Aplikacija za analizu sustava crpka-cjevovod u MATLAB-u

Bunčić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:959949

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

Mario Bunčić

APLIKACIJA ZA ANALIZU SUSTAVA CRPKA-CJEVOVOD U MATLAB-u

Završni rad

Karlovac, 2015

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STROJARSKE KONSTRUKCIJE

ZAVRŠNI RAD

APLIKACIJA ZA ANALIZU SUSTAVA CRPKA-CJEVOVOD U MATLAB-u

Mentor:

Prof. dr. sc. Radoslav Korbar

Komentor:

Prof. dr. sc. Adam Stančić

Student:

Mario Bunčić

Karlovac, 2015

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij: Stručni studij strojarstva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije Karlovac, 03.02.2015

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Mario Bunčić Matični broj: 0110609077

Naslov: Aplikacija za analizu sustava crpka-cjevovod u MATLAB-u

Opis zadatka:

Pomoću programskog jezika MATLAB potrebno je izraditi samostojeću aplikaciju za proračun radne točke i kavitacijske rezerve za jednostavan sustav crpka-cjevovod. U aplikaciju treba ugraditi karakteristike visine dobave i kavitacije za nekoliko realnih pumpi.

U radu je potrebno:

1. Načiniti funkcije za proračun potrebne visine dobave i raspoložive kavitacijske rezerve proizvoljnog jednostavnog cjevovoda,
2. Načiniti funkcije za određivanje radne točke i kavitacijske rezerve za slučaj da se odabrana realna pumpa priključi na proizvoljni jednostavni cjevovod,
3. Izraditi odgovarajuće grafičko korisničko sučelje,
4. Izraditi grafove za prikaz dobivenih rezultata,
5. Izraditi programsku podršku za pretragu i odabir pumpe koja bi odgovarala zadanom sustavu.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
03.02.2015	10.06.2015	02.07.2015

Mentor: Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Prof. Dr. Sc. Radoslav Korbar

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se navedenom literaturom i materijalima sa interneta, te znanjem stečenim tijekom studija. Zahvaljujem se mentorima Prof.dr.sc. Radoslavu Korbaru i Prof.dr.sc. Adamu Stančiću koji su mi svojom susretljivošću i savjetima pomogli u izradi ovog rada.

Karlovac, 2015 Mario Bunčić

Sažetak

Zadaća ovog rada je razviti aplikaciju za izračun radne točke pumpe i rezerve do kavitacije u jednostavnom sustavu crpka-cjevovod, primijeniti alat na realnim pumpama, te predložiti izgled korisničkog sučelja i mehanizme prikaza i spremanja dobivenih rezultata.

Kod aplikacije razvijen je u MATLAB-u, višem programskom jeziku s interaktivnim okruženjem kojeg koriste inženjeri i znanstvenici diljem svijeta.

U radu je objašnjeno na koji način su u aplikaciju implementirane realne pumpe, tok proračuna, korisničko sučelje i način prikaza i spremanja rezultata na primjeru konkretnih proračuna.

Sustav je razvijen do te mjere da je s njim moguće vršiti proračune na pumpama koje su trenutno implementirane u aplikaciju, te je predložena ideja daljnjeg razvoja čijom primjenom bi se aplikaciji proširile mogućnosti.

Abstract

This work's task is to develop application that calculates operating point and cavitational reserve of pump's in simple pipe-pipeline system, apply this tool on realistic pumps and suggest looks of graphical user interface with ways of presenting and saving results.

Application code is written in MATLAB, a higher level programming language with interactive environment used by engineers and scientist around the world.

In this work is explained how are realistic pumps implemented in application, flow of calculation, user interface and the way of representing results and saving results from executed calculations.

System is developed to the point that it is possible to make calculations with pumps that are currently implemented in application. There is also suggested an idea for further development with which the application would expand its possibilities.

Sadržaj

1. UVOD 1
1.1. Općenito 1
1.2. O MATLAB-u i zašto MATLAB 1
2. SAKUPLJANJE I POHRANA INFORMACIJA 3
2.1. Sakupljanje podataka o pumpama 3
2.2. Način pohrane podataka o pumpama 5
2.3. Način pohrane podataka o tekućinama 6
3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA 7
3.1. Modeliranje cjevovoda 7
3.1.1. Modeliranje linijskih gubitaka 8
3.1.2. Modeliranje lokalnih gubitaka 8
3.1.3. Neto pozitivna usisna visina 9
3.2. Modeliranje sustava crpka-cjevovod 10
3.3. Model pumpe 10
3.4. Implementacija unutar MATLAB-a 11
3.4.1. Model pumpe 11
3.4.2. Model cjevovoda 11
4. ODABIR PUMPI ZA APLIKACIJU 17
5. OPIS RAZVIJENE APLIKACIJE 19
5.1. Alati korišteni za razvoj aplikacije 19
5.2. Opis korisničkog sučelja i način rada s aplikacijom 19
5.2.1. Razmještaj opcija na glavnoj formi 19
5.2.2. Glavne opcije aplikacije za izračun, prikaz i spremanje dobivenih rezultata 20
5.2.3. Padajući izbornici za odabir pumpe i radnog fluida 21
5.2.4. Padajući izbornici za odabir broja okretaja pumpe i temperature radnog fluida 21
5.2.5. Opcije za odabir vrste prikaza pumpi 22
5.2.6. Graf 22
5.2.7. Klizač za odabir koeficijenta ventila 22
5.2.8. Ploča za odabir karakteristika cjevovoda 23
5.2.9. Panel za prikaz statusa sustava 23

5.2.10. Alatna traka 23
6. NAČIN RADA APLIKACIJE 24
6.1. Inicijalizacija 24
6.2. Evaluacija statusa sustava 24
6.3. Proračun radne točke 25
6.4. Proračun rezerve do kavitacije 26
6.5. Način traženja odgovarajućih pumpi 27
7. IZRADA SAMOSTOJEĆE APLIKACIJE 29
7.1. Kompajliranje samostojeće aplikacije 29
7.2. Instalacija aplikacije na korisničko računalo 30
8. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA 31
8.1. Prikaz rezultata 31
8.2. Pohrana rezultata 37
9. ZAKLJUČAK 39
10. POPIS LITERATURE 40

Popis slika

Slika		Stranica
2.1	Karakteristike pumpe	3
2.2	„Curve Fitting Tool“	5
3.1	Ovisnost ukupnog gubitka o protoku	13
3.2	Ovisnost ukupnog gubitka o promjeru cjevovoda	14
3.3	Ovisnost ukupnog gubitka o dužini tlačnog cjevovoda	15
3.4	Ovisnost ukupnog gubitka o koeficijentu ventila	16
4.1	Redoslijed naredbi pri korištelju funkcije „findpeaks“	17
4.2	Redoslijed naredbi pri korištenju funkcije „solve“	18
5.1	Glavna forma aplikacije	19
6.1	Stablo odlučivanja u proračunu radne točke	26
6.2	Stablo odlučivanja u proračunu kavitacijske rezerve	27
7.1	Korisničko sučelje MATLAB Compiler-a	29
7.2	Instalacijski čarobnjak	30
8.1	Rezultati proračuna	31
8.2	Analiza dobivenih rezultata	32
8.3	Pojava kavitacije zbog povećanja temperature radnog fluida	32
8.4	Smanjenje protoka zatvaranjem ventila	33
8.5	Tablica rezultata	34
8.6	Prikaz svih pumpi	35
8.7	Mogući brojevi okretaja za pumpe Carver ETA	35
8.8	Prikaz odgovarajućih pumpi	36
8.9	Prikaz odgovarajućih brojeva okretaja	36
8.10	Zaglavlje kreirane Excel datoteke	37
8.11	Ispisana tablica u kreiranoj Excel datoteci	38

Popis oznaka

a,b,c	koeficijenti „Power“ aproksimacije
R_e	Reynolds-ov broj
Q	Protok [m^3/s]
D	Promjer cjevovoda [m]
v	Koeficijent kinematičke viskoznosti [m^2/s]
h_f	Visina linijskih gubitaka [m]
λ	Koeficijent trenja
L	Dužina cjevovoda [m]
g	gravitacijska konstanta [m/s^2]
L_e	Ekvivalentna dužina cjevovoda [m]
h_{fm}	Visina lokalnih gubitaka [m]
K	Koeficijent ventila
$p_{aps,1}$	Apsolutni tlak na ulaznoj prirubnici pumpe [Pa]
ro	Gustoća [kg/m^3]
p_v	Tlak zasićenja [Pa]
v_1	Brzina strujanja fluida na ulaznoj prirubnici pumpe [m/s]

1. UVOD

1.1. Općenito

Pumpe imaju široku primjenu u industriji gdje osiguravaju cirkulaciju sredstva za hlađenje i podmazivanje, služe za transport fluida, i pružaju pokretačku snagu hidrauličkim sistemima. Većina proizvodnih pogona, komercijalnih zgrada i gradova se oslanja na sustave crpka-cjevovod za njihovo svakodnevno funkcioniranje. Pumpe su općenito dostupne u širokom rasponu tipova i veličina, a najčešće se koriste centrifugalne pumpe. Cijena pumpe i njenog održavanja zahtijeva analizu parametara sustava. Zahtijeva se procjena uvjeta i parametara rada što uključuje analizu karakteristika pumpe [1]. Upravo je to tema ovoga rada u kojem je cilj odrediti da li će neka proizvoljna realna pumpa odgovarati zadanom sustavu cjevovoda, u smislu da li će imati radnu točku i dovoljnu rezervu do kavitacije.

1.2. O MATLAB-u i zašto MATLAB

MATLAB je viši programski jezik i interaktivno okruženje. Namijenjen je za inženjersku i znanstvenu uporabu. Omogućuje vizualizaciju i razvoj aplikacija. Ima mnoštvo ugrađenih matematičkih funkcija za linearnu algebru, statistiku, optimizaciju, numeričku integraciju i diferencijalne jednadžbe itd. Odabran je zbog svoje izuzetne proširivosti i mogućnosti prilagodbe korisničkim potrebama, izuzetnim sposobnostima uvoza i izvoza podataka, te dijeljenja programskog koda i aplikacija s ostalim korisnicima [2] [3].

Najvažniji aspekt za potrebe ovoga rada bio je je mogućnost izrade grafičkih korisničkih sučelja, korisničkih funkcija i dijeljenja aplikacija s korisnicima koji ne posjeduju MATLAB, budući da omogućuje izradu samostojećih aplikacija.

MATLAB omogućuje izradu više vrsta funkcija [4]. To su:

- funkcije unutar datoteke
- lokalne funkcije
- ugniježđene funkcije
- anonime funkcije

U ovom radu korištena je funkcija unutar datoteke „lg“ koja računa potrebnu visinu dobave pumpe u sklopu koje su sadržane lokalne i ugniježđene funkcije za izračun Reynolds-ovog broja i koeficijenata trenja λ. Funkcije su optimizirane za rad s matricama (2-D pravokutno polje brojeva) i vektorima (matrica s jednim redom ili jednim stupcem). Matrice i vektori mogu se kreirati manualno, upisom svakog broja posebno, ili funkcijama za izradu matrica ili vektora pri čemu se zadaje proizvoljna početna i krajnja vrijednost te razmak između brojeva. MATLAB funkcije moguće je vektorizirati. Vektorizacija je proces revidiranja skalarno orijentiranih funkcija baziranih na petljama u funkcije koje rade s MATLAB matricama i vektorima. Prednosti vektorizacije vidljive su u izgledu funkcija koje nakon vektoriziranja izgledaju sličnije matematičkim izrazima iz knjiga što kod čini razumljivijim, a isto tako i bržim naspram koda baziranog na petljama [4].

Grafičko korisničko sučelje (u daljnjem tekstu GUI) je grafički prikaz u jednom ili više prozora, koji sadrži kontrole, koje omogućuju korisniku da obavlja interaktivne zadaće. Korisnik GUI-a ne mora znati kreirati funkciju za obavljanje te zadaće, te ne mora razumijeti detalje kako se zadaća izvršava. GUI koji je kreiran koristeći MATLAB može obavljati bilo koju vrstu računanja, čitati i pisati podatkovne datoteke, komunicirati s drugim GUI-ima i prokazivati podatke u obliku tablica ili grafa [5].

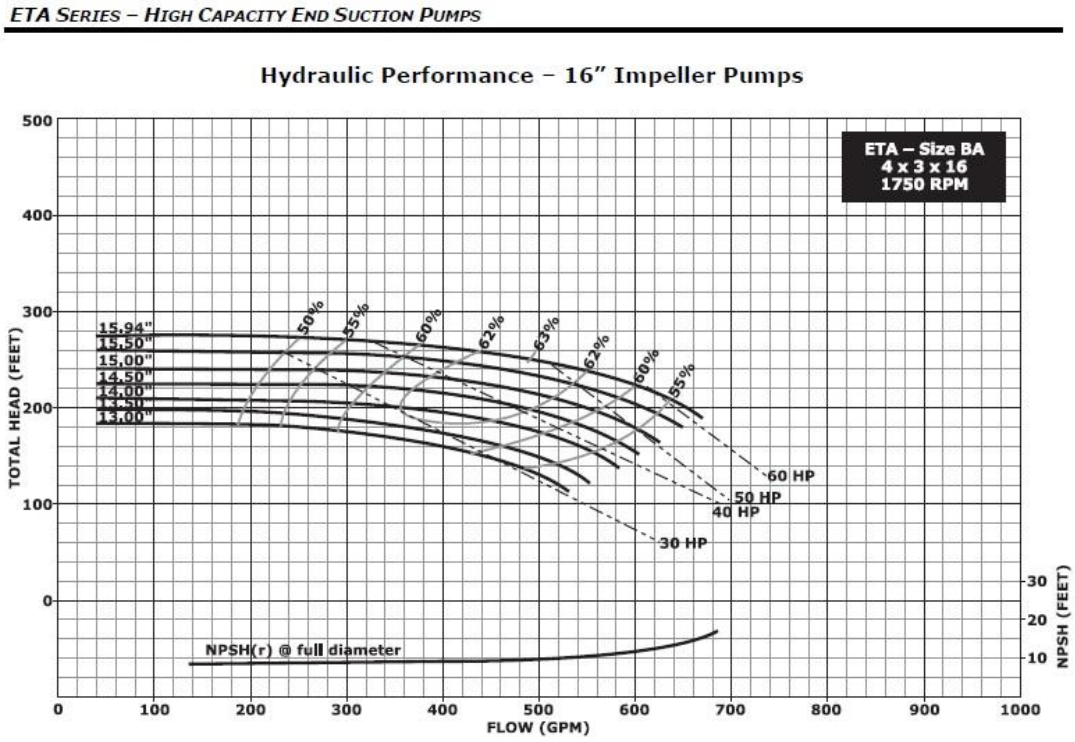
MATLAB je i objektno orijentiran programski jezik, što je također iskorišteno prilikom izrade ovog rada. Objektno orijentiran znači da omogućuje izradu korisnički definiranih klasa. Klasa opisuje set objekata sa zajedničkim karakteristikama. Objekti su specifične instance klase koje sadrže određene vrijednosti zajedno s funkcijama (zvanim metodama) koje omogućuju manipulaciju sadržanih vrijednosti unutar objekta. Vrijednosti sadržane u objektima čine objekte različitim, iako su instance iste klase. Za instanciranje objekata iz klase koristi se konstruktor, funkcija koja postavlja početne vrijednosti objekata. Uporaba objekata pruža mnoštvo značajki koje inače nisu dostupne, a najvažniji aspekt značajki pri izradi ovog rada je pojednostavljeno sortiranje podataka o pumpama, te njihovo spremanje u trajnu memoriju [6].

2. SAKUPLJANJE I POHRANA INFORMACIJA

Prilikom razvijanja aplikacije trebalo je riješiti problem pohrane informacija o tekućinama i pumpama u svojevrsnu „Flat“ bazu podataka. Rješenje za tekućine je jednostavno i podaci o tekućinama spremljeni su u trajnu memoriju u obliku MATLAB matrica unutar datoteke formata MAT. Podaci o pumpama koje proizvođač daje obično u obliku PDF datoteke također su mogle biti spremljene u obliku matrica, ali nađeno je bolje rješenje koje je opisano u daljnjem tekstu.

