

Mogućnosti projektiranja uronjivih centrifugalnih crpki u programu Prosper

Perković, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:745375>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-05**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**MOGUĆNOSTI PROJEKTIRANJA URONJIVIH CENTRIFUGALNIH CRPKI U
PROGRAMU PROSPER**

Diplomski rad

Luka Perković

N410

Zagreb, 2023.

MOGUĆNOSTI PROJEKTIRANJA URONJIVIH CENTRIFUGALNIH CRPKI U PROGRAMU
PROSPER

Luka Perković

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Svrha diplomskog rada je opis mogućnosti projektiranja proizvodnog sustava bušotine ugradnjom uronjive centrifugalne crpke (UCC) u programu Prosper. Prosper je dio softverskog paketa IPM, kojeg razvija i distribuira tvrtka Petroleum Experts. Kao sastavni dio integriranog sustava, s pomoću Prospera je moguće brzo i precizno opisati i razviti sve aspekte proizvodnog i sabirnog sustava nafte i plina, od modeliranja početnog proizvodnog sustava u svim tipovima bušotina do optimizacije i povezivanja površinskih proizvodnih i sabirnih sustava. U radu je najprije prikazano proizvodno modeliranje bušotine X, koja je imala povećani udio vode u proizvodnji te je došlo do pada tlaka u ležištu ispod vrijednosti potrebne za eruptiranje, pa je u skladu s ulaznim podacima i očekivanim rezultatima projektiran proizvodni sustav ugradnjom uronjive centrifugalne crpke. Nakon unosa ulaznih podataka i PVT karakteristika proizvodnog fluida, projektiranje se sastoji od usklađivanja podataka, kreiranja IPR i VLP krivulja, te odabira odgovarajuće crpke. Nakon toga provodi se analiza osjetljivosti sustava u ovisnosti o odabranim promjenjivim proizvodnim parametrima, a u svrhu prognoziranih budućih proizvodnih mogućnosti bušotine.

Ključne riječi: uronjiva centrifugalna crpka, program Prosper, proizvodno modeliranje bušotine

Diplomski rad sadrži: 55 stranica, 9 tablica, 34 slike, i 17 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a
Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a
Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica u trajnom zvanju RGNF-a

POSSIBILITIES OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP DESIGN IN PROSPER SOFTWARE

Luka Perković

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The purpose of this master's thesis is to describe the possibilities of designing a well production system by installing a Electric Submersible Pump (ESP) using the Prosper software. Prosper is part of the software package IPM, developed and distributed by Petroleum Experts. As an integral part of an integrated system, Prosper enables quick and precise modeling and development of all aspects of the oil and gas production and gathering system, from modeling the initial production system in various types of wells to optimization and connection with surface production and gathering systems. In the thesis, the first step is to present the production modeling of well X, which had an increased water cut in production, leading to a pressure drop in the reservoir below the necessary eruption value. In accordance with input data and expected results, a production system is designed by installing a Electric Submersible Pump (ESP). After inputting the data and PVT characteristics of the production fluid, the design process involves data alignment, creating IPR and VLP curves, and selecting the appropriate pump. Subsequently, a sensitivity analysis of the system is conducted based on selected variable production parameters to predict the future production possibilities of the well.

Keywords: Electric Submersible Pump (ESP), Prosper, well production modelling

Thesis contains: 55 pages, 9 tables, 34 figures, and 17 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Sonja Koščak Kolin, Assistant Professor

Reviewers: PhD Sonja Koščak Kolin, Assistant Professor
PhD Vladislav Brkić, Associate Professor
PhD Katarina Simon, Tenured Professor

Defence date: September 28, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	IV
1. UVOD	1
2. SUSTAV S URONJIVOM CENTRIFUGALNOM CRPKOM	2
2.1. Dijelovi sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom	2
2.2. Osnove određivanja teoretske snage centrifugalne crpke	7
2.3. Gubitci prilikom predaje energije rotora fluidu.....	11
2.3.1. Konačni broj lopatica.....	11
2.3.2. Hidraulički gubitci	11
2.3.3. Gubitci zbog curenja	11
2.3.4. Mehanički gubitci	12
2.4. Djelotvornost crpke i stvarna visina podizanja	12
2.5. Pogonska snaga i djelotvornost crpke.....	14
2.6. Utjecaj različitih radnih uvjeta na radne karakteristike crpke	15
2.6.1. Promjena broja okretaja crpke	15
2.6.2. Promjena gustoće fluida.....	16
2.6.3. Promjena promjera rotora	16
2.6.4. Utjecaj viskoznosti.....	16
2.7. Diferencijalni tlak, protok i broj stupnjeva crpke.....	18
2.7.1. Određivanje diferencijalnog tlaka i protoka crpke	18
2.7.2. Određivanje potrebnog broja stupnjeva crpke	20
3. UVOD U KORIŠTENJE PROGRAMA PROSPER.....	22
3.1. Osnovni ulazni podatci proizvodnog sustava	23
3.2. PVT svojstva fluida.....	25
3.3. Podatci o opremi	26
3.3.1. Otklon bušotine.....	27
3.3.2. Površinska oprema	28
3.3.3. Podzemna oprema.....	29
3.3.4. Geotermalni gradijent	30
3.3.5. Prosječne specifične topline.....	31
3.4. Unos podataka o ležištu.....	32

3.4.1.	Model ležišta.....	32
3.4.2.	Podatci o ležištu.....	32
4.	DIZAJN SUSTAVA PROIZVODNJE S URONJIVOM CENTRIFUGALNOM CRPKOM U BUŠOTINI X.....	35
4.1.	Ulazni podatci za bušotinu X.....	35
4.1.1.	PVT podatci.....	35
4.1.2.	Podatci o opremi bušotine X.....	36
4.1.3.	Podatci za proračun IPR krivulje.....	38
4.1.4.	Kriteriji ugradnje centrifugalne crpke.....	39
4.2.	Proizvodni model bušotine X.....	39
4.2.1.	Analiza osjetljivosti i diskusija rezultata.....	49
5.	ZAKLJUČAK.....	53
6.	LITERATURA.....	54

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Proizvodni sustav s uronjivom centrifugalnom crpkom	2
Slika 2-2. Presjek tipičnog uronjenog elektromotora	3
Slika 2-3. Presjek brtvene sekcije.....	4
Slika 2-4. Prikaz jednog stupnja centrifugalne crpke	5
Slika 2-5. Dizajn centrifugalne crpke za radijalni protok (lijevo) i za mješoviti protok (desno)	6
Slika 2-6. Prikaz trokuta brzina na ulasku i izlasku iz rotora	7
Slika 2-7. Promjene visine podizanja zbog gubitaka.....	13
Slika 2-8. Utjecaj svih tipova gubitaka na djelotvornost crpke	14
Slika 2-9. Radna karakteristika centrifugalne crpke.....	15
Slika 2-10. Popravni faktori radnih karakteristika crpke za viskozne fluide.....	17
Slika 2-11. Dijagram tlaka kod ugradnje crpke	19
Slika 2-12. Primjer kataloga za odabir modela centrifugalne crpke.....	21
Slika 3-1. Sučelje programa Prosper za unos podataka o proizvodnom sustavu	25
Slika 3-2. Sučelje programa Prosper za unos PVT podataka o fluidima.....	26
Slika 3-3. Početni prozor programa Prosper za unos podataka o opremi.....	27
Slika 3-4. Prozor programa Prosper za unos podataka o dubini bušotine	28
Slika 3-5. Prozor programa Prosper za unos podataka o površinskoj opremi.....	29
Slika 3-6. Prozor programa Prosper za unos podataka o podzemnoj opremi.....	30
Slika 3-7. Prozor programa Prosper za unos podataka za proračun geotermalnog gradijenta	31
Slika 3-8. Sučelje programa Prosper za unos podataka za konstrukciju IPR krivulje.....	33
Slika 3-9. Prozor za podatke o dizajnu crpke	34
Slika 4-1. Početno sučelje u programu Prosper	40
Slika 4-2. Ulazni podaci za proizvodni model bušotine X.....	41
Slika 4-3. Ulazni PVT podaci	42
Slika 4-4. Opcija <i>Matching</i> za usklađivanje korelacija s mjerenim podacima.....	43
Slika 4-5. Prozor s prikazom specifičnih toplina nafte, plina i vode.....	44
Slika 4-6. Prozor za određivanje IPR krivulje	45
Slika 4-7. IPR krivulja s rezultatima	46
Slika 4-8. Prozor za projektiranje ESP	47
Slika 4-9. Dijagram radnog područja crpke.....	48

Slika 4-10. Odabir varijabli za analizu osjetljivosti	49
Slika 4-11. Prikaz radnih točaka crpke dobivenih analizom osjetljivosti.....	50
Slika 4-12. Prikaz radnih točaka proizvodnog sustava dobivenih analizom osjetljivosti ...	51
Slika 4-13. Radna točka proizvodnog sustava za odabran slučaj analize osjetljivosti	52

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Ulazni PVT podatci o bušotini X	35
Tablica 4-2. Mjereni podatci na temperaturi 100°C	36
Tablica 4-3. Podatci o odklonu bušotine X	36
Tablica 4-4. Podatci o podzemnoj opremi bušotine X	37
Tablica 4-5. Podatci o geotermalnom gradijentu za bušotinu X	37
Tablica 4-6. Specifične topline za naftu, plin i vodu.....	38
Tablica 4-7. Podatci o modelu ležišta i korištenim korelacijama.....	38
Tablica 4-8. Podatci za proračun IPR krivulje	38
Tablica 4-9. Kriteriji za ugradnju centrifugalne crpke	39

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	m	Širina uzorka fluida
B _o	m ³ /m ³	Volumni koeficijent za naftu
D	m	Promjer rotora
dF	N	Centrifugalna sila
dm	g	Masa uzorka fluida
dR	m	Debljina uzorka fluida
E	J	Energija izražena po masi uzorka fluida
H	m	Geodetska visina fluida
H _{vis}	m	Visina podizanja fluida veće viskoznosti
K	-	Konstanta proporcionalnosti
N	s ⁻¹	Broj okretaja
p	Pa	Tlak
P _h	W	Hidraulička snaga
P _p	W	Pogonska snaga
p _p	Pa	Potisni tlak crpke
p _s	Pa	Utisni tlak crpke
q	m ³ /s	Protok
q _o	m ³ /s	Volumni protok nafte
q _p	Pa	Stvarni (in-situ) protok crpke
q _{vis}	m ³ /s	Protok fluida veće viskoznosti
R	m	Polumjer rotora
RdΦ	m	Kružna duljina uzorka fluida
R _s	m ³ /m ³	Faktor otopljenog plina
u	m/s	Obodna brzina
v	m/s	Brzina
v _m	m/s	Radijalna brzina
v _θ	m/s	Obodna komponenta brzine v
W	J	Rad
η _h	-	Hidraulička djelotvornost crpke
η _m	-	Mehanička djelotvornost crpke

