno povećanje kapaciteta i tlaka u novim sustavima, naročito u vršnim potrošnim satima ili u slučaju požara. Mogu se instalirati bilo gdje u vodoopskrbnom sustavu, ali su obično smještene daleko od glavnih crpnih stanica. Lokacija se određuje hidrauličkim analizama sustava. Prilikom korištenja ovih crpnih stanica, važno je spriječiti pojavu podtlaka u usisnom dijelu cjevovoda. Postoje dvije glavne vrste precrpnica: vanjske izvedbe i podvodne cijevne izvedbe.



Slika 5: Shema instalacije precrpnice: vanjska izvedba (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)



Shema izvedbe



Izvedba

Slika 6: Shema instalacije precrpnice: cijevna izvedba (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)

### 3.1 Planiranje i projektiranje precrpnica

Imamo dva tipa precrpnica:

- Otvoreni tip crpne stanice pumpa vodu iz donjeg vodospremnika ili cjevovoda u višu zonu opskrbe koju kontrolira gornji vodospremnik. Funkcioniranje crpnog agregata ovisi o razini vode u ovim vodospremicima. Ova vrsta crpne stanice nalikuje klasičnoj crpnoj stanici, s tim da voda može biti uzeta iz cjevovoda.
- Zatvoreni tip crpne stanice služi za pumpanje vode u višu tlačnu zonu unutar zatvorenog cijevnog sustava. Crpke preuzimaju vodu iz donjeg vodospremnika ili cjevovoda i isporučuju je izravno u višu vodovodnu zonu. Alternativno, crpke mogu vodu iz donjeg vodospremnika ili cjevovoda preusmjeravati u tlačni kotao koji opskrbljuje višu zonu.

Pri projektiranju precrpnice treba uzeti u obzir sljedeće zahtjeve:

- učinkovitost crpnog sustava, uvjete rada,
- tlak na izlazu iz crpki i opskrbenoj mreži
- potrebnu snagu pri punom opterećenju
- zaštitu elektromotora od pregrijavanja
- opskrbu energijom i rezervni sustav napajanja
- rizik od tlačnih udara i zaštitne mjere
- potrebu za obradom vode na izlazu
- stabilizaciju opreme i cjevovoda
- održavanje crpne stanice te potrebu za obilaznim vodom oko precrpnice

Precrpnice su ključni dio vodoopskrbnog sustava, a njihova funkcija ovisi o kapacitetu i radnom tlaku. Kapacitet crpne stanice može biti određen maksimalnim dnevnim ili satnim protokom, s projektnim razdobljem od najmanje 10 godina. U otvorenom sustavu, gdje se opskrba viših zona vrši pomoću vodospremnika, crpne stanice se dimenzioniraju prema maksimalnom dnevnom protoku, dok tlak regulira gornji vodospremnik. Sigurnost opskrbe osigurava se planiranjem da sve crpke zadovoljavaju maksimalnu dnevnu potrošnju, s mogućnošću da srednji dnevni protok postigne i kada najveća crpka nije u pogonu. U zatvorenom sustavu crpne stanice moraju osigurati dovoljan tlak i kapacitet, što znači da je kapacitet jednak ili veći od maksimalnog satnog protoka, a minimalni tlak na priključcima korisnika treba biti 300 kPa. Požarne količine

moгу se osigurati posebnim crpkama ili zajedno s ostalim crpkama u sustavu, uz minimalni tlak od oko 250 kPa.

### 3.2 Hidraulički proračun

Za precizno proračunavanje hidrauličkih karakteristika precrpnice potrebno je simulirati stanje u vodoopskrbnoj mreži, uključujući normalne uvjete rada i uvjete požara.

- Normalni uvjeti rada: u redovnim uvjetima rada, sustav mora osigurati odgovarajuće tlakove u nižoj opskrbenj zoni dok opskrbljuje višu zonu. U otvorenom sustavu, proračun uključuje maksimalni satni protok niže zone, povećan za maksimalnu dnevnu količinu potrebnu za višu zonu. U zatvorenom sustavu, proračun se temelji na maksimalnom satnom protoku niže zone, uvećanom za maksimalni satni protok više zone ili projektirani protok precrpnice, ovisno o tome koji je veći.
- Uvjeti požara: tijekom požara, sustav mora osigurati potrebne količine vode i minimalni tlak u obje opskrbenj zone prema važećim pravilnicima o hidrantskoj mreži. U otvorenom sustavu, mora se osigurati dotok vode za gašenje požara uz maksimalni dnevni protok. U zatvorenom sustavu, potrebno je osigurati protok i tlak u nižoj zoni, uvećane za maksimalni satni protok više zone.

Ovi proračuni osiguravaju pouzdan rad sustava u različitim uvjetima i omogućuju optimalno projektiranje i dimenzioniranje precrpnica.

### 3.3 Projektiranje, izvedba i održavanje

Projekiranje treba zadovoljiti uvjete i zahtjeve Zakona o građenju. Svaki tip crpne stanice mora sadržavati mjerač tlaka na tlačnom cjevovodu, mjerač između crpki, povratni ventil, mjerač na zajedničkom usisnom i izlaznom cjevovodu. Moraju se ugraditi i elementi za kontrolu od prestanka rada ili nedovoljnog tlaka na usisu.