2.1. Sakupljanje podataka o pumpama

Podaci o pumpama koje proizvođač daje obično u PDF datotekama su u obliku grafa. Primjer jedne takve karakteristike (za pumpe ETA serije proizvođača CARVER različitih promjera impelera) prikazan je na slici 2.1.



Sl. 2.1 Karakteristike pumpe

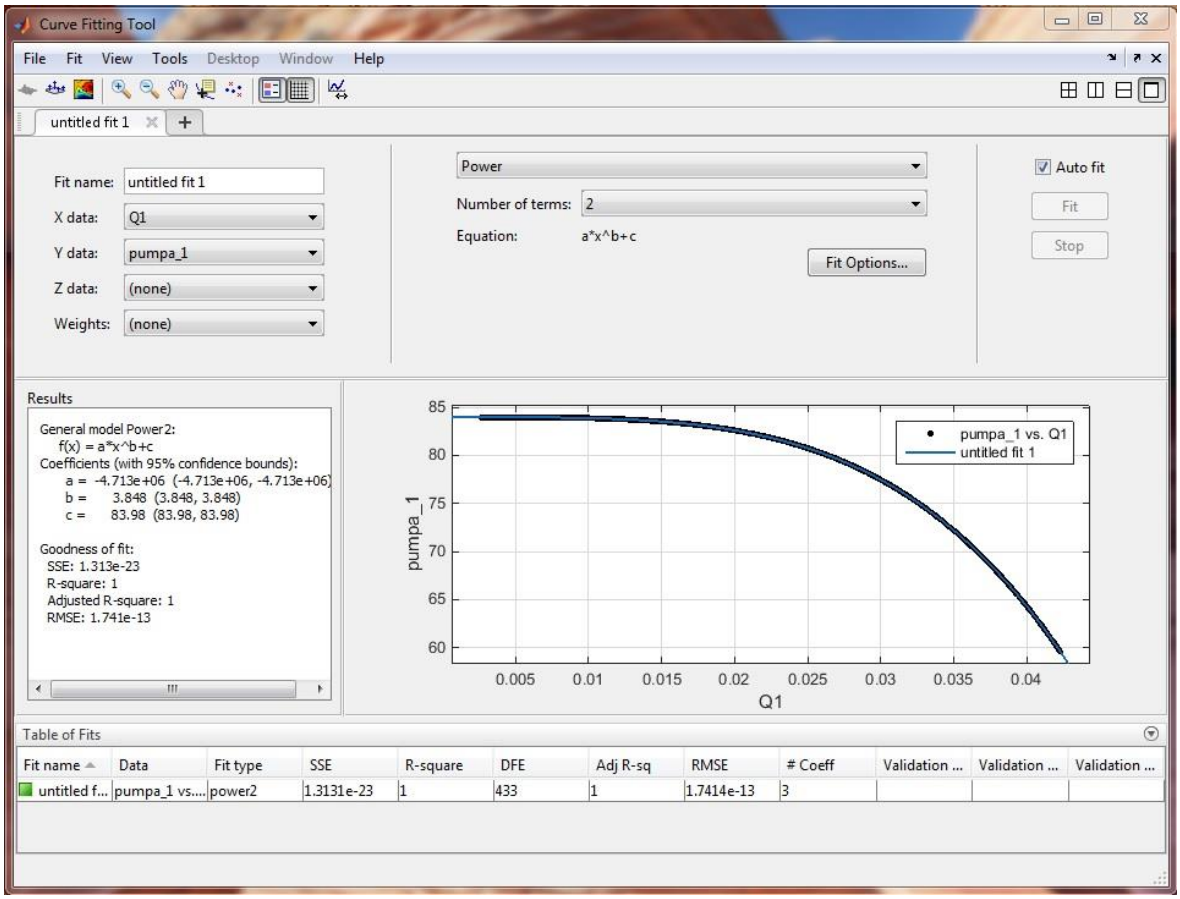
Na prvi pogled očiti problem je precizno čitanje informacija sa grafa, i očito je da radi točnosti proračuna trebamo iščitati informacije u što većoj količini.

Na internetu postoje različiti alati poput DIGITIZE-IT, koji nije besplatan, a budući da MATLAB ima podršku za obradu slike, odlučeno je da će se za uzorkovanje podataka sa slike koristiti MATLAB kako bi se pokazalo da se ne mora izlaziti izvan okvira MATLAB-a za rješavanje ovakvih problema. Za potrebu uzorkovanja podataka za svaku liniju visine dobave pumpe sa slike 2.1 napravljena je skripta, koja uzorkuje podatke o *x* i *y* koordinatama linija i te podatke preračunava u odgovarajuće mjerne jedinice. Potrebno je manualno odrediti na kojoj x koordinati dotična linija počinje, a na kojoj završava. Nakon toga uporabom nekog jednostavnog alata poput PAINT-a uzorkovana linija se izbriše i ponovi se postupak za sljedeću liniju. Korištenjem PAINT-a zapravo se ovdje izašlo izvan okvira MATLAB-a, ali bitno je napomenuti da to nije bilo nužno i da se problem mogao riješiti programski. Budući da je PAINT vrlo raširen alat i vrlo je jednostavan za korištenje, usvojen je kao jednostavnije rješenje. Nedostatak ovakvog načina uzorkovanja podataka sa slike je taj što za svaku liniju moramo izmijeniti skriptu, ali je prednost ta što uzorkovanje vršimo za svaki piksel na slici, te je točnost uzorkovanja ograničena jedino rezolucijom slike.

Nakon što imamo podatke o linijama u obliku *x* i *y* koordinata odgovarajućih mjernih jedinica, liniju karakteristike možemo aproksimirati koristeći MATLAB-ov alat za aproksimaciju linija („Curve Fitting Tool“). Izgled korisničkog sučelja alata za aproksimaciju linija nalazi se na slici 2.2. Alat je vrlo jednostavan i intuitivan za korištenje. Za *x*-podatke odaberemo uzorkovane *x*-koordinate dotične linije, za *y*-podatke odaberemo uzorkovane *y* koordinate. Metoda aproksimacije koja je korištena za sve pumpe u sklopu ovoga rada je metoda „Power“ drugog stupnja. Ta je metoda odabrana iz razloga što aproksimira linije jednako dobro kao i polinomi petog ili većeg stupnja ali joj je formula jednostavnija, a time i lakša za manipulaciju.
Formula modela aproksimacije „Power“ je:

$$f(x) = a * x^b + c \tag{2.1}$$

Gdje su koeficijenti *a*, *b* i *c* izračunati pomoću alata za aproksimaciju linija. Sada kada imamo formule svih linija bitnih za proračun pumpi u okviru ovoga rada, treba se odlučiti o načinu spremanja tih podataka.



Sl. 2.2 „Curve Fitting Tool“

2.2. Način pohrane podataka o pumpama

Pumpe su modelirane pomoću klase, tj. svaka pumpa u programu je objekt. Na taj način postiže se jednostavnost spremanja podataka o pumpama, jednostavno sortiranje i rukovanje objektima, te vrlo laka mogućnost proširenja programa za nove pumpe. Ulazni parametri konstruktora objekata su:

- ime pumpe
- broj okretaja
- protok vezan uz visinu dobave
- visina dobave
- simbolički zapis funkcije visine dobave
- neto pozitivna usisna visina
- simbolički zapis funkcije neto pozitivne usisne visine
- protok vezan uz neto pozitivnu usisnu visinu

To su ujedno i sva svojstva pumpi potrebna za proračun. Osim svojstava, pumpe imaju i definirane metode. Konstruktor je već spomenut, a osim njega definirane su metode za čitanje svojstava pumpi („Getters“).

2.3. Način pohrane podataka o tekućinama

Podaci o tekućinama uzeti su iz literature [7]. Ti podaci spremljeni su unutar aplikacije u trajnu memoriju u obliku MATLAB matrica. Svaka tekućina u aplikaciji spremljena je u svoju 1D matricu u kojoj je prvi stupac temperatura uz koju su vezane karakteristike. Drugi stupac sadrži informacije o tlaku zasićenja u mjernoj jedinici [Pa], treći stupac je gustoća u [kg/m^3], te je četvrti stupac kinematička viskoznost u mjernoj jedinici [m^2/s]. Ovo su ujedno sve karakteristike tekućine potrebne za proračun jednostavnog sustava crpka-cjevovod unutar ove aplikacije. Za zadanu temperaturu aplikacija uzima podatke iz tablice „lookup“ metodom.

3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA

Dužnu pažnju potrebno je posvetiti elementima koji provode fluid u nekom hidrauličkom sustavu [8]. U modelu crpka-cjevovod koji se razrađuje u ovom radu to su cijevi i elementi armature cjevovoda (koljena, ventil). Prolazeći kroz cijevi i armaturu stvaraju se otpori strujanju fluida zbog njegova trenja o stijenke, te trenja unutar samog fluida. Važni podaci glede provođenja fluida u nekom hidrauličkom sustavu su veličine i priroda protoka.

3.1. Modeliranje cjevovoda

Da bi se riješio kompleksni problem strujanja fluida kroz cjevovode ili različite druge profile, koriste se kriteriji sličnosti, ili bezdimenzijske značajke [8]. Pomoću tih značajki dobivaju se jednostavniji izrazi. Jedna od tih značajki je Reynolds-ov broj:

$$Re = \frac{4Q}{D\pi v} \tag{3.1}$$

Gdje su *Q* protok, *D* promjer cjevovoda, a *v* koeficijent kinematičke viskoznosti. Bezdimenzijski Reynolds-ov broj daje mjeru omjera između inercijskih i viskoznih sila. Za niske Reynolds-ove brojeve prevladavaju viskozne sile, strujanje je laminarno. Za visoke Reynolds-ove brojeve prevladavaju inercijske sile fluida, a strujanje je turbulentno. Kod laminarnog strujanja pad tlaka zbog trenja dan je linearnom vezom a kod turbulentnog strujanja pad tlaka zbog trenja proporcionalan je kvadratu protoka pa je i veza pada tlaka i protoka nelinearna. Granica prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje nije oštra i zavisi od mnogih čimbenika, a za proračun se usvaja da se laminarno strujanje održava do Re=2300 [9].

3.1.1. Modeliranje linijskih gubitaka

Linijski gubici h_f se modeliraju pomoću izrada Darcy-Weissbacha [9] koji glasi:

$$h_f = \lambda \frac{8LQ^2}{\pi^2 D^5 g} \tag{3.2}$$

Gdje je λ koeficijent trenja određen eksplicitnom formulom Swamee, Jain:

$$\lambda = \frac{1.325}{\left[ln\left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \tag{3.3}$$

Treba imati na umu da prikazani model linijskih gubitaka vrijedi za strujanje ustaljenim profilom brzine, gdje je pad tlaka zbog trenja linearno razmjeran duljini cjevovoda.

3.1.2. Modeliranje lokalnih gubitaka

Lokalni gubici nastaju pri strujanju kroz koljena, ventile, nagla proširenja i slično [9]. U sklopu ovog rada obuhvaćeni su lokalni gubici kroz koljena za koja je pretpostavljeno da su pod kutem od 90° i ventil. Lokalni gubici kroz koljena zamijenjeni su ekvivalentnom duljinom cjevovoda prema formuli [10]:

$$L_e = 30 * D \tag{3.4}$$

Lokalni gubici kroz ventil obuhvaćeni su formulom:

$$h_{fm} = K \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \tag{3.5}$$

gdje je *K* koeficijent lokalnog gubitka.

3.1.3. Neto pozitivna usisna visina

Kavitacija (engl. *cavity* – znači šupljina) je pojava isparavanja vode i stvaranja mjehura vodene pare. Nastaje u trenutku kada tlak vode postaje jednak ili manji od tlaka zasićenja vodene pare. Kavitacijom se kod hidruličkih strojeva podrazumijeva pojava diskontinuiteta ili „šupljina“ (mjehura pare u vodi) u struji tekućine [11]. Negativni utjecaji kavitacije su:

- kavitacijska erozija
- nagli pad snage
- pad stupnja korisnosti pumpe
- vibracija
- šum

Ako u nekoj točki unutar crpke apsolutni tlak kapljevine postane niži od tlaka zasićenja para p_v te kapljevine, u njoj započinje isparavanje i stvaranje mjehurića pare. Izravna posljedica kavitacije jest razaranje materijala stijenki crpke, tzv. kavitacijska erozija. Pojava kavitacije praćena je karakterističnim šumom i vibracijama, a rad crpke postaje nejednolik i nemiran, smanjuju se visina dobave, protok i djelotvornost. Na pojavu kavitacije utječu uvjeti na usisu crpke. Ako su ti uvjeti takvi da ni u jednoj točki unutar crpke tlak neće biti niži od tlaka zasićenja kapljevine plinovima, kavitacija se ne će pojaviti. Minimalni uvjeti na usisu crpke nužni za sprječavanje kavitacije poznati su pod nazivom neto-pozitivna usisna visina crpke i često se označavaju američkom kraticom NPSH (engl. *net positive suction head*), a određuju se eksperimentalno.

Sukladno preporukama Europskog udruženja proizvođača crpki (engl. European Association of Pump Manufactures) raspoloživa (available) NPSH (u daljnjem tekstu NPSHA) je definirana kao [12]:

$$NPSHA = \frac{p_{aps,1}}{\rho g} + \frac{{v_1}^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g} \tag{3.6}$$

Gdje je $p_{aps,1}$ apsolutni tlak na ulaznoj prirubnici crpke, v_1 brzina na ulaznoj prorubnici crpke, a p_v tlak zasićenja.

Upravo ta definicija korištena je u modeliranju NPSHA u sklopu ovoga rada.

3.2. Modeliranje sustava crpka-cjevovod

Ukupni pad tlaka u hidrauličkom cjevovodu računa se pomoću Bernoulijeve jednadžbe, te dodajući gubitke strujanja u ravnom dijelu cjevovoda i lokalne gubitke [8]. Uz to se dodaje pad tlaka na ventilu. Dakle, za računanje pada tlaka potrebno je zbrojiti pad tlaka na jednom ventilu koji se nalazi u tlačnom cjevovodu, pad tlaka na lokalnim otporima te pad tlaka u ravnim dijelovima cjevovoda. U sklopu ovoga rada zanemareni su koeficijenti ispravka kinetičke energije u Bernoulijevoj jednadžbi.

3.3. Model pumpe

Karakteristike centrifugalne pumpe obično su prezentirane setom krivulja, koje se baziraju na ispitivanjima ili proračunima proizvođača npr. za posebne promjere impelera [13].

Za potrebe ovoga rada bitna je krivulja visine dobave. Ona daje informaciju o visini dobave kao funkciji protoka. Potrebna je za izračun radne točke sustava u crpnom postrojenju u koje je ugrađena. Često te linije sadrže dodatne informacije: ograničenja zbog kavitacije, vibracija i opterećenja motora. Za potrebe ovoga rada dodatne informacije nisu uzete u obzir.

Druga bitna krivulja za ovaj rad je linija neto pozitivne usisne visine pumpe (u daljnjem tekstu NPSHR) koja daje informaciju o potrebnoj („Required“) neto pozitivnoj usisnoj visini kao funkciji protoka. Služi za izračun kavitacijske rezerve crpke unutar crpnog sustava u koji je ugrađena. Obično za pumpu proizvođač daje NPSHR karakteristiku vezanu uz broj okretaja pumpe, i za najveći promjer impelera. U sklopu ovoga rada NPSHR krivulja nije bila preračunavana za manje (podrezane) impelere korištenjem teorije sličnosti, budući da se na taj način ne dobivaju dovoljno precizni rezultati, već je uzeto da za manje impelere iste pumpe vrijedi ista NPSHR karakteristika kao i za najveću dimenziju impelera. U sklopu ovoga rada ostale krivulje nisu razmatrane.

3.4. Implementacija unutar MATLAB-a

3.4.1. Model pumpe

Pumpe su modelirane pomoću klase, tj. svaka pumpa u programu je objekt. Na taj način postiže se jednostavnost spremanja podataka o pumpama, jednostavno sortiranje i rukovanje objektima, te vrlo laka mogućnost proširenja programa na nove pumpe. Ulazni parametri konstruktora objekata su:

- ime pumpe
- broj okretaja
- protok vezan uz visinu dobave
- visina dobave
- simbolički zapis funkcije visine dobave
- neto pozitivna usisna visina
- simbolički zapis funkcije neto pozitivne usisne visine
- protok vezan uz neto pozitivnu usisnu visinu

To su ujedno i sva svojstva pumpi potrebna za proračun. Osim svojstava pumpe imaju definirane metode. Konstruktor je već spomenut, a osim njega definirane su metoda za čitanje svojstava pumpi („Getters“).