η_v	-	Volumetrijska djelotvornost crpke
η_{vis}	-	Djelotvornost crpke za viskozni fluid
Ω	s^{-1}	Kutna brzina
ΔP_{DF}	W	Gubitak snage
Δp_{pump}	Pa	Diferencijalni tlak crpke
γ_g	-	Relativna gustoća plina
ρ	kg/m^3	Gustoća
ρ_o	kg/m^3	Gustoća nafte
ρ_s	kg/m^3	Gustoća nafte koja se crpi na razini crpke

1. UVOD

Proces eksploatacije ugljikovodika sastoji se od nekoliko faza, počevši s istražnim bušenjem, nakon kojeg u slučaju komercijalnog otkrića slijedi opremanje i proizvodno modeliranje bušotine te njeno puštanje u rad. U početnom periodu proizvodnje je za podizanje fluida od dna do ušća te do sabirnog dijela sustava najčešće dovoljna energija ležišta, koja se očituje u razlici ležišnog i dinamičkog tlaka na dnu bušotine. Ta razlika tlaka naziva se depresija, a način proizvodnje eruptivni. Zbog depresije fluid uspijeva svladati hidrauličke otpore u uzlaznim cijevima te dotječe u površinski sabirni sustav kroz sustav priključnih cjevovoda. Kontinuiranom proizvodnjom i odmicanjem vremena proizvodnje, tlak u ležištu pada do razine pri kojoj fluid nije u mogućnosti svladati sve hidrauličke otpore. Tada se radi povećanja iscrpka, odnosno u svrhu daljnjeg rada proizvodnog sustava, prelazi na uporabu mehaničkih metoda podizanja fluida (engl. *artificial lift*). Preko 90% proizvodnih bušotina na svijetu koristi neku od metoda mehaničkog podizanja fluida (Schlumberger, 2015). Mehaničke metode zasnivaju se na dva principa (Abdelhady et al., 2020):

1. Smanjenje gustoće hidrostatičkog stupca kapljevine utiskivanjem plina u bušotinu – plinski lift;
2. Ugrađivanje mehaničkih uređaja u bušotinu, čime se postiže povećanje proizvedene količine kapljevine – vijčane crpke, dubinske crpke s klipnim šipkama, uronjive centrifugalne crpke (UCC) itd.

U usporedbi s ostalim spomenutim principima, uronjive centrifugalne crpke (engl. *ESP – Electric Submersible Pump*) koriste se u otprilike 15% ukupnog broja proizvodnih bušotina koje koriste metode mehaničkog podizanja kapljevine (Pumps and Systems, n.d.) te se smatraju jednim od najučinkovitijih i najekonomičnijih načina proizvodnje kapljevine s velikih dubina pod različitim bušotinskim uvjetima (Sarvestani i Hadipour, 2019). Među svim ostalim razvijenim metodama mehaničkog podizanja fluida, ova se metoda smatra najboljom za korištenje pri niskoj depresiji i za veliki volumen fluida (Saputelli i Maraven, 1997). Osnovna oprema sustava uronjive centrifugalne crpke sastoji se od elektromotora, brtvene sekcije, plinskog separatora (usisne sekcije), same centrifugalne crpke te opreme potrebne za električno upravljanje crpkom, a koja se sastoji od sklopa električnih vodova, površinskog upravljačkog uređaja, razvodne kutije i transformatora (Brown, 1984).

2. SUSTAV S URONJIVOM CENTRIFUGALNOM CRPKOM

U ovom poglavlju su prikazani glavni elementi sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom: njegovi dijelovi i oprema potrebna za rad, tehničke karakteristike same crpke te osnovni pojmovi potrebni za razumijevanje rada u računalnom programu Prosper.

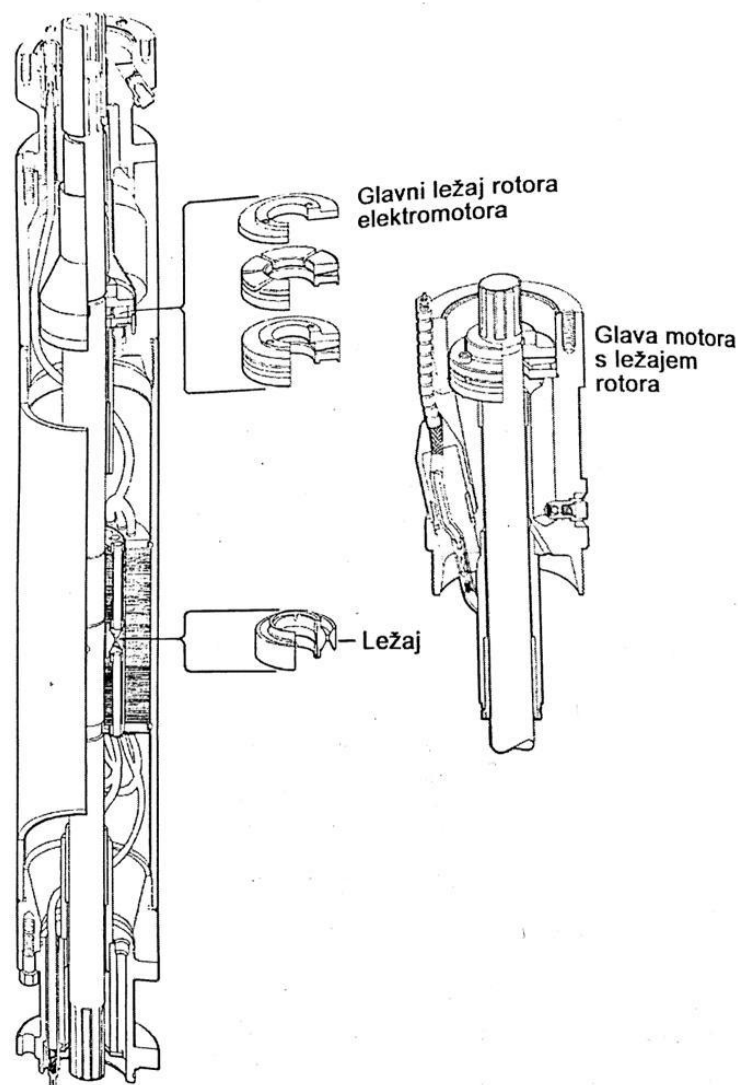
2.1. Dijelovi sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom

Radi lakšeg shvaćanja odabira i projektiranja sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom, potrebno je pobliže objasniti od kojih dijelova se sastoji i koji je njihov princip rada. Cjelokupni sustav prikazan je Slikom 2-1., a najvažniji dijelovi su navedeni u nastavku redosljedom od dna bušotine prema površini.



Slika 2-1. Proizvodni sustav s uronjivom centrifugalnom crpkom (Kimray, n.d.)

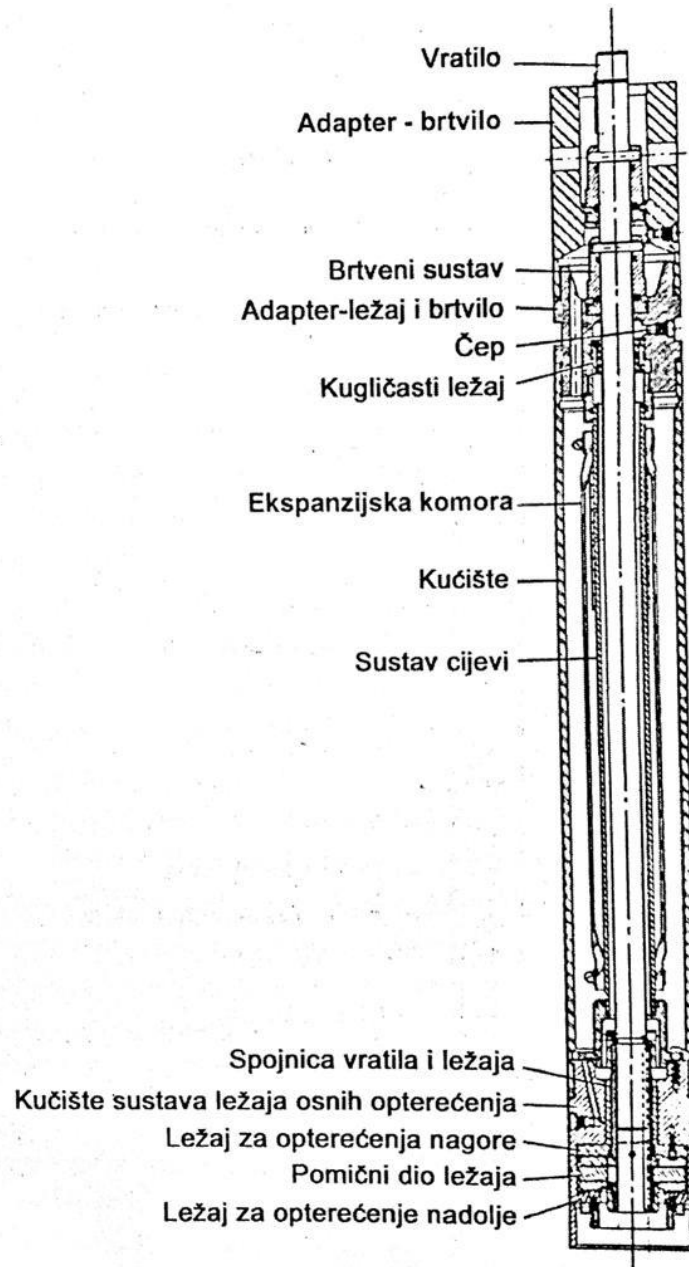
Elektromotor je uronjeni element koji služi kao pogonska sila za pokretanje crpke. Da bi se crpke pokrenule, koriste se dvopolni, trofazni, kavezni električni motori indukcijskog tipa. Element koji apsorbira osne udarce na motor naziva se glavni nosač motora i on nosi težinu rotora. U kućištu motora nalazi se ulje koje služi za postizanje dielektrične čvrstoće, podmazivanje nosača motora i postizanje toplinske vodljivosti. Toplina koja se stvara podmazivanjem nosača motora prenosi se uljem s nosača na kućište motora, a potom s kućišta na bušotinski fluid koji je u stalnom kontaktu s vanjskim dijelom motora. Stalna potreba za odvođenjem topline od motora uvjetuje da se motor uvijek nalazi iznad razine utjecanja kapljevine iz ležišta u kanal bušotine. Na Slici 2-2. vidljiv je presjek uobičajenog elektromotora.