Izvođe se isto kao i ostale crpne stanice ovisno o lokaciji. Koriste se crpke sa horizontalnim i vertikalnim osovinama. (Slika 7). Većinom se rade precrpnice sa paralelnim spojevima crpke. Održavanje crpnih stanica provodi se u skladu s uputama proizvođača.



**Prečrpnica s vertikalnim osovinom crpki**

**Prečrpnica s horizontalnom osovinom crpki**

*Slika 7: Tipična izvedba crpki prečrpnice (izvor: Vodoopskrba naselja, J. Margeta)*

### 3.4 Tipovi crpki

Na tržištu postoje različiti tipovi crpki koje se mogu ugrađivati u prečrpnice. Jedan od najpoznatijih svjetskih proizvođača crpki je tvrtka Grundfos, koja nudi široki asortiman crpki različitih tipova, kapaciteta i snage. Grundfos Hydro MPC uređaji za povišenje tlaka namijenjeni su za povećanje i prijenos tlaka čiste vode u širokom spektru primjena, uključujući vodovodne sustave, stambene blokove, hotele, industrijske objekte, bolnice i škole. Ovi uređaji dizajnirani su za osiguranje konstantnog tlaka čak i uz promjenjive zahtjeve za potrošnjom, što ih čini idealnim za složene vodoopskrbne mreže.

Hydro MPC sustavi sastoje se od dvije do šest identičnih crpki koje su paralelno spojene i montirane na zajednički temeljni okvir. Neke od crpke prikazane su na (slika 8.) (slika 9.) (slika 10.). Ovisno o potrebama, koriste se različiti modeli crpki, poput CRI(E) i CR(E) crpki. Za uređaje s manjom snagom (od 0,37 do 22 kW), koristi se CRI(E) serija s integriranim frekvencijskim pretvaračem, dok za veće snage (30 kW i više) sustavi koriste CR crpke povezane na vanjski Grundfos CUE frekvencijski pretvarač.

Frekvencijski pretvarači omogućuju elektroničku regulaciju brzine crpki, što sustavu omogućava održavanje konstantnog tlaka prilagođavajući brzinu crpki stvarnim potrebama. To rezultira povećanom energetsom učinkovitošću i smanjenjem operativnih troškova.

Upravljačka jedinica CU 351, koja je integralni dio Hydro MPC sustava, omogućava automatsku kontrolu i nadzor sustava, uključujući kaskadnu regulaciju i zaštitu crpki. Sustav može

automatski uključivati i isključivati crpke na temelju trenutnih potreba, čime se optimizira rad i minimizira trošenje opreme. Upravljački ormar također sadrži sve potrebne komponente za sigurno i pouzdano upravljanje crpkama.

Dodatno, Hydro MPC uređaji opremljeni su raznim funkcijama zaštite, uključujući zaštitu od rada na suho, praćenje tlaka i protoka te mogućnosti rada u slučaju nužde. Cjevovodni spojevi variraju od R 2 do DN 350, ovisno o modelu i zahtjevima instalacije. Uređaji također omogućuju lako održavanje jer se crpke mogu ukloniti bez potrebe za rastavljanjem cjevovoda.

Za dimenzioniranje Hydro MPC sustava, Grundfos nudi alate poput WebCAPS i WinCAPS, koji omogućuju precizan izračun potrebnih parametara na temelju profila potrošnje, ulaznog tlaka, gubitaka u cjevovodima i drugih čimbenika. Na taj način osigurava se da sustav bude optimalno konfiguriran za specifične zahtjeve projekta, čime se postiže pouzdano i energetski učinkovito rješenje za povišenje tlaka u vodoopskrbnim mrežama.



