

# RADNI PARAMETRI ELEKTRONIČKI REGULIRANE CRPKE

---

**Đurđević, Ivan**

**Graduate thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:354509>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-31**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni diplomski studij Strojarsstvo

**IVAN ĐURĐEVIĆ**

**ZAVRŠNI RAD**

**RADNI PARAMETRI ELEKTRONIČKI  
REGULIRANE CRPKE**

Split, rujan 2024.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni diplomski studij Strojtarstvo

**Predmet:** Grijanje i klimatizacija

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Ivan Đurđević

**Naslov rada:** Radni parametri elektronički regulirane crpke

**Mentor:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. struč. stud. u t. i.

Split, rujun 2024.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Stručni diplomski studij Strojarstvo

**Predmet:** Grijanje i klimatizacija

**Nastavnik:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. struč. stud. u t. i.

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Ivan Đurđević

**Zadatak:** Radni parametri elektronički regulirane crpke

U radu je potrebno:

- uvodno se osvrnuti o elektronički reguliranim crpkama u sustavima grijanja, klimatizacije i slično, te objasniti razlog izrade diplomskog rada;
- prikazati i objasniti princip rada elektronički regulirane crpke, navesti osnovne radne karakteristike i mogućnosti uštede energije, prikazati ovisnost karakteristike crpke i karakteristike instalacije pri definiranju radne točke, koristiti pripadajuće slike, grafove;
- prikazati i opisati postojeći laboratorijski model s elektronički reguliranom crpkom, izraditi shematski prikaz modela, navesti i opisati moguće režime rada elektronički regulirane crpke;
- za svaki od režima rada elektronički regulirane crpke izvršiti mjerenja radnih parametara modela (volumni protoci, visina dobave, potrošnja energije, ...), pri različitim uvjetima rada (mijenjanjem karakteristike instalacije);
- izraditi analizu izmjerenih radnih parametara za svaki od režima rada elektronički regulirane crpke;
- iznijeti zaključke;
- navesti literaturu i izvore podataka;

## Sažetak

U radu je demonstrirana mogućnost korištenja laboratorijskog modela s elektronički reguliranom crpkom u edukacijske svrhe. Model je izgrađen u svrhu detaljnijeg uvida u radne parametre elektronički regulirane crpke pri različitim uvjetima rada, odnosno, pri različitim vrijednostima otpora cijevne instalacije. U uvodnom dijelu rada prikazane su osnovne karakteristike i princip rada elektronički reguliranih crpki, te je opisan laboratorijski model s elektronički reguliranom crpkom. U praktičnom dijelu rada prikazane su izmjerene vrijednosti visine dobave, volumnog protoka i električne snage u različitim režimima rada crpke, kao što su konstantni broj okretaja rotora crpke (I, II, i III),  $\Delta p$  konstantno,  $\Delta p$  varijabilno, te „Dynamic Adapt plus“ režim rada. Različiti uvjeti rada crpke simulirani su promjenom stupnja otvorenosti regulacijskog ventila, odnosno promjenom vrijednosti lokalnog otpora na regulacijskom ventilu.

Ključne riječi: elektronički regulirana crpka, mjerenje, radni parametri.

## Summary (Operating parameters of electronically controlled pump)

The paper demonstrates the possibility of using a laboratory model with an electronically regulated pump for educational purposes. The model was built for the purpose of a more detailed insight into the operating parameters of the electronically regulated pump under different operating conditions, that is, at different resistance values of the pipe installation. In the introductory part of the paper, the basic characteristics and principle of operation of electronically controlled pumps are presented, and a laboratory model with an electronically controlled pump is described. In the practical part of the work, the measured values of the delivery height, volume flow and electric power are presented in different modes of pump operation, such as three different constant speeds,  $\Delta p$  constant,  $\Delta p$  variable, and "Dynamic Adapt plus" mode of work. Different operating conditions of the pump are simulated by changing the degree of opening of the control valve, i.e. by changing the value of the local losses on the control valve.

Keywords: electronically controlled pump, measurement, operating parameters.

**SADRŽAJ**

Sažetak.....	2
Summary (Operating parameters of electronically controlled pump).....	2
1. Uvod.....	7
2. Crpke u sustavima grijanja i klimatizacije.....	8
2.1. Centrifugalne crpke.....	8
2.2. Parametri crpke.....	9
2.3. Krivulja sustava i radna točka crpke.....	10
2.4. Elektronička regulacija.....	12
3. Laboratorijski model.....	15
3.1. Prikaz i opis laboratorijskog modela.....	15
3.2. Cirkulacijska crpka Wilo-Stratos PICO 30/0,5-8.....	19
3.3. Regulacijski ventil Danfoss LENO MSV-BD – DN25.....	22
3.4. Mjerilo toplinske energije ULTRAHEAT T550.....	24
3.5. Digitalni manometar WIKA CPG1500.....	26
3.6. Usisna košara sa nepovratnim ventilom.....	27
3.7. Hvatač nečistoća.....	27
3.8. AC digitalni multimetar – PZEM-061.....	28
4. Mjerenje radnih parametara.....	29
4.1. Opis postupka mjerenja.....	29
4.2. Mjerenje pri konstantnoj brzini I (3000 o/min).....	33
4.3. Mjerenje pri konstantnoj brzini II, pri 4000 o/min.....	37
4.4. Mjerenje pri konstantnoj brzini III, pri 4650 o/min.....	40
4.5. Mjerenje pri varijabilnom diferencijalnom tlaku – $\Delta p-v$ .....	43
4.6. Mjerenje pri konstantnom diferencijalnom tlaku – $\Delta p-c$ .....	46
4.7. Mjerenje pri 'Dynamic Adapt plus' režimu rada.....	49
5. Analiza.....	52
5.1. Analiza točnosti mjerenja.....	52
5.2. Analiza rezultata mjerenja.....	54
6. Zaključak.....	57
Literatura.....	58

## Popis slika

Slika 2.1.1 – Centrifugalna crpka [2] .....	8
Slika 2.1.2 – Dijelovi centrifugalne crpke [1].....	8
Slika 2.2.1 – Karakteristične krivulje crpke [2] .....	9
Slika 2.3.1 – Shematski prikaz zatvorenog sustava [2] .....	11
Slika 2.3.2 – Shematski prikaz otvorenog sustava [2].....	11
Slika 2.3.3 – Određivanje radne točke [2] .....	12
Slika 2.4.1 – Usporedba metoda regulacije [2].....	13
Slika 2.4.2 – Područje rada elektronički regulirane crpke [2] .....	13
Slika 3.1.1 – Laboratorijski model .....	15
Slika 3.1.2 – Pogled na model iz različitih kutova.....	16
Slika 3.1.3 – Shematski prikaz laboratorijskog modela .....	17
Slika 3.1.4 – Specifikacija laboratorijskog modela.....	18
Slika 3.2.1 – Karakteristične krivulje Wilo-Stratos PICO crpki [3] .....	19
Slika 3.2.2 – Tehnički podaci testirane crpke [3].....	20
Slika 3.2.3 – Svojstva testirane crpke [3] .....	21
Slika 3.2.4 – Mjerni crtež testirane crpke [3].....	21
Slika 3.3.1 – Danfoss LENO MSV-BD [4] .....	22
Slika 3.3.2 – Dijagram protoka ugrađenog regulacijskog ventila [4] .....	23
Slika 3.4.1 – Ultraheat T550 [5].....	24
Slika 3.4.2 – Mjerni crtež korištenog mjerača toplinske energije [5] .....	24
Slika 3.4.3 – Karakteristike korištenog mjerača toplinske energije [5] .....	25
Slika 3.4.4 – Odnos mjerne preciznosti uređaja i norme EN 1434 [5].....	26
Slika 3.5.1 – Digitalni manometar WIKA CPG1500 [6] .....	26
Slika 3.6.1 – Usisna košara sa nepovratnim ventilom.....	27
Slika 3.7.1 – Hvatač nečistoća .....	27
Slika 3.8.1 – AC digitalni multimeter – PZEM-061 [7].....	28
Slika 4.1.1 – Visinska razlika manometara na ulazu i izlazu iz crpke .....	31
Slika 4.1.2 – Vrijednosti gustoće vode u ovisnosti o temperaturi [2] .....	32
Slika 4.2.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu I.....	35
Slika 4.2.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu I .....	36

Slika 4.2.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu I.....	36
Slika 4.3.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu II.....	38
Slika 4.3.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu II .....	39
Slika 4.3.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu II.....	39
Slika 4.4.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu III .....	41
Slika 4.4.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu III.....	42
Slika 4.4.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu III .....	42
Slika 4.5.1 – Radna karakteristika crpke pri varijabilnom diferencijalnom tlaku .....	44
Slika 4.5.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila pri varijabilnom diferencijalnom tlaku.....	45
Slika 4.5.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila pri varijabilnom diferencijalnom tlaku .....	45
Slika 4.6.1 – Radna karakteristika crpke pri konstantnom diferencijalnom tlaku .....	47
Slika 4.6.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila pri konstantnom diferencijalnom tlaku.....	48
Slika 4.6.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila pri konstantnom diferencijalnom tlaku.....	48
Slika 4.7.1 – Radna karakteristika crpke za postavku rada 'Dynamic Adapt plus' .....	50
Slika 4.7.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za postavku rada 'Dynamic Adapt plus' .....	51
Slika 4.7.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za postavku rada 'Dynamic Adapt plus' .....	51
Slika 5.1.1 – Očitavanje srednjih vrijednosti relativnog tlaka na ulazu u crpku .....	53
Slika 5.1.2 – Očitavanje srednjih vrijednosti relativnog tlaka na izlazu iz crpke.....	53
Slika 5.1.3 – Izračunate visine dobave za očitane vrijednosti relativnih tlakova .....	54



**Popis tablica**

Tablica 4.2.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini I.....	34
Tablica 4.2.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini I.....	35
Tablica 4.3.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini II .....	37
Tablica 4.3.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini II.....	38
Tablica 4.4.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini III .....	40
Tablica 4.4.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini III .....	41
Tablica 4.5.1 – Izmjerene vrijednosti pri varijabilnom diferencijalnom tlaku .....	43
Tablica 4.5.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri varijabilnom diferencijalnom tlaku .....	44
Tablica 4.6.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnom diferencijalnom tlaku, $\Delta p$ -c.....	46
Tablica 4.6.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnom diferencijalnom tlaku .....	47
Tablica 4.7.1 – Izmjerene vrijednosti u režimu rada 'Dynamic Adapt plus'.....	49
Tablica 4.7.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke u režimu rada 'Dynamic Adapt plus'.....	50
Tablica 5.1.1 – Očitavanja i rezultati analize točnosti mjerenja.....	52

## 1. Uvod

Crpke su sastavni dio sustava u okviru kojih je potrebno postići prisilno strujanje tekućine. Njihova uloga je omogućiti gibanje radne tekućine kroz sustav i time ostvariti željeni volumni protok, željenu izmjenu topline ili slično, ovisno o namjeni sustava. Najčešće korištene crpke su centrifugalne crpke [1], a razlog tome su njihova jednostavnost, učinkovitost i fleksibilnost pri zadovoljavanju različitih radnih uvjeta sustava.

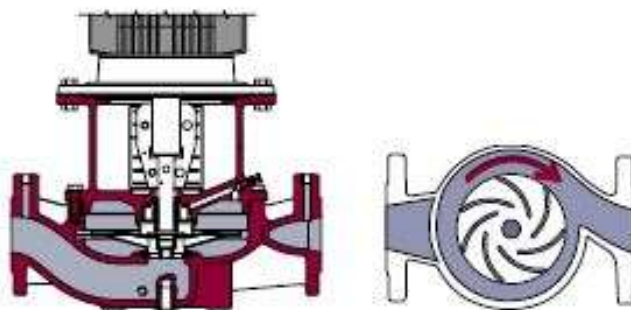
Mnogobrojni su primjeri primjene centrifugalnih crpki. Tako na primjer u sustavima grijanja i klimatizacije osim što osiguravaju željeni volumni protok cirkulirajuće vode, crpke trebaju imati mogućnost kontinuirane promjene količine volumnog protoka kako bi se zadovoljile različite potrebe za toplinskom ili rashladnom energijom pojedinih potrošača. Promjenom režima rada sustava grijanja i klimatizacije mijenja se i krivulja cjevovoda/instalacije iz koje je sustav izveden. Konačni rezultat je promjena radne točke crpke, odnosno njene visine dobave i volumnog protoka. Koristeći crpke koje nemaju mogućnost regulacije rada, promjenom režima rada sustava grijanja i klimatizacije nije moguće postići optimalni rad sustava uz minimalnu potrošnju energije. Uvođenjem elektroničke regulacije u sustav upravljanja radom crpki omogućila se kontinuirana prilagodba radne točke crpke uvjetima koje dinamički sustav kao što je sustav grijanja i klimatizacije zahtijeva kako bi ispunio uvijete energetske učinkovitosti (proizvodio upravo onoliko energije koliko je potrošačima u pojedinom trenutku potrebno). Ušteda energije u današnje vrijeme je izrazito važna zbog sveprisutnih trendova vezanih za energetske učinkovitost i energetske certificiranje. Iako crpke s mogućnošću regulacije zahtijevaju veće investicijske troškove, upotrebom takvih crpki može se postići povrat razlike u investicijskim troškovima za oko 2 do 3 godine. Nakon tog perioda slijedi period smanjenja troškova u potrošnji energije u usporedbi s crpkama koje nemaju mogućnost regulacije rada. Tako se na primjer u periodu od 10 godina može postići ušteda u potrošnji energije od oko 25% ako se koriste crpke s elektroničkom regulacijom [2].

U ovom radu prikazano je mjerenje i analiza osnovnih radnih parametara elektronički regulirane crpke, a kako bi se demonstrirala prilagodba crpke novim uvjetima rada. Pri tome su varirani različiti režimi rada crpke, kao što su nepromjenjivi broj okretaja rotora crpke (3 različite konstantne brzine),  $\Delta p$  konstantno,  $\Delta p$  varijabilno, te „Dynamic Adapt plus“ režim rada. Različiti uvjeti rada crpke simulirani su promjenom stupnja otvorenosti regulacijskog ventila, odnosno promjenom vrijednosti lokalnog otpora na regulacijskom ventilu.

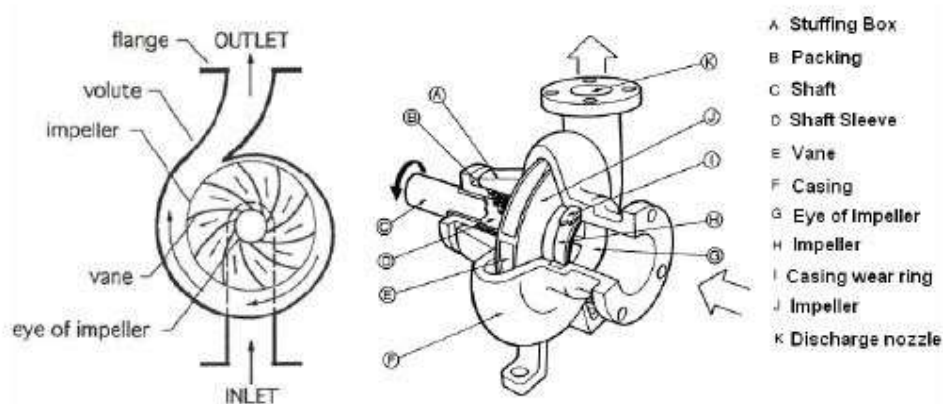
## 2. Crpke u sustavima grijanja i klimatizacije

### 2.1. Centrifugalne crpke

Centrifugalne crpke (slika 2.1.1), kao najzastupljenije crpke za cirkulaciju u sustavima grijanja i klimatizacije, koriste radno kolo ili rotor za pridavanje energije tekućini. Ono svojom rotacijom potiskuje tekućinu prema vani i pod djelovanjem centrifugalne sile tekućina se ubrzava [1]. Prilikom tog procesa radno kolo generira podtlak na usisnoj strani i time nastavlja s „uvlačenjem“ nove tekućine unutar crpke te osigurava kontinuirani protok. Glavni nedostatak je nemogućnost samousisa tekućine, odnosno, potrebno je da kućište pumpe bude prethodno potopljeno kako bi se mogao stvoriti potrebni podtlak i tekućinu dovesti do radnog kola. Prednosti centrifugalnih crpki su kompaktna izvedba, jednostavnost montaže i rukovanja, kontinuiran rad te ekonomska prihvatljivost u odnosu na druge crpke istih značajki. Osnovni dijelovi centrifugalne crpke prikazani su na slici 2.1.2.



Slika 2.1.1 – Centrifugalna crpka [2]

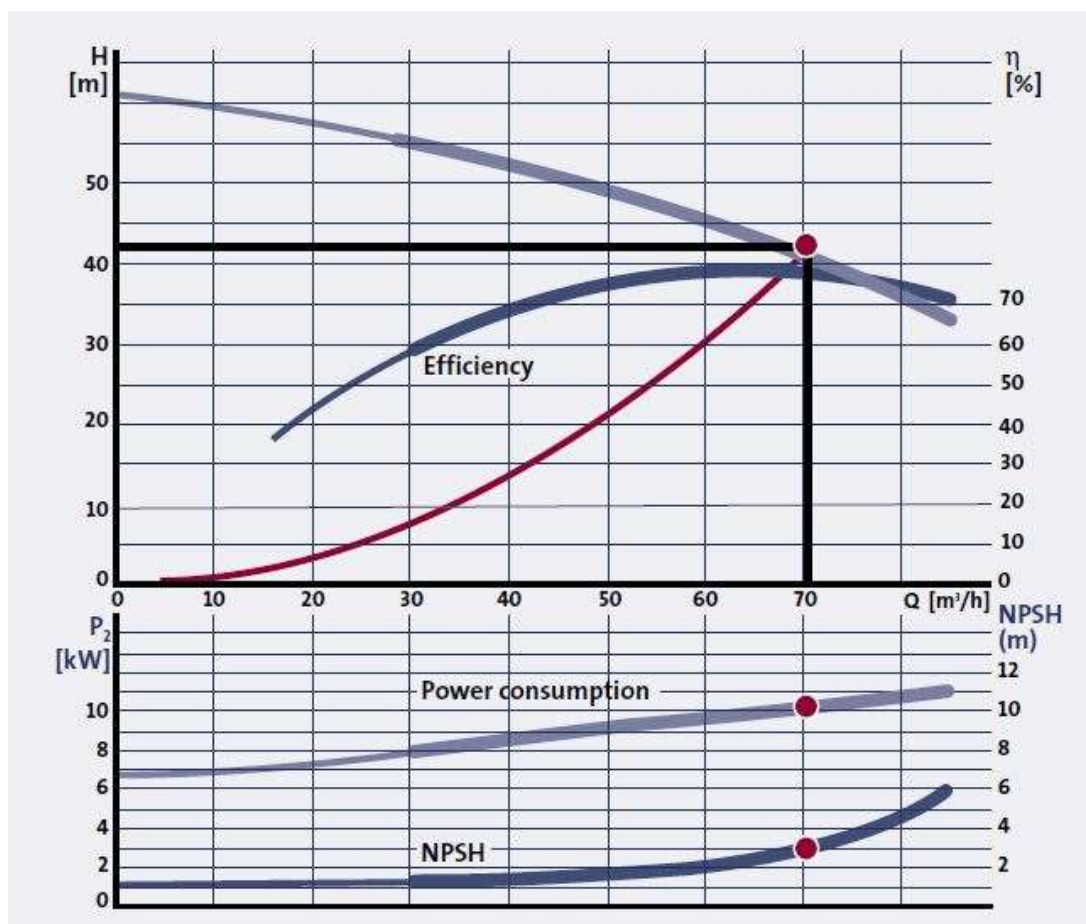


Slika 2.1.2 – Dijelovi centrifugalne crpke [1]

## 2.2. Parametri crpke

Jedan od najvažnijih parametara za odabir crpke je njezin kapacitet (volumni protok) koji se proračunava iz zahtjeva sustava. Odabrani kapacitet direktno utječe na dimenzioniranje cjevovoda sustava, odnosno unutrašnji promjer cijevi kroz koji se tekućine transportira. Prilikom dimenzioniranja potrebno je obratiti pozornost na brzine strujanja. Prevelike brzine strujanja rezultiraju većim gubitcima u radu sustava, dok premale brzine strujanja povisuju investicijske troškove uslijed predimenzioniranja cjevovoda te mogu utjecati na higijenu cirkulirajućeg medija i stvaranje slojeva na stijenkama cjevovoda.