Slika 2-2. Presjek tipičnog uronjenog elektromotora (Zelić i Čikeš, 2006)

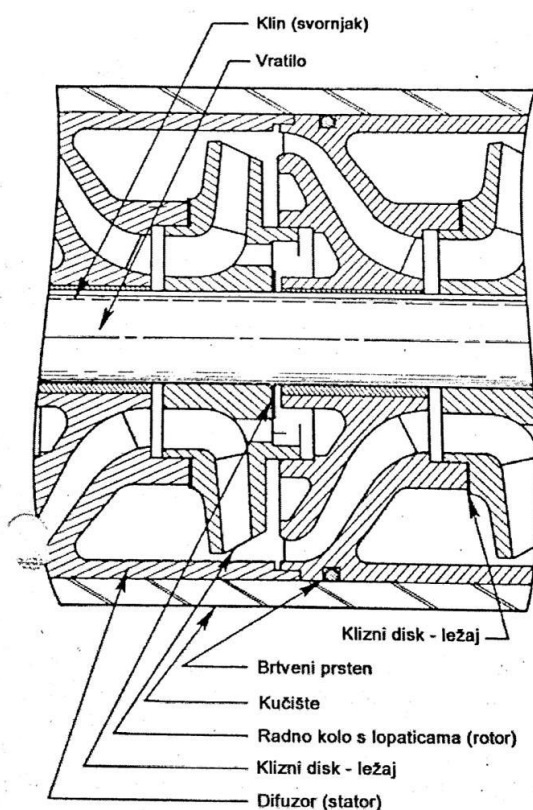
Brtvena sekcija, prikazana na Slici 2-3. ima četiri glavne funkcije:

- Povezuje pogonsku osovinu motora s osovinom crpke te tako spaja kućišta motora i crpke;
- Smješta glavni nosač crpke kako bi preuzimao aksijalne udarce koje crpka stvara;
- Sprječava ulaz bušotinskih fluida u kućište motora te
- Osigurava spremanje ulja u ekspanzijskoj komori za vrijeme ekspanzije ulja zbog rada motora.



Slika 2-3. Presjek brtvene sekcije (Zelić i Čikeš, 2006)

Plinski separator ili usisna sekcija smještena je između brtvene sekcije i crpke, a služi za odvajanje slobodnog plina iz kapljevine i usmjeravanje tog plina u prstenasti prostor (Schlumberger, n.d.). Važno je napomenuti da ovaj element teoretski nije obavezan u sustavu, u slučaju da je u fluidu udio plinske faze dovoljno malen da neće smetati radu same crpke. Uronjiva centrifugalna crpka, kao centralni dio ovog sustava (Slika 2-1), nalazi se iznad plinskog separatora. Način rada uronjive centrifugalne crpke je stupnjevit, s tim da se svaki radni stupanj sastoji od rotora s lopaticama i nepomičnog difuzora. Prikaz jednog stupnja crpke nalazi se na Slici 2-4.

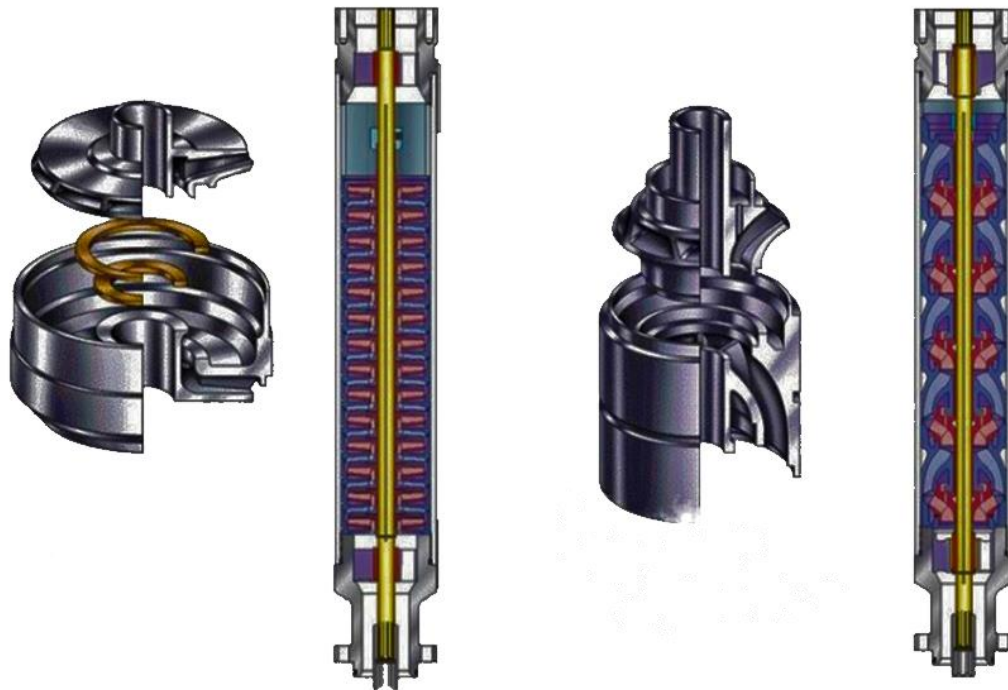


Slika 2-4. Prikaz jednog stupnja centrifugalne crpke (Zelić i Čikeš, 2006)

Proces podizanja kapljevine pomoću crpke je sljedeći (Abbas, 2020):

1. Fluid ulazi u jedan od stupnjeva crpke kroz usisnu stranu;
2. Kretanjem od usisne strane prema potisnoj strani kroz rotor, čestice se ubrzavaju te im se povećava kinetička energija;
3. Dolazi do pretvorbe dijela kinetičke energije u potencijalnu energiju koja se manifestira kao tlak, odnosno povećanje visine stupca fluida;
4. Fluid ulazi u idući stupanj crpke te se proces ponavlja onoliko puta koliko stupnjeva crpka ima

Protok u centrifugalnoj crpki može biti radijalni i mješoviti, što je određeno konstrukcijom same crpke (Slika 2-5). Kod radijalnog protoka fluid se u impeleru kreće okomito na os impelera, a kod mješovitog protoka fluid se kreće u obliku konusa do kojeg dolazi zbog istovremenog protjecanja okomito na os impelera i paralelno s njom.



Slika 2-5. Dizajn centrifugalne crpke za radijalni protok (lijevo) i za mješoviti protok (desno) (Abbas, 2020)

Električni kablovi, površinski upravljački uređaj, razvodna kutija i transformator dijelovi su sustava centrifugalne crpke koji nisu direktno povezani sa samim protokom fluida, nego služe primarno za opskrbu uronjenog elektromotora električnom energijom. Potrebno je napomenuti kako je iznimno važno ovu opremu uskladiti s elektromotorom, odnosno osigurati da u svakom trenutku elektromotor bude opskrbljen električnom energijom (Brown, 1982).

2.2. Osnove određivanja teoretske snage centrifugalne crpke

Zelić i Čikeš (2006) dali su pregled osnovnih jednažbi koje se koriste kod dizajna sustava s urošnjivim centrifugalnim crpkama. Da bi se razumjelo bilo koju od danih jednažbi, potrebno je poznavati osnovnu jednažbu očuvanja energije. U slučaju idealnog i nestlačivog fluida, to je osnovna Bernoullijeva jednažba:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + H = konst. \quad (2-1)$$

gdje su:

p – tlak, Pa

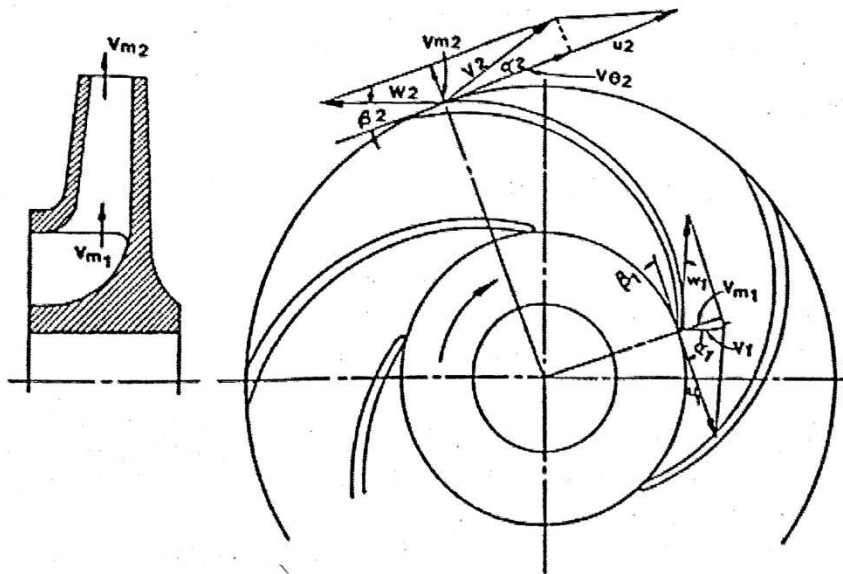
ρ – gustoća fluida, kg/m^3

g – gravitacijsko ubrzanje, $9,80665 \text{ m/s}^2$

v – brzina, m/s

H – geodetska visina fluida, m

Proračun protoka fluida kroz crpku i sama konstrukcija crpke temelje se na jednodimenzionalnom protoku, pri čemu se zanemaruje sekundarno gibanje do kojeg dolazi prilikom izlaska fluida iz rotora. Druga pretpostavka je da se fluid kreće točno kroz prolaze u rotoru, a moguće nastale pogreške ispravljaju se empirijski utvrđenim faktorima (Zelić i Čikeš, 2006). Na Slici 2-6. nalaze se prikaz dijagrama brzina protjecanja u rotoru te prikaz trokuta brzina na ulasku u rotor i izlasku iz njega.



Slika 2-6. Prikaz trokuta brzina na ulasku i izlasku iz rotora (Zelić i Čikeš, 2006)

Brzina čestice fluida koja prolazi rotorom, v (v_1 ili v_2 za dva različita slučaja) rastavlja se u dvije komponente: Obodnu brzinu, u (u_1 ili u_2) i relativnu brzinu, w (w_1 ili w_2). Postupak proračuna ovih dviju komponenti je grafički, korištenjem metode trokuta brzina.