*Slika 8. Hydro MPC-E sa dvije crpke*





Slika 9. Hydro MPC-E sa tri crpke

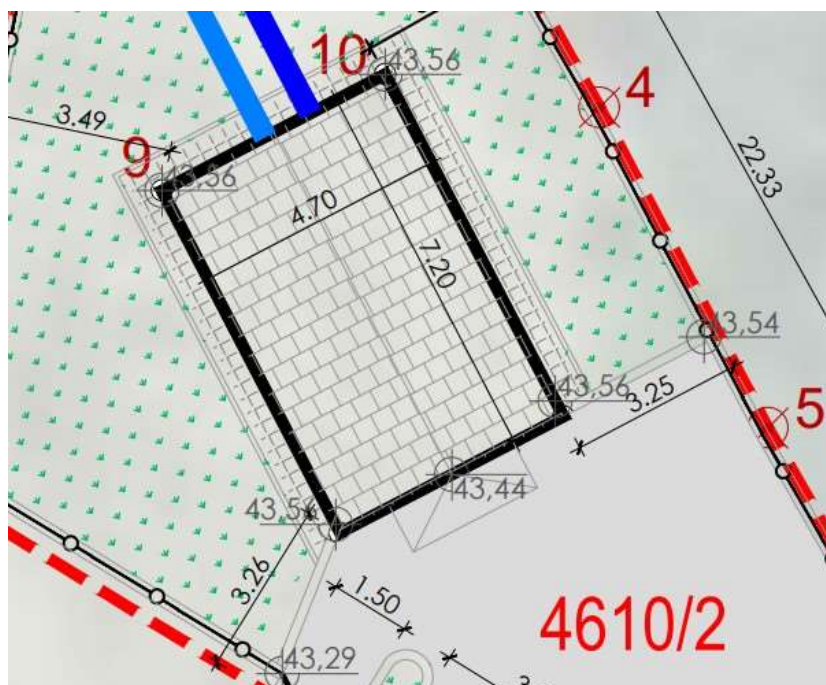


Slika 10. Hydro MPC-E sa četiri crpke

#### 4. HIDRAULIČKI PRORAČUN

Hidraulički proračun precrpne stanice primarno se odnosi na proračun ukupne visine dizanja koju precrpna stanica mora ostvariti u traženim uvjetima. U ovom konkretnom slučaju, promatra se slučaj najnepovoljnijeg čvora odnosno izljevno mjesto u sustavu, za koji je potrebno zadovoljiti uvjete potrošnje vode ali i protupožarne zaštite.

Podloga za hidrauličke analize preuzeta je iz dostupne projektne dokumentacije koja se odnosi na dio vodoopskrbnog sustava naselja Drage. Precrpnja stanica Drage 2 zamišljena je kao nadzemna građevina, predviđena u svrhu smještaja crpki za podizanje tlaka u vodoopskrbnoj mreži. Građevina je tlocrtna površine 33,84 m<sup>2</sup> te ukupne visine 2,73 m.



Slika 11. Tlocrtni prikaz smještaja građevine planirane precrpne stanice Drage 2

Dovodni cjevovod u precrpnu stanicu je od nodularnog lijeva, unutarnjeg promjera 150 mm, kao i odvodni cjevovod. Mjerodavni protok koji protječe kroz precrpnu stanicu je 20 l/s što odgovara maksimalnoj satnoj potrošnji vode uvećanoj za zahtjeve protupožarne zaštite (10 l/s). Visina kota na kojoj se nalazi crpna stanica iznosi 43,44 m n.m. dok ulazni tlak u precrpnu stanicu iznosi 15 m v.s.

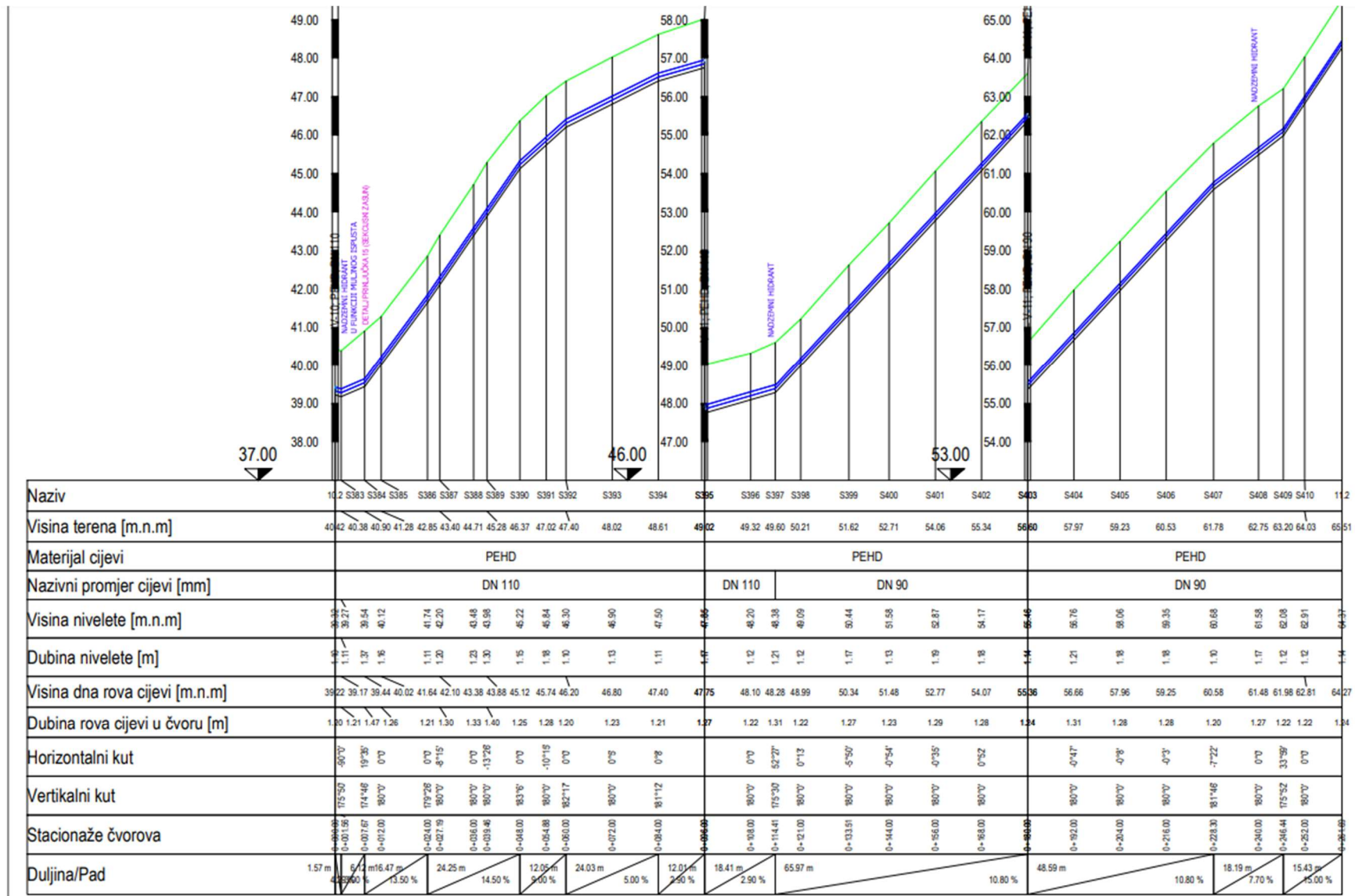
Za potrebe hidrauličke analize u sklopu diplomskog rada, odabrana je jedna od najnepovoljnijih točaka u vodoopskrbnom sustavu naselja Drage, za koju je izvršena hidraulička