Ostali parametri za odabir crpke (visina dobave, učinkovitost, električna snaga, ...) prikazuju se karakterističnim krivuljama crpke (slika 2.2.1) i to u direktnom odnosu s kapacitetom izraženim u jedinicama volumena u vremenu.



Slika 2.2.1 – Karakteristične krivulje crpke [2]

Visina dobave je, uz kapacitet, drugi najvažniji parametar pri odabiru crpke. Ovisno o izvedbi sustava, visinom dobave crpka treba savladati sve lokalne i linijske gubitke sustava, visinsku razliku, te osigurati tekućini potrebnu brzinu (kinetičku energiju) pri izlasku iz sustava. Visina dobave izražena je u jedinicama dužine/visine, odnosno u metrima. Iako se radi o količini energije koju crpka predaje tekućini, kao parametar pri odabiru crpke koristi se visina dobave a ne tlak iz razloga što visina dobave ne ovisi o vrsti tekućine koja je u sustavu, dok tlak ovisi o gustoći tekućine [1]. Za crpke vrijedi općenito pravilo da porastom kapaciteta (volumnog protoka) dolazi do opadanja visine dobave.

Uz prethodno navedene parametre još je važno spomenuti i učinkovitost crpke te potrošnju energije. Prilikom odabira crpke poželjno je da crpka pri najčešćoj radnoj točki ima najveću učinkovitost te što je moguće manju potrošnju energije.

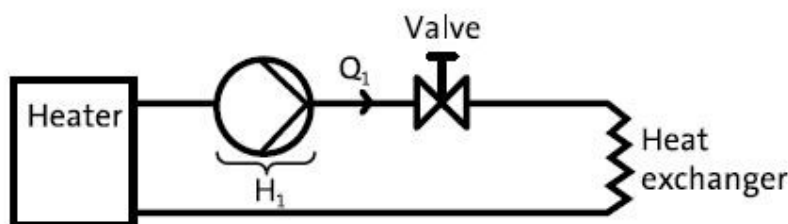
Konačno, jedan od važnih radnih parametara je NPSH (eng. Net Positive Suction Head), odnosno neto pozitivna usisna visina dobave crpke. Ovaj parametar definira traženi stupac visine tekućine koji je potreban na usisnoj strani crpke kako bi se spriječila pojava kavitacije na radnom kolu, uslijed čega može doći do prekida rada crpke i oštećenja radnog kola.

### **2.3. Krivulja sustava i radna točka crpke**

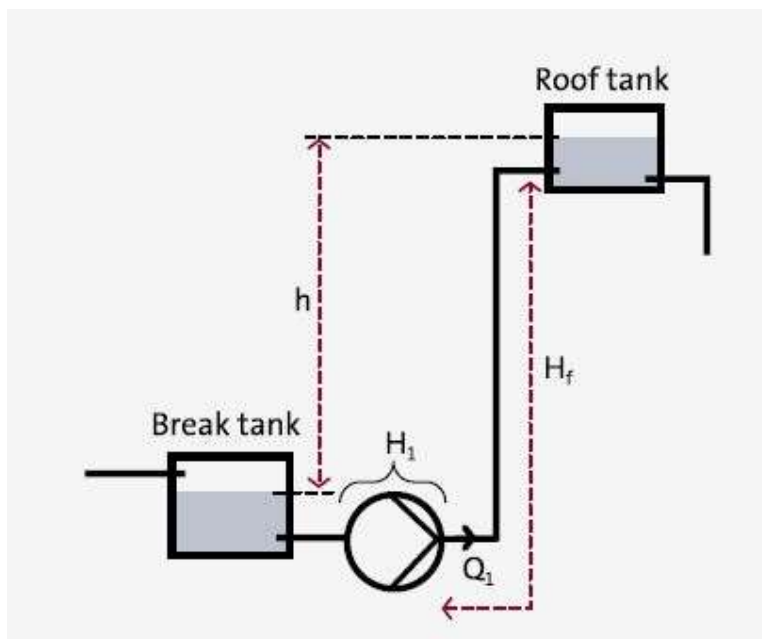
U slici 2.2.1 prikazana je sivom bojom radna karakteristika crpke kojom je definirana međusobna ovisnost visine dobave ( $H$ ) i volumnog protoka ( $Q$ ). Crvenom krivuljom definirana je karakteristika instalacije (cjevovod s pripadajućim elementima). Karakteristični oblik karakteristike instalacije je parabola čije tjeme može mijenjati svoj položaj po ordinati (vertikalna os)  $H$ - $Q$  dijagrama. Za razliku od crpki, za instalaciju vrijedi pravilo da porastom volumnog protoka dolazi do povećanja potrebne visine dobave uslijed povećanja linijskih i lokalnih gubitaka koji se mijenjaju s kvadratom brzine strujanja.

Instalacijski sustavi mogu biti otvoreni ili zatvoreni [2]. U zatvorenim sustavima (slika 2.3.1) crpke vrše cirkulaciju tekućine kroz sustav gdje se visinske razlike anuliraju na tlačnoj i povratnoj strani instalacije, te crpka treba savladati sve lokalne i linijske gubitke koji se javljaju unutar cjevovoda i opreme/uređaja priključenima na cjevovod. Gubici koji se javljaju u instalaciji posljedica su otpora strujanja tekućine (viskoznost, hrapavost stijenke cijevi) po dužini cijevi, promjeni smjera strujanja, promjeni poprečnog presjeka kroz koji tekućina struji, te gubicima koji nastaju unutar opreme koja je priključena na sustav. Kod zatvorenog sustava karakteristika instalacije, odnosno tjeme parabole, smješteno je u ishodištu dijagrama.

Kod otvorenih sustava (slika 2.3.2) crpka najčešće ima funkciju transporta tekućine, te je uz lokalne i linijske gubitke prilikom proračuna visine dobave potrebno uzeti u obzir visinsku razliku između slobodnih površina tekućine u spremnicima, te potrebnu brzinu tekućine iz izlaznog cjevovoda. Kod otvorenih sustava karakteristika instalacije, odnosno tjele parabole, može biti smješteno na određenoj + vrijednosti visine dobave  $H$  (pozitivna visinska razlika između dvaju spremnika), ili na određenoj – vrijednosti visine dobave  $H$  (negativna visinska razlika između spremnika).



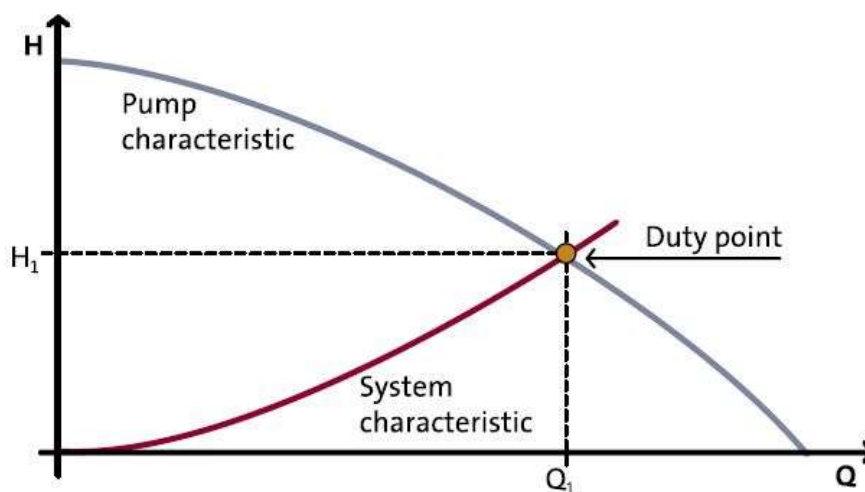
Slika 2.3.1 – Shematski prikaz zatvorenog sustava [2]



Slika 2.3.2 – Shematski prikaz otvorenog sustava [2]

Presjekom karakterističnih krivulja crpke i instalacije definirana je radna točka crpke (slika 2.3.3), odnosno njena visina dobave i volumni protok. Radna točka crpke mijenja svoj položaj u ovisnosti o promjeni položaja karakteristike instalacije. Karakteristika instalacije mijenja

svoj položaj u ovisnosti o promjeni otpora instalacije do čega dolazi na primjer pri otvaranju i zatvaranju regulacijskih ventila. U skladu s gore navedenim, na slici 2.3.3 prikazana je karakteristika instalacije zatvorenog sustava (tjeme parabole je smješteno u ishodištu dijagrama).







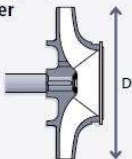

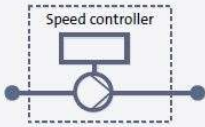
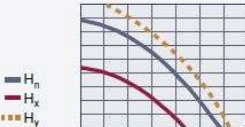
Slika 2.3.3 – Određivanje radne točke [2]

## 2.4. Elektronička regulacija

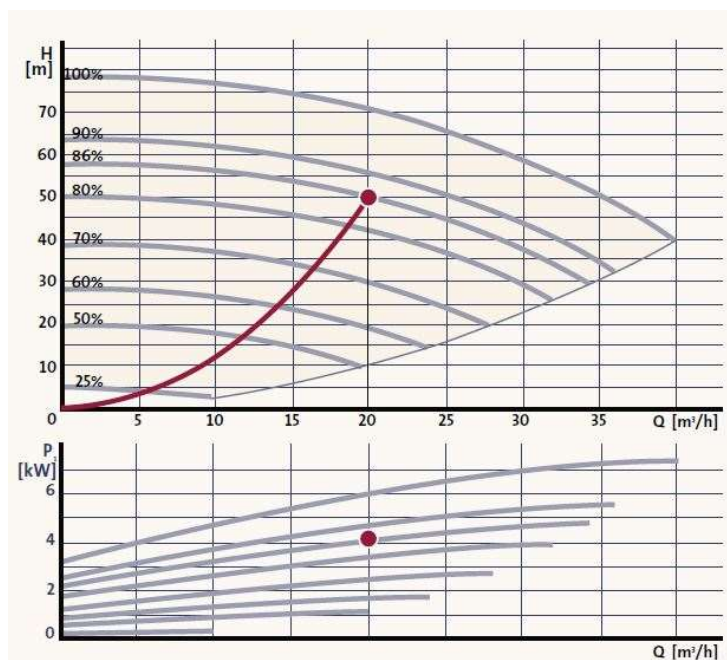
Regulacija rada crpke može se postići na dva načina, mehanički i elektronički (slika 2.4.1). Mehanička regulacija postiže se postavljanjem dodatnog ventila u serijski ili paralelni spoj s crpkom ili mijenjanjem promjera radnog kola crpke [2]. Sva tri načina regulacije iziskuju dodatne zahvate na sustavu koji utječu na efikasnost sustava ili promjene koje nisu moguće za vrijeme rada crpke.

Elektronička regulacija crpki koristi se za optimizaciju rada crpke i prilagodbu parametrima sustava bez prekida rada crpke ili potrebe za dodatnim dijelovima u sustavu. Elektroničkom regulacijom kontrolira se brzina vrtnje radnog kola crpke koju je moguće smanjiti ili povećati u odnosu na nominalnu brzinu vrtnje te se na taj način može smanjiti ili povećati radno područje crpke (slika 2.4.2). Time se mijenja i karakteristična krivulja crpke, ali njezine karakteristike ostaju nepromijenjene.

Uparivanjem frekventnog pretvarača koji je zadužen za kontrolu brzine rada s dodatnim regulatorom koji prikuplja podatke iz sustava kroz razne senzore postavljene u sustav ostvaruje se automatska kontrola rada i prilagodba crpke potrebama sustava.

Method	Continuous adjustment possible?	The resulting performance curve will have	Overall efficiency of the pump system	Relative power consumption by 20% reduction in flow
Throttle control 	Yes	Reduced Q 	Considerably reduced	94%
Bypass control 	Yes	Reduced H and changed curve 	Considerably reduced	110%
Modifying impeller diameter 	No	Reduced Q and H 	Slightly reduced	67%
Speed control 	Yes	Reduced Q and H 	Slightly reduced	65%

Slika 2.4.1 – Usporedba metoda regulacije [2]



Slika 2.4.2 – Područje rada elektronički regulirane crpke [2]



Regulator je napravljen po principu ECM tehnologije, odnosno elektronički kontroliranog modula koji prikuplja podatke iz sustava i pomoću mikroprocesora ih obrađuje te prema dobivenim rezultatima korigira rad crpke za optimalne rezultate. Ovakva kombinacija se koristi za kontrolu više različitih značajki sustava kao što su:

- konstantan tlak u otvorenim sustavima,
- konstantan diferencijalni tlak u zatvorenim sustavima,
- kontrola temperature.

Kao primjer može se navesti korištenje elektronički regulirane crpke u sustavu toplovodnog radijatorskog grijanja. U slučaju kada jedna crpka opskrbljuje veći broj radijatora, čiji regulacijski ventili (ventili s termostatskim glavama) po potrebi mogu biti više ili manje otvoreni/zatvoreni, radna točka cirkulacijske crpke kontinuirano će se mijenjati ovisno o toplinskim potrebama pojedinih radijatora. Povećanjem potrebe za toplinskom energijom otvaraju se regulacijski ventili. Pri tome je potrebno uskladiti volumni protok tople vode stvarnim potrebama sustava grijanja, ali i visinu dobave crpke promjenjivim otporima/gubicima cjevovodne instalacije i radijatora. Sustav grijanja postaje „dinamičan“, radna točka crpke se kontinuirano mijenja i upravo elektronički regulirana crpka, ovisno o podešenom načinu regulacije i instaliranim sensorima, treba pravovremeno i kontinuirano zadovoljavati sve režime rada sustava grijanja.

### 3. Laboratorijski model

#### 3.1. Prikaz i opis laboratorijskog modela

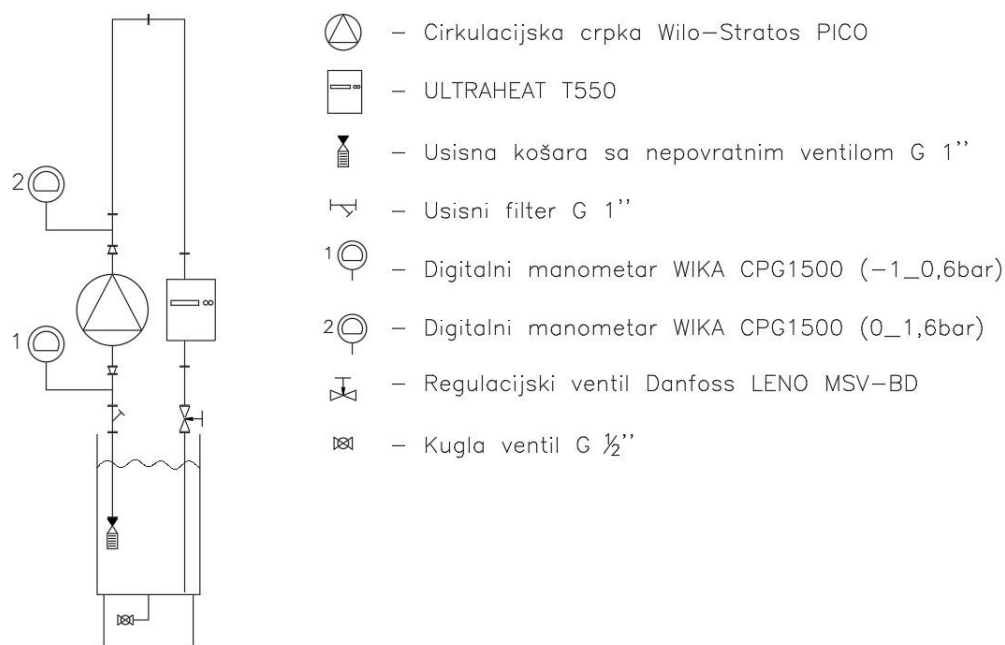


*Slika 3.1.1 – Laboratorijski model*



*Slika 3.1.2 – Pogled na model iz različitih kutova*

Laboratorijski model, prikazan na slikama 3.1.1 i 3.1.2, sastoji se od spremnika vode zapremine 10 litara, cjevovoda izvedenog iz bakarnih cijevi dimenzija  $\varnothing 28 \times 1,0$  mm, pripadajuće cijevne armature, centrifugalne crpke, digitalnih manometara, ultrazvučnog mjerača protoka (mjerilo toplinske energije), te regulirajućeg ventila. Spremnik ima mogućnost pražnjenja uz pomoć kugla ventila nazivnog promjera DN15, smještenog na dnu spremnika. Shematski prikaz laboratorijskog modela s osnovnim elementima prikazan je na slici 3.1.3., dok su osnovne dimenzije modela prikazane na slici 3.1.4.

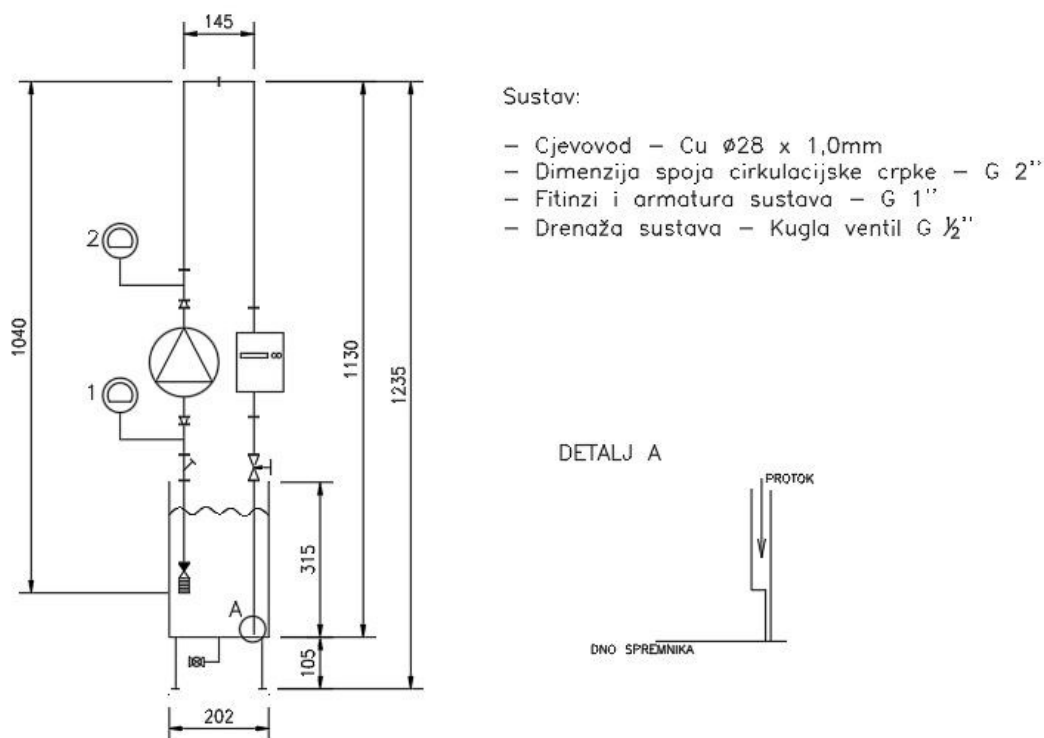


Slika 3.1.3 – Shematski prikaz laboratorijskog modela

Usisni dio cjevovoda sastoji se od usisne košare s nepovratnim ventilom, hvatača nečistoća (filtra), T-priključka za spoj manometra niskog tlaka, te priključnog holendera za spoj na cirkulacijsku crpku. Tlačni dio cjevovoda sastoji se od priključnog holendera za spoj na cirkulacijsku crpku, T-priključka za spoj manometra visokog tlaka, dva koljena DN25, te priključnih elemenata za spoj na ultrazvučni mjerič protoka i regulacijski ventil. Svi spojevi cjevovodne instalacije izvedeni su navojnim elementima i „hermeto“ spojnicama dimenzija 1“-28 mm.

Digitalni manometri niskog i visokog tlaka predviđeni su za očitavanje razlike tlaka na ulazu i izlazu iz crpke, na osnovu kojeg će se računati visina dobave crpke u različitim režimima rada. Regulacijski ventil, koji se koristi u sustavima grijanja i klimatizacije za hidrauličko

balansiranje sustava, predviđen je u svrhu promjene radnih uvjeta sustava. Otvaranjem i zatvaranjem regulacijskog ventila u točno definiranim položajima (prikazani broječanim oznakama na ventilu) može se mijenjati vrijednost otpora cijevne instalacije te time simulirati stvarni uvjeti rada sustava u praksi. Odabrani regulacijski ventil omogućuje ponovljivost mjerenja radnih parametara pri istom položaju otvorenosti/zatvorenosti ventila. Mjerilom toplinske energije i pripadajućim ultrazvučnim mjerjačem protoka predviđeno je mjerenje volumnog protoka vode kroz cijevnu instalaciju pri različitim režimima rada.