Nakon što je utvrđena brzina prolaska fluida kroz impeler, potrebno je proračunati energiju koju daje impeler, a koja je zapravo visina do koje impeler podiže fluid. Taj proračun temelji se na tri pretpostavke:

1. Izlazak fluida iz impelera je tangencijalan na površinu lopatice – to je moguće samo u slučaju neograničenog broja lopatica,
2. Impeler je u potpunosti zapunjen protočnim fluidom,
3. Brzine fluida iste su na svim strujnicama u točkama slične udaljenosti od središta impelera.

Prvi korak kod navedenog proračuna je promatranje jako malog uzorka fluida određene duljine, debljine i kružne duljine, koji ima kutnu brzinu kojom rotira s impelerom.

Masa uzorka fluida dana je kao:

$$dm = \rho b R d\Phi dR \quad (2-2)$$

gdje su:

dm – masa uzorka fluida, g

b – širina uzorka fluida, m

dR – debljina uzorka fluida, m

$Rd\Phi$ – kružna duljina uzorka fluida, m

Na danu masu fluida djeluje centrifugalna sila:

$$dF = dmR\omega^2 \quad (2-3)$$

pri čemu je:

dF – centrifugalna sila, N

ω – kutna brzina, s^{-1}

Preko prethodne dvije jednačbe dolazi se do jednačbe za porast tlaka uslijed djelovanja centrifugalne sile:

$$dp = \frac{dF}{dA} = \frac{\rho b R^2 \omega^2 d\Phi dR}{b R d\Phi} = \rho R \omega^2 dR \quad (2-4)$$

gdje je:

dA – površina, m^2

Daljnjim izvedom (Zelić i Čikeš, 2006) dobiva se izraz za ukupnu energiju predanu fluidu, koja iznosi:

$$W = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(H_2 - H_1) \quad (2-5)$$

Po Bernoulliju, jednačba strujanja idealnog fluida pri jednolikoj rotaciji glasi:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} + gH_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} + gH_2 \quad (2-6)$$

gdje je:

$w_{1,2}$ – relativna brzina, kao što je prikazano na slici 2-6

Za fluid određene gustoće rotor razvija teoretski tlak izražen ovako:

$$p = \rho(u_2 v_{\theta 2} - u_1 v_{\theta 1}) \quad (2-7)$$

Iz čega visina dobave crpke glasi:

$$H = \frac{1}{g}(u_2 v_{\theta 2} - u_1 v_{\theta 1}) \quad (2-8)$$

Temeljem trokuta brzina prikazanom na Slici 2-8., može se zaključiti kako je obodna komponenta apsolutne brzine v jednaka:

$$v_{\theta} = \frac{v_m}{\tan \alpha} = u - \frac{v_m}{\tan \beta} \quad (2-9)$$

gdje je:

v_{θ} – obodna komponenta apsolutne brzine, m/s

v_m – radijalna brzina, m/s

Radijalna brzina na određenom polumjeru rotora R prema jednačbi kontinuiteta može se izraziti kao:

$$v_m = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi R b} = \frac{q}{\pi D b} \quad (2-10)$$

gdje su:

R – polumjer rotora, m

q – protok fluida, m

D – promjer rotora, m

Ova jednadžba se može koristiti za ulaz fluida u rotor i za izlaz fluida iz rotora.

Ubacivanjem jednadžbe 2-10 u jednadžbu 2-9 dobiva se sljedeći izraz za obodnu komponentu apsolutne brzine:

$$v_{\theta} = u - \frac{q}{\pi D b \tan \alpha} \quad (2-11)$$

Obodna brzina u izražava se kao:

$$u = \omega R = \frac{\omega D}{2} \quad (2-12)$$

Iz čega slijedi izraz za energiju dobave crpke izraženu preko njenih geometrijskih karakteristika:

$$W = \frac{1}{4} \omega^2 (D_2^2 - D_1^2) - \frac{\omega q}{2\pi} \left(\frac{1}{b_2 \tan \beta_2} - \frac{1}{b_1 \tan \beta_1} \right) \quad (2-13)$$

u kojem indeks 1 označava vrijednosti na ulazu u rotor, dok indeks 2 označava vrijednosti na izlazu iz rotora.

Energija izračunata jednadžbom 2-13 je specifična, odnosno njom se izražava snaga predana fluidu po jedinici masenog protoka ρq . Množenjem s masenim protokom, dobiva se snaga predana fluidu:

$$P = \rho \left[\frac{1}{4} * \omega^2 q (D_2^2 - D_1^2) - \frac{\omega q^2}{2\pi} \left(\frac{1}{b_2 \tan \beta_2} - \frac{1}{b_1 \tan \beta_2} \right) \right] \quad (2-14)$$

Izražena snaga predana fluidu za idealni fluid uvijek je jednaka snazi za pokretanje rotora. Međutim, u stvarnosti je zbog raznih faktora ona manja od snage potrebne za pokretanje rotora zbog gubitka energije u samom sustavu, do kojeg dolazi zbog raznih čimbenika, a glavni su opisani u nastavku.

2.3. Gubitci prilikom predaje energije rotora fluidu

2.3.1. Konačni broj lopatica

Rad rotora je takav da se on okreće oko svoje osi. Prilikom te rotacije, fluid zbog svoje inercije ima tendenciju kretati se u suprotnom smjeru odnosno na rotor. Sama količina fluida koji na taj način cirkulira ovisi o obliku prolaza u rotoru (Morrison et al., 2014). Što je više lopatica, manja je udaljenost između lopatica te one bolje provode fluid, odnosno manja je cirkulacija fluida. Ranije prikazanim Eulerovim jednadžbama dan je izračun karakteristika pumpe u slučaju neograničenog, odnosno idealnog broja lopatica. Obzirom da je takav rotor u praksi tehnički nemoguće proizvesti, stvarna visina dobave će uvijek biti manja nego ranije prikazanim jednadžbama.

2.3.2. Hidraulički gubitci

Hidraulički gubitci primarno su rezultat utjecaja trenja pri protoku fluida kroz rotor. Također, oni uključuju i gubitke energije zbog udaranja fluida u izvinutu lopaticu rotora, gubitke energija zbog vrtloženja na izlazu iz rotora te gubitke zbog separacije fluida prilikom protjecanja kroz prolaze rotora. Hidraulički se gubitci procjenjuju prema podacima dobivenim empirijskim testiranjem crpki. Hidraulička djelotvornost crpke, η_h , omjer energije dobivene iz crpke prema energiji predanoj fluidu.

2.3.3. Gubitci zbog curenja

Ovi su gubitci izraženi kao gubitci volumena fluida tijekom rada crpke. Postoje tri mjesta gdje su mogući gubitci fluida, ovisno o izvedbi crpke:

- Curenje između statora i rotora,
- Curenje između dva uzastopna stupna u crpki, u slučaju višestupanjske izvedbe crpke i
- Curenje kroz otvore za održavanje ravnoteže osnovog naprezanja crpke.

Stvarna količina curenja ovisi o razlici tlaka kroz zazor, veličini zazora, brtvenom sustavu, razmaku između rotora i stijenki statora te o mnogim drugim konstrukcijskim karakteristikama crpke (Zelić i Čikeš, 2006)

Volumetrijska djelotvornost crpke, η_v , omjer je protoka fluida izmjerene kod crpke i protoka fluida kroz rotor.

2.3.4. Mehanički gubici

Glavni uzrok mehaničkih gubitaka crpke je trenje diska. Za rotaciju kućišta rotora ispunjenog fluidom potrebna je snaga koju dobavlja elektromotor. Radom crpke, ta snaga prelazi u toplinu koja se predaje fluidu, zbog čega raste temperatura fluida. Fluid se zbog djelovanja centrifugalne sile pritišće između lopatica rotora i stijenki statora, a njega nadomješta novi volumen fluida koji protječe uz stijenke statora prema centru rotora.

Gubitak snage zbog trenja diska izražava se kao (Zelić i Čikeš, 2006):

$$\Delta P_{DF} = KN^3D^5\rho \quad (2-15)$$

gdje su:

ΔP_{DF} – gubitak snage, W;

N – broj okretaja, s^{-1} ;

D – vanjski promjer diska, m;

ρ – gustoća fluida, kg/m^3 ;

K – konstanta proporcionalnosti

Vrijednost konstante K ovisi o zazoru između rotora i stijenki statora, hrapavosti lopatica rotora i dimenzija diska. Za razliku od prethodna dva tipa gubitaka, mehanički gubici nemaju utjecaja na visinu dobave crpke, ali direktno utječu na snagu potrebnu za pokretanje crpke. Mehanička djelotvornost crpke omjer je snage predane fluidu i snage predanoj crpki od strane elektromotora, a označava se kao η_m .

2.4. Djelotvornost crpke i stvarna visina podizanja

Ukupna djelotvornost crpke dana je umnoškom hidrauličke djelotvornosti, volumetrijske djelotvornosti i mehaničke djelotvornosti crpke, a može se izraziti i kao omjer hidrauličke i pogonske snage crpke:

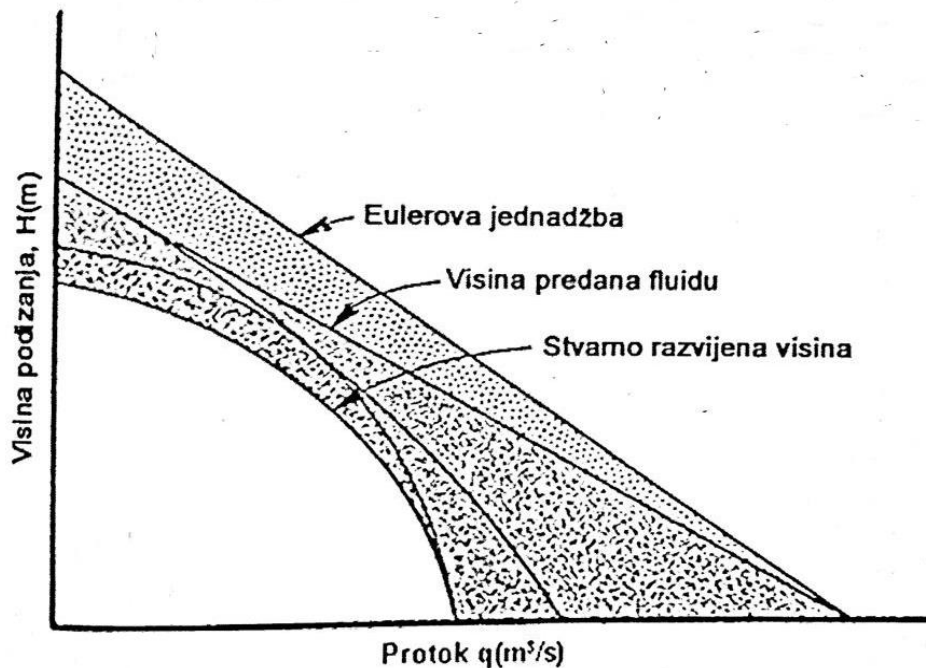
$$\eta = \eta_h \eta_v \eta_m = \frac{P_h}{P_p} \quad (2-16)$$

gdje su:

P_h – hidraulička snaga, W;

P_p – pogonska snaga, W

Rotori svih crpki konstruiraju se za neki protok i maksimalnu visinu podizanja, u svrhu postizanja dobre djelotvornosti. Pri višem protoku od predviđenog, fluid koji ulazi među lopatice rotora udara u njih te se stvara turbulencija koja smanjuje maksimalnu visinu podizanja. Turbulencija raste proporcionalno s povećanjem protoka u odnosu na predviđenu veličinu. Na Slici 2-7. vidljivo je kako pojedini gubici utječu na visinu podizanja crpke. Može se zaključiti kako pri niskim protocima najveći utjecaj na visinu podizanja imaju gubici uslijed konačnog broja lopatica, dok pri visokim protocima najveći utjecaj na visinu podizanja imaju hidraulički gubici.