3.4.2. Model cjevovoda

Za potrebe proračuna kreirana je funkcija „lg“. Funkcija „lg“ matematički modelira cjevovod. Ovakav način modeliranja je statički, deterministički [14]. Funkcija se sastoji od ugniježđene funkcije koja računa ukupni gubitak, i lokalnih funkcija koje računaju Reynolds-ove brojeve u usisnom i tlačnom cjevovodu, te lokalnih funkcija koje računaju faktore trenja ovisno o tome da li je strujanje laminarno ili turbulentno. Također, dodane su i lokalne funkcije koje računaju lokalne gubitke u koljenima cjevovoda za koje je pretpostavka da su pod kutem od 90°, te se računaju po formuli (3.4)

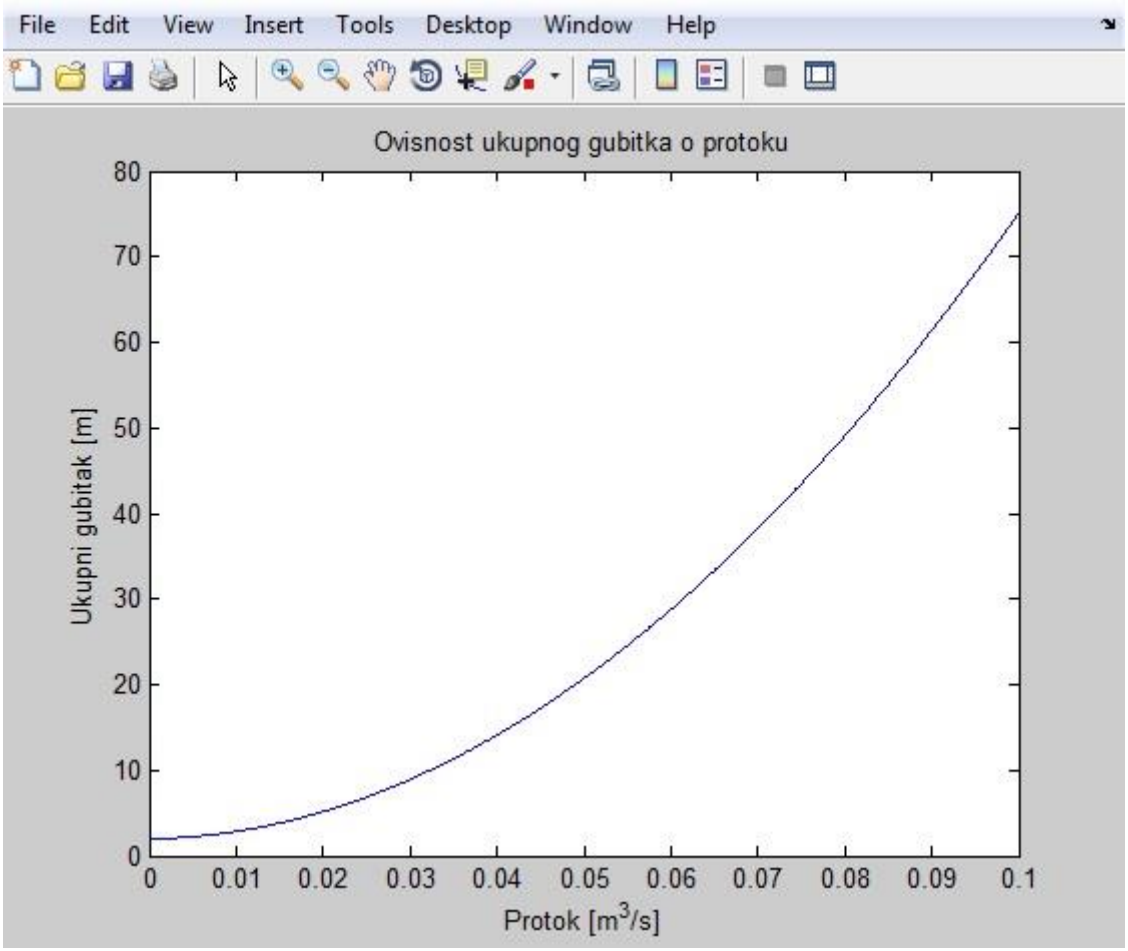
Ulazni parametri potrebni za funkciju su:

- Q [m^3/s] Protok
- D1,D2 [m] Promjeri usisnog i tlačnog cjevovoda
- v (ni) [m^2/s] Koeficijent kinematičke viskoznosti
- k [mm] Apsolutna visina hrapavosti stijenke cijevi
- L1,L2 [m] Dužine usisnog i tlačnog cjevovoda
- ρ (ro) [kg/m^3] Gustoća tekućine
- h1,h2 [m] Visine spremnika
- pa [Pa] Atmosferski tlak
- pv [Pa] Tlak zasićenja tekućine
- pm1,pm2 [Pa] Pretlaci u ulaznom odnosno izlaznom spremniku
- brk1,brk2 Broj koljena u usisnom i tlačnom cjevovodu
- K Koeficijent ventila

Protok se najčešće unosi u obliku vektora, dok se svi ostali parametri unose u obliku skalara. Međutim, budući da je funkcija vektorizirana za više ulaznih parametara to ne mora biti slučaj. Funkcija je vektorizirana i za promjere cjevovoda, što znači da se oni mogu unijeti u obliku vektora, dok su ostale vrijednosti skalari. Također je vektorizirana za dužinu cjeovoda i koeficijent ventila. Prema tome, iz funkcije je moguće dobiti više vrsta rezultata.

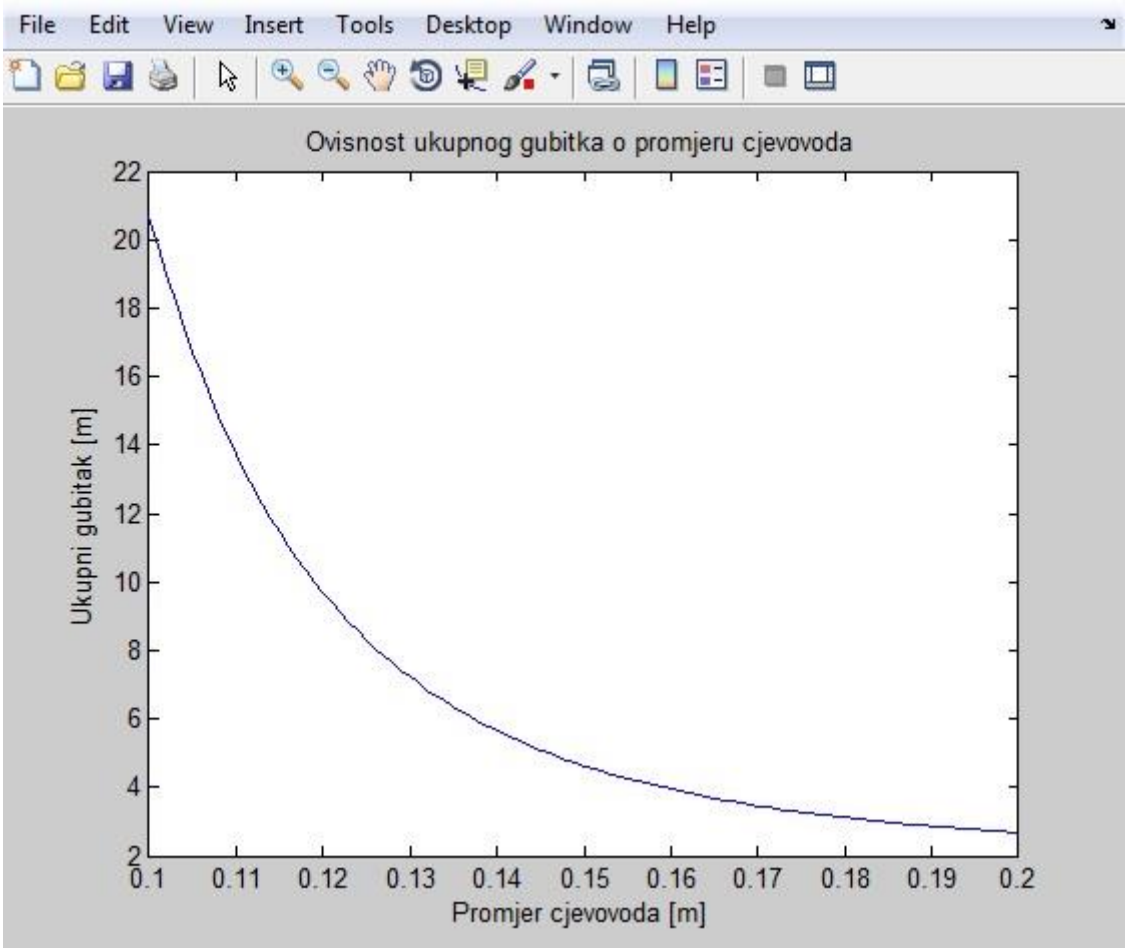
Ako su svi ulazni parametri u obliku skalara dok je protok u obliku vektora, za rezultat dobijemo ukupni gubitak cjevovoda u ovisnosti o protoku. Takav rezultat prikazan je na slici 3.1.

Na slici 3.1 vidi se da ukupni gubitak raste otprilike s kvadratom protoka. Graf je dobiven na način da se protok unese u obliku vektora proizvoljne veličine dok su ostali ulazni parametri proizvoljne vrijednosti u obliku skalara.



Sl. 3.1 Ovisnost ukupnog gubitka o protoku

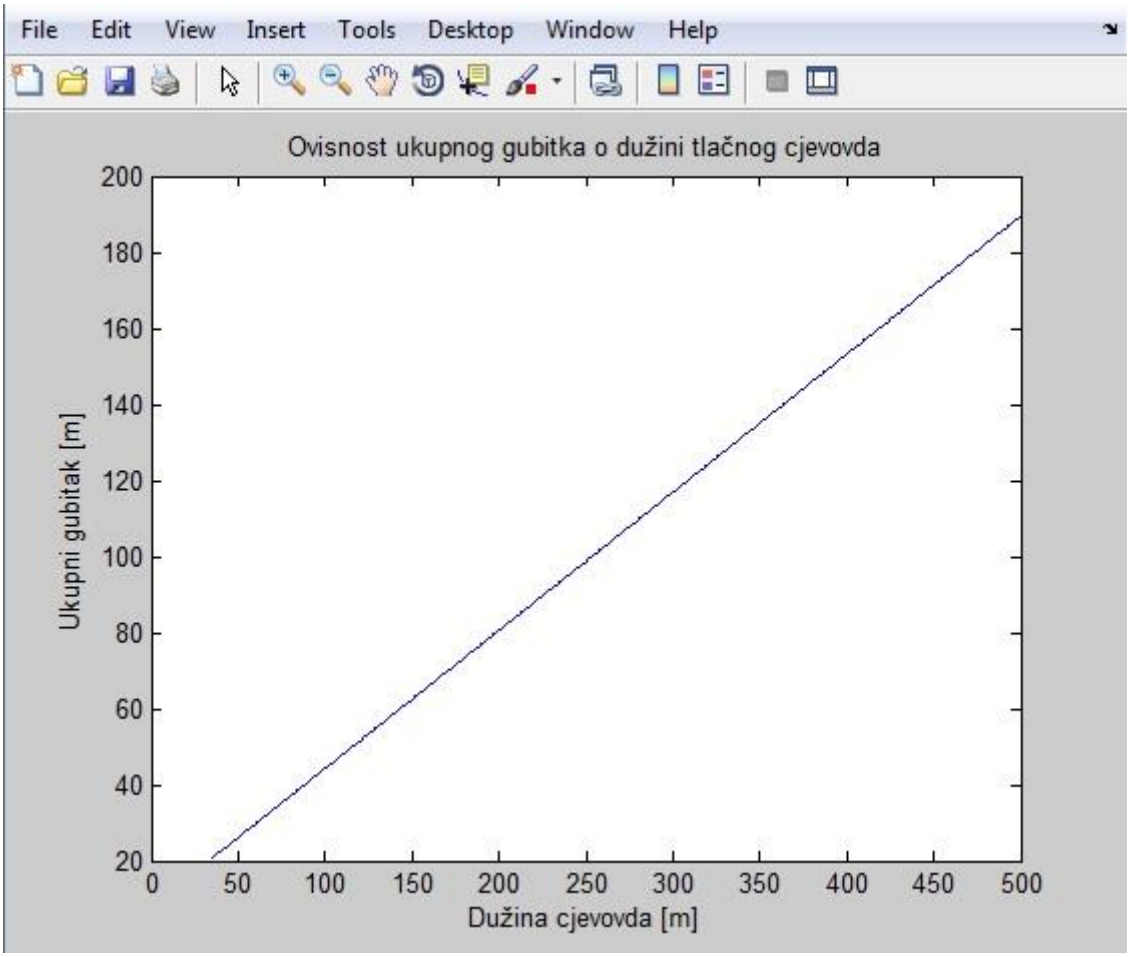
Ako se želi dobiti ovisnost ukupnog gubitka o promjerima cjevovoda, promjeri cjevovoda unose se u obliku vektora dok su ostale vrijednosti skalari. Ovisnost ukupnog gubitka o promjerima cijevovoda prikazana je na slici 3.2. Iz slike je vidljivo da ukupni gubitak pada otprilike s petom potencijom promjera cjevovoda. Graf je dobiven na način da su promjeri usisnog i tlačnog cjevovoda unijeti u obliku vektora proizvoljne veličine (obadva vektora moraju biti iste veličine) dok su ostale vrijednosti proizvoljni skalari. U ovom konkretnom slučaju obadva promjera su zadana kao vektori iste dužine, ali moguće je i da samo jedan promjer bude zadan kao vektor. Takvim bi uvrštavanjem parametara dobili isti oblik krivulje ovisnosti, ali kvantitativne vrijednosti bile bi drugačije.



Sl. 3.2 Ovisnost ukupnog gubitka o promjeru cjevovoda

Još jedan primjer vektoriziranosti funkcije je unos dužine cjevovoda u obliku vektora, dok su ostale vrijednosti skalari. U tom slučaju rezultat je ovisnost ukupnog gubitka o dužini cjevovoda prikazan na slici 3.3. Iz slike je očito da je ovisnost ukupnog gubitka o dužini cjevovoda linearna. U funkciju se unosi dužina cjevovoda u obliku vektora proizvoljne veličine, dok su ostale vrijednosti proizvoljni skalari. Konkretno za sliku 3.3 vektor je samo dužina tlačnog cjevovoda, početna vrijednost je 35 m a krajnja vrijednost je 500 m. Na isti način može se pokazati ovisnost ukupnog gubitka o dužini usisnog cjevovoda, ili ovisnost o ukupnoj dužini cjevovoda (zbroj dužine usisnog i tlačnog cjevovoda) na način da se obadvije dužine (usisnog i tlačnog cjevovoda) unesu u obliku vektora (obadva vektora moraju biti iste veličine).