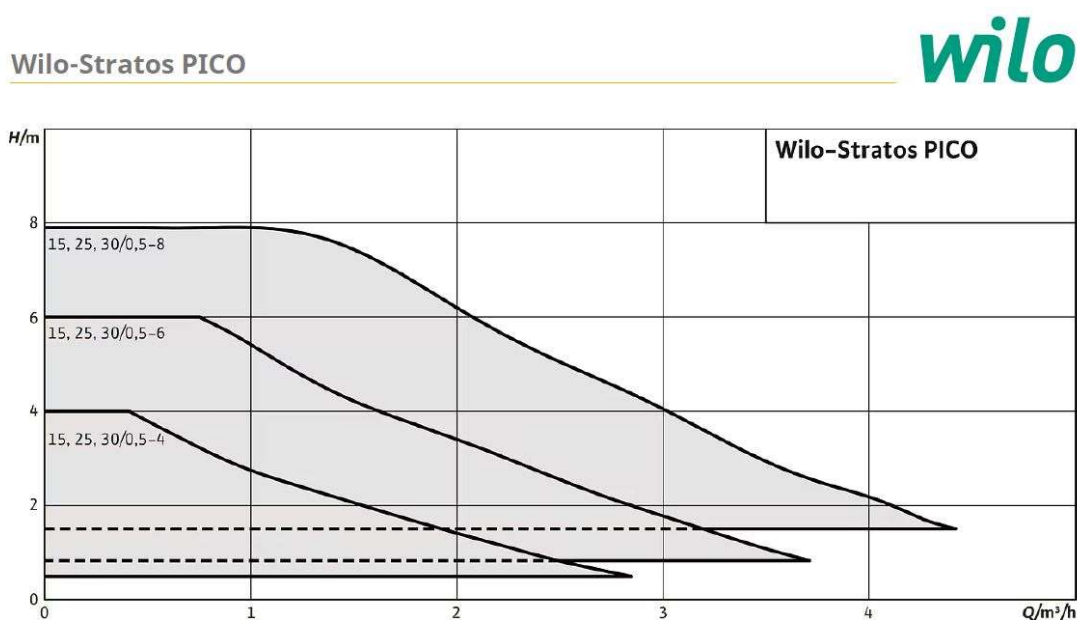


Slika 3.1.4 – Specifikacija laboratorijskog modela

Laboratorijski model malih je dimenzija i male mase, te je predviđeno da se koristi u edukacijske svrhe. Osim laboratorijskih vježbi, može se koristiti i u predavaonici u svrhu praktične demonstracije radnih parametara cirkulacijske crpke. Ukupna visina modela iznosi 1235 mm, dok su dimenzije spremnika tekućine  $\varnothing 202 \text{ mm} \times 315 \text{ mm}$ .

### 3.2. Cirkulacijska crpka Wilo-Stratos PICO 30/0,5-8

Wilo-Stratos PICO je visokoučinkovita cirkulacijska crpka s integriranom elektroničkom regulacijom učinka za kontinuiranu regulaciju diferencijalnog tlaka. Moguće ju je koristiti u svim instalacijama grijanja i klimatizacije koji koriste tekućinu temperaturnog raspona od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+110^{\circ}\text{C}$  [3]. Automatsko prepoznavanje rada na suho i automatsko ponovno pokretanje doprinose pouzdanosti crpke. Karakteristične krivulje cijelog asortimana Wilo-Stratos PICO crpki prikazane su na slici 3.2.1., dok se krivulja oznake 30/0,5-8 odnosi na crpku koja je instalirana na laboratorijskom modelu.



Slika 3.2.1 – Karakteristične krivulje Wilo-Stratos PICO crpki [3]

U okviru postavki crpke moguće je odabrati jednu od sljedećih vrsta regulacije:

- „Dynamic Adapt plus“ – tvornička postavka za konstantnu prilagodbu snage potrebama sustava bez određene zadane vrijednosti
- Konstantni diferencijalni tlak ( $\Delta p-c$ )
- Varijabilni diferencijalni tlak ( $\Delta p-v$ )
- Konstantni broj okretaja ( $n\text{-const.}$ ) – mogućnost odabira 3 različite brzine okretanja

Tehnički podaci, osnovna svojstva i dimenzije crpke prikazani su slikama 3.2.2, 3.2.3 i 3.2.4.

## Stratos PICO 30/0,5-8

wilo



## List s tehničkim podacima

## Hidraulički podatci

Maksimalni radni tlak $P_N$	10 bar
Visina dobave $H_{max}$	8,1 m
Količina protoka $Q_{max}$	4,4 m <sup>3</sup> /h
Minimalna visina dotoka pri 50 °C	0,5 m
Minimalna visina dotoka pri 95 °C	3 m
Minimalna visina dotoka pri 110 °C	10 m
Min. temperatura medija $T_{min}$	-10 °C
Maks. temperatura medija $T_{max}$	110 °C
Maks. temperatura medija pri maks. temperaturi okoline od +25 °C $T_{max}$	110 °C
Maks. temperatura medija pri maks. temperaturi okoline od +40 °C $T_{max}$	95 °C
Temperatura okoline min. $T_{min}$	-10 °C
Maks. temperatura okoline $T_{max}$	40 °C

## Podatci o motoru

Indeks energetske učinkovitosti (EEI)	≤0.23
Mrežni priključak	1-230 V ±10%, 50/60 Hz
Nazivna snaga $P_2$	58 W
Broj okretaja min. $n_{min}$	500 1/min
Broj okretaja maks. $n_{max}$	4800 1/min
Potrošnja struje (min) $P_1_{min}$	3 W
Potrošnja struje $P_1_{max}$	75 W
Emiširanje smetnji	EN 61000-6-3
Otpornost na smetnje	EN 61000-6-2
Elektromagnetna kompatibilnost	EN 61800-3
Kabelska uvodnica	1 x PG11
Klasa izolacije	F
Stupanj zaštite	IPX4D

## Materijali

Kućište pumpe	Sivi lijev
Radno kolo	PP-GF40
Vratilo	Plemeniti čelik
Materijal ležaja	Ugljen, impregnirano metalom

## Dimenzije montaže

Priključak cijevi s tlačne strane	G 2
Priključak cijevi s usisne strane	G 2
Ugradna dužina $l_0$	180 mm

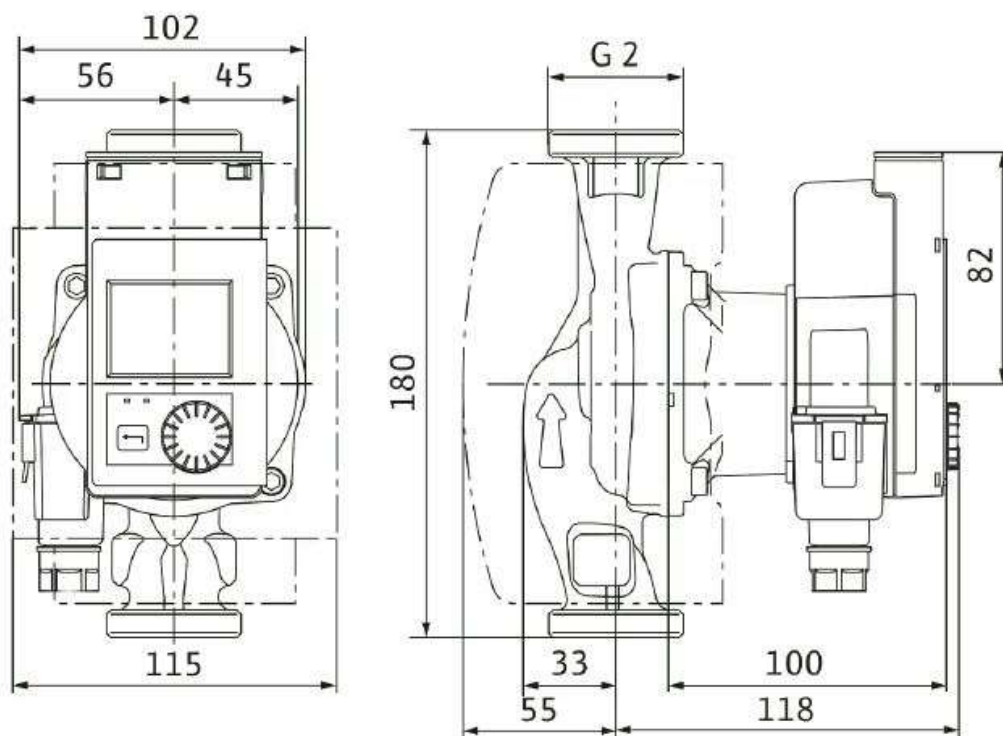
Slika 3.2.2 – Tehnički podaci testirane crpke [3]





Slika 3.2.3 – Svojstva testirane crpke [3]

Stratos PICO 30/0,5-8



Slika 3.2.4 – Mjerni crtež testirane crpke [3]



### 3.3. Regulacijski ventil Danfoss LENO MSV-BD – DN25

Danfoss LENO MSV-BD je ručni regulacijski ventil (slika 3.3.1) koji se koristi za balansiranje protoka u sustavima grijanja i klimatizacije [4]. Napravljen je kao kombinacija zapornog ventila i ventila s predpodešavanjem, a može ga se ugraditi na polazni kao i na povratni vod sustava. Uz balansiranje sustava, najčešće ga se koristi za održavanje stalnog protoka u sustavu ili kao zaporni element prilikom servisa sustava. Mogućnost zaključavanja predpodešavanja i indikacija otvorenosti ili zatvorenosti omogućuju jednoznačnu ponovljivost mjerenja s minimalnom mogućnošću za pogrešku. Regulacijsko kolo može se odvojiti od tijela ventila radi lakše ugradnje. Na tijelu ventila postavljeni su priključci za mjerne igle preko kojih se na ventil može spojiti diferencijalni manometar u svrhu mjerenja volumnog protoka i podešenosti ventila.

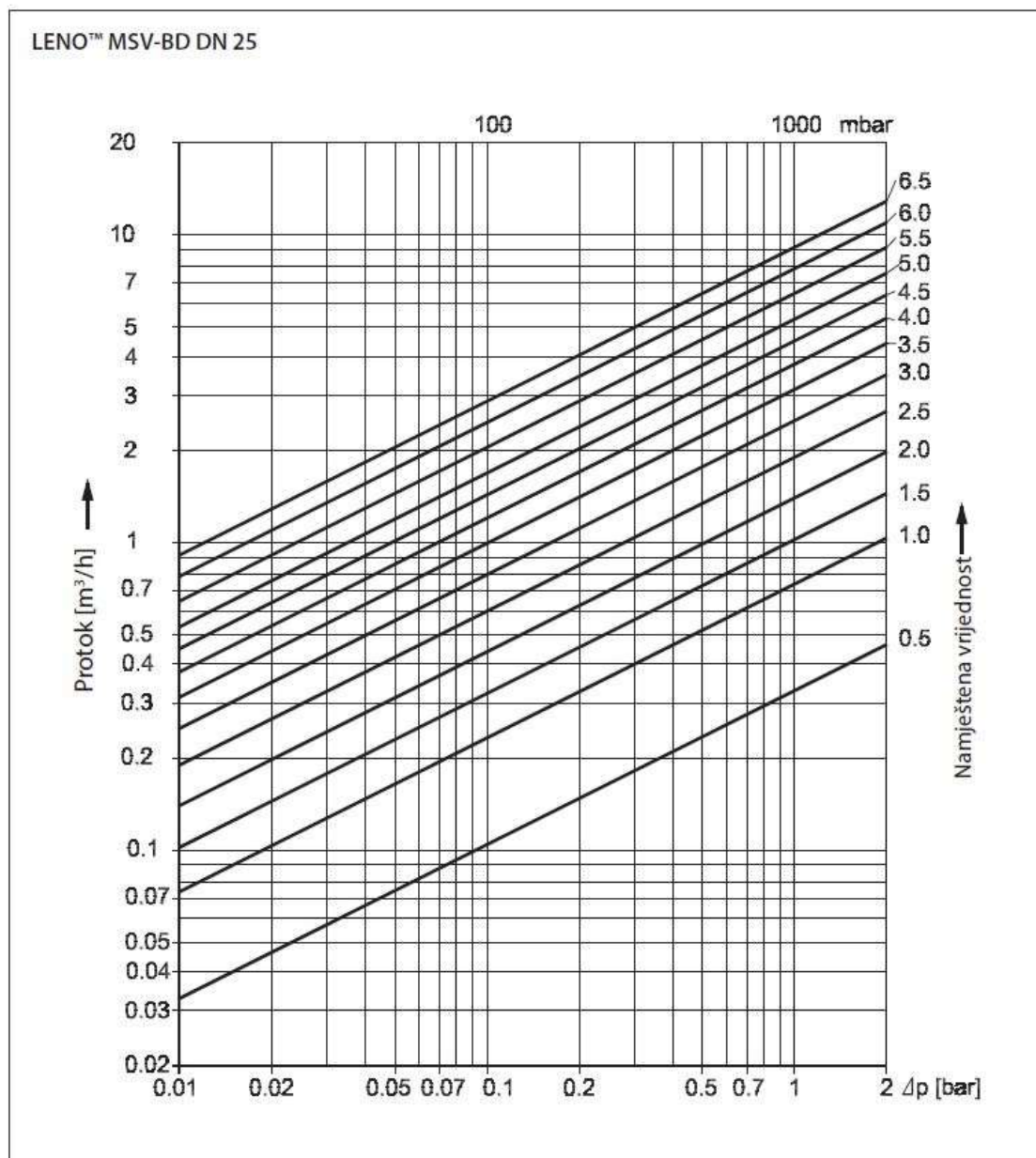


Slika 3.3.1 – Danfoss LENO MSV-BD [4]

Na slici 3.3.2 prikazan je dijagram protoka odabranog regulacijskog ventila. Uz poznatu namještenu vrijednost ventila (od 0.5 do 6.5) potrebno je izmjeriti vrijednost diferencijalnog tlaka na ventilu (priključak mjernih igala i diferencijalnog manometra). Na mjestu gdje se namještena vrijednost ventila presječe s vrijednošću diferencijalnog tlaka na lijevoj strani dijagrama može se očitati vrijednost volumnog protoka kroz ventil.

Za potrebe laboratorijskog modela upravo je odabran regulacijski ventil navedenih karakteristika jer osigurava ponovljivost položaja i otvorenosti ventila.

## Dijagram protoka, DN 25



Slika 3.3.2 – Dijagram protoka ugrađenog regulacijskog ventila [4]

### 3.4. Mjerilo toplinske energije ULTRAHEAT T550

Odabrano mjerilo toplinske energije (slika 3.4.1) radi po ultrazvučnom principu rada koji osigurava visoku preciznost mjerenja i stabilne rezultate [5]. Mjerenje volumnog protoka vrši se uz pomoć dvije sonde koje su postavljene unutar mjerne cijevi kroz koju prolazi tekućina. Sonde su postavljene unutar cijevi, udaljene jedna od druge, a iz sondi se odašilju ultrazvučni impulsi. Mjeri se vrijeme potrebno da impuls dođe od jedne do druge sonde, u smjeru protoka i obrnuto, te se uz pomoć izmjerenih vremena računa volumni protok tekućine. Navedeno mjerilo toplinske energije nije predviđeno za sustave koji koriste mješavinu vode i glikola, te za sustave koji koriste pitku vodu. Osnovne dimenzije mjerila prikazane su na slici 3.4.2.



Ultrasonic Heat Meter / Cooling Meter  
**ULTRAHEAT / ULTRACOLD**  
**T550 (UH50...)**

**The Professional:**  
 High-precision, modularity,  
 reliable technology  
 for all applications

Slika 3.4.1 – Ultraheat T550 [5]

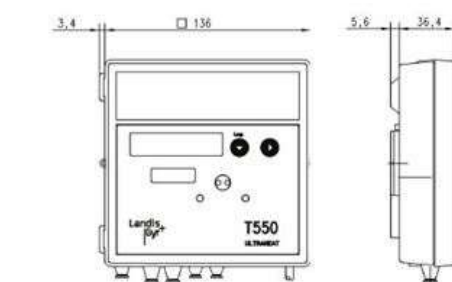


Fig. 15: Dimensions of electronic unit

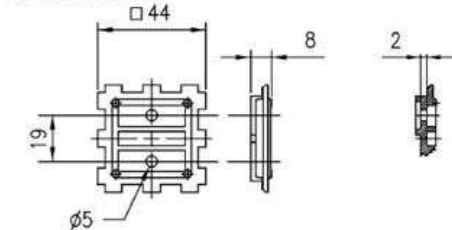


Fig. 16: Plan view and cross section of adapter plate

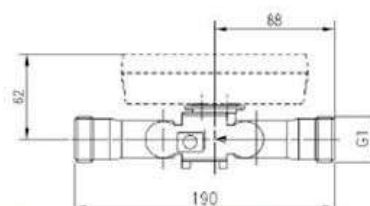


Fig. 3: Overview dimensions: overall length 190 mm (thread)

Order-No.	qp m <sup>3</sup> /h	PN bar	a mm	b mm	c mm
UH50-x03	0.6	16	130	G1	58
UH50-x04	0.6	25	130	G1	58
UH50-x05	0.6	16	110	G ¾	48
UH50-x06	0.6	25	110	G ¾	48
UH50-x07	0.6	16	190	G1	88
UH50-x09	0.6	25	190	G1	88
UH50-x21	1.5	16	110	G ¾	48
UH50-x22	1.5	25	110	G ¾	48
UH50-x23	1.5	16	190	G1	88
UH50-x25	1.5	25	190	G1	88
UH50-x26	1.5	16	130	G1	58
UH50-x27	1.5	25	130	G1	58
UH50-x36	2.5	16	130	G1	58
UH50-x37	2.5	25	130	G1	58
UH50-x38	2.5	16	190	G1	95
UH50-x40	2.5	25	190	G1	95

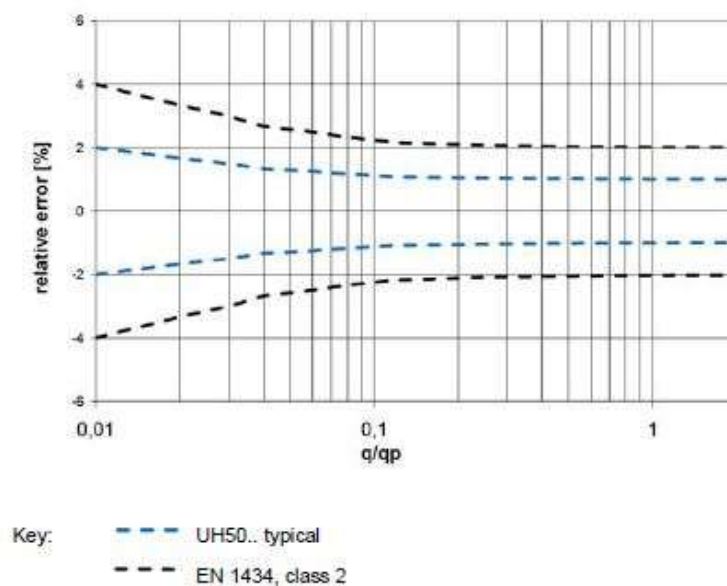
Slika 3.4.2 – Mjerni crtež korištenog mjerača toplinske energije [5]

Mjerilo toplinske energije koje je postavljeno na laboratorijski model je UH50-x38, nominalnog protoka  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$  i pada tlaka od 210 mbara. Najvažnije karakteristike korištenog uređaja prikazane su na slici 3.4.3., pri čemu je u crvenom okviru istaknut odabrani model. Ugradbena dužina mjerila toplinske energije iznosi 190 mm, dok je dimenzija navojnog priključka G1.