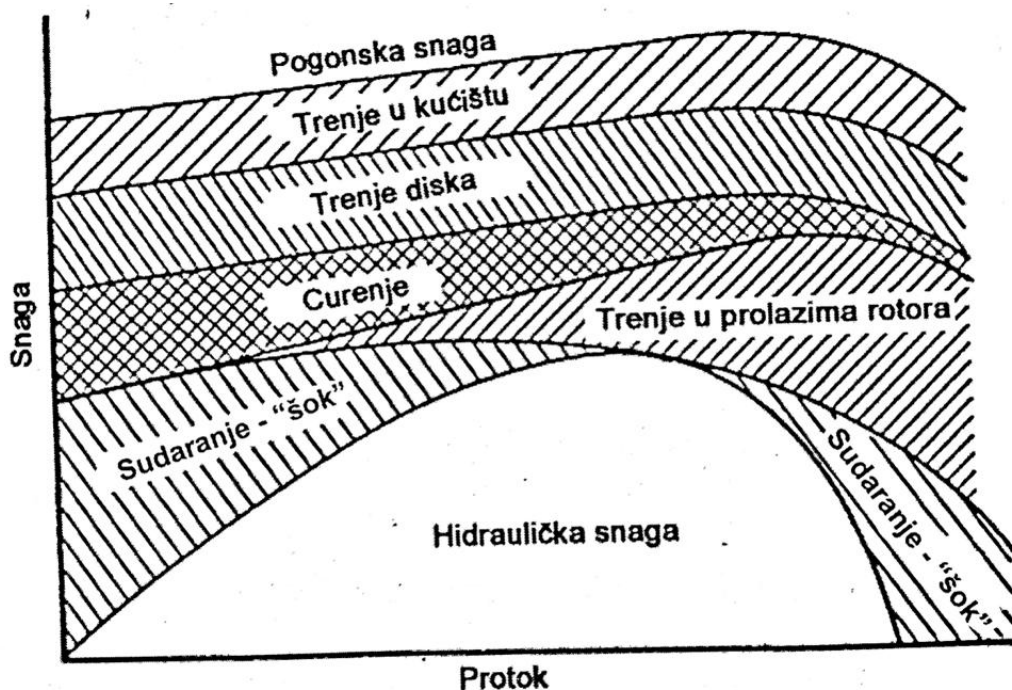
Slika 2-7. Promjene visine podizanja zbog gubitaka (Zelić i Čikeš, 2006.)

Prema jednadžbama 2-7 i 2-8, gustoća fluida ne utječe na visinu podizanja crpke, ali utječe na tlak kojeg razvija rotor crpke. To znači da centrifugalna crpka pri određenom protoku razvija istu visinu podizanja neovisno o fluidu u njoj. S druge strane, ukoliko je gustoća fluida manja od gustoće fluida za koji je crpka predviđena, može doći do tolikog smanjenja tlaka da će crpka gotovo u potpunosti izgubiti djelotvornost. Na primjer, ukoliko se crpka predviđena za protok vode ispuni plinom, tlak istiskivanja plina neće biti dovoljan za nadvladati tlak stupca vode koji zapunjava uzlazne cijevi iznad crpke. Ova pojava se

naziva plinska blokada (Lea i Bearden, 1980), a u praksi se može riješiti tako da se crpka zaustavi i tako dopusti plinu da gravitacijski izbije na vrh stupca vode (Zelić i Čikeš, 2006).

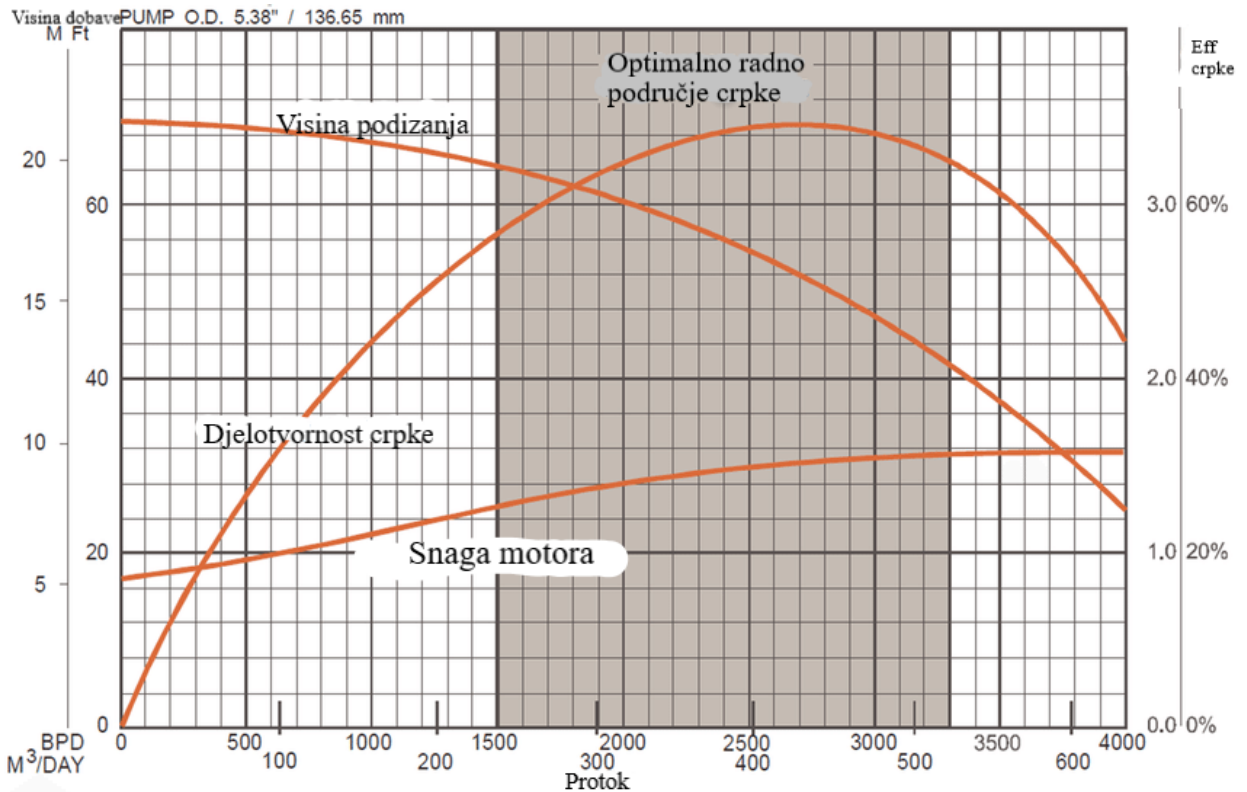
2.5. Pogonska snaga i djelotvornost crpke

Pogonska snaga centrifugalne crpke mora biti dovoljna da svlada sve gubitke i priskrbi energiju potrebnu za rad crpke. Analogno Slici 2-7., na Slici 2-8. opisan je utjecaj svih ranije navedenih gubitaka na redukciju pogonske snage. Omjer ulazne, pogonske snage i snage predane fluidu, odnosno hidrauličke snage, naziva se djelotvornost crpke, kako je ranije opisano jednadžbom 2-16.



Slika 2-8. Utjecaj svih tipova gubitaka na djelotvornost crpke (Zelić i Čikeš, 2006)

Crpke se isputuju tako da se pri stalnoj rotaciji mijenja protok povećavanjem izlaznog tlaka. Tijekom ispitivanja mjeri se protok, razlika između ulaznog i izlaznog tlaka te pogonska snaga u nekoliko točaka. Porast tlaka može se pretvoriti u visinu podizanja fluida, pomoću koje se računa ukupna djelotvornost crpke, a svi navedeni podatci prikazuju se grafički. Tako se dolazi do tipskih krivulja za sve ove veličine, koji zajedno tvore radne karakteristike crpke. Tipiska radna karakteristika crpke nalazi se na Slici 2-9.



Slika 2-9. Radna karakteristika centrifugalne crpke (Zhu i Zhang, 2017)

2.6. Utjecaj različitih radnih uvjeta na radne karakteristike crpke

Radne karakteristike crpke i njihove krivulje dane su u uvjetima fiksnog broja okretaja, u čistoj vodi gustoće 1kg/m^3 i viskoznosti 1mPas . U nastavku su objašnjeni slučajevi promjene nekih od prethodno navedenih parametara, odnosno njihov utjecaj na rad crpke.

2.6.1. Promjena broja okretaja crpke

Promjenom broja okretaja, odnosno brzine vrtnje, dolazi do promjene protoka, visine podizanja i pogonske snage. Promjena brzine vrtnje direktno je proporcionalna promjeni protoka, razvijena visina proporcionalna je kvadratu brzine, dok je snaga proporcionalna kubu brzine. To vrijedi samo u slučaju zanemarivanja utjecaja broja okretaja na gubitke zbog trenja i turbulencija. Unatoč tome, zbog toga što navedeni gubitci čine samo mali dio ukupnih gubitaka, u praksi se ovi odnosi mogu koristiti sa zadovoljavajućom točnosi. Promjena brzine vrtnje nema utjecaj na promjenu djelotvornosti uronjive centrifugalne crpke.