Zadnji primjer vektoriziranja funkcije je vektoriziranje za koeficijent ventila. To znači da na isti način možemo dobiti rezultat koji predstavlja ovisnost ukupnog gubitka o koeficijentu ventila. Bitno je napomenuti da je ventil isključivo hipotetski

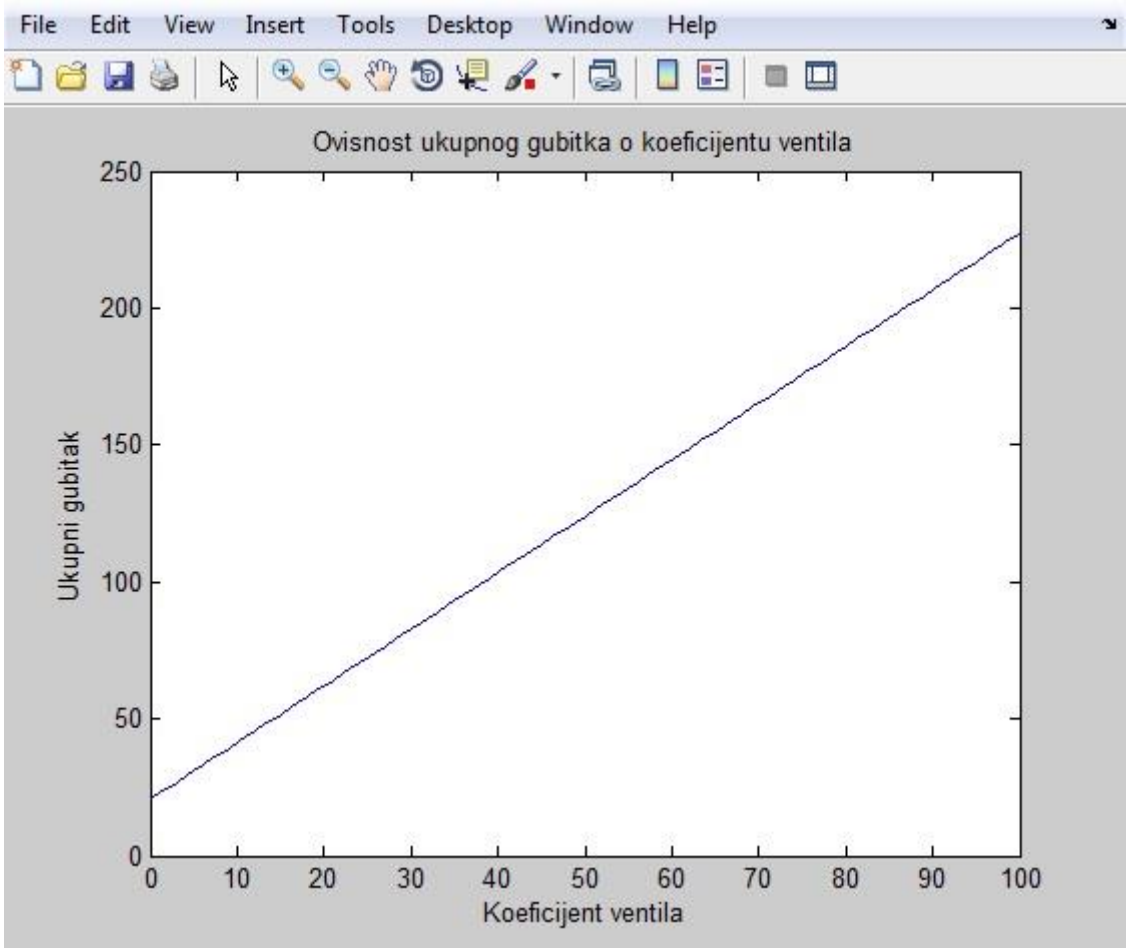


Sl. 3.3 Ovisnost ukupnog gubitka o dužini tlačnog cjevovoda

tj. nema stvarnu karakteristiku, ali mogu se birati vrijednosti *K* (u aplikaciji mogu se birati vrijednosti od 1 do 1000). Također, ventil je zamišljen u tlačnom cjevovodu. Na slici 3.4 prikazana je ovisnost ukupnog gubitka o koeficijentu ventila. Na slici je vidljiva linearna ovisnost. Graf je dobiven na način da se koeficijent ventila unese u funkciju u obliku vektora proizvoljne veličine, dok su ostale vrijednosti proizvoljni skalari.

Funkcija za rezultat daje ukupni gubitak u metrima, koji u kontekstu sustava crpka-cjevovod predstavlja potrebnu visinu dobave, Reynolds-ove brojeve u usisnom i tlačnom cjevovodu, koeficijente trenja u usisnom i tlačnom cjevovodu, te drške

(„Handles“) na lokalne funkcije za slučaj potrebe korištenja lokalnih funkcija izvan glavne funkcije „lg“.



Sl. 3.4 Ovisnost ukupnog gubitka o koeficijentu ventila

4. ODABIR PUMPI ZA APLIKACIJU

Za potrebe aplikacije najbitniji kriterij za odabir pumpe bio je taj da pumpa ima stabilnu karakteristiku. U trenutku kada smo pomoću Curve Fitting Tool-a dobili formulu krivulje visine dobave pumpe koristit ćemo funkciju „sym“ kako bi u simboličkom obliku mogli manipulirati funkcijom. Nakon kreiranja simboličke funkcije potrebno je koristiti funkciju „subs“ kako bi evaluirali vrijednosti funkcije visine dobave za protok u čijem intervalu funkcija vrijedi. Tada dobivenu simboličku varijablu prebacujemo u brojčani oblik funkcijom „double“ i nova brojčana varijabla nam služi za ispitivanje stabilnosti karakteristike pomoću funkcije „findpeaks“. Dotična funkcija za ulazne parametre prima skalarni vektor [15]. Funkcija vraća vektor s lokalnim maksimumom. Ako ne postoji lokalni maksimum funkcija vraća prazan vektor. Ovaj način provjere opisat će se na primjeru pumpe sa slike 2.1.

Postupak je prikazan na slici 4.1. Simbolička funkcija visine dobave pumpe je spremljena u varijablu „h1“. Nakon toga je evaluirana funkcijom „subs“, gdje je prvi argument simbolička funkcija a drugi argument su vrijednosti za koje želimo evaluirati funkciju. Pretvaranjem u brojčanu vrijednost funkcijom „double“ novodobivenu matricu šaljemo kao ulazni argument u funckiju „findpeaks“. Funkcija je vratila praznu matricu iz čega zaključujemo da je karakteristika pumpe stabilna.

```
>> h1=sym('- 4713000.0*Q1^3.848+83.98');
>> h1=subs(h1,0.0026:0.0001:0.0423);
>> h1=double(h1);
>> pks=findpeaks(h1)

pks =

   Empty matrix: 1-by-0

fx >>
```

Sl. 4.1 Redoslijed naredbi pri korištelju funkcije „findpeaks“

Drugi način ispitivanja stabilnosti karakteristike možemo napraviti standardnim matematičkim postupkom traženja maksimuma funkcije. Poznato je da za traženje maksimuma moramo izračunati prvu derivaciju funkcije. To možemo učiniti funkcijom „diff“. U ovom postupku kao i u prethodnom kreiramo simboličku funkciju naredbom „sym“. Simbolički zapis funkcije spremamo u varijablu h1. Zatim izračunamo prvu derivaciju funkcijom „diff“ gdje je prvi ulazni argument funkcija koju želimo izderivirati, a to je upravo varijabla h1, a drugi argument je broj 1 jer želimo prvu derivaciju. Vrijednost prve derivacije spremljena je u varijablu „hder“. Kada dobijemo prvu derivaciju funkcija se izjednači s nulom, proglasi se nepoznata simbolička varijabla naredbom „syms“, u ovom slučaju nazvali smo ju Q1. Naredbom „solve“ računa se vrijednost nepoznate varijable u dotičnoj jednadžbi. Postupak je prikazan na slici 4.2. Očito je da naredba „solve“ za prvi argument ima jednadžbu koju želimo riješiti, a drugi argument je nepoznata simbolička varijabla koju želimo izračunati. Zbog prirode „Power“ funkcije, koja ima maksimum pri presjecištu s y osi, i budući da koristimo simbolički zapis funkcije a znamo da naša funkcija ne prolazi kroz y os, iz dobivenog rezlutata zaključuje se da pumpa ima stabilnu karakteristiku.

```
>> h1=sym('- 4713000.0*Q1^3.848+83.98');
>> hder=diff(h1,1)

hder =

-18135624.0*Q1^2.848

>> syms Q1
>> solve('-18135624.0*Q1^2.848==0', Q1)

ans =

0

fx >>
```

Sl. 4.2 Redoslijed naredbi pri korištenju funkcije „solve“

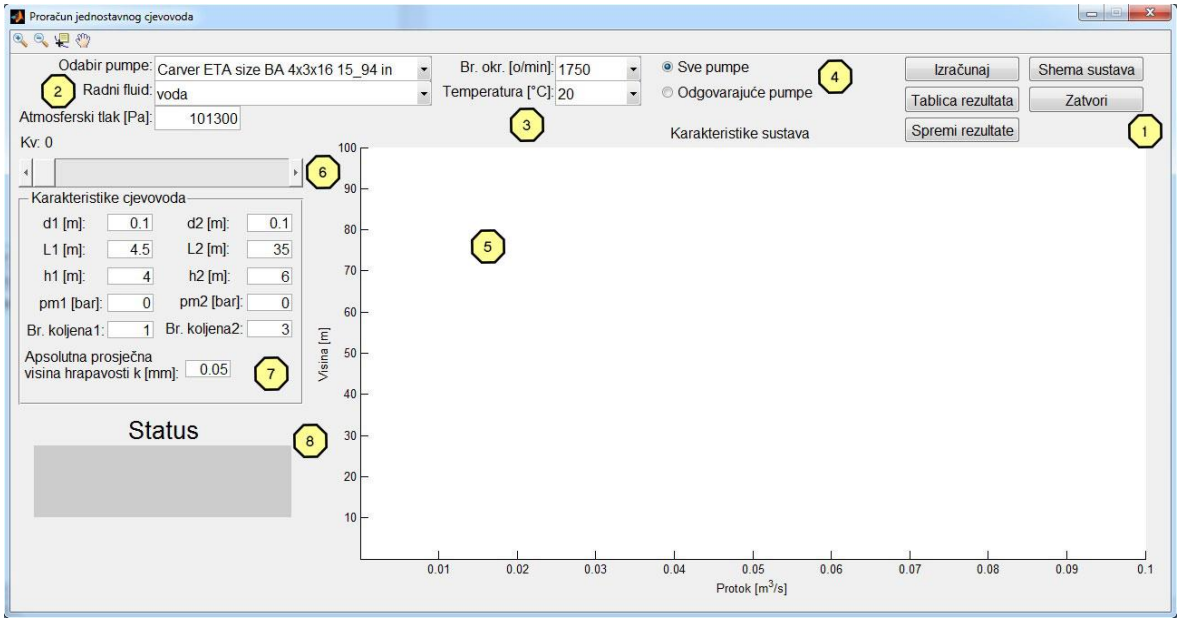
5. OPIS RAZVIJENE APLIKACIJE

5.1. Alati korišteni za razvoj aplikacije

Kao glavni alat za izradu ove aplikacije bio je korišten MATLAB. MATLAB je viši programski jezik, interaktivno okruženje za numeričko računanje [2]. Razvila ga je firma MathWorks. MATLAB omogućava manipulacije matricama, crtanje grafova, implementaciju algoritma, kreiranje grafičkih korisničkih sučelja, simboličko računanje i još mnogo drugih zadataka. Ima jako raširenu upotrebu, te je također prednost to što je dostupan na više platformi. Omogućuje i izradu samostojećih aplikacija, što omogućuje da se aplikacijama napravljenim u MATLABU koriste i oni korisnici koji ne posjeduju MATLAB.

5.2. Opis korisničkog sučelja i način rada s aplikacijom

5.2.1. Razmještaj opcija na glavnoj formi



Sl. 5.1 Glavna forma aplikacije

Na slici 5.1 prikazana je glavna forma razvijene aplikacije za proračun jednostavnog sustava crpka-cjevovod.

Glavna podjela raznih opcija na formi vidi se prema brojevima kako slijedi:

1. glavne opcije aplikacije za izračun, prikaz i spremanje dobivenih rezultata
2. padajući izbornici za odabir pumpe i radnog fluida
3. padajući izbornici za odabir broja okretaja pumpe i temperature radnog fluida
4. opcije za odabir vrste prikaza pumpi
5. graf
6. klizač za odabir vrijednosti ventila
7. ploča za odabir karakteristika cjevovoda
8. panel za prikaz statusa sustava
9. alatna traka

U daljnjem tekstu će biti pobliže objašnjena svaka od navedenih opcija te njihove mogućnosti.

5.2.2. Glavne opcije aplikacije za izračun, prikaz i spremanje dobivenih rezultata

Na slici 5.1 pod 1 vidi se grupa opcija za izračun, prikaz rezultata u obliku tablice, opcije za spremanje rezultata, opcije za prikaz sheme sustava i opcije za izlaz iz aplikacije.

U ovoj grupi opcija najbitnija od njih je opcija „Izračunaj“. Pri radu s aplikacijom prvo je potrebno odabrati pumpu, broj okretaja pumpe, radni fluid i njegovu temperaturu, te kada su postavljeni svi parametri cjevovoda, pritiskom na opciju „Izračunaj“ aplikacija evaluira status sustava crpka-cjevovod. Bitno je napomenuti da se nikakvo računanje od strane aplikacije ne odvija samo pormjenom određenog parametra, sve dok se ne pritisne opcija „Izračunaj“.

Odabirom opcije „Tablica rezultata“ pojavljuje se tablica sa svim međuvrijednostima korištenim za proračun a koje nisu direktno prikazane na grafu aplikacije. To su Reynolds-ovi brojevi i koeficijenti trenja lambda, sortirani za usisni i tlačni cjevovod.

Opcija „Spremi rezultate“ poziva formu za odabir opcija spremanja. Aplikacija nudi dvije mogućnosti spremanja:

- spremanje u obliku Excel datoteke
- spremanje u obliku CSV datoteke

Te opcije odabrane su zbog velike prisutnosti programa Excel na korisničkim računalima a CSV-datoteke zbog univerzalnosti.

Opcija „Shema sustava“ poziva novu formu, na kojoj je prikazana slika sustava crpka-cjevovod sa svim kotama potrebnim za definiciju sustava.

Prisitkom na opciju „Izlaz“ aplikacija se zatvara.

5.2.3. Padajući izbornici za odabir pumpe i radnog fluida

Na slici 5.1 pod 2 nalaze se dva padajuća izbornika, izbornik za odabir pumpe te izbornik za odabir radnog fluida. Izbornik za odabir pumpe povezan je s izbornikom broja okretaja pumpe. Za pumpe različitog proizvođača dostupni su različiti brojevi okretaja pumpe.

Izbornik za odabir radnog fluida povezan je s izbornikom za odabir temperature radnog fluida. Za različite fluide dostupne su različite temperature, s tim da je početna vrijednost temperature uvijek 20°C.

5.2.4. Padajući izbornici za odabir broja okretaja pumpe i temperature radnog fluida

Na slici 5.1 pod 3 također se nalaze dva padajuća izbornika, jedan je za odabir broja okretaja pumpe, a drugi za temperaturu radnog fluida. Bitno je napomenuti da izbornik za odabir broja okretaja pumpe ovisi oizborniku „Odabir pumpe“. Ako je odabrana opcija „Sve pumpe“ za odabranu pumpu prikazuju se sve moguće brzine vrtnje, a ukoliko je odabrana opcija „Odgovarajuće pumpe“ prikazuju se samo oni brojevi okretaja pri kojima bi pumpa imala radnu točku za zadani cjevovodni sustav. U tom slučaju postoji mogućnost da nijedna pumpa ne odgovara sustavu ni na kojem broju okretaja te je padajući izbornik za broj okretaja pumpe ispunjen točkama „...“. U slučaju da korisnik u tom trenutku pritisne opciju „Izračunaj“ aplikacija javlja da to nije moguće.

5.2.5. Opcije za odabir vrste prikaza pumpi

Na slici 5.1 pod 4 nalaze se opcije za odabir vrste prikaza pumpi. Pod vrstom prikaza smatra se da ako je odabrana opcija „Sve pumpe“ aplikacija omogućava odabir bilo koje pumpe koja je definirana unutar aplikacije, i njenog broja okretaja. Odabirom opcije „Odgovarajuće pumpe“ pokreće se svojevrsna tražilica, koja će pronaći samo one pumpe koje bi za zadani cjevovodni sustav imale radnu točku, te će u padajućim izbornicima biti omogućen odabir samo odgovarajućih pumpi. Za slučaj da nije pronađena niti jedna odgovarajuća pumpa, izbornici za odabir pumpe i njenog broja okretaja bit će ispunjeni točkama „...“.