Nominal flowrate $q_b$	Overall length	Connection	Maximum flowrate $q_s$	Minimum flowrate $q_i$	Response threshold (variable)	Pressure loss at $q_b$	Kv flowrate at $\Delta p$ 1 bar	Kv flowrate at $\Delta p$ 100 mbar	Weight
$\text{m}^3/\text{h}$	mm	G/DN	$\text{m}^3/\text{h}$	l/h	l/h	mbar	$\text{m}^3/\text{h}$	$\text{m}^3/\text{h}$	kg
0.6	110	G 3/4	1.2	6	2.4	150	1.5	0.5	1
0.6	190	G1	1.2	6	2.4	150	1.5	0.5	1.5
0.6	190	DN20	1.2	6	2.4	150	1.5	0.5	3
1.5	110	G 3/4	3	15	6	170	3.9	1.2	1
1.5	130	G1	3	15	6	160	3.8	1.2	1.5
1.5	190	G1	3	15	6	160	3.8	1.2	1.5
1.5	190	DN20	3	15	6	160	3.8	1.2	3
2.5	130	G1	5	25	10	200	5.6	1.8	1.5
2.5	190	G1	5	25	10	210	5.3	1.7	1.5
2.5	190	DN20	5	25	10	210	5.3	1.7	3
3.5	260	G 1 1/4	7	35	14	60	14	4.5	3
3.5	260	DN25	7	35	14	60	14	4.5	5
6	150	G 1 1/4	12	60	24	240	12	3.9	3
6	260	G 1 1/4	12	60	24	180	14	4.5	3
6	260	DN25	12	60	24	180	14	4.5	5
10	200	G2	20	100	40	130	28	8.8	2.6
10	300	G2	20	100	40	110	30	9.5	4
10	300	DN40	20	100	40	130	28	8.8	7
15	200	DN50	30	150	60	95	49	15.4	5
15	270	DN50	30	150	60	110	45	14.3	8
25	300	DN65	50	250	100	105	77	24.4	11
40	300	DN80	80	400	160	160	100	31.6	13
60	360	DN100	120	600	240	115	177	56.0	22
150	500	DN150	300	1500	600	120	433	136.9	50 <sup>a)</sup>

Slika 3.4.3 – Karakteristike korištenog mjerača toplinske energije [5]

Mjerilo toplinske energije klasificirano je normom EN 1434, klasa 2, koja dopušta određena odstupanja u mjerenjima. Dijagram na slici 3.4.4 prikazuje dopuštena odstupanja mjerenja prema normi EN 1434 i odstupanja korištenog uređaja. Za vrijednost od 0,01 odnosa stvarnog protoka i nominalnog protoka, norma propisuje dopuštenu relativnu pogrešku u mjerenju od  $\pm 4\%$  dok uređaj ostvaruje preciznost mjerenja s odstupanjem od  $\pm 2\%$ . Za područje od 0,1 do 1 odnosa stvarnog protoka i nominalnog protoka normom dozvoljena tolerancija se smanjuje na raspon od  $\pm 2\%$  relativne pogreške u mjerenju, dok uređaj ostvaruje preciznost uz pogrešku od  $\pm 1\%$ .



Slika 3.4.4 – Odnos mjerne preciznosti uređaja i norme EN 1434 [5]

### 3.5. Digitalni manometar WIKA CPG1500

Precizni digitalni manometar (slika 3.5.1) instaliran je na laboratorijskom modelu u svrhu očitavanja relativnog tlaka prije ulaska vode u crpku i nakon izlaska vode iz crpke. Osim visoke preciznosti očitavanja, manometar omogućava mjerenje temperature tekućine, prikaz izmjerenih vrijednosti u različitim fizikalnim jedinicama za tlak, te mogućnost povezivanja s računalom ili pametnim telefonom [6]. Za mjerenje niskog relativnog tlaka odabran je manometar s mjernim područjem od -1 do 0,6 bar, dok je za mjerenje visokog relativnog tlaka odabran manometar s mjernim područjem od 0 do 1,6 bar.



Slika 3.5.1 – Digitalni manometar WIKA CPG1500 [6]



### 3.6. Usisna košara sa nepovratnim ventilom

Usisna košara (slika 3.6.1) postavljena je na usisni dio cjevovoda prije crpke kako ne bi došlo do ulaza većih nečistoća u cjevovod te se time potencijalno uzrokovalo začepljenja cjevovoda. Odabrana usisna košara ima i nepovratni ventil čime se sprječava protok tekućine u obrnutom smjeru. Na taj način je osigurano da će usisni dio cjevovoda uvijek biti napunjen vodom, te da će pri svakom pokretanju usisni priključak crpke biti naplavljen čime je osiguran početak rada pri svakom uključivanju crpke u rad.



Slika 3.6.1 – Usisna košara sa nepovratnim ventilom

### 3.7. Hvatač nečistoća

Hvatač nečistoća (slika 3.7.1) instaliran je usisnom cjevovodu i to prije priključka na digitalne manometre i cirkulacijsku crpku. Hvatač nečistoća ima uložak izveden od fine metalne mrežice te se koristi za mehaničko pročišćavanje vode. Sa stupnjem filtracije od 500  $\mu\text{m}$  osigurava sprječavanje prolaska sitnih čestica metala ili slično prema preciznoj mjernoj opremi i cirkulacijskoj crpki. Kako ne bi došlo do povećanja otpora na hvataču nečistoće, potrebno je periodički provjeriti začepljenost filtarskog uložka te ga prema potrebi očistiti.



Slika 3.7.1 – Hvatač nečistoća

### 3.8. AC digitalni multimeter – PZEM-061

U svrhu mjerenja trenutne električne snage tijekom rada cirkulacijske crpke predviđen je priključak električnog napajanja crpke u AC digitalni multimeter, model PZEM-061. Uređaj ima mogućnost prikaza napona električne mreže, trenutne jakosti struje, trenutne električne snage i kumulativne potrošnje električne energije. Odabrani uređaj predviđen je za priključak na električnu mrežu s rasponom napona od 110 do 230 V i jakostima struje od 0 do 100 A. Radni napon uređaja kreće se između 80 i 260 VAC, dok je maksimalna snaga koju uređaj može mjeriti 22 kW.



Slika 3.8.1 – AC digitalni multimeter – PZEM-061 [7]

## 4. Mjerenje radnih parametara

### 4.1. Opis postupka mjerenja

Mjerenje radnih parametara crpke izvršeno je za sljedeće režime rada crpke:

- pri konstantnoj brzini I (3000 o/min)
- pri konstantnoj brzini II (4000 o/min)
- pri konstantnoj brzini III (4650 o/min)
- pri konstantnom diferencijalnom tlaku ( $\Delta p-c$ )
- pri varijabilnom diferencijalnom tlaku ( $\Delta p-v$ )
- pri Dynamic Adapt plus režimu rada

Izmjereni i izračunani radni parametri, te radni parametri očitani s grafičkog zaslona crpke prikazani su tablično i grafički. Tijekom mjerenja radnih parametara crpke za svaki od gore navedenih režima rada mijenjan je položaj ručnog regulacijskog ventila. Inicijalno su definirana 22 položaja rotacijskog kola regulacijskog ventila, te su mjerenja u svakom režimu rada izvršena za iste položaje rotacijskog kola. Položaj rotacijskog kola kretao se od 0.0 (potpuno zatvoren ventil) do 6.5 (potpuno otvoren ventil). Promjena položaja rotacijskog kola, a time i stupnja otvorenosti ventila, ima za cilj simulirati stvarne uvjete rada crpke pri različitim otporima (karakteristikama) cijevne instalacije.

Tijekom mjerenja bilježeni su sljedeći radni parametri:

- temperatura vode (kako bi su pri proračunu visine dobave koristila točna vrijednost gustoće vode)
- relativni tlak na ulazu u crpku
- relativni tlak na izlazu iz crpke
- volumni protok vode
- električna snaga

S obzirom da korištena crpka ima grafički zaslon s prikazom osnovnih radnih parametara, istovremeno su tijekom mjerenja bilježeni sljedeći podaci:



- visina dobave
- volumni protok
- električna snaga

Volumni protok vode i električna snaga mogu se direktno izmjeriti i očitati s mjernih instrumenata priključenih na laboratorijski model. Za mjerenje i očitavanje vrijednosti volumnog protoka vode korišteno je mjerilo toplinske energije (slika 3.4.1) dok je za mjerenje i očitavanje električne snage korišten digitalni multimetar (slika 3.8.1).

Visinu dobave crpke nije moguće izmjeriti i direktno očitati s mjernog instrumenta već ju je potrebno izračunati na osnovu mjerenja temperature cirkulirajuće vode, te mjerenja dvaju relativnih tlakova prije i nakon crpke. Izraz za proračun visine dobave crpke potrebno je izvesti iz Bernoullijeve jednadžbe za strujnicu od točke 1 (ulaz u crpku) do točke 2 (izlaz iz crpke) kako slijedi:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 + h_p = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 + \Sigma h_g \quad (4.1)$$

gdje su:

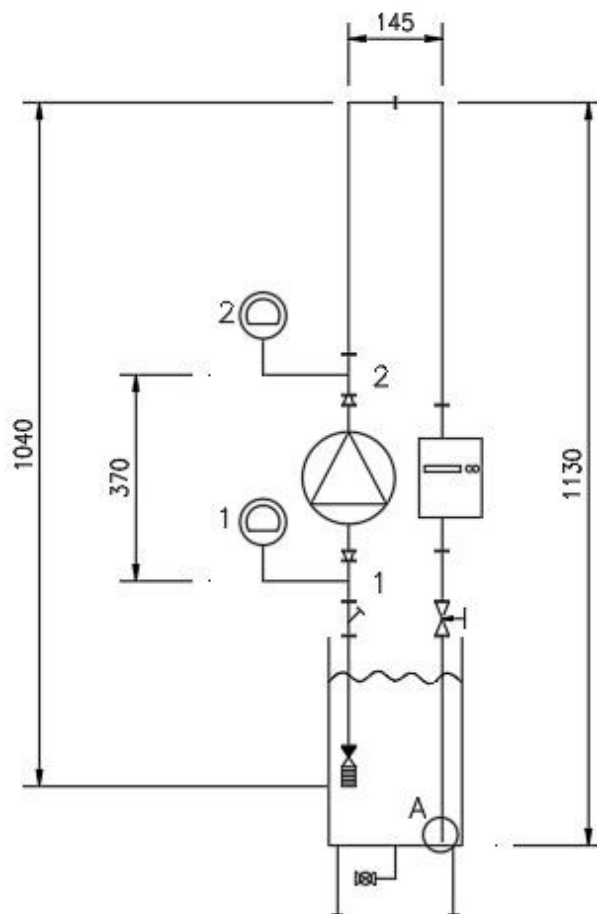
- $p_1$  – relativni tlak očitani na manometru 1 na ulazu u crpku
- $p_2$  – relativni tlak očitani na manometru 2 na izlazu iz crpke
- $v_1$  – brzina strujanja vode na ulazu u crpku
- $v_2$  – brzina strujanja vode na izlazu iz crpke
- $\rho$  – gustoća vode (slika 4.1.2)
- $g$  – ubrzanje Zemljine sile teže,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $h_p$  – visina dobave crpke
- $\Sigma h_g$  – suma svih gubitaka
- $Z_1$  – visinska pozicija manometra 1
- $Z_2$  – visinska pozicija manometra 2

Pod pretpostavkom da je suma svih gubitaka od točke 1 do točke 2 približno jednaka nuli (kratka dionica cjevovoda, bez lokalnih gubitaka), te s obzirom da su brzine strujanja vode na ulazu i izlazu iz crpke jednake (jednaka dimenzija cjevovoda), može se napisati izraz za visinu dobave crpke:

$$h_p = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + Z_2 - Z_1 \quad (4.2)$$

Visinska razlika između manometara ( $Z_2 - Z_1$ ) definirana je geometrijom modela, te iznosi 370 mm (slika 4.1.1.). Na osnovu navedenog može se napisati konačni izraz jednadžbe za proračun visine dobave crpke kako slijedi:

$$h_p = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot 9,81} + 0,37 \quad (4.3)$$



Slika 4.1.1 – Visinska razlika manometara na ulazu i izlazu iz crpke

S obzirom da je za izračun visine dobave crpke potrebno poznavati i vrijednosti gustoće vode, ista je definirana u ovisnosti o promjeni temperature vode tijekom mjerenja (slika 4.1.2).

Vapour pressure  $p$  and density  $\rho$  of water at different temperatures

$t[^\circ\text{C}]$	$T[\text{K}]$	$P[\text{bar}]$	$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$
21	294.15	0.02485	998.1
22	295.15	0.02642	997.8
23	296.15	0.02808	997.6
24	297.15	0.02982	997.4
25	298.15	0.03166	997.1
26	299.15	0.03360	996.8
27	300.15	0.03564	996.6
28	301.15	0.03778	996.3
29	302.15	0.04004	996.0
30	303.15	0.04241	995.7

*Slika 4.1.2 – Vrijednosti gustoće vode u ovisnosti o temperaturi [2]*

## 4.2. Mjerenje pri konstantnoj brzini I (3000 o/min)

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri konstantnoj brzini I okretanja radnog kola (3000 o/min) prikazani su tablično i grafički (tablice 4.2.1 i 4.2.2, slike 4.2.1, 4.2.2 i 4.2.3).

Tablica 4.2.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije, te se sastoji od 9 stupaca:

- No. – prikazuje redni broj mjerenja
- Položaj ventila – prikazuje brojčanu oznaku postavke položaja ručnog regulacijskog ventila
- Temperatura – prikazuje izmjerenu vrijednost temperature vode
- Gustoća – prikazuje vrijednost gustoće vode u ovisnosti o izmjerenoj temperaturi
- Manometar\_1 – prikazuje očitavanja relativnog tlaka na ulazu u crpku
- Manometar\_2 – prikazuje vrijednost relativnog tlaka na izlazu iz crpke
- Snaga – prikazuje očitavanje snage s digitalnog multimetra
- Protok – prikazuje očitavanja volumnog protoka vode kroz crpku
- Visina dobave – prikazuje izračunatu vrijednost visine dobave crpke prema izrazu 4.3

S obzirom da će se za svaki od definiranih režima rada crpke izvršiti isti broj mjerenja s istim položajima ručnog regulacijskog ventila, gore navedeno objašnjenje sadržaja tabličnih prikaza odnosi se i na sva sljedeća mjerenja.

Tablica 4.2.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke pri istom rednom broju mjerenja i istim postavkama položaja ručnog regulacijskog ventila, a koji su prikazani u tablici 4.2.1. Očitani podaci svrstani su u tri stupca (snaga, protok i visina dobave).

Grafički prikaz na slici 4.2.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka vode za konstantnu brzinu I pri 3000 o/min radnog kola.

Grafički prikaz na slici 4.2.2 prikazuje ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjenjenog volumnog protoka crpke o položaju ručnog regulacijskog ventila. Na apscisi dijagrama definirana mjerna skala podešenosti ručnog regulacijskog ventila označava stupanj

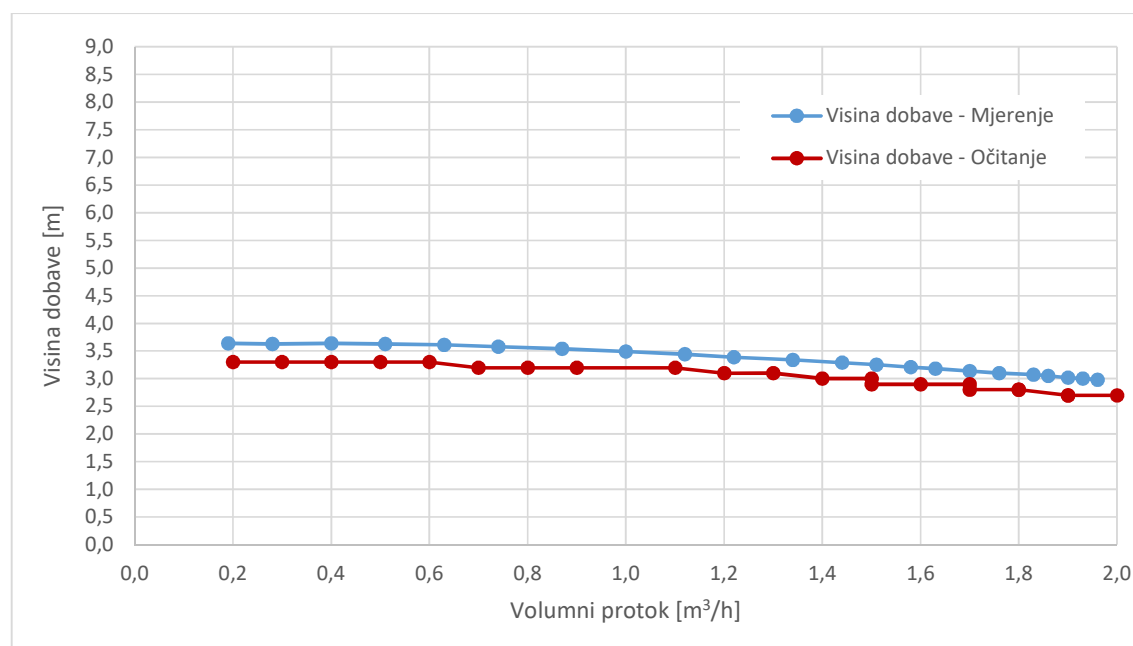
njegove otvorenosti, pri čemu oznaka 6.5 označava potpuno otvoren ventil. Slika 4.2.3 prikazuje ovisnost izmjerene električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.2.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini I

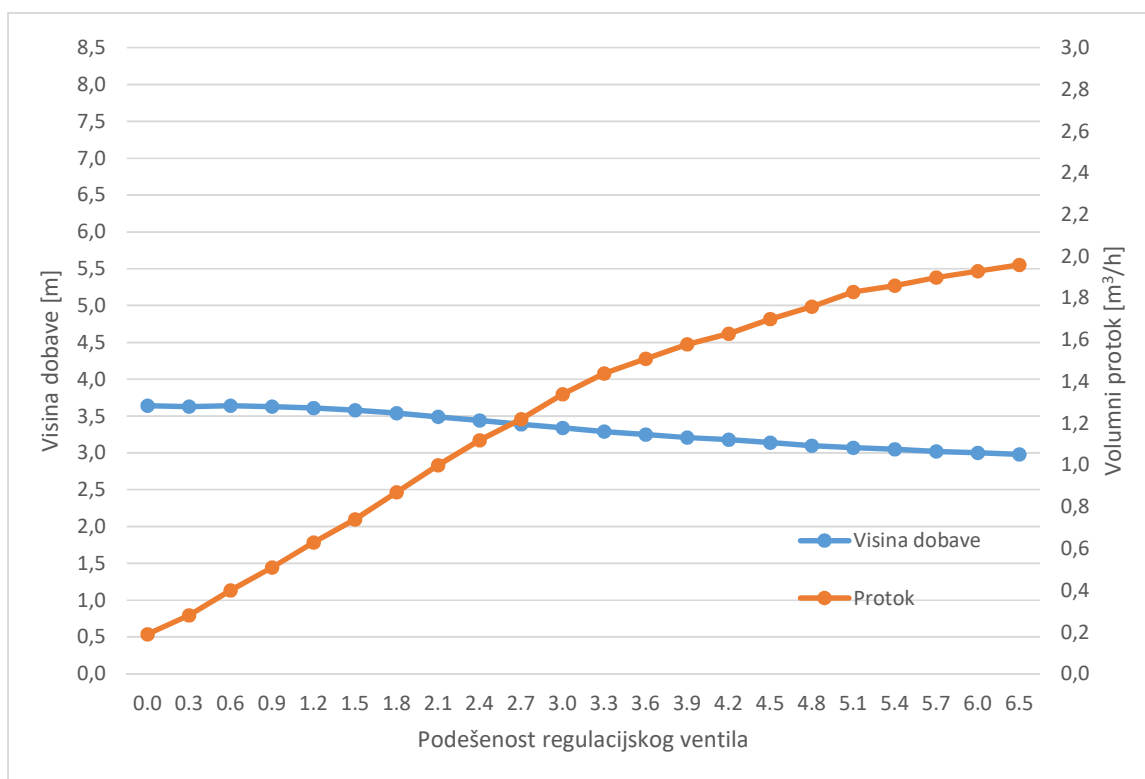
No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	27	996,6	-0,0042	0,3155	15,8	0,19	3,64
2	0.3	27	996,6	-0,0057	0,3135	16,9	0,28	3,63
3	0.6	27	996,6	-0,0078	0,3116	18	0,4	3,64
4	0.9	27	996,6	-0,0097	0,3089	19,4	0,51	3,63
5	1.2	27	996,6	-0,0125	0,3044	20,7	0,63	3,61
6	1.5	27	996,6	-0,0158	0,2981	22	0,74	3,58
7	1.8	27	996,6	-0,0197	0,2905	23	0,87	3,54
8	2.1	27	996,6	-0,0243	0,2809	24,4	1	3,49
9	2.4	27	996,6	-0,0292	0,2708	25,6	1,12	3,44
10	2.7	27	996,6	-0,0341	0,2614	26,7	1,22	3,39
11	3.0	27	996,6	-0,0395	0,2506	27,3	1,34	3,34
12	3.3	27	996,6	-0,0441	0,2418	28,1	1,44	3,29
13	3.6	27	996,6	-0,0486	0,2334	29,2	1,51	3,25
14	3.9	27	996,6	-0,0523	0,2252	29,8	1,58	3,21
15	4.2	27	996,6	-0,0555	0,2192	29,8	1,63	3,18
16	4.5	27	996,6	-0,0597	0,2107	30,7	1,7	3,14
17	4.8	27	996,6	-0,0651	0,2022	31,2	1,76	3,10
18	5.1	27	996,6	-0,0683	0,1953	31,6	1,83	3,07
19	5.4	27	996,6	-0,0716	0,1901	32	1,86	3,05
20	5.7	27	996,6	-0,0741	0,1845	32,2	1,9	3,02
21	6.0	27	996,6	-0,0767	0,1806	32,4	1,93	3,00
22	6.5	27	996,6	-0,0791	0,1761	32,2	1,96	2,98