2.6.2. Promjena gustoće fluida

Kao što je ranije navedeno, visina podizanja kapljevine, odnosno njezina promjena, nije u direktnom odnosu s promjenom gustoće fluida. Nasuprot tome, pogonska snaga se mijenja s gustoćom fluida, dok djelotvornost crpke ostaje jednaka neovisno o gustoći fluida.

2.6.3. Promjena promjera rotora

Promjer rotora se u praksi smanjuje za malu vrijednost radi postizanja željenog odnosa protoka i visine podizanja kapljevine, ali bez većih promjena u početnom dizajnu crpke. Također se to radi ako crpka ima preveliku visinu podizanja pri određenom protoku. Promjena svih triju varijabli izražava se idućim setom jednadžbi (Zelić i Čikeš, 2006):

$$q_2 = q_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \quad (2-17)$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \quad (2-18)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \quad (2-19)$$

U prethodne tri jednadžbe indeksi 1 označavaju vrijednosti veličina pri početnom protoku, dok indeksi 2 označavaju vrijednosti veličina pri promijenjenom protoku. Važno je naglasiti kako se djelotvornost crpke promjenom protoka na ovaj način ne mijenja, odnosno vrijedi $\eta_2 = \eta_1$.

2.6.4. Utjecaj viskoznosti

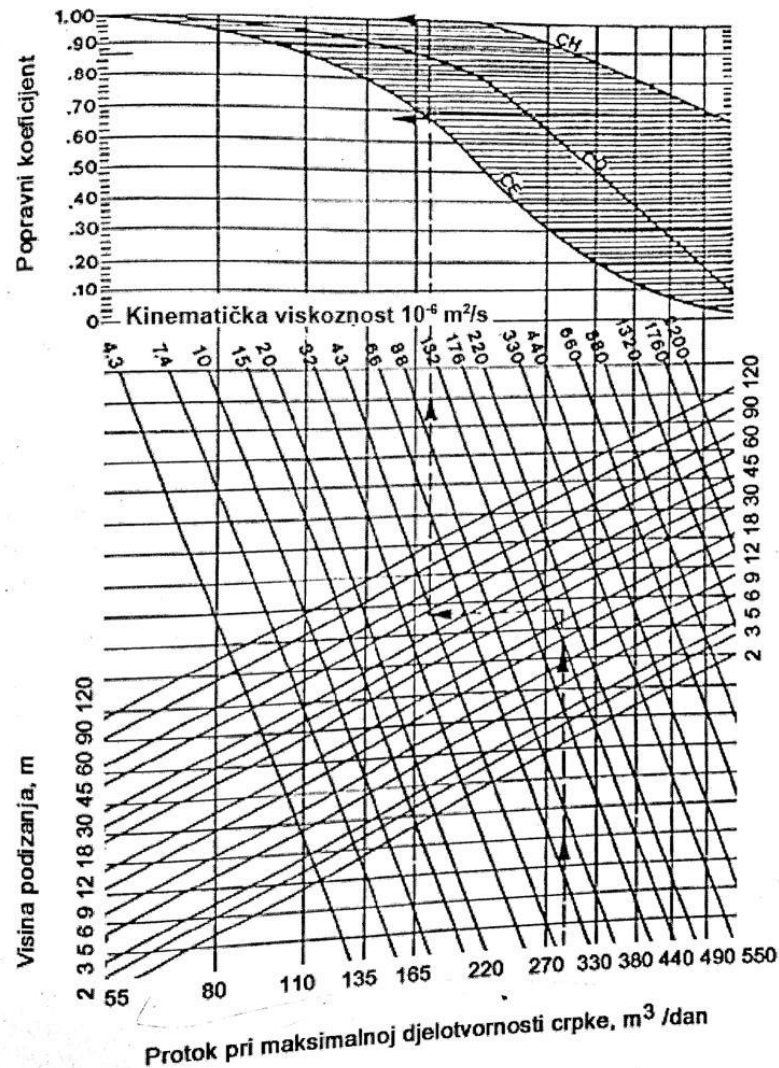
Centrifugalne crpke većinom su izrađene za crpljenje vode ili drugih kapljevina niske viskoznosti. Međutim, postoje i one crpke koje su namijenjene za crpljenje fluida puno veće viskoznosti. Što je fluid viskozniji, to mu je veći unutarnji otpor protjecanju. Posljedično tome, gubitci zbog trenja su povećani, što konačno dovodi do nižeg stupca kapljevine i visoke potrebne pogonske snage. Obzirom da viskoznost utječe i na gubitke curenja, utvrđeno je da ona smanjuje protok centrifugalne crpke čak i u području maksimalne moguće djelotvornosti (Zelić i Čikeš, 2006). Nomogram na Slici 2-10. prikazuje krivulje s pomoću kojih se određuju popravni faktori radnih karakteristika crpke u slučaju rada s viskoznim fluidima, a uvjet za njihovo korištenje je poznavanje radne karakteristike za vodu. Te krivulje dobivene su laboratorijskim ispitivanjima, a koriste se tako da se temeljem poznatog protoka i visine podizanja određene crpke u točki njene maksimalne djelotvornosti, odrede

popravni faktori C_q , C_H i C_E , te se sljedećim jednadžbama računaju karakteristike crpke za viskozni fluid (Zelić i Čikeš, 2006):

$$q_{vis} = C_q q_w \quad (2-20)$$

$$H_{vis} = C_H H_w \quad (2-21)$$

$$\eta_{vis} = C_E \eta_w \quad (2-22)$$



Slika 2-10. Popravni faktori radnih karakteristika crpke za viskozne fluide (Brown, 1980)

Ovi popravni koeficijenti koriste se u proračuna potrebne snage, odnosno visine dizanja kod onih tipova centrifugalnih crpki uz koje proizvođači prilažu radne karakteritike samo za slučaj crpljenja vode, što nije slučaj u dimenzioniranju proizvodnog sustava bušotine s uronjivom centrifugalnom crpkom u programu Prosper, gdje je na raspolaganju katalog s crpkama namijenjenim za crpljnje viskoznog fluida, odnosno nafte.

2.7. Diferencijalni tlak, protok i broj stupnjeva crpke

U ovom dijelu dan je postupak izbora crpke, kao zadnji segment u dizajniranju sustava podizanja fluida uronjivom centrifugalnom crpkom. U tu svrhu potrebno je poznavati podatake kao što su:

- Podatci o geometrijskoj konstrukciji bušotine;
- Jednadžba indikatorske (IPR) krivulje;
- Analiza višefaznog protjecanja tijekom eruptivnog rada bušotine;
- Potrebna dubina ugradnje crpke, uz uvjet da ona uvijek mora biti uronjena u kapljevину;
- Gustoća svih fluida u bušotini, plinski faktor tijekom proizvodnje te volumni faktor za naftu.

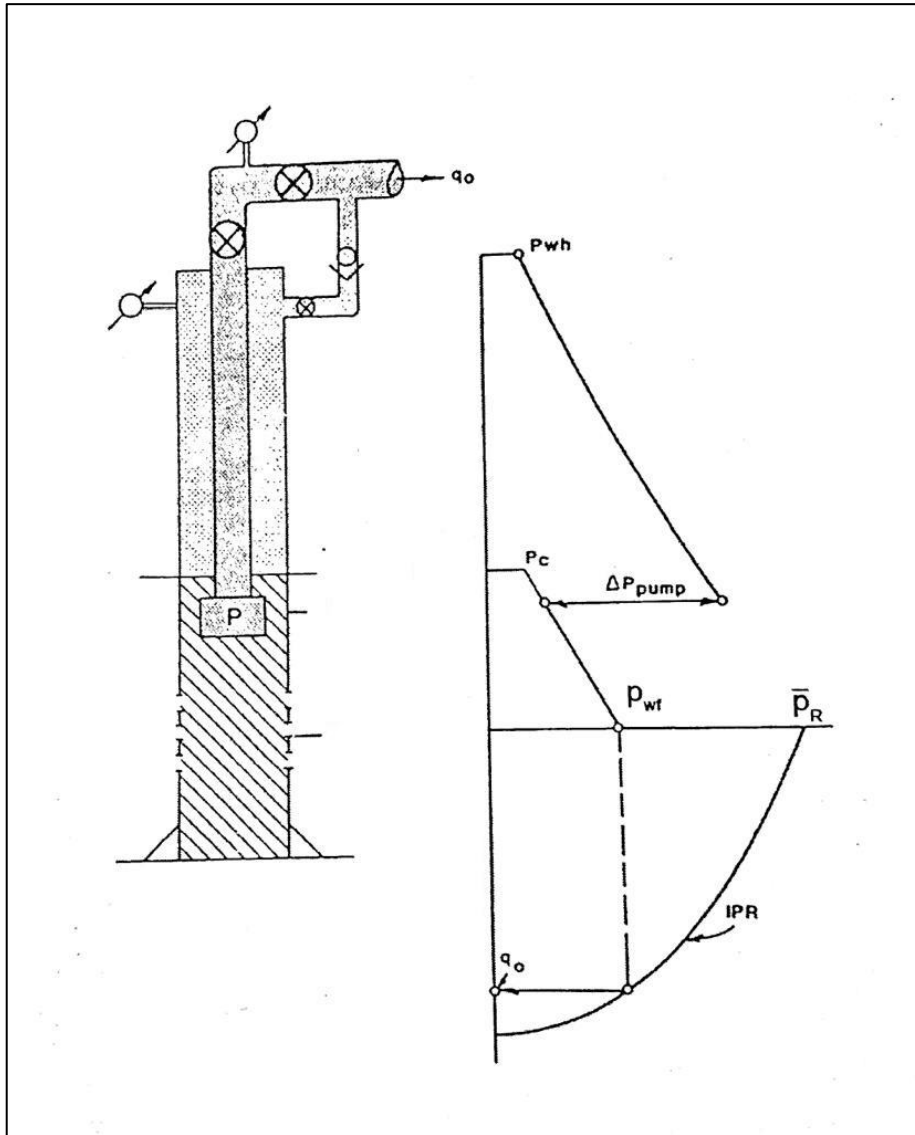
Poznavajući navedeno, može se odrediti potreban diferencijalni tlak i stvarni protok crpke.