analiza. Odabrani najnepovoljniji čvor (nazivne oznake 408) nalazi se na visinskoj koti od 61,58 m n.m., dok ukupna razmatrana duljina cjevovoda od precrpne stanice do predmetnog čvora iznosi 2089 m.



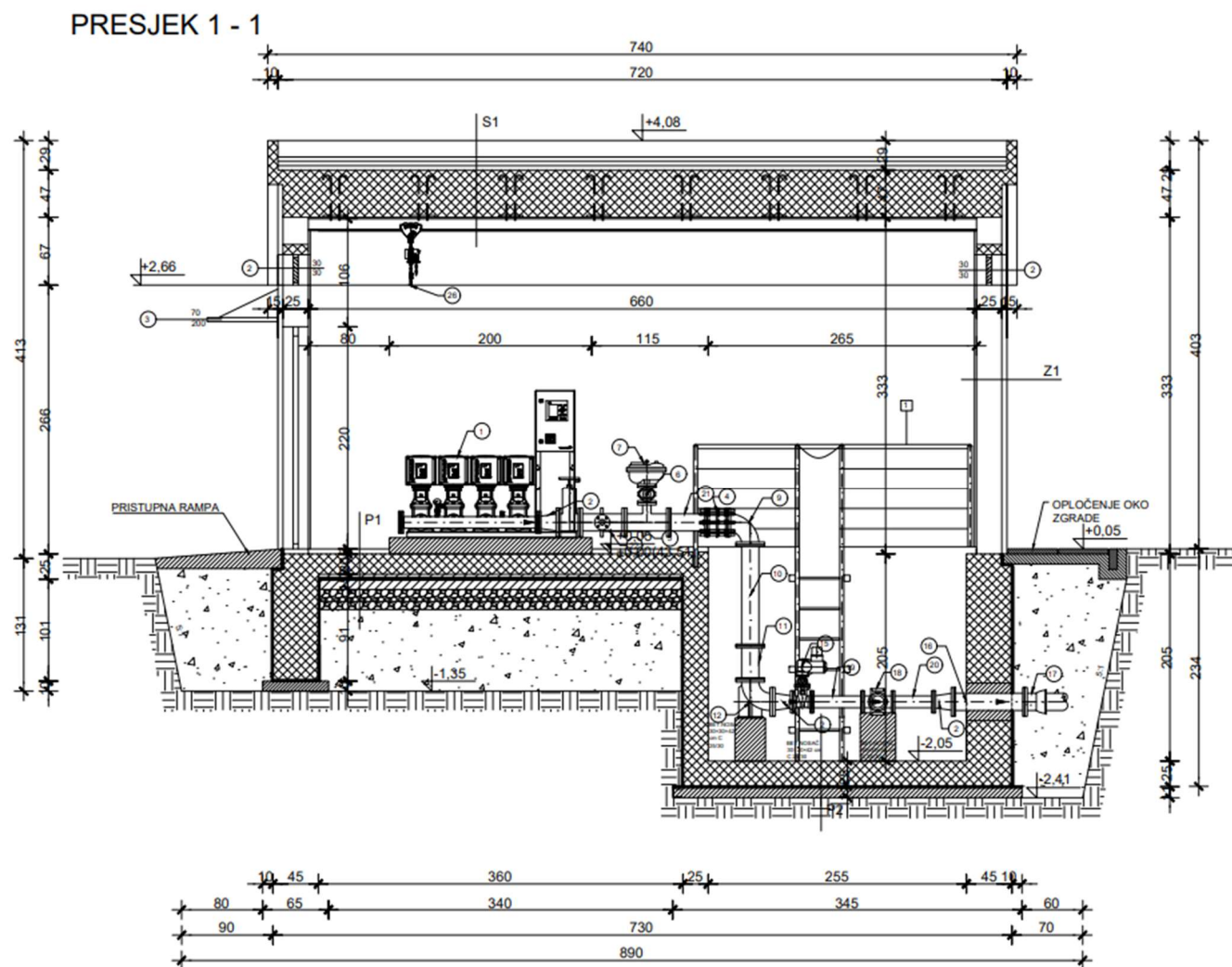


Slika 12. Trasa cjevovoda od precrpne stanice Drage do najnepovoljnijeg čvora 408.