5.2.6. Graf

Pomoću grafa aplikacija korisniku isporučuje vizualnu informaciju. Punim linijama iscrtavaju se linije potrebne i dostupne visine dobave. Linija dostupne visine dobave je uvijek crne boje, a linija potrebne visine dobave je crvene boje. Linije dostupne i potrebne neto pozitivne usisne visine iscrtavaju se isprekidanom linijom. NPSHA linija je uvijek zelene boje, NPSHR linija je uvijek plave boje. Ako postoje presjecišta između odgovarajućih linija ona su dodatno naglašena krugom boje cijan. *X*-os grafa predstavlja protok u metrima kubnim po sekundi, i početna vrijednost protoka je uvijek nula, a krajnja je uvijek 0.1. *Y*-os grafa predstavlja visinu u metrima, i početna vrijednost je uvijek 0, a krajnja vrijednost 100. Zbog toga postoji mogućnost da, ovisno o parametrima cjevovoda, linije potrebne visine dobave i dostupne neto pozitivne usisne visine budu izvan tih granica, pa se za pomicanje po grafu mogu koristiti alati iz alatne trake. Graf se nalazi na slici 5.1 pod brojem 5.

5.2.7. Klizač za odabir koeficijenta ventila

Na slici 5.1 pod 6 nalazi se klizač za odabir vrijednosti koeficijenta ventila. Ventil je hipotetske prirode, nema stvarnu karakteristiku, dakle promjenom položaja klizača ne mijenjamo otvorenost ventila, već mijenjamo isključivo koeficijent ventila. Aplikacija omogućuje odabir koeficijenta između 0 i 1000, pri čemu odabrani koeficijent služi za izračun u formuli 3.5.

5.2.8. Ploča za odabir karakteristika cjevovoda

Na slici 5.1 pod 7 nalazi se ploča za odabir parametara cjevovoda. To su ujedno i svi parametri cjevovoda koji se mogu mijenjati u ovoj aplikaciji. Ploča je podijeljena u dva stupca, lijevi stupac se odnosi na usisni, a desni na tlačni cjevovod. Ono što je zajedničko usisnom i tlačnom cjevovodu je apsolutna prosječna visina hrapavosti (ovdje je pretpostavka da su oba cjevovoda napravljena od iste vrste cijevi) čija je početna vrijednost odabrana za vučene čelične cijevi (nove) [16].

5.2.9. Panel za prikaz statusa sustava

Na slici 5.1 pod 8 nalazi se panel za prikaz statusa sustava. Panel ima više funkcija. Glavna zadaća mu je da nas nakon što aplikacija evaluira status sustava u smislu radne točke i rezerve do pojave kavitacije informira o statusu. Također služi i za upozorenje ukoliko korisnik unese neodgovarajuće vrijednosti (npr. tekst) u polja za odabir karakteristika cjevovoda unutar ploče „Karakteristike cjevovoda“, ili da nas obavijesti o tome jesu li pronađene odgovarajuće pumpe nakon odabira opcije „Odgovarajuće pumpe“.

5.2.10. Alatna traka

Na slici 5.1 pod 9 nalazi se alatna traka koja korisniku nudi mogućnost povečanja grafa, pomicanja po grafu, i kursor za ispitivanje vrijednosti linija u pojedinim točkama. Na desnom rubu alatne trake vidiljiva je ikona ruke, koja služi za pomicanje po grafu, budući da linija potrebne visine dobave i linija dostupne neto pozitivne usisne visine mogu biti, ovisno o parametrima cjevovoda, izvan početnih granica grafa. Pri uporabi kursora za ispitivanje vrijednosti linija u pojedinim točkama, koji se nalazi lijevo od ikone ruke, klikom na liniju dobivaju se informacije o x i y koordinatama u dotičnoj točki. Desnim klikom na novodobivenu točku, možemo birati opcije za brisanje točke, ili za njeno zadržavanje („Create new datatip“), tako da sljedećim klikom bilo gdje na liniju dobivamo novu točku, sa zadržanom prethodnom.

6. NAČIN RADA APLIKACIJE

U daljnjem tekstu bit će opisano na koji način aplikacija evaluira status sustava.

6.1. Inicijalizacija

Pri inicijalizaciji aplikacije, iz trajne memorije učitavaju se karakteristike tekućina, spremljene u MAT datoteku, i učitavaju se podaci o karakteristikama pumpi iz objektnog polja također spremljenog u trajnu memoriju u obliku MAT datoteke, tako da su svi podaci do završetka inicijalizacije kopirani u radnu memoriju. Isto tako aplikacija postavlja početne vrijednosti u kućice za parametre cjevovoda, te početnu pumpu i radni fulid u odgovarajuće padajuće izbornike. Nakon toga aplikacija čeka interakciju s korisnikom.

6.2. Evaluacija statusa sustava

Aplikacija ne evaluira status sustava samo promjenom nekog parametra cjevovoda ni npr. odabirom druge pumpe. Status sustava se počinje evaluirati kada korisnik pritisne opciju „Izračunaj“. Pri prvom koraku aplikacija učitava sve parametre iz korisničkog sučelja. Nakon toga iz odabrane pumpe učitava matrice koje sadrže podatke o karakteristikama pumpe. Potom poziva funkciju „lg“, pri čemu aplikacija funkciji prosljeđuje sve potrebne argumente za izračun, a funkcija vraća protok do kojeg nema pojave cjevovodne kavitacije, potrebnu visinu dobave pumpe i NPSHA. Nakon toga aplikacija računa presjecišta između potrebne i dostupne visine dobave, te potrebne i dostupne neto pozitivne usisne visine (ako ih ima). Ta presjecišta računaju se pomoću ugrađene MATLAB funkcije „polyxpoly“ koja u slučaju da nema presjecišta vraća praznu matricu [17]. Svi spomenuti parametri u ovom paragrafu spremaju se u strukturu „handles“ koja je dostupna svim funkcijama, a zatim aplikacija poziva funkciju „Proracun_rt“ (proračun radne točke) koja određuje status sustava u tekstualnom obliku.

6.3. Proračun radne točke

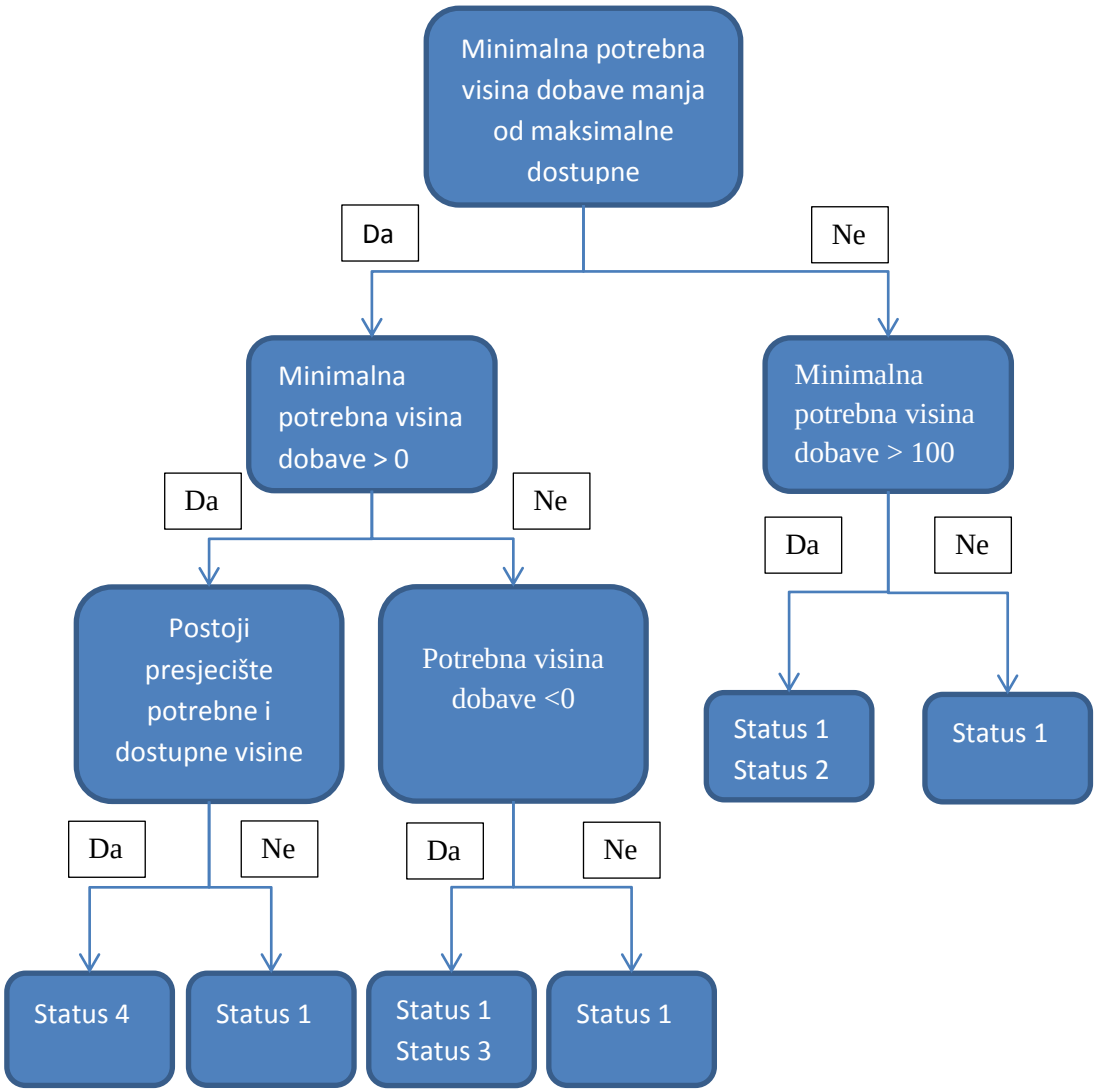
„proracun_rt“ je funkcija za procjenu statusa sustava, u tekstualnom obliku. Kada je u pitanju presjecište potrebne i dostupne visine dobave pumpe, moguće su četiri situacije, tj. četiri različita tekstualna statusa koja služe za ispis u panel za prikaz statusa sustava, gdje su onda vidljiva korisniku.

Status može biti:

1. Izvan radnog režima pumpe!
2. Minimalna potrebna visina dobave iznad 100 m!
3. Krivulja potrebne visine dobave ispod nule!
4. Radna točka pumpe: (x koordinata) Visina dobave: (y koordinata)

U statusu broj 4 pod *x* i *y* koordinata misli se na koordinate presjecišta dobivene funkcijom „polyxpoly“, pri čemu je *x*-koordinata protok u radnoj točki u mjernoj jedinici [m^3/s] a *y*-koordinata je visina dobave pumpe u mjernoj jedinici [m]. Da bi odredila koji je trenutni status sustava, funkcija prolazi kroz stablo odlučivanja, pri čemu naravno ima pristup svim potrebnim parametrima za određivanje statusa. Stablo odlučivanja funkcije „proracun_rt“ nalazi se na slici 6.1.

Nakon što je određen status presjecišta linija potrebne i dostupne visine dobave u tekstualnom obliku funkcija taj tekst također sprema u strukturu „handles“ te poziva funkciju „proracun_rt_kav“ koja potom određuje dolazi li za zadane ulazne parametre do pojave kavitacije u sustavu.



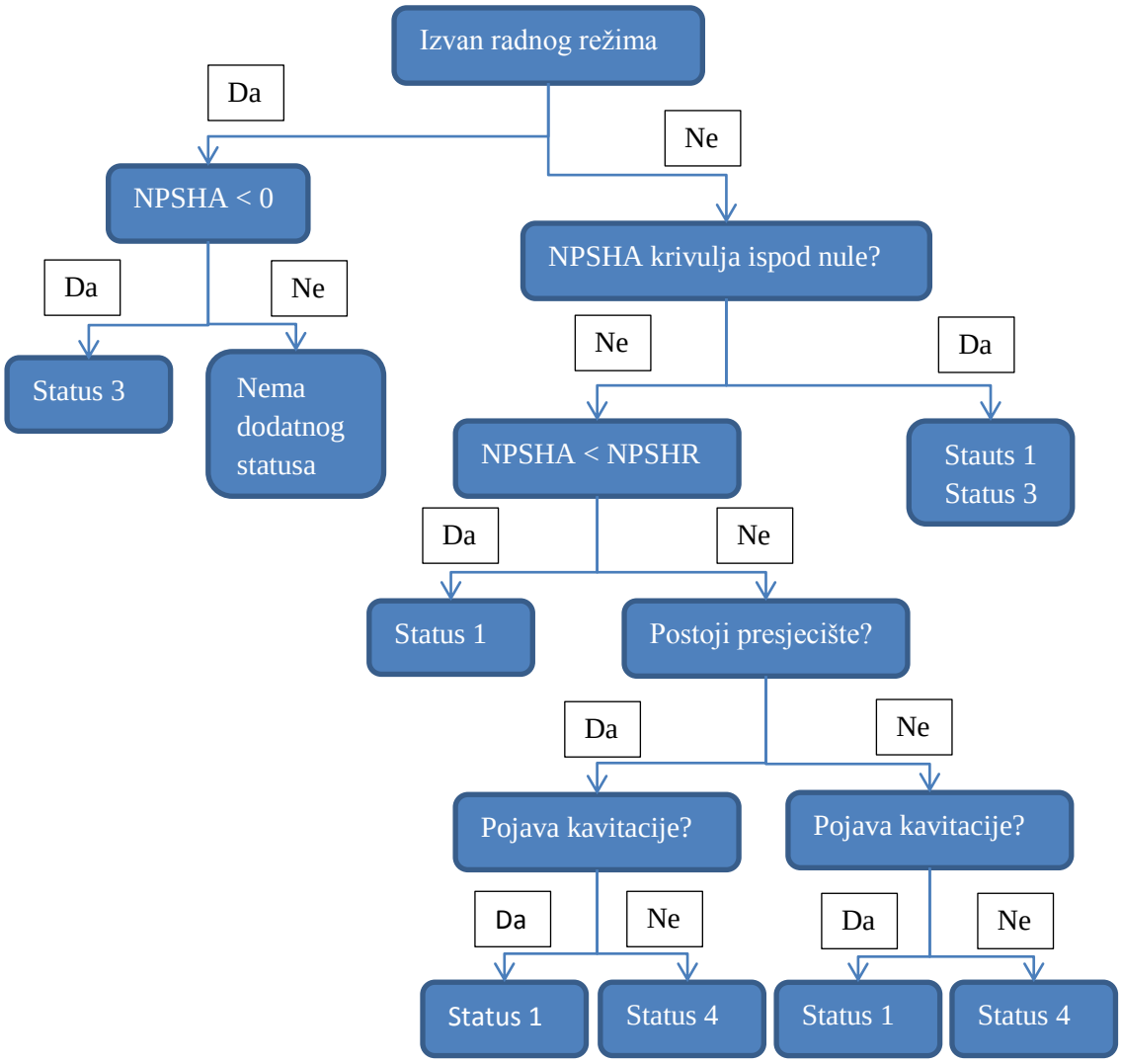
Sl. 6.1 Stablo odlučivanja u proračunu radne točke

6.4. Proračun rezerve do kavitacije

Dolazi li do kavitacije u sustavu određuje funkcija „proracun_rt_kav“. Funkcija također određuje drugi dio teksutualnog statusa sustava, koji se tiče presjecišta NPSHA i NPSHR linije. Mogući statusi su:

1. Pojava kavitacije!
2. Rezerva do kavitacije nije poznata
3. NPSHA krivulja je ispod nule!
4. Rezerva do kavitacije: (visina rezerve u metrima)

Za odabir statusa sustava od četiri moguća statusa funkcija isto kao i „proračun_rt“ koristi stablo odlučivanja prikazano na slici 6.2.