Tablica 4.2.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini I

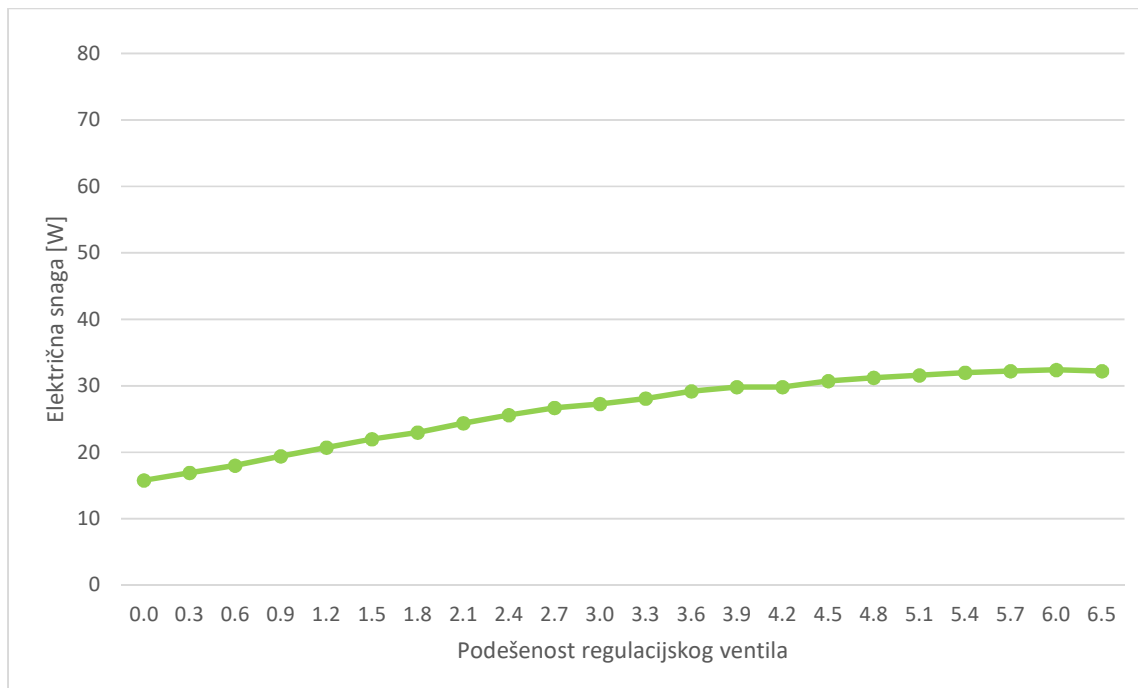
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	17	0,2	3,3
2	0.3	18	0,3	3,3
3	0.6	19	0,4	3,3
4	0.9	20	0,5	3,3
5	1.2	22	0,6	3,3
6	1.5	23	0,7	3,2
7	1.8	24	0,8	3,2
8	2.1	25	0,9	3,2
9	2.4	26	1,1	3,2
10	2.7	27	1,2	3,1
11	3.0	28	1,3	3,1
12	3.3	29	1,4	3
13	3.6	30	1,5	3
14	3.9	30	1,5	2,9
15	4.2	31	1,6	2,9
16	4.5	31	1,7	2,9
17	4.8	32	1,7	2,8
18	5.1	32	1,8	2,8
19	5.4	33	1,8	2,8
20	5.7	33	1,9	2,7
21	6.0	33	1,9	2,7
22	6.5	33	2	2,7



Slika 4.2.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu I



Slika 4.2.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu I



Slika 4.2.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu I

### 4.3. Mjerenje pri konstantnoj brzini II, pri 4000 o/min

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri konstantnoj brzini II okretanja radnog kola (4000 o/min) prikazani su tablično i grafički (tablice 4.3.1 i 4.3.2, te slike 4.3.1, 4.3.2 i 4.3.3).

Tablica 4.3.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije. Tablica 4.3.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke pri istom rednom broju mjerenja i istim postavkama položaja ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.3.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini II

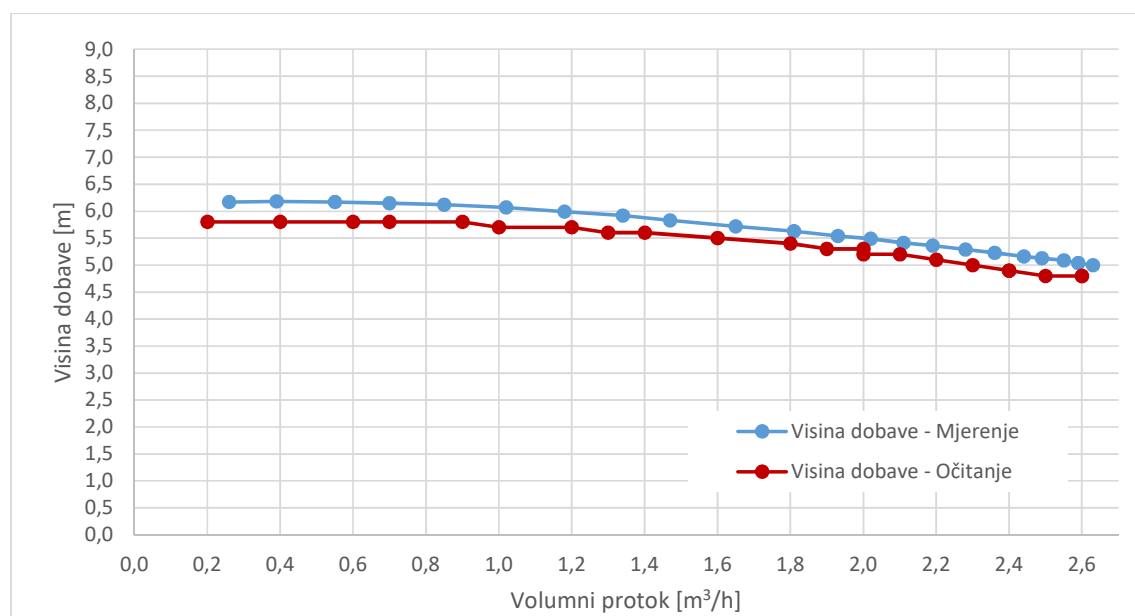
No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	27	996,6	-0,0051	0,5621	30,6	0,26	6,17
2	0.3	27	996,6	-0,0075	0,5602	33,5	0,39	6,18
3	0.6	27	996,6	-0,0108	0,5562	36,8	0,55	6,17
4	0.9	27	996,6	-0,0141	0,5513	39,6	0,7	6,15
5	1.2	27	996,6	-0,0189	0,5429	42,8	0,85	6,12
6	1.5	27	996,6	-0,0246	0,5325	45,5	1,02	6,07
7	1.8	27	996,6	-0,0312	0,5186	48,9	1,18	5,99
8	2.1	27	996,6	-0,0394	0,5028	51,9	1,34	5,92
9	2.4	27	996,6	-0,0452	0,4885	54,1	1,47	5,83
10	2.7	27	996,6	-0,0562	0,4669	57,2	1,65	5,72
11	3.0	27	996,6	-0,0668	0,4471	60,3	1,81	5,63
12	3.3	27	996,6	-0,0761	0,4291	61,9	1,93	5,54
13	3.6	27	996,6	-0,0836	0,4167	63,8	2,02	5,49
14	3.9	27	996,6	-0,0907	0,4021	64,7	2,11	5,41
15	4.2	27	996,6	-0,0981	0,3895	66,5	2,19	5,36
16	4.5	27	996,6	-0,1051	0,3762	67,7	2,28	5,29
17	4.8	27	996,6	-0,1128	0,3623	68,6	2,36	5,23
18	5.1	27	996,6	-0,1203	0,3481	70,1	2,44	5,16
19	5.4	27	996,6	-0,1252	0,3402	70,6	2,49	5,13
20	5.7	27	996,6	-0,1306	0,3304	71,8	2,55	5,09
21	6.0	27	996,6	-0,1341	0,3225	72,4	2,59	5,04
22	6.5	27	996,6	-0,1396	0,3132	73	2,63	5,00

Grafički prikaz na slici 4.3.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka vode za konstantnu brzinu II pri 4000 o/min radnog kola. Grafički prikazi na slikama 4.3.2 i 4.3.3 prikazuju ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjerenih volumnih protoka crpke i električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

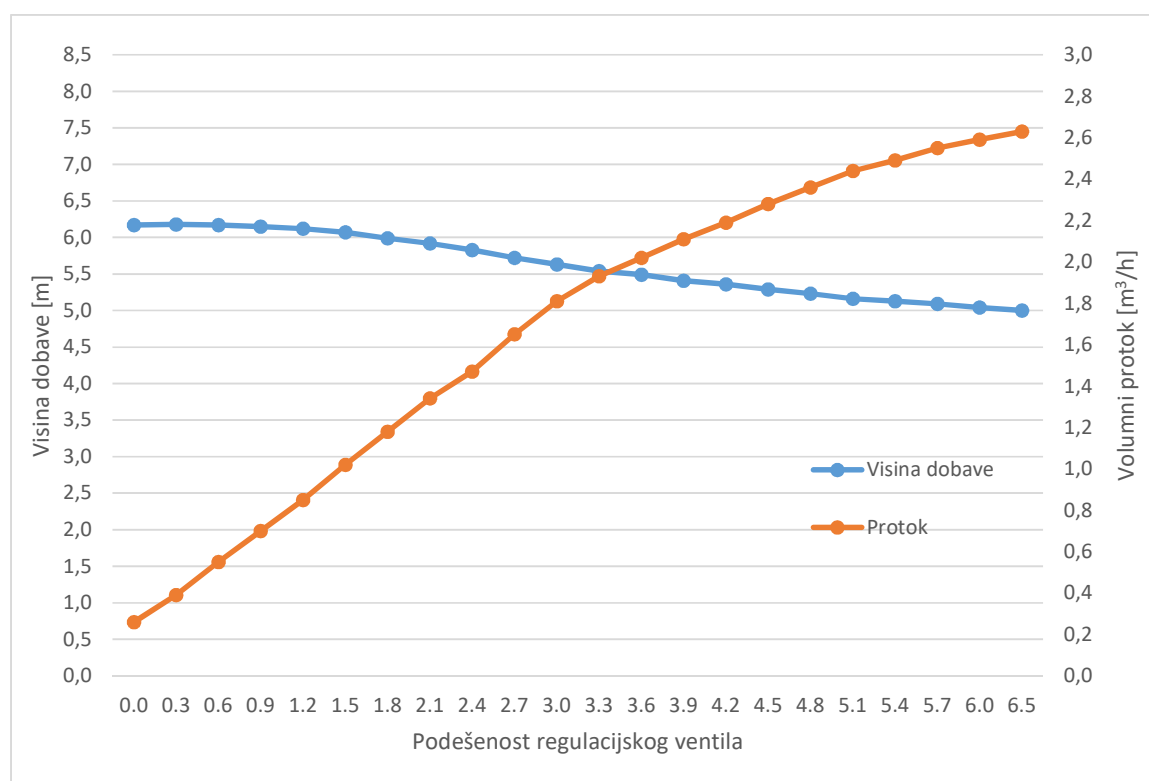


Tablica 4.3.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini II

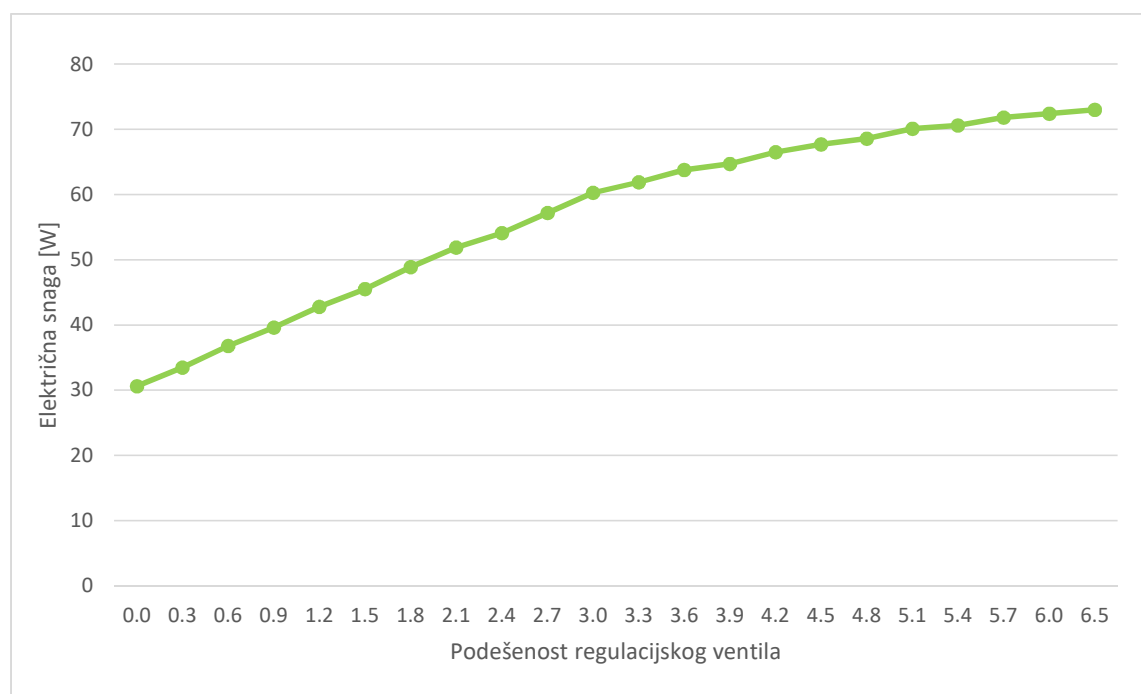
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	31	0,2	5,8
2	0.3	34	0,4	5,8
3	0.6	37	0,6	5,8
4	0.9	40	0,7	5,8
5	1.2	43	0,9	5,8
6	1.5	46	1	5,7
7	1.8	49	1,2	5,7
8	2.1	52	1,3	5,6
9	2.4	54	1,4	5,6
10	2.7	58	1,6	5,5
11	3.0	60	1,8	5,4
12	3.3	62	1,9	5,3
13	3.6	64	2	5,3
14	3.9	65	2	5,2
15	4.2	67	2,1	5,2
16	4.5	68	2,2	5,1
17	4.8	69	2,3	5
18	5.1	70	2,4	4,9
19	5.4	71	2,4	4,9
20	5.7	72	2,5	4,8
21	6.0	72	2,6	4,8
22	6.5	73	2,6	4,8



Slika 4.3.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu II



Slika 4.3.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu II



Slika 4.3.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu II

#### 4.4. Mjerenje pri konstantnoj brzini III, pri 4650 o/min

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri konstantnoj brzini III okretanja radnog kola (4650 o/min) prikazani su tablično i grafički (tablice 4.4.1 i 4.4.2, te slike 4.4.1, 4.4.2 i 4.4.3).

Tablica 4.4.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije. Tablica 4.4.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke pri istom rednom broju mjerenja i istim postavkama položaja ručnog regulacijskog ventila.

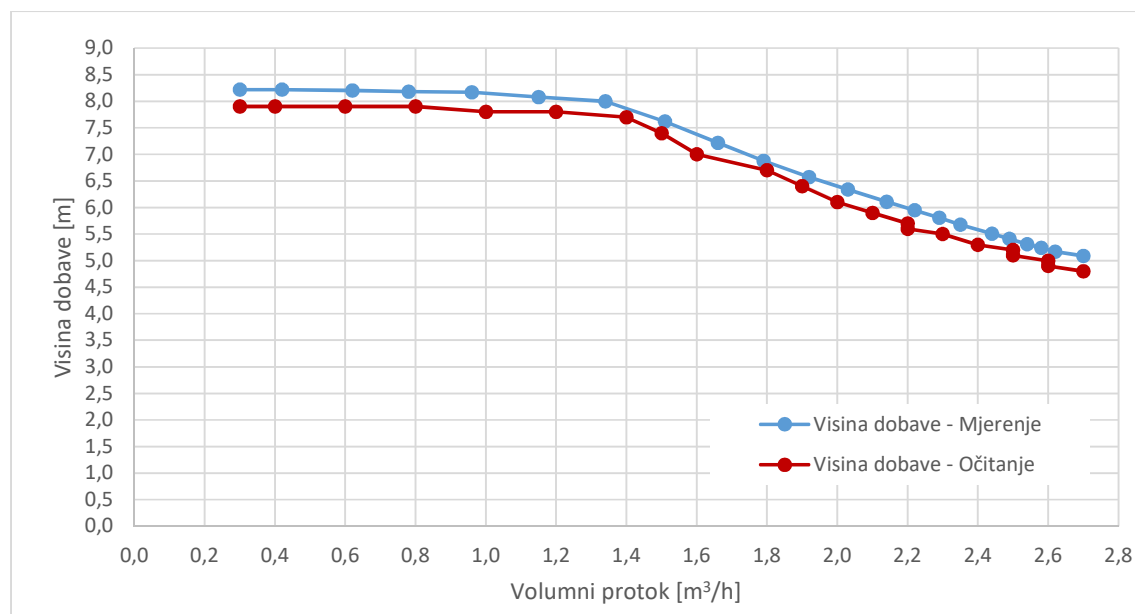
Tablica 4.4.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnoj brzini III

No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	26	996,8	-0,006	0,7619	45,5	0,3	8,22
2	0.3	26	996,8	-0,0081	0,7595	48,9	0,42	8,22
3	0.6	26	996,8	-0,0121	0,7536	54,4	0,62	8,20
4	0.9	26	996,8	-0,0163	0,7478	59,3	0,78	8,18
5	1.2	26	996,8	-0,0231	0,7396	64,1	0,96	8,17
6	1.5	26	996,8	-0,0304	0,7238	69,1	1,15	8,08
7	1.8	26	996,8	-0,0397	0,7062	74,1	1,34	8,00
8	2.1	25	997,1	-0,0485	0,6606	74,9	1,51	7,62
9	2.4	25	997,1	-0,0569	0,6131	75,3	1,66	7,22
10	2.7	25	997,1	-0,0661	0,5711	74,9	1,79	6,88
11	3.0	25	997,1	-0,0751	0,5314	74,8	1,92	6,57
12	3.3	25	997,1	-0,0855	0,4981	75,2	2,03	6,34
13	3.6	25	997,1	-0,0935	0,4682	74,8	2,14	6,11
14	3.9	25	997,1	-0,1007	0,4449	75,1	2,22	5,95
15	4.2	25	997,1	-0,1071	0,4251	75,2	2,29	5,81
16	4.5	25	997,1	-0,1125	0,4065	75,1	2,35	5,68
17	4.8	25	997,1	-0,1201	0,3822	75,2	2,44	5,51
18	5.1	25	997,1	-0,1261	0,3669	75	2,49	5,41
19	5.4	24	997,4	-0,1292	0,3538	75,1	2,54	5,31
20	5.7	24	997,4	-0,1327	0,3435	75,1	2,58	5,24
21	6.0	24	997,4	-0,1362	0,3333	75,1	2,62	5,17
22	6.5	24	997,4	-0,1387	0,323	75	2,7	5,09