Slika 13. Uzdužni profil cjevovoda





Slika 14. Presjek precrpne stanice

#### 4.1. Hidraulički proračun visine dizanja precrpne stanice

Nastavno na uvodni dio u kojem je pojašnjen način hidrauličkog proračuna precrpnih stanica, izvršen je proračun potrebne visine dizanja tlaka odnosno piezometarske linije za odabrani čvor u vodoopskrbnom sustavu naselja Drage. Hidraulički proračun izvršen je kako bi se odredila ukupna visina dizanja  $H$ , koja predstavlja ključni parametar za odabir crpki i dimenzioniranje precrpne stanice. Ukupna visina dizanja  $H$  predstavlja visinu razliku između kote precrpne stanice i promatranog čvora, uvećanu za gubitke u tlačnom sustavu između dvije promatrane točke, minimalni tlak na izljevnom mjestu koji u ovom slučaju iznosi 25 m v.s. zbog potreba protupožarne zaštite i brzinsku visinu. Također, konačna vrijednost ukupne visine dizanja  $H$  umanjena je za vrijednost ulaznog tlaka u precrpnu stanicu.

$$H_{\text{ukupno}} = H_{\text{statičko}} + H_{\text{gubici}} + H_{\text{izljev}} - H_{\text{ulazno}} + v^2/2g \quad (12)$$

gdje je

$H_{\text{statičko}}$  - visina razliku između kote precrpne stanice i promatranog čvora odnosno mjerodavnog izljevnom mjestu

$H_{\text{gubici}}$  – gubici (linijski) u cjevovodu tlačnog sustava

$H_{\text{izljev}}$  – traženi tlak na odabranom izljevnom mjestu

$H_{\text{ulazno}}$  – tlak u cjevovodu neposredno prije precrpne stanice

Za potrebe ovog rada redom su izračunati traženi parametri kako bi se odredila ukupna potreban visina dizanja.  $H_{\text{statičko}}$  odnosno visinska razlika između kote precrpne stanice i promatranog čvora iznosi:

$$H_{\text{prerpnica}} = 43,44 \text{ m n.m.}$$

$$H_{\text{čvor}} = 61,58 \text{ m n.m.}$$

$$H_{\text{statičko}} = H_{\text{čvor}} - H_{\text{prerpnica}} = 61,58 - 43,44 = 18,14 \text{ m}$$

Proračun hidrauličkih gubitaka u tlačnom cjevovodu izvršen je za linijske gubitke budući da se lokalni gubici u vodoopskrbnim sustavima često mogu zanemariti. Proračun linijskih gubitaka temelji se na jednadžbi:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Gdje je:

L - dužina cijevi

$\lambda$  - koeficijent otpora

Koeficijent otpora  $\lambda$  računa se prema jednadžbama sukladno režimu strujanja:

a) Laminarni režim:  $\lambda=f(\text{Re})$ ;

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (14)$$

b) Turbulentno glatki režim:  $\lambda=f(\text{Re})$ ; (Prandtl-ov zakon)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \cdot \log(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (15)$$

c) Turbulentno prijelazni režim:  $\lambda=f(\varepsilon/D, \text{Re})$ ; (Colebrook-White-ova jednadžba)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}\right) \quad (16)$$

d) Turbulentno hrapavi režim:  $\lambda=f(\varepsilon/D)$ ; (Prandtl-Karman-ova jednadžba)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2.0 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (17)$$

Mjerodavni protok za hidraulički proračun iznosi 20 l/s odnosno 0,02 m<sup>3</sup>/s, dok je površina poprečnog presjeka cijevi jednaka 0,0177 m<sup>2</sup>, stoga je mjerodavna brzina tečenja u stacionarnom stanju jednaka 1,13 m/s.

$$Q = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 0,0177 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = 1,13 \text{ m/s}$$

Uzimajući izračunati brzinu izvršen je proračun koeficijenta otpora  $\lambda$ , gdje je u prvom koraku pretpostavljen turbulentno hrapavi režim strujanja. Izračunata vrijednost koeficijenta otpora ispitana je zatim u turbulentno prijelaznom režimu kako bi se utvrdila konačna vrijednost.

$$H_{\text{gubici}} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

U prvom koraku izračunat je Reynoldsov broj koji se definira kao:



$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Gdje je:

$v$  - brzina strujanja (m/s)

$D$  - promjer cijevi (m)

$\nu$  - viskoznost tekućine (vode) =  $1.14 \cdot 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

Ako je  $Re < 2000$ , strujanje je laminarno. Ako je  $Re > 4000$ , strujanje je turbulentno, dok je područje između prijelazno.

$\varepsilon = 0,15$  mm

$v = 1,13$  m/s

$D = 150$  mm = 0,15 m

$\nu = 1.14 \cdot 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{1,13 \cdot 0,15}{1.14 \cdot 10^{-6}} = 148684,21$  - strujanje se smatra turbulentno pa se može usvojiti da se

koeficijent otpora  $\lambda$  računa prema turbulentno hrapavom režimu:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \rightarrow \lambda = 0,0196$$

Nakon izračunatog koeficijenta otpora pristupilo se izračunu linijskih gubitaka u tlačnom cjevovodu za stacionarno stanje tečenja:

$$H_{\text{gubici}} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0196 \cdot \frac{2089}{0,150} \cdot \frac{1,13^2}{2 \cdot 9,81} = 17,76 \text{ m}$$

Prethodno je definirano da su izračunate vrijednosti odnosno preuzete sljedeće pretpostavke:

$H_{\text{izljev}}$  - minimalni tlak na izljevnom mjestu koji u ovom slučaju iznosi 25 m zbog potreba protupožarne zaštite,

$H_{\text{ulazno}}$  - ulazni tlak koji ulazi u precrpnu stanicu i iznosi 15 m,

$v^2/2g$  – brzinska visina koja iznosi 0,065 m.