Sl. 6.2 Stablo odlučivanja u proračunu kavitacijske rezerve

6.5. Način traženja odgovarajućih pumpi

Aplikacija nudi mogućnost da za zadane parametre cjevovoda i radnog fluida pronađe pumpe i brojeve okretaja istih koje bi u takvom sustavu imale radnu točku i rezervu do kavitacije. To se može ostvariti odabirom opcije „Odgovarajuće pumpe“. Odabirom te opcije aplikacija odmah počinje s traženjem odgovarajućih pumpi na način da za svaku pumpu u bazi podataka evaluira status sustava. Pri tome se koristi funkcijama „proracun_rt“ i „proracun_rt_kav“ opisanim u prethodnim poglavljima. Ako neka pumpa odgovara zadanim kriterijima (da za takav sustav ima radnu točku i rezervu do kavitacije) dodaje se na popis odgovarajućih pumpi, s pridruženim odgovarajućim brojem okretaja. Rezultat je promjena statusa aplikacije, kojim aplikacija obavještava korisnika da je postupak

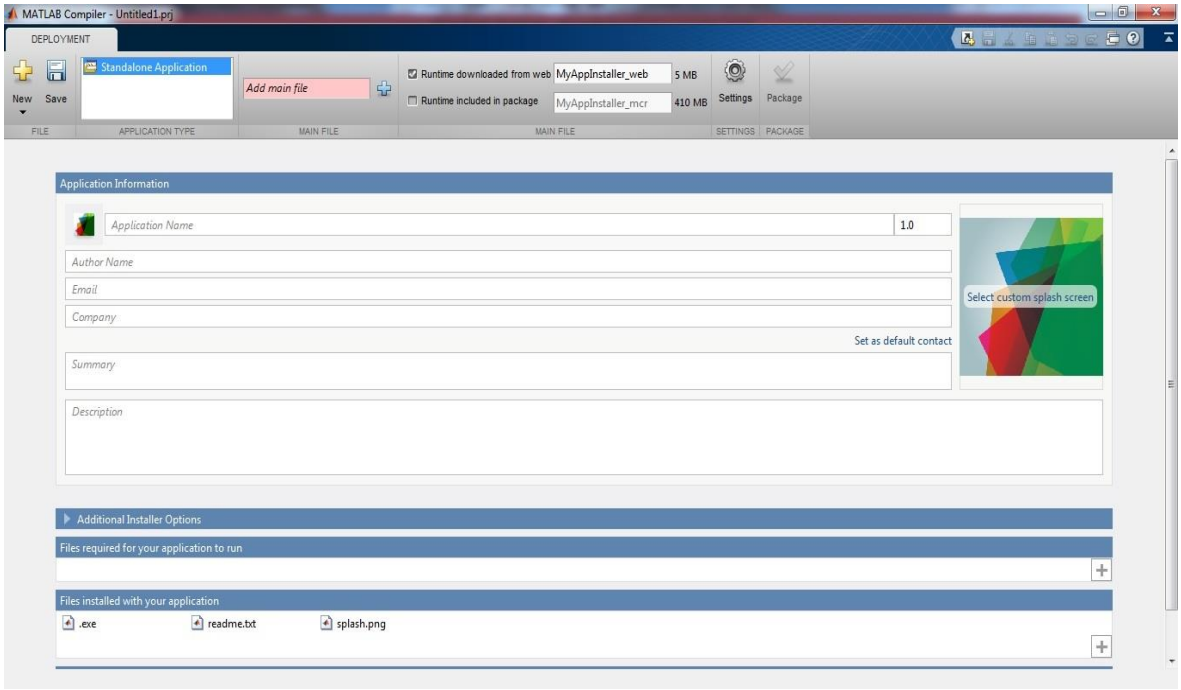
traženja završen, te su sada u padajućim izbornicima za odabir pumpe i broja okretaja dostupne samo pumpe i brojevi okretaja tih pumpi koje bi odgovarale zadanom sustavu cjevovoda. S obzirom da traženje odgovarajućih pumpi traje relativno dugo, nakon svakog traženja aplikacija će upamtiti ulazne parametre cjevovoda i radnog fluida, te dobivene rezultate. Očito je da ukoliko se ulazni parametri ne promjene, nema potrebe za ponovnim traženjem, jer bi se dobili jednaki rezultati. U tom slučaju, da korisnik ponovo pokrene traženje odgovarajućih pumpi bez promjene ulaznih parametara rezultati bi bili odmah dostupni.

7. IZRADA SAMOSTOJEĆE APLIKACIJE

U ovom poglavlju opisan je postupak izrade samostojeće aplikacije, iz postojećih MATLAB datoteka.

7.1. Kompajliranje samostojeće aplikacije

Korištenjem alata MATLAB Compiler, funkcije i aplikacije napravljene u MATLAB-u možemo dijeliti s ostalim korisnicima u obliku knjižnica, MATLAB aplikacija, ili možemo izraditi samostojeće aplikacije kako bi se njima mogli služiti i korisnici koji ne posjeduju MATLAB [18].

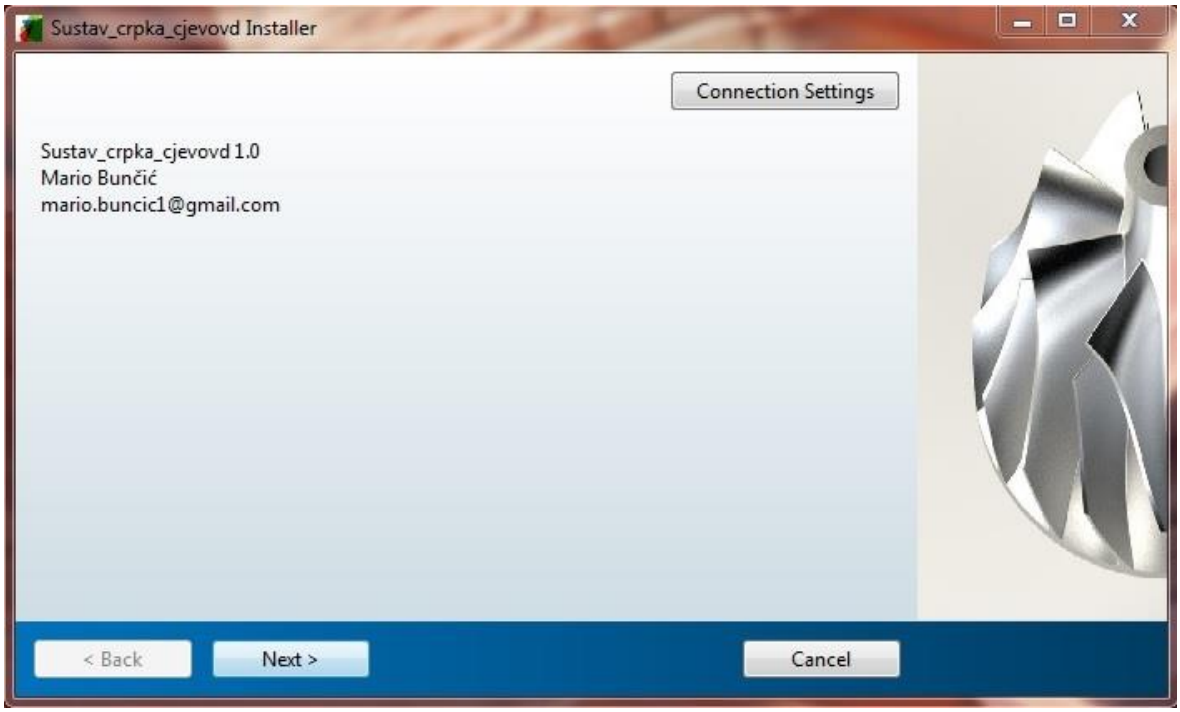


Sl. 7.1 Korisničko sučelje MATLAB Compiler-a

U okviru ovoga rada napravljena je samostojeća aplikacija s uključenim MCR (MATLAB Compiler Runtime). Ovisno o verziji MATLAB-a u kojoj se radi aplikacija, potreban je odgovarajući MCR. Na internetu je dostupna samo najnovija verzija MCR, a budući da je na korisničkom računalu moguća instalacija više različitih MCR-a, MCR je uključen u aplikaciju kako bi se izbjegli problemi s kompatibilnošću. Rezultat korištenja dotičnog alata je instalacijski paket pomoću kojega možemo instalirati aplikaciju na računala korisnika koji ne posjeduju MATLAB. Korisničko sučelje alata MATLAB Compiler prikazano je na slici 7.1.

7.2. Instalacija aplikacije na korisničko računalo

Instalacijski paketi kreirani s MATLAB Compiler-om, korisnici mogu jednostavno pokrenuti i instalirati [18]. Postupak instalacije je isti kao i za sve ostale programe koji se instaliraju preko instalacijskog paketa. Nakon pokretanja instalacijskog paketa, otvara se instalacijski čarobnjak, prikazan na slici 7.2. Pritisne se „Next“ kako bi se započela instalacija, odabere se instalacijska datoteka, potvrdi se odabir i započinje se instalacija. Za samostojeće aplikacije kreirane u MATLAB-u potreban je MCR, spomenut u prethodnom poglavlju. Instalacijski paket kreiran u sklopu ovoga rada sadrži u sebi MCR, te ga automatski instalira. Ovakav način izrade samostojeće aplikacije u MATLAB-u omogućuje da se aplikaciju koriste i oni korisnici koji ne posjeduju MATLAB.



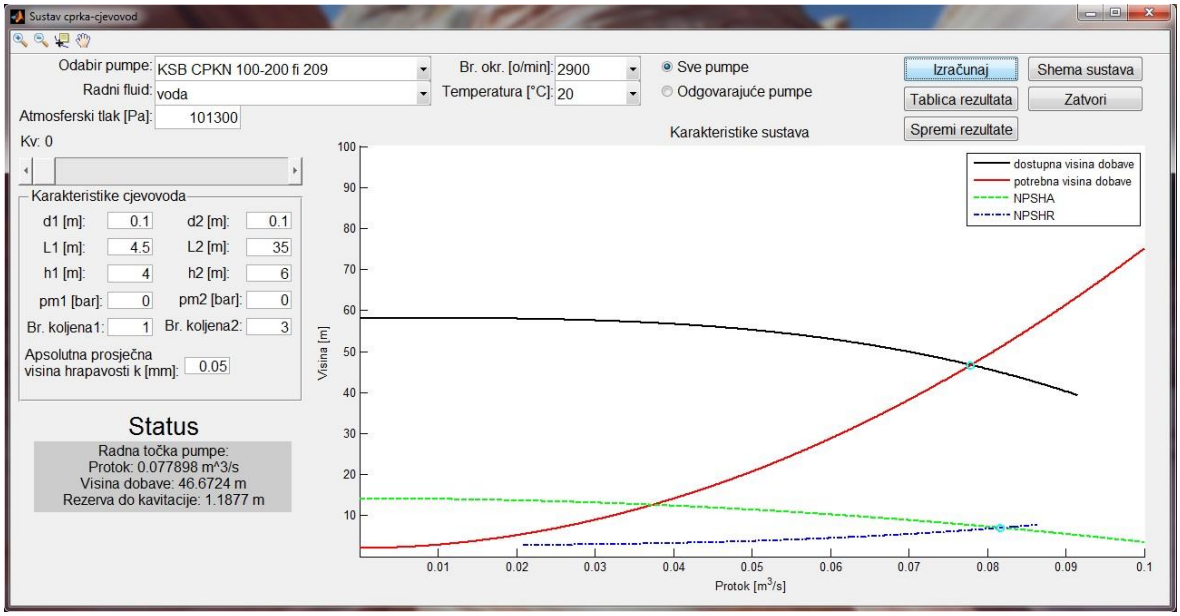
Sl. 7.2 Instalacijski čarobnjak

8. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Glavna smjernica prilikom razvoja aplikacije bila je da se rezultati proračuna što intuitivnije prikažu. Graf korisniku daje vizualnu informaciju o tome gdje je radna točka u odnosu na minimalni i maksimalni protok na kojem pumpa može raditi, i informaciju o tome postoji li presjecište između NPSHR i NPSHA linije, i gdje se to presjecište nalazi u odnosu na radnu točku. Status radne točke u tekstualnom obliku govori točnu informaciju o koordinatama radne točke, i rezervu do kavitacije. Primjeri rezultata nekih proračuna dani su u sljedećim poglavljima.

8.1. Prikaz rezultata

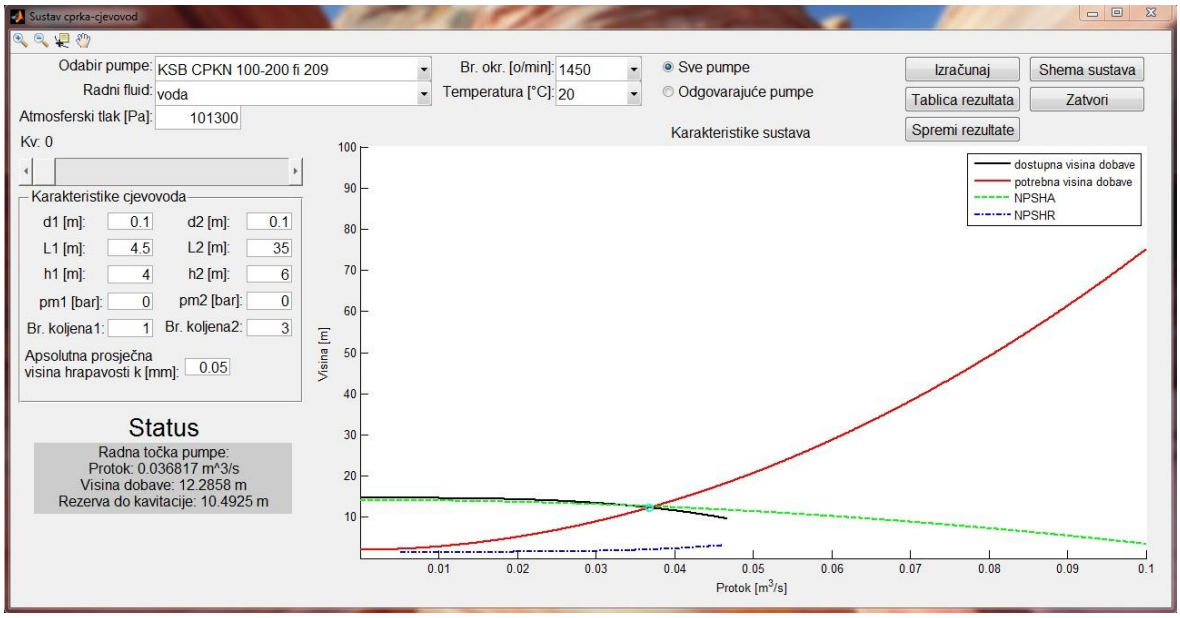
Rezultat proračuna, proizvoljno odabranih parametara cjevovoda, radnog fluida i pumpe te njenog broja okretaja prikazan je na slici 8.1.



Sl. 8.1 Rezultati proračuna

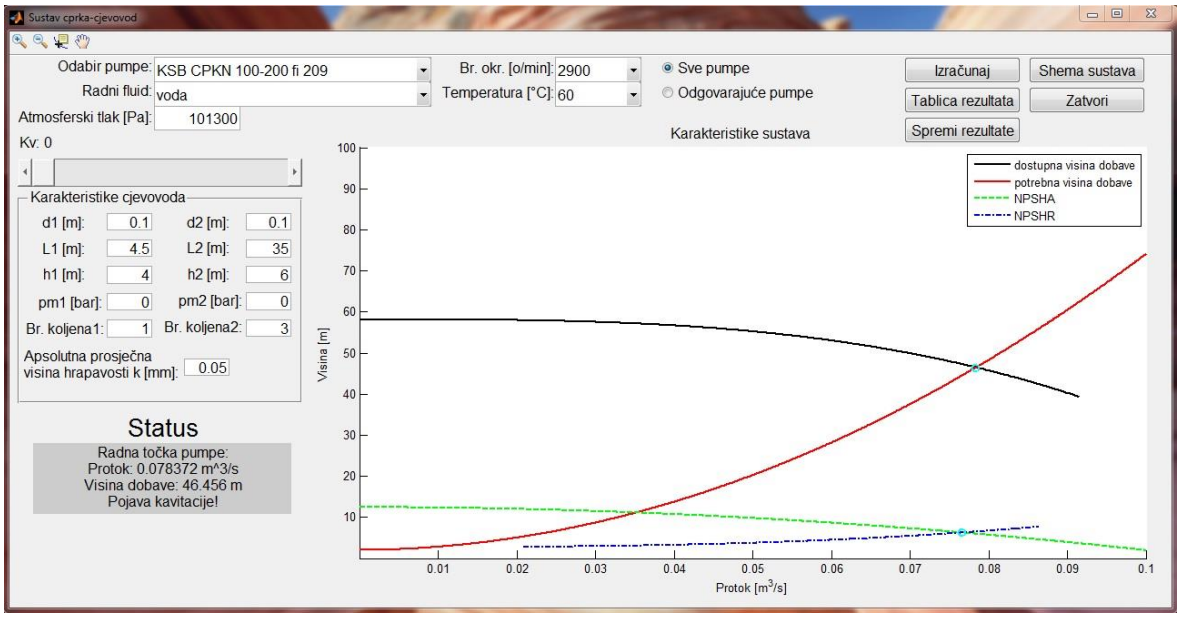
Na slici se vide odabrani parametri cjevovoda s kojima se napravio proračun, radni fluidi njegova temperatura i pumpa proizvođača KSB, model CPKN 100-200, promjera impelera 209 mm, pri 2900 o/min. Kao rezultat proračuna aplikacija je iscrtala graf, sa NPSHR i NPSHA linijama, i linijama potrebne i dostupne visine dobave pumpe. Također rezultat je i status na kojem se u tekstualnom obliku vidi radna točka pumpe te rezerva do kavitacije. Ovaj rezultat možemo usporediti sa istim sustavom cjevovoda, radnim fluidom i istom pumpom, samo sa smanjenim

brojem okretaja sa 2900 o/min na 1450 o/min. Rezultat je prikazan na slici 8.2. Vidljiv je pomak radne točke, nastao zbog smanjenja broja okretaja pumpe čime je znatno smanjena dostupna visina dobave. Vidljivo je i povećanje rezerve do kavitacije, što je također posljedica smanjenja broja okretaja pumpe, čime je neposredno smanjena brzina fluida na ulaznoj prirubnici pumpe.