2.7.1. Određivanje diferencijalnog tlaka i protoka crpke

Dinamička razina kapljevine u prstenastom prostoru je određena dubinom ugradnje crpke i minimalnom dubinom u koju se može uroniti crpku. Navedene podatke za svaku specifičnu crpku izdaje proizvođač. Dinamički tlak na razini sredine perforacija jednak je zbroju tlaka u prstenastom prostoru na ušću te tlakova koje stvaraju stupac plina u prstenastom prostoru i stupac kapljevine od njene razine do sredine perforacija. Usisni tlak crpke, p_s biti će jednak dinamičkom tlaku na sredini perforacija umanjenom za vrijednost koju stvara stupac kapljevine od razine perforacija do dubine ugradnje crpke (Zelić i Čikeš, 2006). Potisni tlak, p_p , crpke određen je krivuljom gradijenta tlaka dobivenom analizom eruptivnog rada bušotine. Tada je potreban diferencijalni tlak crpke jednak razlici potisnog i usisnog tlaka:

$$\Delta p_{pump} = p_p - p_s \quad (2-23)$$

što se može vidjeti i na Slici 2-11:



Slika 2-11. Dijagram tlaka kod ugradnje crpke (Brown, 1980)

Za proračun stvarnog protoka crpke potrebno je poznavati gustoće fluida u bušotini i količinu otopljenog plina u nafti. Tada se prema nekoj od ustanovljenih korelacija može utvrditi volumni koeficijent za naftu, B_o . Dakle, izraz za stvarni ili in-situ protok crpke je:

$$q_p = q_o B_o \quad (2-24)$$

gdje je:

q_o – volumni protok nafte, m^3/s

B_o – volumni koeficijent za naftu, m^3/m^3

Prema jednadžbama 2-23 i 2-24, može se zaključiti kako je crpku potrebno dimenzionirati tako da ostvaruje potreban diferencijalni tlak pri nekom danom protoku.

Analogno tome, prilikom dimenzioniranja uronjive centrifugalne crpke u programu Prosper, koristi se opcija u kojoj se za potrebni, odnosno očekivani protok, određuje diferencijalni tlak te tip crpke koja ga može ostvariti, što je opisano kasnije u radu.

2.7.2. Određivanje potrebnog broja stupnjeva crpke

Prema potrebnom protoku crpke i zadanom unutarnjem promjeru zaštitnih cijevi, iz kataloga proizvođača izabire se crpka, uz uvjet da bude unutar optimalnog radnog područja i blizu najveće moguće djelotvornosti. Ona svojim dimenzijama mora stati u zaštitne cijevi te njezin promjer mora biti manji od unutarnjeg promjera zaštitnih cijevi. Primjer kataloga kompanije Baker Hughes za odabir crpke prikazan je Slikom 2-12., a modeli crpki nalaze se u koloni 2. Prema radnoj karakteristici određenog modela crpke, pri čemu je jedan od primjera prikazan Slikom 2-9., očitavaju se vrijednosti za zadani protok:

- Visina podizanja jednog stupnja crpke, Δh ;
- Djelotvornost crpke, η .

Gustoća nafte koja se crpi, a na razini crpke, može se izračunati kao:

$$\rho_s = \frac{\rho_o + 1,223\gamma_g R_s}{B_o} \quad (2-25)$$

gdje su:

ρ_o – gustoća nafte, kg/m^3

γ_g – relativna gustoća plina, -

R_s – faktor otopljenog plina, m^3/m^3

Diferencijalni tlak koji ostvaruje jedan stupanj crpke tada je:

$$\Delta p = \rho_s g \Delta h \quad (2-26)$$

Broj stupnjeva koji crpka treba imati jednak je omjeru potrebnog diferencijalnog tlaka crpke i diferencijalnog tlaka kojeg ostvaruje jedan stupanj crpke, odnosno:

$$n = \frac{\Delta p_{pump}}{\Delta p}$$

(2-27)

**CENTRILIFT
HUGHES**

THE SYSTEM

TABLE 1 — PUMP SELECTION DATA

SERIES	TYPE	MINIMUM CASING SIZE	NOMINAL SERIES		HP (SERIES)		RATE @ BEST EFFICIENCY		OPERATING RANGE	
					MAXIMUM MOTOR SIZE AVAILABLE (1)		60 HZ	50 HZ	60 HZ	50 HZ
					SEAL	MOTOR	60 HZ	50 HZ	(BPD)	(M ³ /D)
338	U-23		338	375	105	87.5	780	104	525 - 875	70 - 116
	(375)				(375)	1350	179	1000 - 1670	132 - 221	
400	B-11W	(2)	400	450	240 (450)	200 (450)	380	50	180 - 497	24 - 66
	W-18						600	80	400 - 800	53 - 106
	H-27						900	120	650 - 1100	86 - 146
	M-34						1180	157	840 - 1500	112 - 199
	G-48						1530	203	1050 - 2150	139 - 285
	J-61						1800	239	1200 - 2600	159 - 345
	Z-69						2150	285	1250 - 2800	165 - 371
	N-80						2650	351	1600 - 3650	212 - 484
	T-100						3350	444	2000 - 4500	265 - 596
	F-6000						5700	755	3600 - 6900	477 - 901
513	F-35	(2)	513	544	400 (544)	333 (544)	1200	159	800 - 1650	106 - 220
	I-42B						1550	206	1000 - 2025	132 - 268
	Y-82B						2150	285	1440 - 2850	185 - 378
	K-70						2800	371	1650 - 3650	219 - 484
	KA-100						3350	444	2000 - 4600	265 - 609
	E-127						4050	537	2550 - 5700	338 - 755
	S-175						5900	782	3650 - 8100	483 - 1073
D225B	8600	1139	4800 - 10700	636 - 1418						
562	K15000 (3)						15000	1987	11250 - 18750	1490 - 2484
675	A-177	(2)	675	544	400 (544)	333 (544)	7200	954	4000 - 8900	530 - 1179
	P-320A						10000	1325	5200 - 11600	689 - 1537
	R-330						12200	1616	6900 - 15300	914 - 2027
875	IA-600	(2)	675	562	600 (562)	500 (562)	20800	2755	11800 - 25600	1563 - 3392
	IB-700						21000	2782	10300 - 27500	1365 - 3643
1025	JA-1100	(2)	875	725	750 (725)	625 (725)	24500	3245	12700 - 32200	1683 - 4266
	JB-1300						38500	4835	19200 - 45900	2544 - 6081
							43000	5696	19900 - 58900	2636 - 7803

NOTE: (1) REFER TO FIGURE 12 FOR MAXIMUM PUMP SHAFT LOAD.
 (2) REFER TO TABLE 19 FOR MAXIMUM DIAMETER OF PRODUCT.
 (3) 23 LB./FT. OR LIGHTER

Slika 2-12. Primjer kataloga za odabir modela centrifugalne crpke (Baker Hughes, 1989)

Temeljem svega navedenog u opisu osnovnih dijelova centrifugalnih crpki i odabira modela za njihovu ugradnju u proizvodni sustav bušotine, u nastavku je dano modeliranje cijelog proizvodnog sustava bušotine i dizajn uronjive centrifugalne crpke primjenom programa Prosper.

3. UVOD U KORIŠTENJE PROGRAMA PROSPER

Petroleum Experts Ltd. (PETEX) sa sjedištem u Edinburghu u Škotskoj vodeća je svjetska kompanija u razvijanju i distribuciji softverskih paketa vezanih uz proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Najveći proizvod PETEX-a je Integrated Production Modelling programski paket (IPM). IPM je integrirani programski paket specijaliziran za primjenu u proizvodnim sustavima nafte i plina, a uključuje modeliranje ležišta, bušotina, bušotinske opreme, kao i nadzemne površinske opreme i sabirnog sustava. Paket obuhvaća programe kao što su numerički simulator ležišta (Mbal), program za postavljanje korelacija PVT svojstava ležišnih fluida (PVTp), program za dizajn i nadzor cjelokupne integrirane proizvodnje (Resolve), program specijaliziran za simulaciju ležišta i pribušotinske zone (Reveal), program za analizu površinskog sustava i višefaznog protoka (Gap) te program za modeliranje i analizu bušotinskih sustava koji se koriste u proizvodnom inženjerstvu (Prosper). Svi ovi programi međusobno se mogu povezati, a zajedno čine izuzetno snažan i brz alat za dizajn proizvodnih sustava nafte i plina.

U ovom radu opisan je način primjene programa Prosper, specijaliziranog za projektiranje i analizu proizvodnog sustava bušotine. Prosper je kao alat izuzetno brz i efikasan, ima širok spektar mogućnosti optimiranja i modeliranja proizvodnih bušotina, uključujući i utisne bušotine. S obzirom na to da je dio integriranog programskog paketa, u njega se lagano mogu uvesti podatci iz ostalih programa iz IPM paketa, npr. podatci o ležišnim fluidima iz programa PVTp, ali isto tako može služiti kao izvor podataka u programima kao što je Gap. Neke od radnih mogućnosti programa Prosper uključuju:

- Određivanje IPR (engl. *Inflow Performance Relationship*) krivulja tj. modela utoka fluida iz ležišta u bušotinu za sve postojeće tipove bušotina;
- Dizajn i optimizaciju dimenzija uzlaznih cijevi u odnosu na zaštitne cijevi, kao i dizajn površinskih cjevovoda i separatora;
- Dizajn i optimizaciju eruptivnog podizanja kapljevine i svih vrsta umjetnog podizanja kapljevine;
- Proračun pada tlaka u proizvodnom sustavu primjenom Nodal analize;
- Predviđanje temperature i njezine promjene u bušotini i cjevovodima.
- Proračun i prikaz VLP (engl. *Vertical Lift Performance*) krivulja, odnosno krivulja gradijenata dinamičkog tlaka u tubigu za sve tipove bušotina.
- Određivanje radne točke sustava (engl. *solution point*).

- Analizu osjetljivosti ključnih parametara bušotine i ležišta uslijed kojih se mijenjaju proizvodne mogućnosti bušotine tijekom vremena.

3.1. Osnovni ulazni podatci proizvodnog sustava

Dizajniranje bilo kojeg načina proizvodnje u programu Prosper podijeljeno je na korake. Prije nego što se krene u dizajn proizvodnog sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom, potrebno je unijeti općenite podatke o sustavu, što je prikazano Slikom 3-1 (engl. *System Summary*). Sam prozor podijeljen je na nekoliko dijelova.

U prvom dijelu se unose podatci o proizvodnom fluidu (engl. *Fluid description*). Ovisno o izboru fluida u bušotini, ovise i daljnje mogućnosti rada u programu. Kada se kao proizvodni fluid odabere nafta i voda (engl. *Oil and Water*), u opciji *Method* (hrv. metoda) se odabirom između dviju mogućnosti, teške nafte (engl. *Black Oil*) i jednadžbe stanja (engl. *Equation of State*), otvara ponuđen odabir PVT korelacija za usklađivanje s mjerenim podacima uz ugrađene metode linearne regresije. *Black Oil* metoda sadrži sedam različitih korelacija, dok se odabirom *Equation of State* metode otvara izbor između Peng-Robinson i Soave-Redlich-Kwong korelacija. Odabirom nekog drugog proizvodnog fluida (plina ili kondenzata), odabirom *Equation of State* metode dobivaju se na izbor i druge poznate PVT korelacije fluida.