Konačno, zbrojem svih traženih parametara izračunata je maksimalna ukupna visina dizanja koju precrpna stanica mora ostvariti u uvjetima najveće potrošnje vode na izljevnom mjestu:

$$H_{\text{ukupno}} = 18,14 + 17,76 + 25,00 - 15,00 + 0,065 = 45,97 \text{ m}$$

Nakon analize potrebne visine dizanja precrpne stanice izvršena je nestacionarna analiza u svrhu definiranja dinamike rada sustava. Konkretno, provedenom dinamičkom analizom analizirano je vrijeme potrebno da se uspostavi potpuno stacionarno stanje nakon uključivanja precrpne stanice u pogon. Analizirane su varijacije tlakova i odnosno brzina istjecanja na promatranom izljevnom mjestu pri zadanoj dinamici uključivanja crpne stanice u pogon.

Piezometarska linija na izljevnom mjestu jednaka je piezometarskoj liniji u precrpnoj stanici, umanjeno za linije gubitke između dvije promatrane točke:

$$h_{\text{izljev}} = h_{\text{crpke}} - \Delta h_e$$

gdje je

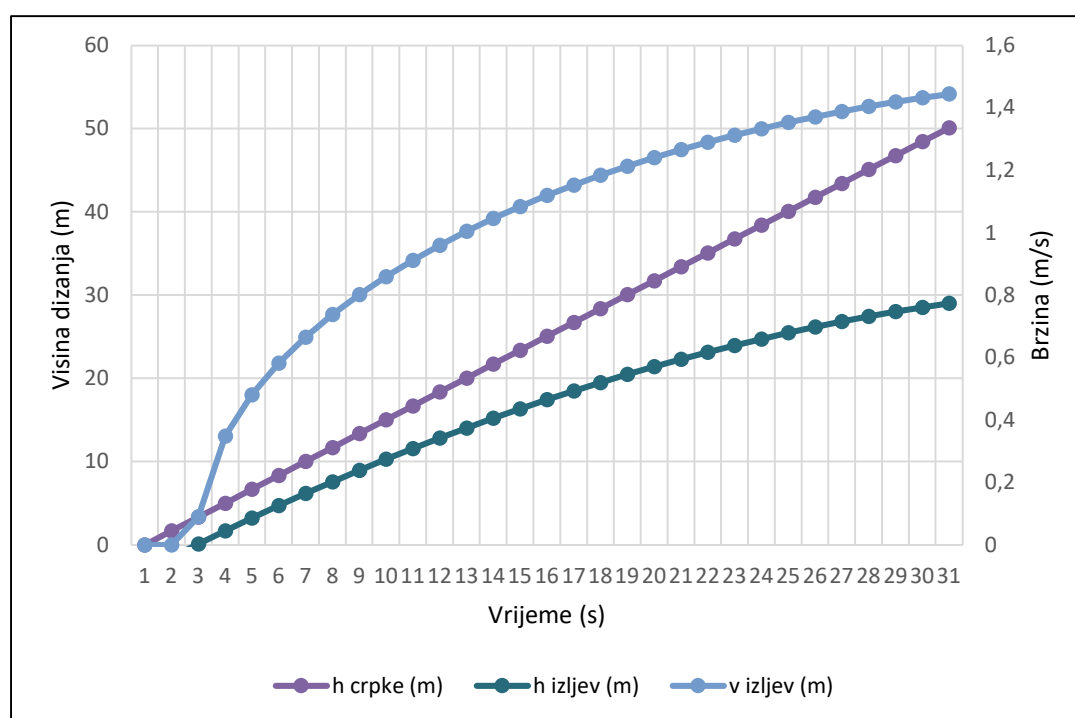
$$\Delta h_e = \beta \cdot v^2 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Uključivanjem crpki u pogon, podiže se ukupna linija energije kao i tlak u sustavu, uz pojavu uzvodnog tečenja u određenom trenutku. Uzevši u obzir karakteristike odabranih crpki, pretpostavlja se da precrpna stanica dostiže maksimalni radni kapacitet za 30 sekundi, kada se ostvari maksimalna visina dizanja uz zadani maksimalni protok. Vremenski korak analize je jedna (1) sekunda.

Tablica 1. Prikaz rezultata simulacije uključivanja precrpne stanice u pogon

t (s)	z crpke (m n.m.)	h poč (m)	h dizanja (m)	Q (l/s)	h gubici (m)	z izljev (m n.m.)	h izljev (m)
0	43,44	15	0	0	0,00	61,58	-3,14
1	43,44	15	1,7	0,7	0,02	61,58	-1,49
2	43,44	15	3,3	1,3	0,08	61,58	0,11
3	43,44	15	5,0	2,0	0,18	61,58	1,68
4	43,44	15	6,7	2,7	0,32	61,58	3,21
5	43,44	15	8,3	3,3	0,50	61,58	4,70
6	43,44	15	10,0	4,0	0,71	61,58	6,16
7	43,44	15	11,7	4,7	0,97	61,58	7,57
8	43,44	15	13,4	5,4	1,27	61,58	8,94
9	43,44	15	15,0	6,0	1,61	61,58	10,27
10	43,44	15	16,7	6,7	1,99	61,58	11,56
11	43,44	15	18,4	7,4	2,41	61,58	12,81
12	43,44	15	20,0	8,0	2,86	61,58	14,03
13	43,44	15	21,7	8,7	3,36	61,58	15,20
14	43,44	15	23,4	9,4	3,90	61,58	16,33