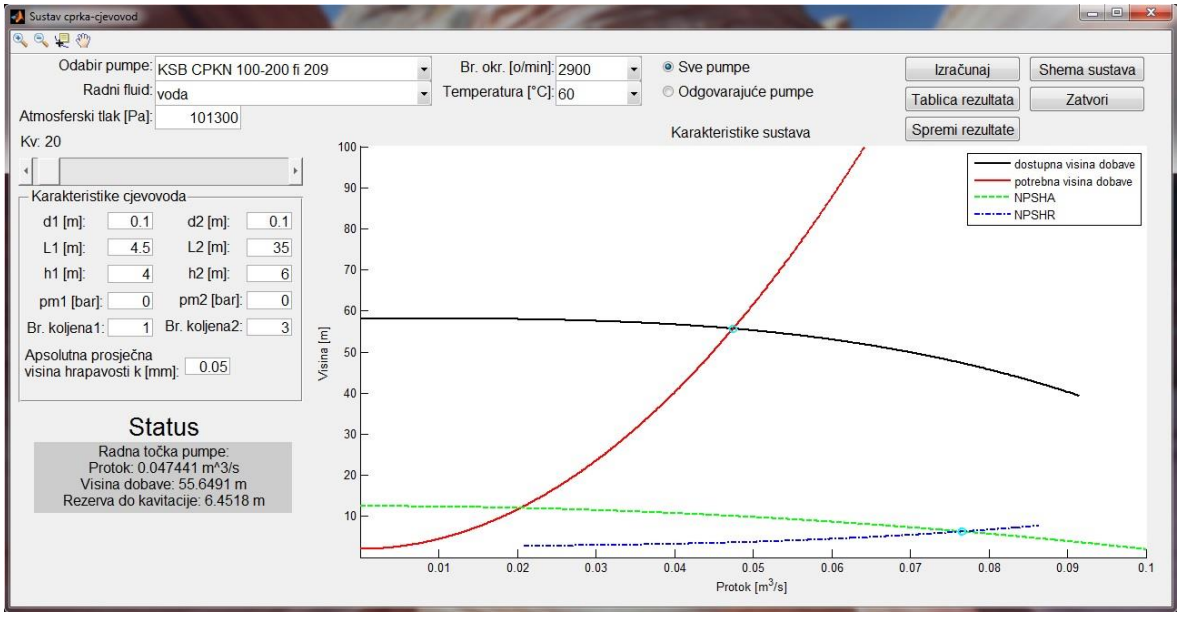
Sl. 8.2 Analiza dobivenih rezultata

Ako bi se npr. umjesto smanjenja broja okretaja, povećala temeratura radnog fluida sa 20°C na 60°C, došlo bi do pojave kavitacije. Poznato je da se povećanjem temperature radnog fluida povećava mogućnost pojave kavitacije, jer fluid u pumpu ulazi bliže točki zasićenja nego kad ima manju temperaturu. Ono što se ne zna unaprijed je hoće li se pri nekoj proizvoljnoj temperaturi za zadani sustav crpka-cjevovod pojaviti kavitacija ili neće. Koristeći aplikaciju u svega par sekundi može se provjeriti koji slučaj će nastati. Rezultat povećanja temperature radnog fluida prikazan je na slici 8.3. U ovom primjeru se teško vidi da je točka presjecišta NPSHR i NPSHA linije lijevo od radne točke pumpe (što znači da dolazi do kavitacije u sustavu), ali je to vidljivo iz statusa sustava.



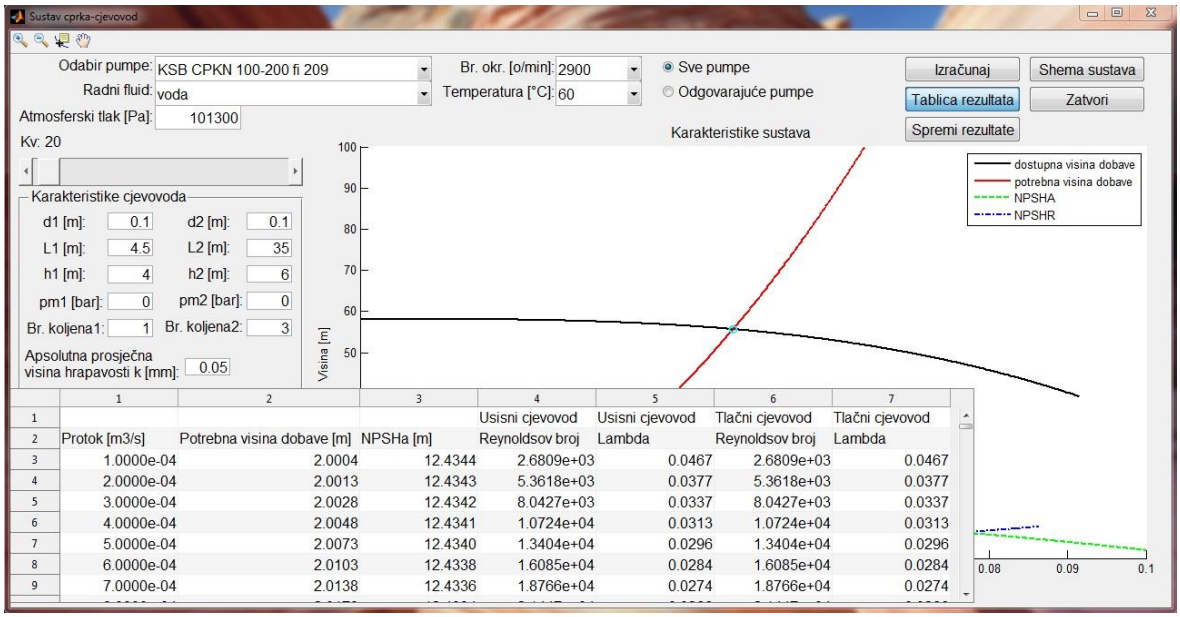
Sl. 8.3 Pojava kavitacije zbog povećanja temperature radnog fluida

Ovdje bi se problem kavitacije u sustavu mogao izbjeći zatvaranjem ventila u tlačnom cjevovodu, čime bi se povećao otpor ventila Kv npr. na koeficijent 20. Time pomičemo radnu točku natrag na lijevu stranu od presjecišta NPSHA i NPSHR linije (linija potrebne visine dobave postaje strmija) čime izbjegavamo pojavu kavitacije. Rezultat je vidljiv na slici 8.4.



Sl. 8.4 Smanjenje protoka zatvaranjem ventila

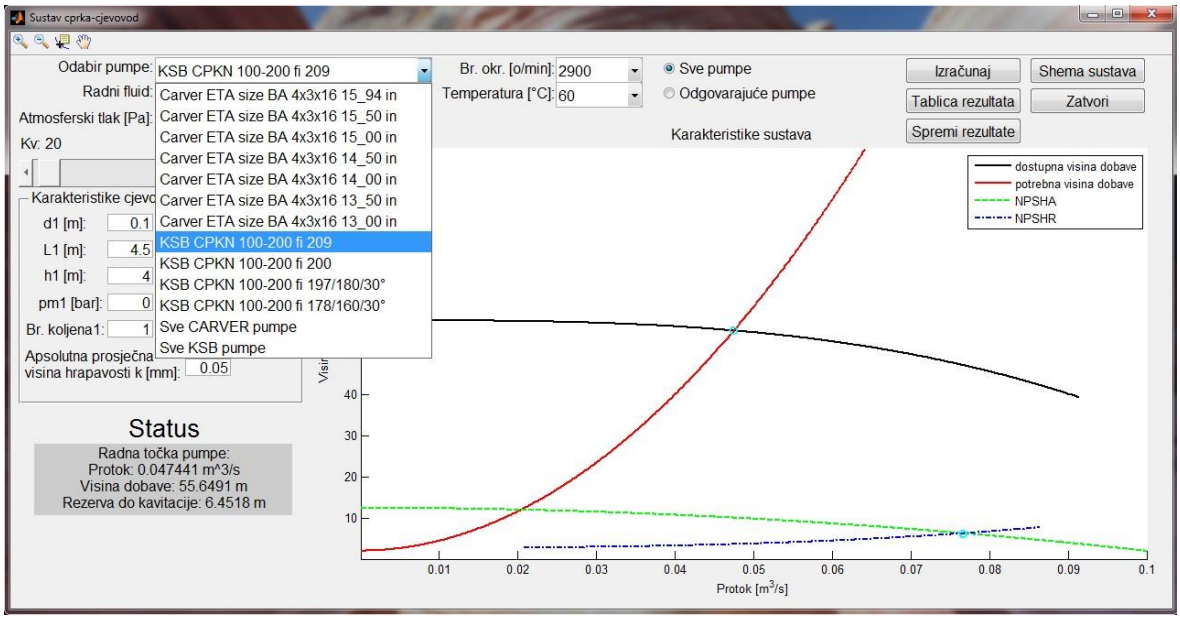
Ako bi korisnika u ovom trenutku proračuna zanimali Reynolds-ovi bojevi i koeficijenti trenja lambda, odabirom opcije „Tablica rezultata“ na korisničkom sučelju pojavila bi se tablica sa svim rezultatima korištenim za crtanje grafa. Tablica nije vidljiva u cijelosti jer se u ovom slučaju proteže kroz 1002 redaka. Tablica je vidljiva na slici 8.5.



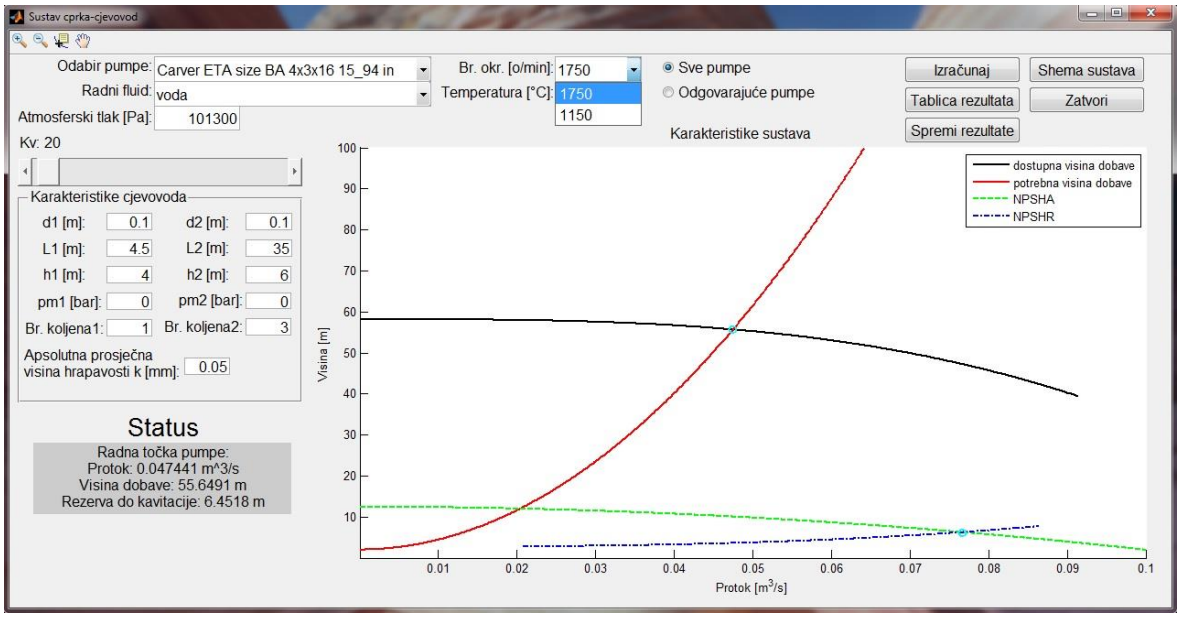
	1	2	3	4	5	6	7
1				Usisni cjevovod	Usisni cjevovod	Tlačni cjevovod	Tlačni cjevovod
2	Protok [m3/s]	Potrebna visina dobave [m]	NPSHa [m]	Reynoldsov broj	Lambda	Reynoldsov broj	Lambda
3	1.0000e-04	2.0004	12.4344	2.6809e+03	0.0467	2.6809e+03	0.0467
4	2.0000e-04	2.0013	12.4343	5.3618e+03	0.0377	5.3618e+03	0.0377
5	3.0000e-04	2.0028	12.4342	8.0427e+03	0.0337	8.0427e+03	0.0337
6	4.0000e-04	2.0048	12.4341	1.0724e+04	0.0313	1.0724e+04	0.0313
7	5.0000e-04	2.0073	12.4340	1.3404e+04	0.0296	1.3404e+04	0.0296
8	6.0000e-04	2.0103	12.4338	1.6085e+04	0.0284	1.6085e+04	0.0284
9	7.0000e-04	2.0138	12.4336	1.8766e+04	0.0274	1.8766e+04	0.0274

Sl. 8.5 Tablica rezultata

Do sada je aplikacija omogućavala odabir bilo koje pumpe iz aplikacije i bilo kojeg broja okretaja koji je moguć za odabranu pumpu budući da je bila odabrana opcija „Sve pumpe“ kao što je vidljivo na prijašnjim slikama. Na slici 8.6 vidljiv je popis svih pumpi a na slici 8.7 mogući brojevi okretaja za pumpe ETA serije proizvođača Carver.