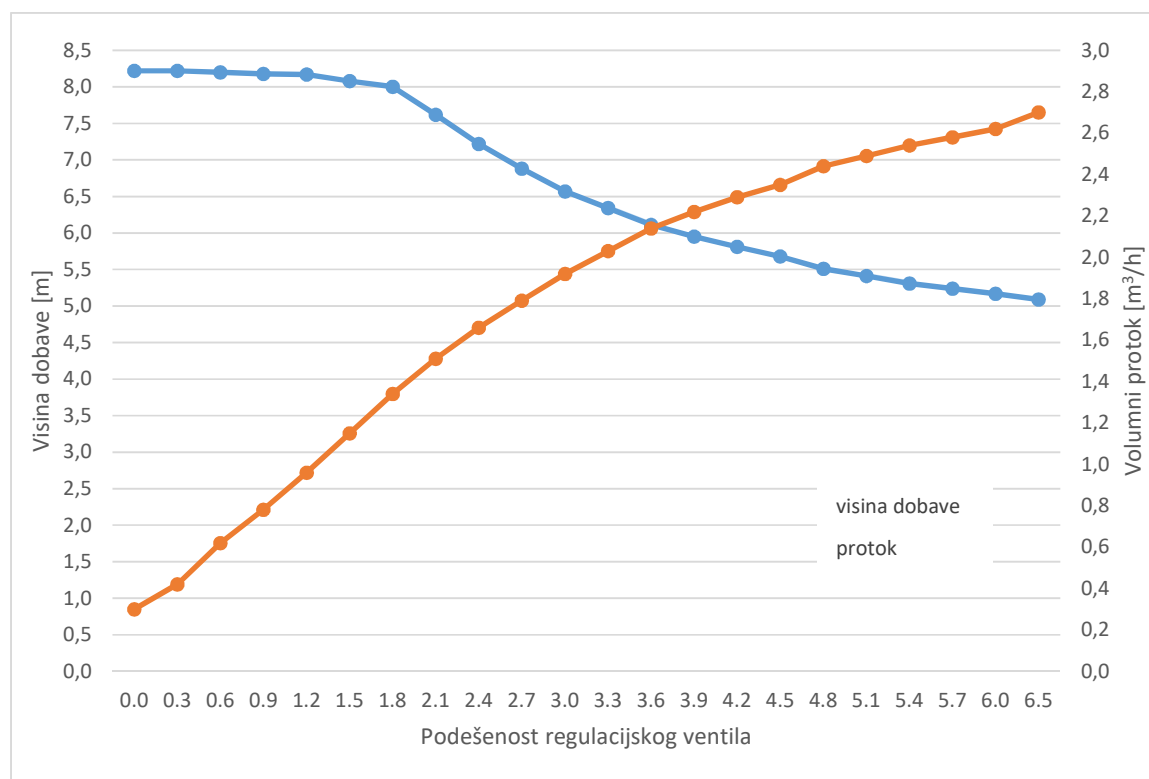
Grafički prikaz na slici 4.4.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitavanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka za konstantnu brzinu III pri 4650 o/min radnog kola. Grafički prikazi na slikama 4.4.2 i 4.4.3 prikazuju ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjerenih volumnih protoka crpke i električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.4.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnoj brzini III

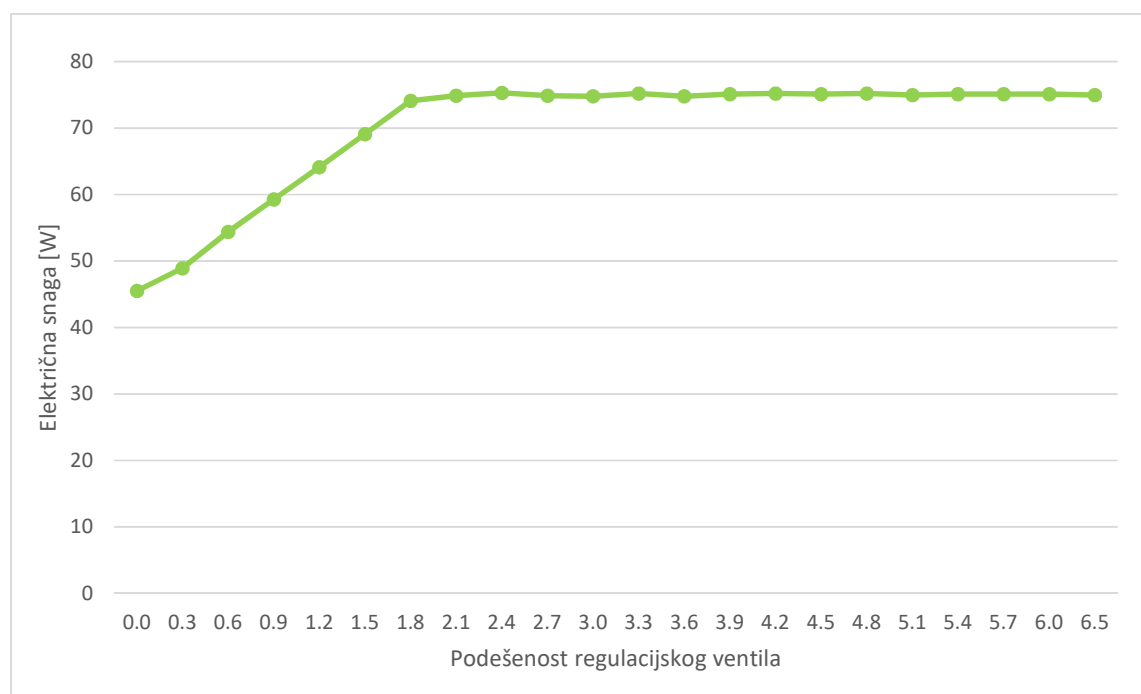
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	46	0,3	7,9
2	0.3	49	0,4	7,9
3	0.6	55	0,6	7,9
4	0.9	59	0,8	7,9
5	1.2	64	1	7,8
6	1.5	69	1,2	7,8
7	1.8	74	1,4	7,7
8	2.1	75	1,5	7,4
9	2.4	75	1,6	7
10	2.7	75	1,8	6,7
11	3.0	75	1,9	6,4
12	3.3	75	2	6,1
13	3.6	75	2,1	5,9
14	3.9	75	2,2	5,7
15	4.2	75	2,2	5,6
16	4.5	75	2,3	5,5
17	4.8	75	2,4	5,3
18	5.1	75	2,5	5,2
19	5.4	75	2,5	5,1
20	5.7	75	2,6	5
21	6.0	75	2,6	4,9
22	6.5	75	2,7	4,8



Slika 4.4.1 – Radna karakteristika crpke za konstantnu brzinu III



Slika 4.4.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu III



Slika 4.4.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za konstantnu brzinu III

#### 4.5. Mjerenje pri varijabilnom diferencijalnom tlaku – $\Delta p-v$

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri postavci varijabilnog diferencijalnog tlaka i zadane visine dobave od 5 m prikazani su tablično i grafički (tablice 4.5.1 i 4.5.2, te slike 4.5.1, 4.5.2 i 4.5.3).

Tablica 4.5.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije. Tablica 4.5.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke u istim uvjetima rada.

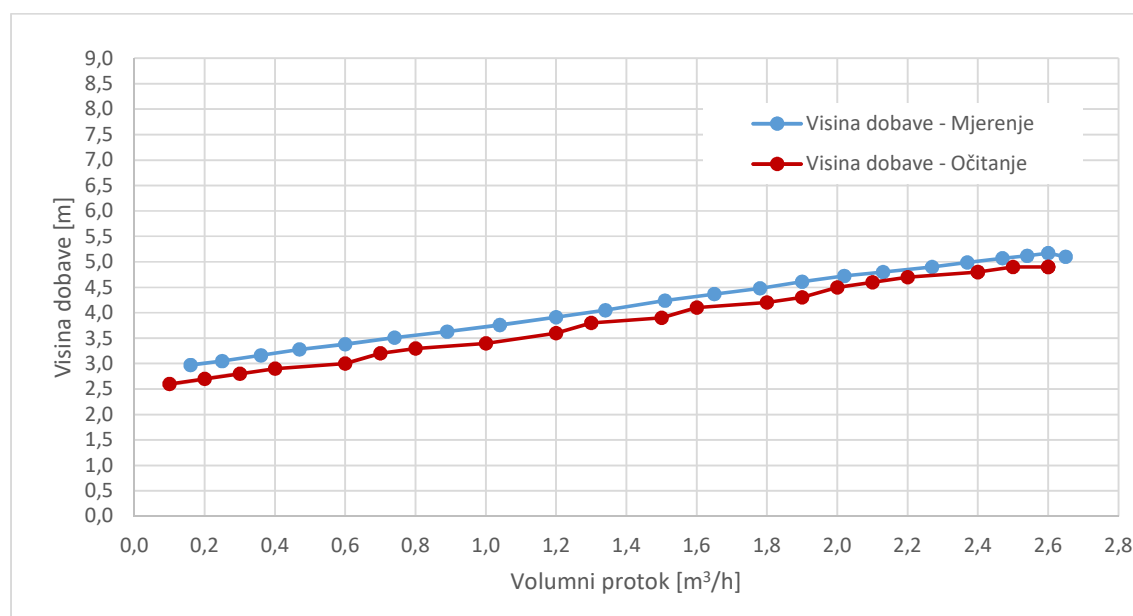
Tablica 4.5.1 – Izmjerene vrijednosti pri varijabilnom diferencijalnom tlaku

No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	25	997,1	-0,0063	0,2478	12,6	0,16	2,97
2	0.3	25	997,1	-0,0071	0,2547	13,8	0,25	3,05
3	0.6	25	997,1	-0,0093	0,2638	15,5	0,36	3,16
4	0.9	25	997,1	-0,0116	0,2732	17,3	0,47	3,28
5	1.2	25	997,1	-0,0141	0,2807	19,2	0,6	3,38
6	1.5	25	997,1	-0,0182	0,2887	21,6	0,74	3,51
7	1.8	25	997,1	-0,0227	0,2959	23,7	0,89	3,63
8	2.1	25	997,1	-0,0286	0,3034	27,2	1,04	3,76
9	2.4	25	997,1	-0,0358	0,3108	30,8	1,2	3,91
10	2.7	25	997,1	-0,0432	0,3164	34,5	1,34	4,05
11	3.0	25	997,1	-0,0531	0,3252	38,6	1,51	4,24
12	3.3	25	997,1	-0,0599	0,3309	42,9	1,65	4,37
13	3.6	25	997,1	-0,0684	0,3333	46,6	1,78	4,48
14	3.9	25	997,1	-0,0783	0,3363	50,1	1,9	4,61
15	4.2	25	997,1	-0,0886	0,3366	54,6	2,02	4,72
16	4.5	25	997,1	-0,0981	0,3348	57,8	2,13	4,80
17	4.8	25	997,1	-0,1104	0,3327	61,6	2,27	4,90
18	5.1	25	997,1	-0,1211	0,3312	66,4	2,37	4,99
19	5.4	25	997,1	-0,1295	0,3298	69,7	2,47	5,07
20	5.7	25	997,1	-0,1378	0,3265	72,7	2,54	5,12
21	6.0	25	997,1	-0,1439	0,3253	74,7	2,6	5,17
22	6.5	25	997,1	-0,1467	0,3161	75	2,65	5,10

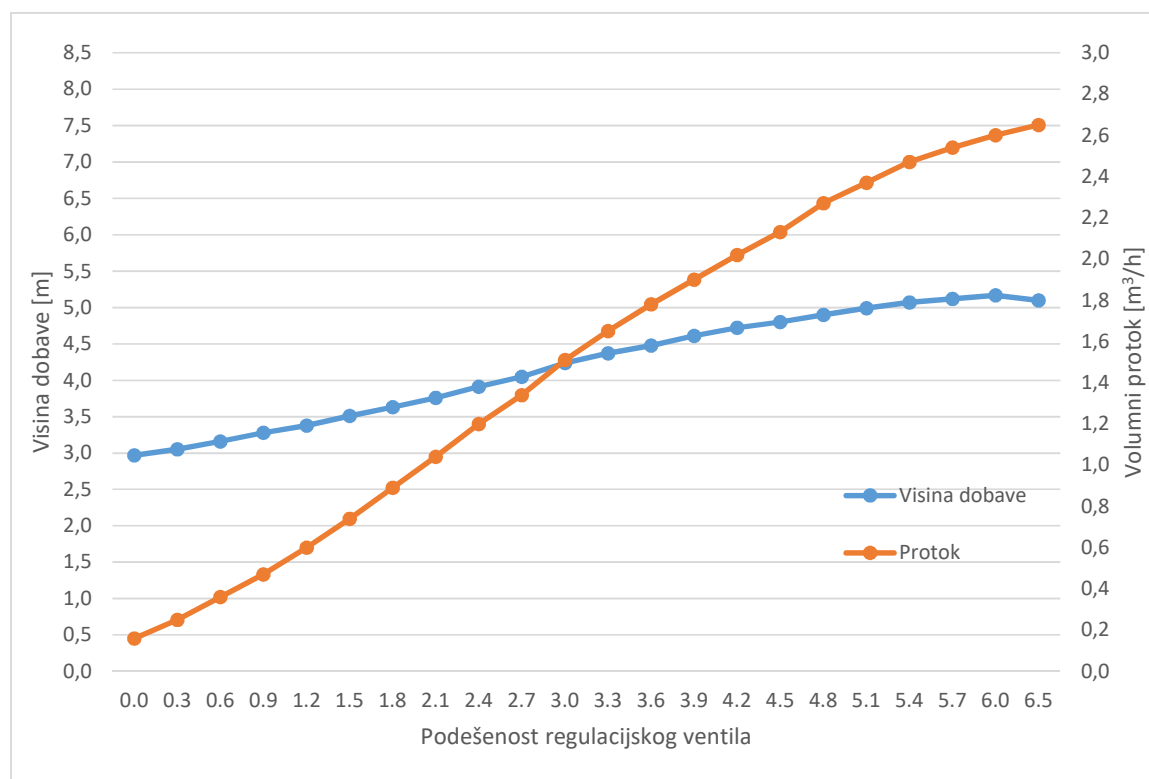
Grafički prikaz na slici 4.5.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitavanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka za postavku varijabilnog diferencijalnog tlaka. Grafički prikazi na slikama 4.5.2 i 4.5.3 prikazuju ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjerenih volumnih protoka crpke i električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.5.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri varijabilnom diferencijalnom tlaku

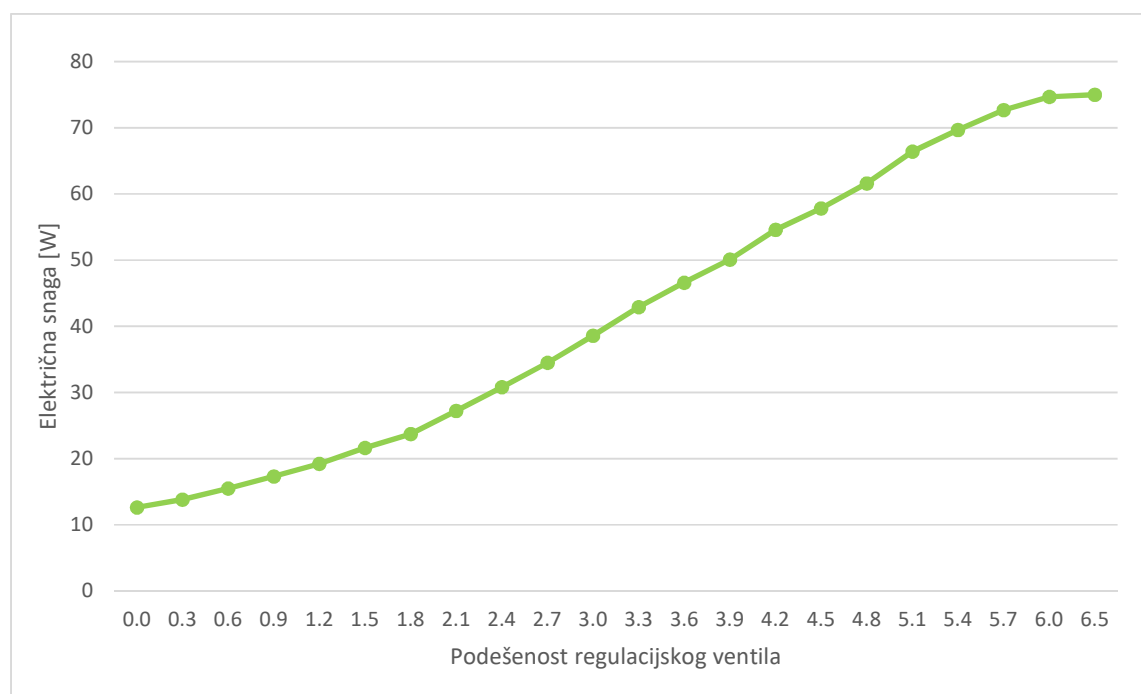
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	13	0,1	2,6
2	0.3	15	0,2	2,7
3	0.6	16	0,3	2,8
4	0.9	18	0,4	2,9
5	1.2	20	0,6	3
6	1.5	22	0,7	3,2
7	1.8	24	0,8	3,3
8	2.1	28	1	3,4
9	2.4	32	1,2	3,6
10	2.7	35	1,3	3,8
11	3.0	39	1,5	3,9
12	3.3	43	1,6	4,1
13	3.6	47	1,8	4,2
14	3.9	50	1,9	4,3
15	4.2	55	2	4,5
16	4.5	58	2,1	4,6
17	4.8	62	2,2	4,7
18	5.1	66	2,4	4,8
19	5.4	70	2,4	4,8
20	5.7	73	2,5	4,9
21	6.0	75	2,6	4,9
22	6.5	75	2,6	4,9



Slika 4.5.1 – Radna karakteristika crpke pri varijabilnom diferencijalnom tlaku



Slika 4.5.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila pri varijabilnom diferencijalnom tlaku



Slika 4.5.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila pri varijabilnom diferencijalnom tlaku



#### 4.6. Mjerenje pri konstantnom diferencijalnom tlaku – $\Delta p-c$

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri postavci konstantnog diferencijalnog tlaka i zadane visine dobave od 5 m prikazani su tablično i grafički (tablice 4.6.1 i 4.6.2, te slike 4.6.1, 4.6.2 i 4.6.3).

Tablica 4.6.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije. Tablica 4.6.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke u istim uvjetima rada.