15	43,44	15	25,0	10,0	4,48	61,58	17,42
16	43,44	15	26,7	10,7	5,09	61,58	18,48
17	43,44	15	28,4	11,4	5,75	61,58	19,49
18	43,44	15	30,1	12,1	6,45	61,58	20,46
19	43,44	15	31,7	12,7	7,19	61,58	21,39
20	43,44	15	33,4	13,4	7,96	61,58	22,29
21	43,44	15	35,1	14,1	8,78	61,58	23,14
22	43,44	15	36,7	14,7	9,64	61,58	23,95
23	43,44	15	38,4	15,4	10,53	61,58	24,73
24	43,44	15	40,1	16,1	11,47	61,58	25,46
25	43,44	15	41,7	16,7	12,44	61,58	26,16
26	43,44	15	43,4	17,4	13,46	61,58	26,81
27	43,44	15	45,1	18,1	14,52	61,58	27,42
28	43,44	15	46,8	18,8	15,61	61,58	28,00
29	43,44	15	48,4	19,4	16,75	61,58	28,53
30	43,44	15	50,1	20,1	17,92	61,58	29,03



Slika 15. Grafički prikaz odnosa visine dizanja crpke i tlaka na izljevnom mjestu

Na Slici 15. vidljivo je da tlak na izljevnom mjestu raste zajedno s rastom visine dizanja precrcpne stanice. Međutim, kako se visina dizanja precrcpne stanice približava maksimalnoj vrijednosti

vidljiva je razlika u rastu tlaka na izljevnom mjestu. Razlog leži u tome što s porastom brzine tečenja u sustavu raste i veličina linijskih gubitaka. Međutim, vidljivo je da bez obzira na porast linijskih gubitaka, tlak na izljevnom mjestu zadovoljava potrebni minimalni tlak za protupožarnu zaštitu.

## 4.2. Proračun vodnog udara prilikom ispadanja precrpne stanice

Vodni udar je pojava koja se javlja prilikom ispadanja precrpne stanice iz pogona uslijed naglog zatvaranja zasuna na mjestu potrošnje ili gašenja crpki. Vodni udar odnosi se na naglo povećanje tlaka u cijevi koje se propagira naizmjenično od mjesta zatvaranja uzvodno i nizvodno i postoje različiti načini zaštite sustava od djelovanja vodnog udara. Budući da je prema dostupnoj dokumentaciji utvrđeno da za promatrani sustav ne postoje posebne mjere zaštite, izvršen je proračun maksimalnog povećanja tlaka u cijevi uslijed naglog prekida, kako bi se utvrdilo može li predmetna cijev izdržati povećanje tlaka.

U prvom koraku potrebno je izračunati brzinu propagacije vodnog udara nakon trenutnog prekida rada sustava. Brzina propagacije računa se prema sljedećem izradu i ovisi o modulu elastičnosti vode koji je ponajprije u zavisnosti o temperaturi vode, modulu elastičnosti cijevi koja može manje ili više apsorbirati vodni udar te o promjenu i debljini stijenke cijevi:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{E_v}{\rho_v}}}{\sqrt{1 + \frac{E_v \cdot D}{E_c \cdot s}}} \text{ (m/s)}$$

gdje je:

- $E_v$  - modul elastičnosti vode (Pa),
- $E_c$  - modul elastičnosti cijevi (Pa),
- $\rho_v$  - gustoća vode ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $D$  - unutarnji promjer cijevi (m),
- $s$  - debljina stijenke cijevi (m).

Također, moguće je izračunati vrijeme koje je potrebno da vodni udar dođe od čvora do precrpne stanice i da se vrati natrag, tj. vrijeme refleksije:

$$\tau_0 = \frac{2L}{a} \text{ (s)}$$

Konačno, maksimalno povećanje tlačne visine u sustavu računa se prema izrazu Žukovskog te predstavlja rezultat odnosa brzine propagacije vodnog udara i gravitacije, pomnoženo s brzinom tečenja prije ispadanja sustava iz pogona:

$$\Delta h_{\max} = -\frac{a}{g}(v_1 - v_0) = -\frac{a}{g}(0 - v_0) \text{ (m)} - \text{maksimalno povećanje tlačne visine.}$$

$$\Delta p_{\max} = \Delta h_{\max} \cdot \rho g \text{ (Pa)} - \text{maksimalno povećanje tlaka.}$$

$v_1$  - trenutna brzina,

$v_0$  - početna brzina.