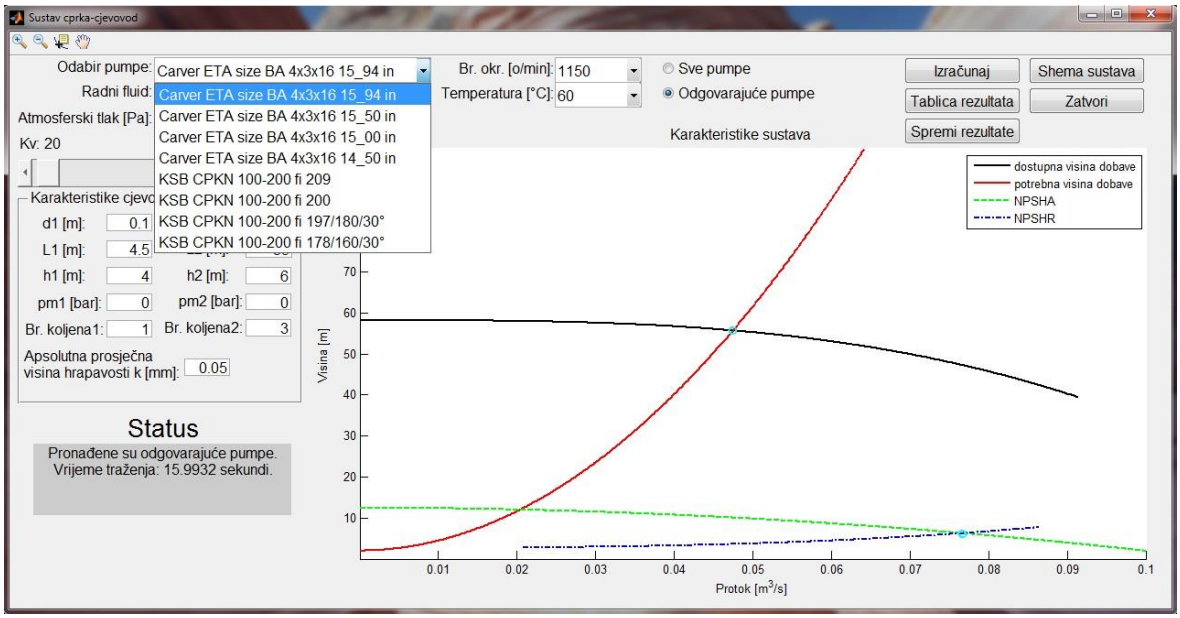


Sl. 8.6 Prikaz svih pumpi

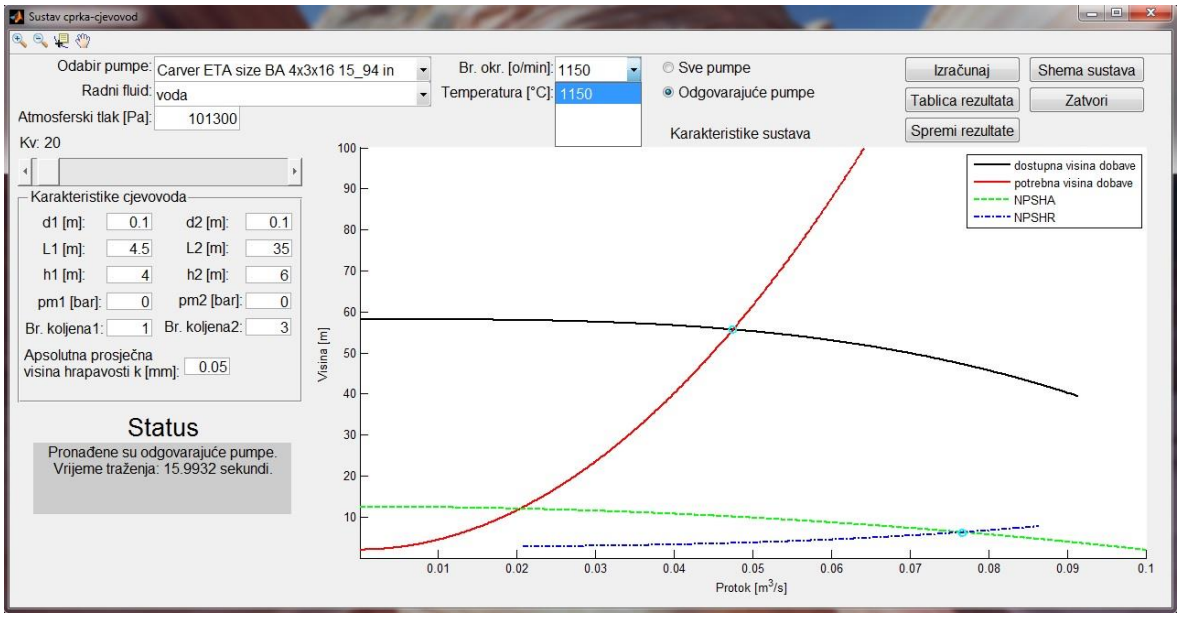


Sl. 8.7 Mogući brojevi okretaja za pumpe Carver ETA

Odabirom opcije „Odgovarajuće pumpe“ aplikacija korisniku dozvoljava odabir samo onih pumpi koje za zadane parametre nebi bile izvan radnog režima. To znači i da dozvoljava odabir samo određenih broja okretaja pumpe. O završetku traženja korisnika obavještava status, kao što je vidljivo na slikama 8.8 i 8.9.



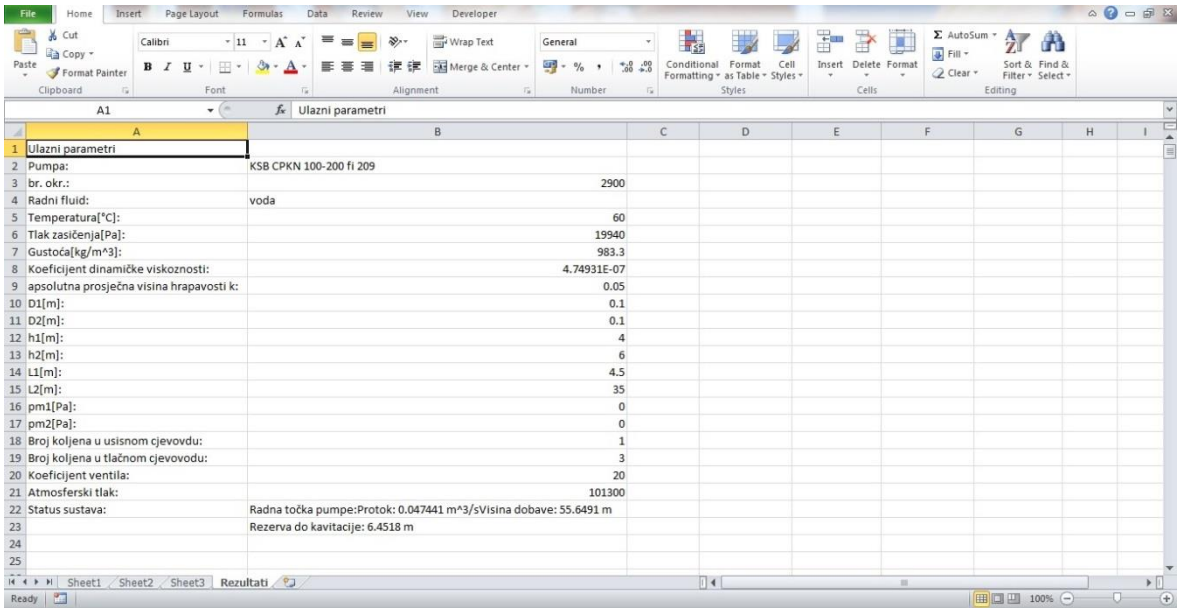
Sl. 8.8 Prikaz odgovarajućih pumpi



Sl. 8.9 Prikaz odgovarajućih brojeva okretaja

8.2. Pohrana rezultata

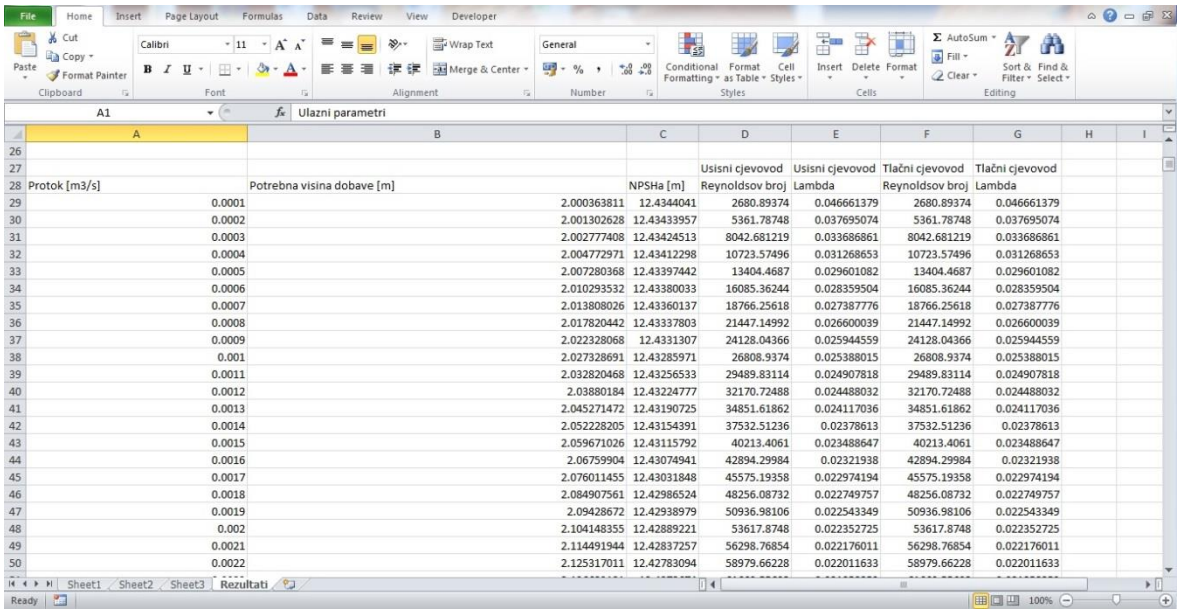
Za spremanje dobivenih rezultata u trajnu memoriju odabire se opcija „Spremi rezultate“. Aplikacija korisniku nudi mogućnost spremanja podataka u CVS datoteku, ili u obliku Excel datoteke. U ovom primjeru rezultati će se spremiti u Excel datoteku. Aplikacija u datoteku dodaje novu stranicu, „Rezultati“. U svojevrsnom zaglavlju novokreirane stranice u datoteci, nalaze se svi ulazni parametri koji su bili zadani od strane korisnika, s kojima je izvršen proračun, te rezultat proračuna u tekstualnom obliku radne točke i rezerve do kavitacije. Zaglavlje novokreiranog dokumenta vidljivo je na slici 8.10.



	A	B
1	Ulazni parametri	
2	Pumpa:	KSB CPKN 100-200 fi 209
3	br. okr.:	2900
4	Radni fluid:	voda
5	Temperatura[°C]:	60
6	Tlak zasičenja[Pa]:	19940
7	Gustoća[kg/m^3]:	983.3
8	Koeficijent dinamičke viskoznosti:	4.74931E-07
9	apsolutna prosječna visina hrapavosti k:	0.05
10	D1[m]:	0.1
11	D2[m]:	0.1
12	h1[m]:	4
13	h2[m]:	6
14	L1[m]:	4.5
15	L2[m]:	35
16	pm1[Pa]:	0
17	pm2[Pa]:	0
18	Broj koljena u usisnom cjevovodu:	1
19	Broj koljena u tlačnom cjevovodu:	3
20	Koeficijent ventila:	20
21	Atmosferski tlak:	101300
22	Status sustava:	Radna točka pumpe:Protok: 0.047441 m^3/sVisina dobave: 55.6491 m
23		Rezerva do kavitacije: 6.4518 m

Sl. 8.10 Zaglavlje kreirane Excel datoteke

Ispod toga nalazi se tablica sa svim međurezultatima računatim od strane aplikacije za potrebe iscrtavanja grafa, uključujući i Reynolds-ove brojeve i koeficijente trenja lambda, kao što je prikazano na slici 9.11.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
26									
27				Usisni cjevovod	Usisni cjevovod	Tlačni cjevovod	Tlačni cjevovod		
28	Protok [m3/s]	Potrebna visina dobave [m]	NPSHa [m]	Reynoldsov broj	Lambda	Reynoldsov broj	Lambda		
29	0.0001	2.000363811	12.4344041	2680.89374	0.046661379	2680.89374	0.046661379		
30	0.0002	2.001302628	12.43433957	5361.78748	0.037695074	5361.78748	0.037695074		
31	0.0003	2.002777408	12.43424513	8042.681219	0.033686861	8042.681219	0.033686861		
32	0.0004	2.004772971	12.43412298	10723.57496	0.031268653	10723.57496	0.031268653		
33	0.0005	2.007280368	12.43397442	13404.4687	0.029601082	13404.4687	0.029601082		
34	0.0006	2.010293532	12.43380033	16085.36244	0.028359504	16085.36244	0.028359504		
35	0.0007	2.013808026	12.43360137	18766.25618	0.027387776	18766.25618	0.027387776		
36	0.0008	2.017820442	12.43337803	21447.14992	0.026600039	21447.14992	0.026600039		
37	0.0009	2.022328068	12.4331307	24128.04366	0.025944559	24128.04366	0.025944559		
38	0.001	2.027328691	12.43285971	26808.9374	0.025388015	26808.9374	0.025388015		
39	0.0011	2.032820468	12.43256533	29489.83114	0.024907818	29489.83114	0.024907818		
40	0.0012	2.03880184	12.43224777	32170.72488	0.024488032	32170.72488	0.024488032		
41	0.0013	2.045271472	12.43190725	34851.61862	0.024117036	34851.61862	0.024117036		
42	0.0014	2.052228205	12.43154391	37532.51236	0.02378613	37532.51236	0.02378613		
43	0.0015	2.059671026	12.43115792	40213.4061	0.023488647	40213.4061	0.023488647		
44	0.0016	2.06759904	12.43074941	42894.29984	0.02321938	42894.29984	0.02321938		
45	0.0017	2.076011455	12.43031848	45575.19358	0.022974194	45575.19358	0.022974194		
46	0.0018	2.084907561	12.42986524	48256.08732	0.022749757	48256.08732	0.022749757		
47	0.0019	2.09428672	12.42938979	50936.98106	0.022543349	50936.98106	0.022543349		
48	0.002	2.104148355	12.42889221	53617.8748	0.022352725	53617.8748	0.022352725		
49	0.0021	2.114491944	12.42837257	56298.76854	0.022176011	56298.76854	0.022176011		
50	0.0022	2.125317011	12.42783094	58979.66228	0.022011633	58979.66228	0.022011633		

Sl 8.11 Ispisana tablica u kreiranoj Excel datoteci

9. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog završnog rada razvijena je aplikacija za izračun radne točke pumpe, te rezerve do kavitacije za jednostavne sustave crpka-cjevovod, s implementiranim realnim pumpama. Tijekom razvoja aplikacije riješeno je kompletno korisničko sučelje, te dodatne mogućnosti koje uključuju:

- traženje odgovarajućih pumpi za zadane parametre cjevovoda i radnog fluida
- spremanje ulaznih parametara i dobivenih rezultata u CVS ili Excel datoteku

Objašnjene su sve do sada razvijene mogućnosti i način rada aplikacije, te je na primjerima pokazan način uporabe i dobiveni rezultati. Ostavljen je prostor za daljnji razvoj aplikacije. Prema mišljenju autora, prvi korak u daljnjem razvoju trebalo bi biti povećanje mogućnosti za korisnika da može dodati u aplikaciju nove pumpe, sa svojim karakteristikama, te na njima vršiti proračun. To bi bio malo veći posao gdje bi trebalo napraviti novu formu, koja bi mogla komunicirati s već postojećom formom, u kojoj bi se upisivale karakteristike pumpi koje se želi dodati, s mogućnošću unosa karakteristika bilo u obliku formula, ili x i y koordinata linija dostupne visine dobave i potrebne usisne visine pumpe. Implementacija takve opcije otvorila bi nove mogućnosti korištenja aplikacije.

Sama aplikacija funkcionira iznad očekivanja i dovoljno je razvijena za daljnja eksperimentiranja. Čak je i postavljeno pitanje proizvođačima pumpi o mogućnosti primjene aplikacije u praksi.

10. POPIS LITERATURE

[1] U.S. Department of Energy's Industrial Technologies Program: *Improving Pumping System Performance*, Second Edition, 2006

[2] www.mathworks.com (pristup 01.06.2015.)

[3] www.mathworks.com/products/matlab/features.html (pristup 01.06.2015.)

[4] MathWorks: *MATLAB Programming Fundamentals*, izdanje 2014b

[5] MathWorks: *MATLAB Creating Graphical User Interfaces*, izdanje 2014b

[6] MathWorks: *MATLAB Object-Oriented Programmming*, izdanje 2014b

[7] Yunus A. Cengel, John M. Cimbala: *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2006

[8] Joško Petrić: *Hidraulika i Pneumatika, 1. Dio: Hidraulika*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2012

[9] Zdravko Virag: *Mehanika fluida: Odabrana poglavlja, primjeri i zadaci*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2007

[10] E.W. McAllister: *Pipeline Rules of Thumb Handbook*, Sixth Edition, 2005

[11] http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation (pristup 01.06.2015.)

[12] Ž. Vuković, I. Halkijević: *Kavitacija u centrifugalnim crpkama*, Pregledni rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet, Zagreb, 2010

[13] Grundfos: *The Sewage pumping handbook*

[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_model (pristup 01.06.2015.)

[15] http://www.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html (pristup 01.06.2015.)

[16] B. Kraut: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987

[17] http://www.mathworks.com/help/map/ref/polyxpoly.html (pristup 01.06.2015.)

[18] MathWorks: *MATLAB Compiler: User's Guide,* izdanje 2014b