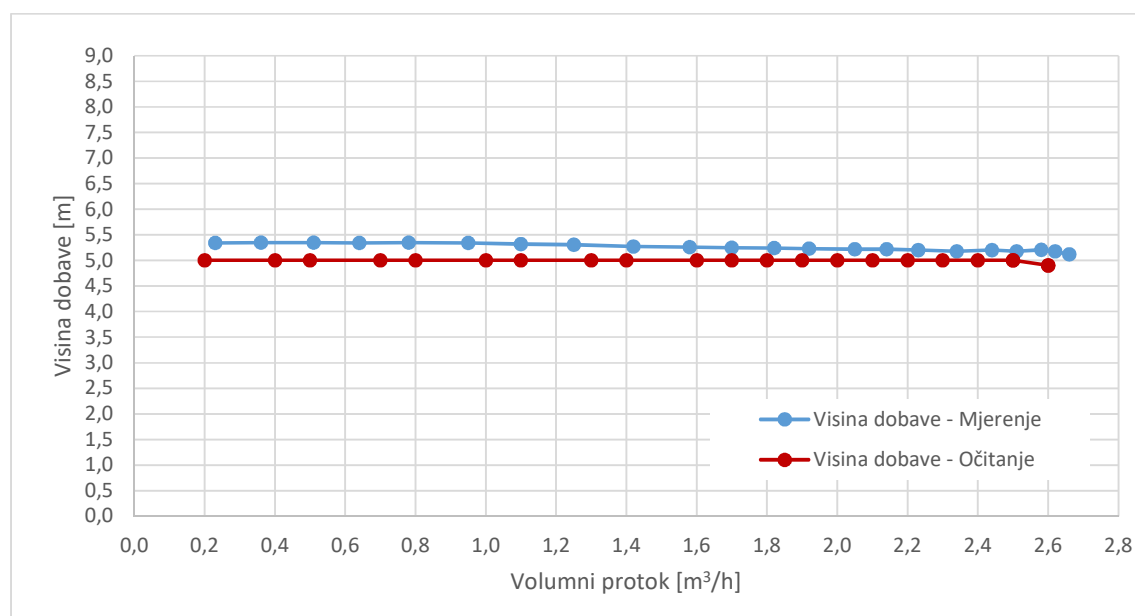
Tablica 4.6.1 – Izmjerene vrijednosti pri konstantnom diferencijalnom tlaku,  $\Delta p-c$

No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	27	996,6	-0,0062	0,4796	25,5	0,23	5,34
2	0.3	27	996,6	-0,0086	0,4779	27,7	0,36	5,35
3	0.6	27	996,6	-0,0117	0,4751	30,4	0,51	5,35
4	0.9	27	996,6	-0,0146	0,4716	32,2	0,64	5,34
5	1.2	27	996,6	-0,0189	0,4675	35,4	0,78	5,35
6	1.5	27	996,6	-0,0243	0,4612	38,4	0,95	5,34
7	1.8	27	996,6	-0,0306	0,4531	41,3	1,1	5,32
8	2.1	27	996,6	-0,0382	0,4443	44,2	1,25	5,31
9	2.4	27	996,6	-0,0464	0,4331	47,8	1,42	5,27
10	2.7	27	996,6	-0,0549	0,4232	50,5	1,58	5,26
11	3.0	26	996,8	-0,0632	0,4137	53,7	1,7	5,25
12	3.3	26	996,8	-0,0707	0,4053	55,6	1,82	5,24
13	3.6	26	996,8	-0,0803	0,3951	58,6	1,92	5,23
14	3.9	26	996,8	-0,0896	0,3848	60,6	2,05	5,22
15	4.2	26	996,8	-0,0989	0,3753	62,9	2,14	5,22
16	4.5	26	996,8	-0,1072	0,3649	65,9	2,23	5,20
17	4.8	26	996,8	-0,1161	0,3542	67,9	2,34	5,18
18	5.1	26	996,8	-0,1269	0,3454	70,4	2,44	5,20
19	5.4	26	996,8	-0,1328	0,3377	72,7	2,51	5,18
20	5.7	26	996,8	-0,1403	0,3326	74,7	2,58	5,21
21	6.0	26	996,8	-0,1448	0,3253	74,8	2,62	5,18
22	6.5	26	996,8	-0,1495	0,3147	75,1	2,66	5,12

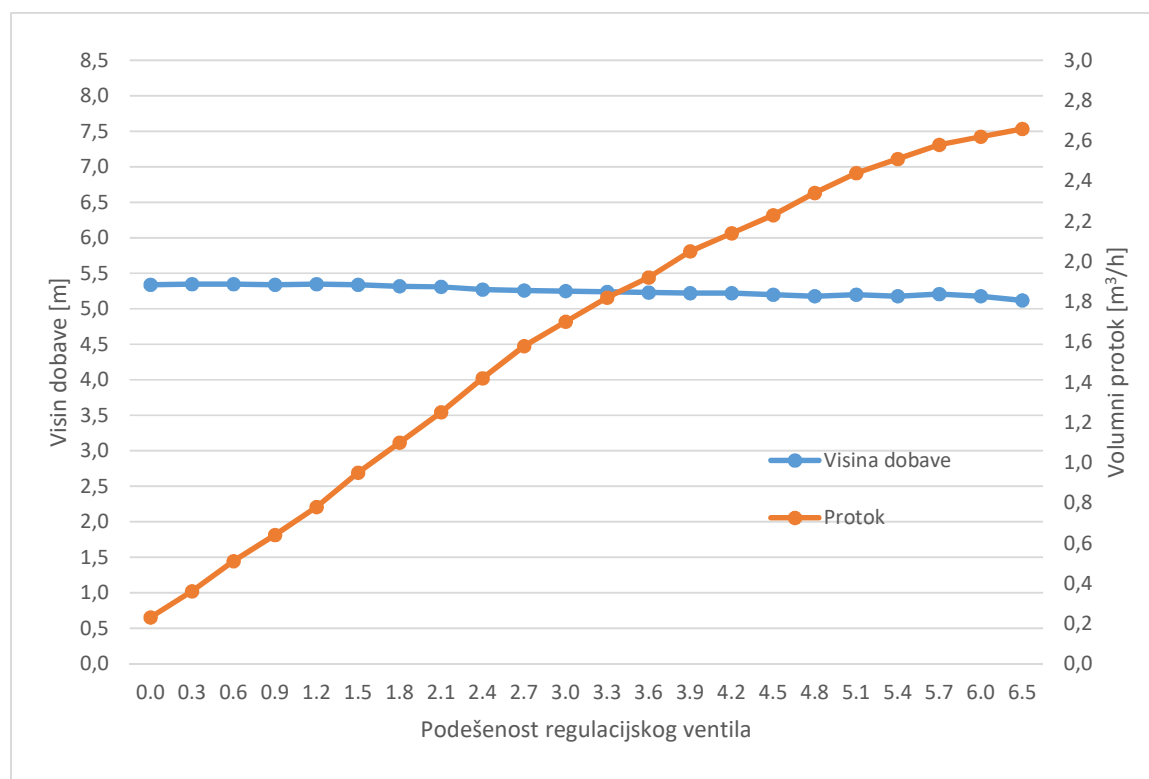
Grafički prikaz na slici 4.6.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitavanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka za postavku konstantnog diferencijalnog tlaka. Grafički prikazi na slikama 4.6.2 i 4.6.3 prikazuju ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjerenih volumnih protoka crpke i električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.6.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke pri konstantnom diferencijalnom tlaku

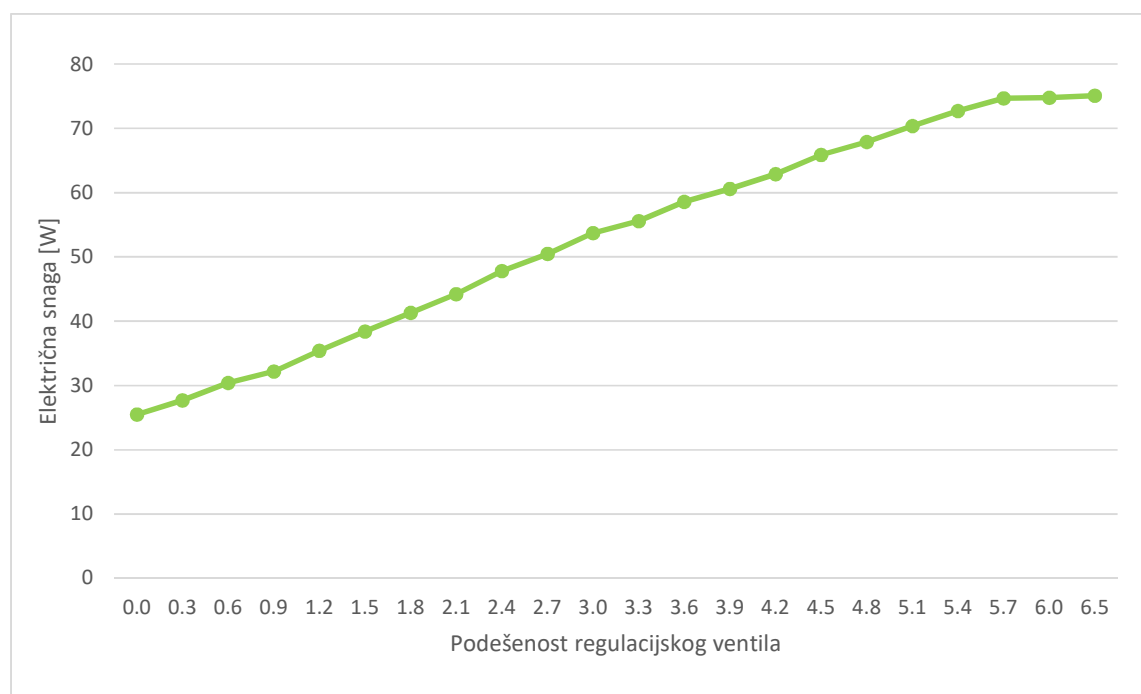
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	26	0,2	5
2	0.3	29	0,4	5
3	0.6	31	0,5	5
4	0.9	33	0,7	5
5	1.2	36	0,8	5
6	1.5	38	1	5
7	1.8	42	1,1	5
8	2.1	44	1,3	5
9	2.4	48	1,4	5
10	2.7	51	1,6	5
11	3.0	54	1,7	5
12	3.3	56	1,8	5
13	3.6	59	1,9	5
14	3.9	61	2	5
15	4.2	63	2,1	5
16	4.5	66	2,2	5
17	4.8	68	2,3	5
18	5.1	70	2,4	5
19	5.4	72	2,5	5
20	5.7	75	2,5	5
21	6.0	75	2,6	4,9
22	6.5	75	2,6	4,9



Slika 4.6.1 – Radna karakteristika crpke pri konstantnom diferencijalnom tlaku



Slika 4.6.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila pri konstantnom diferencijalnom tlaku



Slika 4.6.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila pri konstantnom diferencijalnom tlaku

#### 4.7. Mjerenje pri 'Dynamic Adapt plus' režimu rada

Rezultati mjerenja radnih parametara crpke pri postavci 'Dynamic Adapt plus' prikazani su tablično i grafički (tablice 4.7.1 i 4.7.2, te slike 4.7.1, 4.7.2 i 4.7.3).

Tablica 4.7.1 prikazuje rezultate mjerenja očitanih na manometrima i mjerilu toplinske energije. Tablica 4.7.2 sadrži podatke očitane s grafičkog zaslona crpke pri istim uvjetima rada.

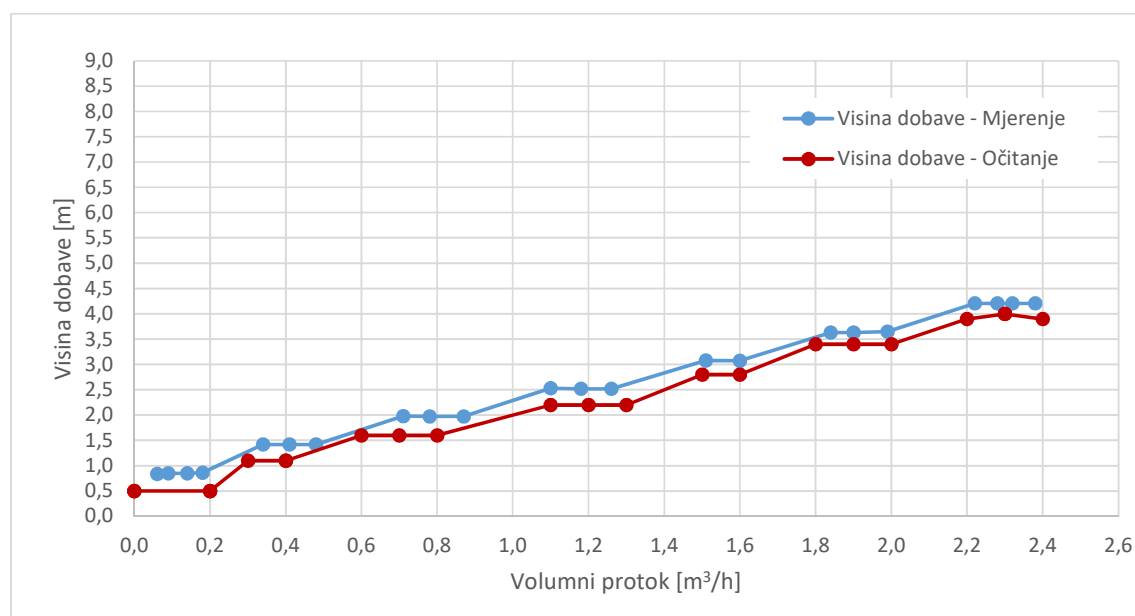
Tablica 4.7.1 – Izmjerene vrijednosti u režimu rada 'Dynamic Adapt plus'

No.	Položaj ventila	Temperatura [°C]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Manometar_1 [bar]	Manometar_2 [bar]	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	27	996,6	-0,0046	0,0416	4,2	0,06	0,84
2	0.3	27	996,6	-0,0047	0,0418	4,3	0,09	0,85
3	0.6	27	996,6	-0,0053	0,0421	4,4	0,14	0,85
4	0.9	27	996,6	-0,0058	0,0418	4,4	0,18	0,86
5	1.2	27	996,6	-0,0085	0,0946	7	0,34	1,42
6	1.5	27	996,6	-0,0098	0,0933	7,2	0,41	1,42
7	1.8	27	996,6	-0,0112	0,0913	7,5	0,48	1,42
8	2.1	27	996,6	-0,0165	0,1405	11,6	0,71	1,98
9	2.4	27	996,6	-0,0191	0,1372	12,2	0,78	1,97
10	2.7	27	996,6	-0,0217	0,1345	12,7	0,87	1,97
11	3.0	27	996,6	-0,0308	0,1801	18,4	1,1	2,53
12	3.3	27	996,6	-0,0342	0,1764	19,2	1,18	2,52
13	3.6	27	996,6	-0,0379	0,1727	20	1,26	2,52
14	3.9	27	996,6	-0,0515	0,2134	27,6	1,51	3,08
15	4.2	27	996,6	-0,0563	0,2077	28,4	1,6	3,07
16	4.5	27	996,6	-0,0734	0,2452	38,1	1,84	3,63
17	4.8	27	996,6	-0,0792	0,2392	39,6	1,9	3,63
18	5.1	27	996,6	-0,0868	0,2343	40,8	1,99	3,65
19	5.4	27	996,6	-0,1066	0,2686	51,8	2,22	4,21
20	5.7	27	996,6	-0,1121	0,2631	53,3	2,28	4,21
21	6.0	27	996,6	-0,1156	0,2598	54,6	2,32	4,21
22	6.5	27	996,6	-0,1211	0,2547	55,5	2,38	4,21

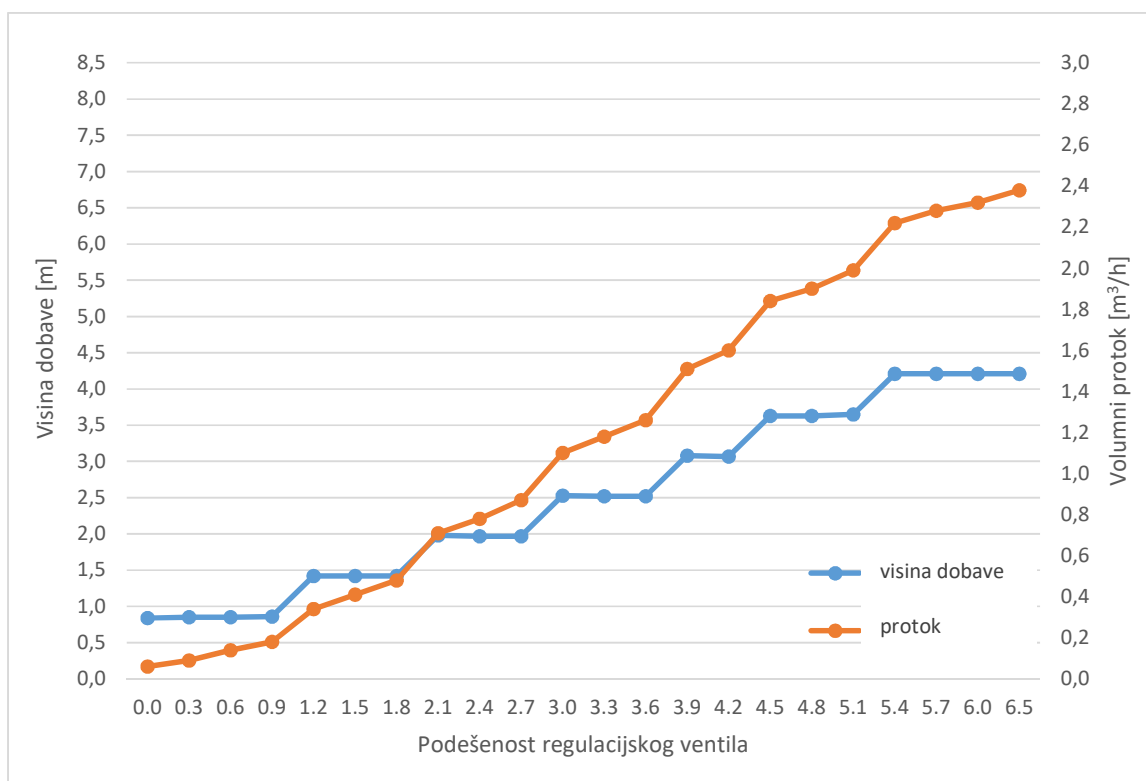
Grafički prikaz na slici 4.7.1 prikazuje H-Q (visina dobave-volumni protok) dijagram na kojem su ucrtani rezultati mjerenja (visina dobave-mjerenje) i očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke (visina dobave-očitavanje). I jedna i druga karakteristika prikazuju međusobnu ovisnost visine dobave crpke i volumnog protoka za režim rada 'Dynamic Adapt plus'. Grafički prikazi na slikama 4.7.2 i 4.7.3 prikazuju ovisnost izmjerene i izračunate visine dobave crpke, te izmjerenih volumnih protoka crpke i električne snage o položaju ručnog regulacijskog ventila.

Tablica 4.7.2 – Očitane vrijednosti s grafičkog zaslona crpke u režimu rada 'Dynamic Adapt plus'

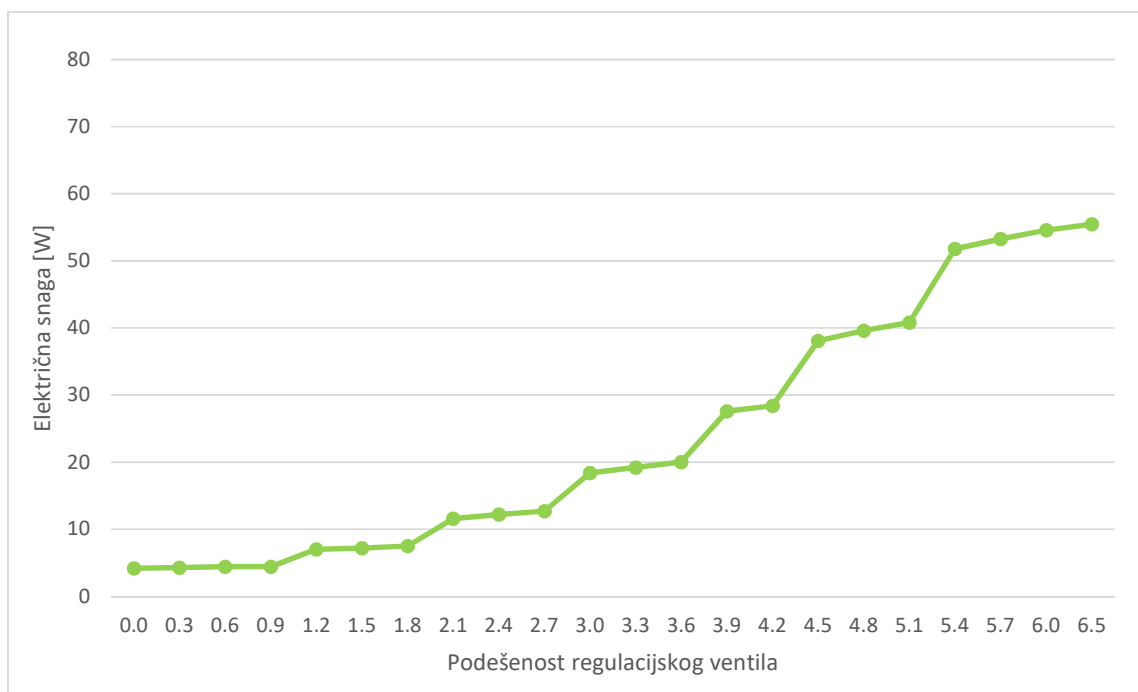
No.	Položaj ventila	Snaga [W]	Protok [m <sup>3</sup> /h]	Visina dobave [m]
1	0.0	4	0	0,5
2	0.3	4	0	0,5
3	0.6	5	0,2	0,5
4	0.9	5	0,2	0,5
5	1.2	8	0,3	1,1
6	1.5	8	0,4	1,1
7	1.8	8	0,4	1,1
8	2.1	12	0,6	1,6
9	2.4	13	0,7	1,6
10	2.7	13	0,8	1,6
11	3.0	19	1,1	2,2
12	3.3	20	1,2	2,2
13	3.6	21	1,3	2,2
14	3.9	28	1,5	2,8
15	4.2	29	1,6	2,8
16	4.5	39	1,8	3,4
17	4.8	40	1,9	3,4
18	5.1	42	2	3,4
19	5.4	52	2,2	3,9
20	5.7	54	2,3	4
21	6.0	55	2,3	4
22	6.5	56	2,4	3,9



Slika 4.7.1 – Radna karakteristika crpke za postavku rada 'Dynamic Adapt plus'



Slika 4.7.2 – Ovisnost visine dobave i volumnog protoka o podešenosti regulacijskog ventila za postavku rada 'Dynamic Adapt plus'



Slika 4.7.3 – Ovisnost električne snage crpke o podešenosti regulacijskog ventila za postavku rada 'Dynamic Adapt plus'

## 5. Analiza

### 5.1. Analiza točnosti mjerenja

U svrhu provjere točnosti izmjerene i izračunane visine dobave izvršena je analiza točnosti mjerenja pri proizvoljnoj postavci regulacijskog ventila te pri proizvoljnom režimu rada crpke. Navedena analiza je izvršena s obzirom da je tijekom mjerenja uočeno da očitavanja relativnog tlaka (na ulazu i izlazu crpke) osciliraju u vremenu, a upravo se očitane vrijednosti relativnih tlakova koriste za izračun visine dobave. Također je uočeno u svim režimima rada da je izmjerena i izračunata visina dobave nešto više vrijednosti u odnosu na očitano visinu dobave s grafičkog zaslona crpke (slike 4.2.1, 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1 i 4.7.1). Tijekom izrade analize odabrana je opcija rada digitalnih manometara na način da tijekom određenog vremenskog intervala mjerenja prikažu očitavanje srednje vrijednosti relativnih tlakova.