Za ovaj konkretan slučaj, odabrani su ulazni parametri iz hidrauličkog proračuna stacionarnog tečenja u sustavu:

$$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = 0,0177 \text{ m}^2$$

$$v_0 = \frac{Q}{A} = 1,13 \text{ m/s}$$

Brzina propagacije vodnog udara izračunata je primjenom gore navedenog izraza kako slijedi:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{2,07 \cdot 10^9}{1000}}}{\sqrt{1 + \frac{2,07 \cdot 10^9 \cdot 0,15}{2,0 \cdot 10^{11} \cdot 0,005}}} = 1256,77 \text{ (m/s)}$$

Parametri odabrani za proračun brzine propagacije vodnog udara jednaki su:

$$E_v = 2,07 \cdot 10^9 \text{ (Pa)},$$

$$E_c = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ (Pa)},$$

$$\rho_v = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)},$$

$$D = 0,15 \text{ (m)},$$

$$S = 0,005 \text{ (m)}.$$

Temeljem izračunate brzine propagacije vodnog udara izračunato je maksimalno povećanje tlačne visine u promatranom sustavu:

$$\Delta h_{\max} = -\frac{a}{g}(v_1 - v_0) = -\frac{a}{g}(0 - 1,13) = 144,76 \text{ (m)}$$

Temeljem izračunatih rezultata vidljivo je da maksimalno povećanje tlaka u sustavu prelazi preporučenih 80 m v.s. te da bi trebalo razmotriti dodatne mjere zaštite.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analiziran je rad precrpne stanice u sklopu vodoopskrbnog sustava. Podloge za diplomski rad preuzete su iz glavnog projekta precrpne stanice „Drage 2“, za naselje Drage u Zadarskoj županiji. U diplomskom radu je detaljno objašnjena uloga precrpnih stanica, tipovi i namjena te način projektiranja. Također, prikazani su određeni tipovi crpki proizvođača Grundfos, koji se mogu koristiti za ugradnju u precrpnim stanicama za podizanje tlaka.

Temeljem prikupljenih podloga, odabran je jedan dio vodoopskrbnog sustava koji je korišten za daljnju analizu. Izabrana je jedna od najnepovoljnijih lokacija izljevnom mjestu za koji su provedene hidrauličke analize. Za definirane uvjete proveden je proračun ukupne potrebne visine dizanja koji precrpna stanica mora ostvariti na izljevnom mjestu, uz zadovoljavanje uvjeta minimalnog tlaka za potrebe protupožarne zaštite. Hidrauličkim proračunom u stacionarnom stanju pokazalo se da je potrebna visina dizanja jednaka minimalno 45,97 m kako bi se savladala visinska razlika i hidraulički gubici te zadovoljio uvjet minimalnog tlaka na izljevnom mjestu od 25 m v.s. u svrhu protupožarne zaštite.

Također, analiziran je scenarij uključivanja precrpne stanice u pogon kako bi se utvrdilo vrijeme potrebno da se uspostavi stacionarno stanje u vodoopskrbnom sustavu gdje se pokazalo da tlak pri uključivanju precrpne stanice u pogon, tlak na izljevnom mjestu proporcionalno raste na početku dok u kasnijoj fazi ne prati rast uslijed hidrauličkih gubitaka. Konačno, izvršen je proračun vodnog udara u slučaju ispadanja sustava iz pogona. Proračunom je pokazano da uslijed ispadanja sustava iz pogona maksimalni tlak prelazi preporučene vrijednosti stoga bi trebalo razmotriti dodatne mjere zaštite.

## Literatura

- [1] Jure Margeta, Vodoopskrba naselja, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu 2010. godina
- [2] Vinko Jović, nastavni materijali kolegija *Hidraulika*, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu
- [3] Grundfos Data Booklet, Hydro MPC, Uređaji za povišenje tlaka s 2 do 6 crpki
- [4] Hidrostanica vodoopskrbe „Drage 2“, Glavni projekt, "VIA FACTUM" d.o.o. Zagreb, 2019.
- [5] Razvoj sustava vodoopskrbe i odvodnje na području Svetog Filipa i Jakova, Biograda i Pakošтана - vodoopskrba i odvodnja, Područje Općine Pakošтанe, naselja Pakošтанe, Drage i Vrana, vodoopskrba i odvodnja – IV etapa, Glavni projekt, Mapa 4: vodoopskrba, ANIVA-INŽENJERING d.o.o., Zadar, 2018.



## Popis slika i tablica

*Slika 1 Shema instalacije crpne stanice s vertikalnim potpljenim crpkama(izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 2 :Shema instalacije crpne stanice s horizontalnim crpkama (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 3. Osnovne krivulje centrifugalne crpke(izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 4: Krivulja crpnog sustava i radna točka(izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 5: Shema instalacije precrpnice: vanjska izvedba (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 6: Shema instalacije precrpnice: cijevna izvedba (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 7: Tipična izvedba crpki precrpnice (izvor: Vodoopsrkba naselja, J. Margeta)*

*Slika 8. Hydro MPC-E sa dvije crpke*

*Slika 9. Hydro MPC-E sa tri crpke*

*Slika 10. Hydro MPC-E sa četiri crpke*

*Slika 11. Tlocrtni prikaz smještaja građevine planirane precrpne stanice Drage 2*

*Slika 12. Trasa cjevovoda od precrpne stanice Drage do najnepovoljnijeg čvora 408.*

*Slika 13. Uzdužni profil cjevovoda*

*Slika 14. Presjek precrpne stanice*

*Slika 15. Grafički prikaz odnosa visine dizanja crpke i tlaka na izljevnom mjestu*

*Tablica 1. Prikaz rezultata simulacije uključivanja precrpne stanice u pogon*