Tijekom analize odabrana je postavka regulacijskog ventila 6.0 i režim rada crpke s konstantnom brzinom vrtnje III (4650 o/min). Za vremenski interval očitavanja srednjih vrijednosti relativnih tlakova odabrano je vrijeme u trajanju od 20 sekundi, dok je ukupno očitano 16 srednjih vrijednosti relativnih tlakova (tijekom 300 sekundi). Tijekom mjerenja temperatura vode iznosila je 27°C, dok prema tablici prikazanoj na slici 4.1.2 pri toj temperaturi gustoća vode iznosi 996,6 kg/m<sup>3</sup>.

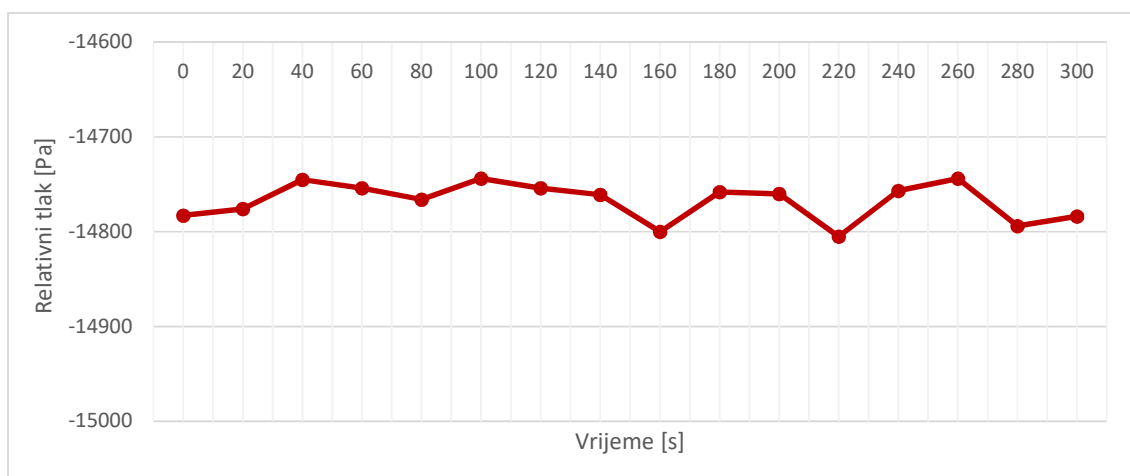
Tablica 5.1.1 – Očitavanja i rezultati analize točnosti mjerenja

Vrijeme (s)	Manometar_1 [Pa]	Manometar_2 [Pa]	Visina dobave [m]
0	-14783	32407	5,197
20	-14776	32382	5,194
40	-14745	32376	5,190
60	-14754	32358	5,189
80	-14766	32436	5,198
100	-14744	32410	5,193
120	-14754	32400	5,193
140	-14761	32324	5,186
160	-14800	32426	5,200
180	-14758	32378	5,191
200	-14760	32361	5,190
220	-14805	32424	5,201
240	-14757	32397	5,193
260	-14744	32398	5,192
280	-14794	32344	5,191
300	-14784	32318	5,188

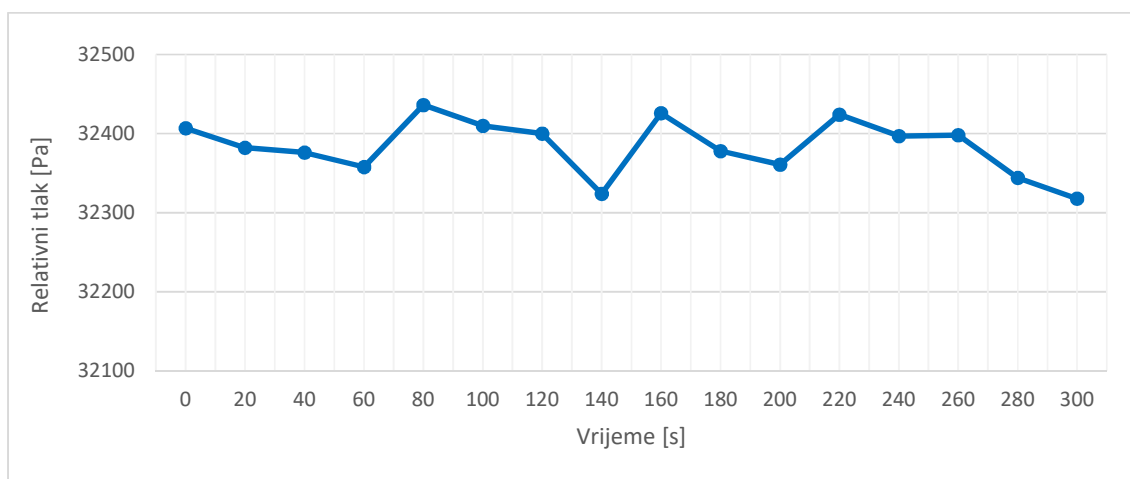
Očitani podaci relativnog tlaka na ulazu i izlazu iz crpke, te izračunana visina dobave (prema izrazu 4.3) za izmjerene rezultate prikazani su u tablici 5.1.1.

Na slici 5.1.1 prikazana je promjena srednje vrijednosti relativnog tlaka na ulazu u crpku u vremenu, dok je na slici 5.1.2 prikazana promjena srednje vrijednosti relativnog tlaka na izlazu iz crpku u vremenu. Iz obiju slika može se zaključiti da su oscilacije relativnih tlakova u vremenu zanemarivo male s gledišta izračuna visine dobave crpke.

Na slici 5.1.3 prikazana je promjena izračunane visine dobave crpke u vremenu. Iz izračunatih vrijednosti za visinu dobave proizlazi da je odstupanje od srednje vrijednosti visine dobave u rasponu od +/- 8 mm.

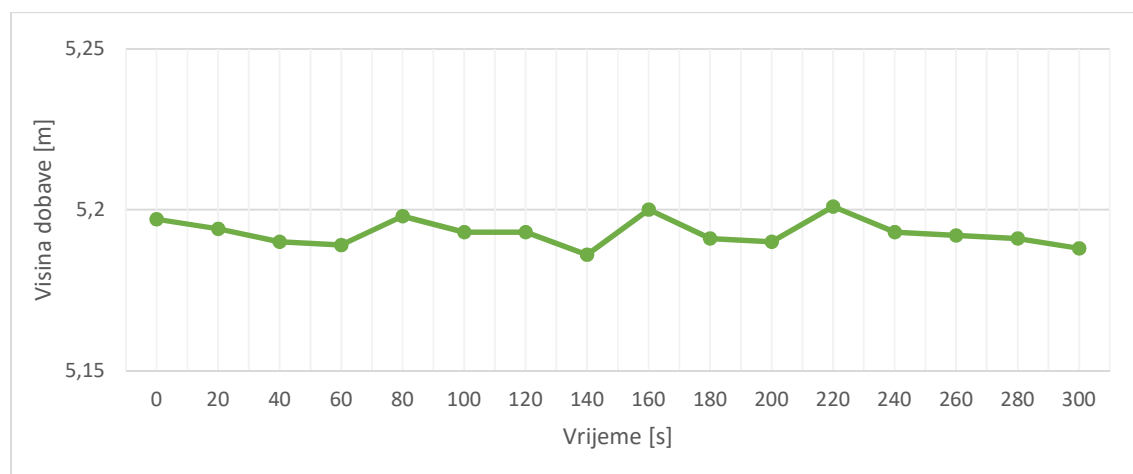


Slika 5.1.1 – Očitanje srednjih vrijednosti relativnog tlaka na ulazu u crpku



Slika 5.1.2 – Očitanje srednjih vrijednosti relativnog tlaka na izlazu iz crpke





Slika 5.1.3 – Izračunate visine dobave za očitane vrijednosti relativnih tlakova

## 5.2. Analiza rezultata mjerenja

Prilikom rada crpke u režimu konstantne brzine I okretanja radnog kola vidljivo je da smanjenjem protoka dolazi do povećanja visine dobave crpke i smanjenja potrošnje električne snage (slika 4.2.2). Pri konstantnoj brzini I okretanja radnog kola (3000 o/min) visina dobave crpke mijenja se od 3,64 m, kada je regulacijski ventil skroz zatvoren (položaj 0.0), do 2,98 m kada je regulacijski ventil skroz otvoren (položaj 6.5), dok je izmjereni protok u okviru područja od 0,19 m<sup>3</sup>/h do 1,96 m<sup>3</sup>/h. Promatranjem dobivenih rezultata može se zaključiti da u režimu rada s konstantnom brzinom I okretanja radnog kola dolazi do manje promjene visine dobave crpke za veći raspon volumnih protoka. Promjena električne snage crpke mijenja se od 15,8 W (pri najmanjem protoku i najvišoj visini dobave) te do 32,2 W pri potpuno otvorenom regulacijskom ventilu (slika 4.2.3). Pri visini dobave od oko 3 m i volumnom protoku od 1,96 m<sup>3</sup>/h potrebno je dvostruko više električne snage (32,2 W) nego pri visini dobave od 3,64 m i protoku od 0,19 m<sup>3</sup>/h (15,8 W).

Konstanta brzina II okretanja radnog kola (4000 o/min) za rezultat prikazuje specifičnu krivulju rada crpke sličnih karakteristika i istog ponašanja kao i u slučaju brzine I, samo sa povišenim vrijednostima očitanih parametara (slika 4.3.2). Tako se pri konstantnoj brzini II visina dobave mijenja u rasponu od 6,17 m do 5 m, volumni protok u rasponu od 0,26 m<sup>3</sup>/h do 2,63 m<sup>3</sup>/h, dok se električna snaga mijenja u rasponu od 30,6 W do 73 W (slika 4.3.3).

Konstantna brzina III okretanja radnog kola (4650 o/min) prikazuje nešto drugačije ponašanje crpke u odnosu na prethodna dva režima rada. Iako i dalje smanjenjem protoka dolazi do povećanja visine dobave, načelno se dijagram može podijeliti u dva područja koja graniče s volumnim protokom od oko 1,4 m<sup>3</sup>/h (slika 4.4.1), odnosno s podešenošću regulacijskog ventila u položaju 1.8 (slike 4.4.2 i 4.4.3). Sveukupno, volumni protok mijenja se u rasponu od 0,3 do 2,7 m<sup>3</sup>/h, visina dobave od 5,09 do 8,22 m, dok se električna snaga mijenja u području od 45,5 do 75 W. Na slici 4.4.2 može se uočiti da visina dobave zadržava otprilike istu vrijednost s promjenom položaja regulacijskog ventila od 0.0 do 1.8. Povećanjem volumnog protoka, odnosno otvaranjem regulacijskog ventila pojavljuje se kontinuirano smanjenje visine dobave. Isti trend može se uočiti i na slici 4.4.3 gdje se električna snaga crpke kontinuirano povećava otvaranjem regulacijskog ventila od položaja 0.0 do 1.8, odnosno povećanjem protoka, kada doseže maksimum od oko 75 W. Nakon toga električna snaga crpke ostaje konstantna za sve protoke veće od 1,4 m<sup>3</sup>/h (slika 4.4.1).

U režimu rada s varijabilnim diferencijalnim tlakom ( $\Delta p-v$ ) može se uočiti drugačiji trend promjene radnih parametara u odnosu na režime rada s konstantnim brojem okretaja radnog kola crpke. Na slici 4.5.1 prikazano je povećanje visine dobave crpke s povećanjem volumnog protoka. Volumni protoci mijenjaju se od 0,16 do 2,65 m<sup>3</sup>/h, porastom volumnog protoka visina dobave crpke mijenja se od 2,97 do 5,1 m (slika 4.5.2). Isti trend uočene je i za električnu snagu crpke (slika 4.5.3), gdje povećanjem protoka i visine dobave električna snaga raste od početnih 12,6 W do konačnih 75 W.

Za režim rada sa konstantnim diferencijalnim tlakom ( $\Delta p-c$ ), visina dobave crpke održava se na zadanoj vrijednosti od oko 5 m za cijelo područje volumnih protoka od 0,23 do 2,66 m<sup>3</sup>/h (slike 4.6.1 i 4.6.2). Električna snaga crpke mijenja se od početnih 25,5 W pri najmanjem protoku od 0,23 m<sup>3</sup>/h, do konačnih 75 W pri najvećem protoku od 2,66 m<sup>3</sup>/h. Promjena položaja regulacijskog ventila (od 0.0 do 6.5) nije imala utjecaj na visinu dobave crpke.

Režim rada „Dynamic Adapt plus“ ne nudi mogućnost zadavanja vrijednosti visine dobave ili brzine vrtnje već automatski prilagođava radne parametre crpke uvjetima sustava. Uočljivo je da se smanjenjem protoka u sustavu smanjuje i visina dobave crpke (slika 4.7.1), dok isti trend prati i električna snaga crpke. Na slikama 4.7.1, 4.7.2 i 4.7.3 vidljive su „stepenaste“ promjene radnih parametara crpke. Izmjereni raspon visina dobave je od 0,84 do 4,21 m s ponavljajućim područjima konstantne visine dobave (slika 4.7.2). Uočeno je da se periodični „skokovi“ u visini dobave ponavljaju sa svakom promjenom volumnog protoka u iznosu oko

0,35 - 0,40 m<sup>3</sup>/h. Područje izmjerenih volumnih protoka je od 0,06 do 2,38 m<sup>3</sup>/h (slika 4.7.2), dok se električna snaga mijenja u rasponu od početnih 4,2 W do konačnih 55,5 W (slika 4.7.3). Krivulja električne snage ima jednaki stepenasti oblik kao i krivulje visine dobave i volumnog protoka, dok se stepenasti prijelazi pojavljuju u istim točkama kao i visinu dobave i volumni protok.

Konačno, za sve režime rada crpke uočena je nešto viša vrijednost izmjerene i izračunane visina dobave u odnosu na očitane vrijednosti visine dobave na grafičkom zaslonu crpke (slike 4.2.1, 4.3.1, 4.4.1, 4.5.1, 4.6.1 i 4.7.1). Razlog tome ne može se sa sigurnošću utvrditi, te bi se daljnjim mjerenjem i radom na modelu s elektronički reguliranom crpkom trebao riješiti problem preciznijeg izračuna visine dobave crpke. Pretpostavka je da do male razlike u vrijednostima visine dobave crpke dolazi zbog preciznosti mjerenja. Nadalje, na grafičkom zaslonu crpke prikazane su vrijednosti visine dobave s preciznošću od jednog decimalnog mjesta što predstavlja ograničenje za izradu preciznije usporedbe i analize. U prosjeku, izmjerena i izračunana visina dobave crpke veća je za oko 0,3 m u odnosu na visinu dobave očitane na grafičkom zaslonu crpke.

## 6. Zaključak

U radu je demonstrirana mogućnost upotrebe laboratorijskog modela s elektronički reguliranom crpkom u svrhu izobrazbe studenata prijediplomskog i diplomskog studija. Kako bi se studentima omogućilo lakše razumijevanje načina rada elektronički reguliranih crpki model je jednostavne izvedbe u kojoj crpka i regulacijski ventil čine osnovne radne elemente, dok digitalni manometri i ultrazvučni mjerač protoka čine osnovne mjerne elemente.

Model omogućuje analizu radnih parametara elektronički regulirane crpke u različitim režimima rada u okviru vrsta regulacije definiranih u postavkama crpke. Za svaku od definiranih vrsta regulacije rada crpke dodatna analiza radnih parametara omogućena je promjenom položaja ručnog regulacijskog ventila. Izmjerene i izračunate vrijednosti radnih parametara mogu se usporediti s vrijednostima očitanim na grafičkom zaslonu crpke. Dodatnom instrumentacijom sastavnih elemenata modela omogućeno je očitavanje radnih parametara na daljinu.

U radu je dokazano da se primjenom modela mogu s dovoljnom preciznošću demonstrirati osnovni radni parametri crpke, trendovi promjene radnih parametara pri promjeni radnih uvjeta crpke, te približiti studentima načine upotrebe i primjene različite mjerne opreme u svrhu mjerenja i očitavanja radnih parametara crpke.

Cilj prikazanog laboratorijskog modela je demonstracija postupka mjerenja i prikupljanja podataka o radu crpke, te mogućnost usporedbe izmjerenih i izračunatih parametara s vrijednostima očitanim na grafičkom zaslonu crpke. Konačno, cilj je i demonstrirati na koji način se radna točka crpke prilagođava novim radnim uvjetima.

Ovim radom je upravo takav postupak prikazan uz analizu dobivenih rezultata. Upotrebom elektronički regulirane crpke u različitim režimima i uvjetima rada zabilježene su vrijednosti osnovnih radnih parametara crpke te su prikladno tablično i grafički prezentirani i analizirani. U budućim analizama bilo bi interesantno dati poseban naglasak na potrošnju energije i prilagodbu crpke stvarnim radnim uvjetima pri različitim režimima rada definiranim u postavkama crpke. Konačno, s obzirom da je za sve režime rada crpke uočena u prosjeku za oko 0,3 m viša vrijednost izračunane visina dobave u odnosu na očitane vrijednosti na grafičkom zaslonu crpke, buduća analiza trebala bi riješiti problem preciznijeg izračuna visine dobave crpke.

## Literatura

1. Online tečaj PDHonline [Online]. Dostupno na:  
<https://pdhonline.com/courses/m329/m329content.pdf> (pristup ostvaren 12.05.2024.)
2. Grundfoss priručnik za pumpe [Online]. Preuzeto sa:  
<https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-5448843.pdf>  
(pristup ostvaren 15.05.2024.)
3. Wilo web stranica [Online]. Dostupno na:  
<https://wilo.com/hr/hr/> (pristup ostvaren 09.06.2024.)
4. Danfoss katalog proizvoda [Online]. Dostupno na:  
<https://store.danfoss.com/hr/hr/Climate-Solutions-za-grijanje/Hidrauli%C4%8Dko-balansiranje-i-regulacija/Stati%C4%8Dko-Balansiranje/LENO/LENO-MSV-BD%2C-DN-15%2C-Vanjski-navoj/p/003Z4101> (pristup ostvaren 10.06.2024.)
5. Landys+Gyr katalog proizvoda [Online]. Dostupno na:  
<https://www.landisgyr.eu/product/ultraheat-t550-uh50/> (pristup ostvaren 10.06.2024.)
6. WIKA tehnički katalog [Online]. Dostupno na:  
[https://www.wika.fi/upload/OI\\_CPG1500\\_en\\_de\\_74592.pdf](https://www.wika.fi/upload/OI_CPG1500_en_de_74592.pdf)  
(pristup ostvaren 10.06.2024.)
7. Hellas digital katalog proizvoda [Online]. Dostupno na:  
<https://www.hellasdigital.gr/electronics/sensors/current-sensors/110-220v-lcd-digital-measure-80260vac-100a-voltage-current-power-energy-voltmeter-ammeter-ct-current-transformer-pzem-061/> (pristup ostvaren 25.06.2024.)