Nakon togase u dijelu prozora o bušotini (engl. *Well*) može odabrati vrsta protjecanja i vrsta, odnosno namjena bušotine. Vrsta protjecanja (engl. *Flow Type*) odnosi se na proizvodnu opremu kroz koju protječe fluid tijekom proizvodnje, odnosno protječe li kroz uzlazne cijevi, zaštitne cijevi, ili kroz oboje. U opciji vrsta bušotine (engl. *Well Type*) može se odabrati namjena bušotine. Tako postoji odabir između proizvodne bušotine, utisne bušotine, vodoutisne bušotine i bušotine koja iz ležišta ugljena proizvodi metan.

Potom se dolazi do dijela za odabir umjetnog podizanja kapljevine (engl. *Artificial Lift*), ako postoji. Prema tome, između niza ponuđenih opcijamoguć je odabir između plinskog lifta, mlazne crpke, hidrauličke crpke, dubinske crpke s klipnim šipkama te uronjive centrifugalne crpke. Zadnja od navedenih opcija objašnjena je u ovom radu te je njezin dizajn opisan u idućem poglavlju.

S druge strane prozora za unos ulaznih podataka sustava prvi dio je vezan uz odabir proračuna tlaka i temperature. Moguć je odabir proračuna samo tlaka (engl. *Pressure Only*), u kojem je potreban unos vrijednosti temperature, te proračuna i tlaka i temperature (engl. *Pressure and Temperature*), gdje Prosper računa i tlak i temperaturu u modelu. Kod proračuna temperature, postoje tri različita načina generiranja temperaturnog modela:

- a) Gruba pretpostavka (engl. *Rough Approximation*);
- b) Entalpijska ravnoteža (engl. *Enthalpy Balance*);
- c) Napredna procjena (engl. *Improved Approximation*).

Za korištenje grube pretpostavke potrebno je unijeti vrijednost koeficijenta prijelaza topline, a potom program generira statički temperaturni profil putem masenih protoka fluida u bušotini. Entalpijska ravnoteža i napredna procjena temperature koriste se za praćenje promjena temperature u proizvodnim sustavima uključujući Joule-Thomsonov efekt, provodljivost, prijelaz topline i zračenje. Razlika između ova dva modela proračuna temperature je u tome da je za korištenje napredne procjene koeficijent prijelaza topline potrebno ručno unijeti u program.

Na kraju je potrebno unijeti podatke o proizvodnoj opremi u bušotini (engl. *Well Completion*). Opcije za način opremanja su opremanje zaštitnim cijevima s perforacijama (engl. *Cased Hole*) i otvoreni proizvodni interval (engl. *Open Hole*). Osim toga, moguće je odabrati metodu odnosno sustav kontrole utoka pijeska, ukoliko je takav sustav ugrađen. Također, moguće je odabrati vrstu bušotine s obzirom na broj proizvodnih kanala, odnosno birati između opcija jednokanalna bušotina (engl. *Single Branch*) i višekanalna bušotina (engl. *Multilateral Well*). Zadnja moguća opcija za odabir je postojanje konusiranja plina (engl. *Gas Coning*), koja je moguća ukoliko se odabere metoda *Black Oil*. Slika 3-1. prikazuje sve prethodno opisane opcije. Nakon odabira svih potrebnih opcija u sažetku sustava, zatvara se prozor pritiskom na tipku *Done* (hrv. završeno) te se kreće u dizajniranje proizvodnog sustava bušotine.

The screenshot shows the 'System Summary (untitled)' window with the following settings:

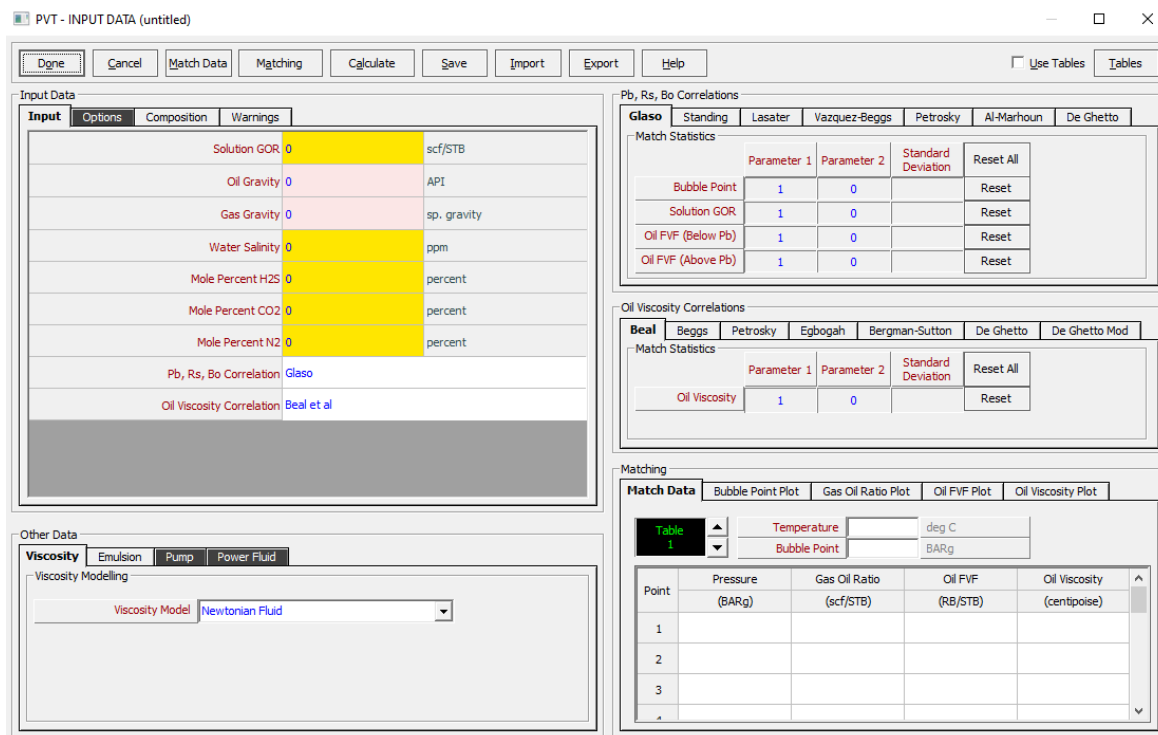
- Fluid Description:** Fluid: Oil and Water; Method: Black Oil; Separator: Single-Stage Separator; Emulsions: No; PVT Warnings: Disable Warning; Water Viscosity: Use Default Correlation; Viscosity Model: Newtonian Fluid.
- Calculation Type:** Predict: Pressure and Temperature (offshore); Model: Rough Approximation; Range: Full System.
- Brine Modelling:** Brine Properties Correlation: Default.
- Well:** Flow Type: Tubing Flow; Well Type: Producer.
- Well Completion:** Type: Cased Hole; Sand Control: None.
- Artificial Lift:** Method: None.
- Reservoir:** Inflow Type: Single Branch; Gas Coning: No.
- User information:** Company, Field, Location, Well, Platform, Analyst (all empty); Date: 7. rujna 2023.
- Comments:** A text area for entering comments, with a note '(Cntl-Enter for new line)'.

Slika 3-1. Sučelje programa Prosper za unos podataka o proizvodnom sustavu

3.2. PVT svojstva fluida

Prije samog početka dizajniranja proizvodnog sustava potrebno je unijeti podatke o PVT svojstvima fluida koji služe za predviđanje promjena tlaka i temperature od ležišta do ušća bušotine. Ti podatci se unose u sekciji za ulazne podatke (engl. *Input Data*). U njoj se unose količina otopljenog plina u nafti GOR (engl. *Gas-to-Oil Ratio*), gustoća nafte (engl. *Oil Gravity*), gustoća plina (engl. *Gas Gravity*), salinitet vode (engl. *Water Salinity*), te udjeli nečistoća kao što su dušik (engl. *Mole percent N2*), ugljikov dioksid (engl. *Mole percent CO2*) i sumporovodik (engl. *Mole percent H2S*). Moguć je odabir korelacija koje će biti korištene kod proračuna tlaka zasićenja, volumnog koeficijenta nafte i faktora otopljenog plina (engl. *Pb, Rs, Bo Correlation*) te korelacija za računanje viskoznosti nafte (engl. *Oil Viscosity*). Na kraju unosa u ovom prozoru nalazi se opcija za unos hidrauličkog modela fluida (engl. *Viscosity Model*). U donjem desnom uglu prozora nalazi se sekcija za usklađivanje mjerenih podataka s metodom nelinearne regresije (engl. *Matching*). U svrhu

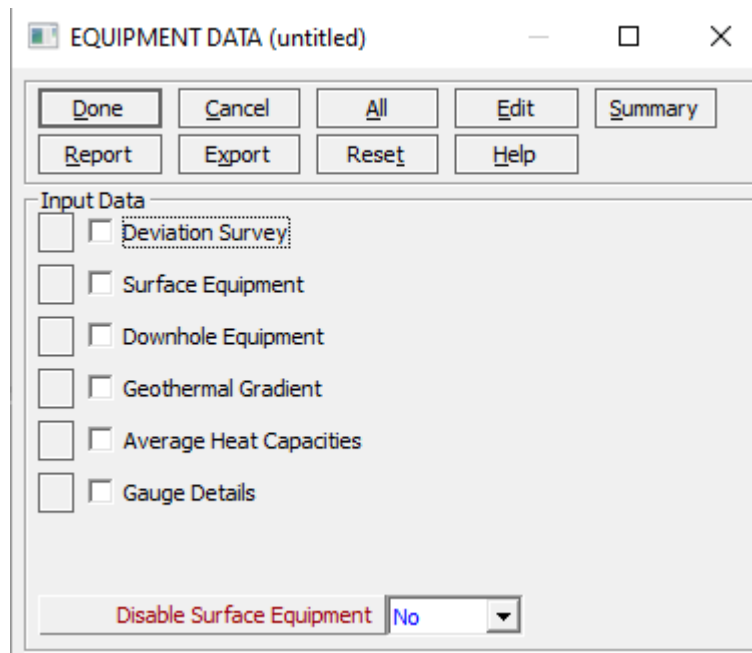
daljnjeg proračuna ovdje je potrebno unijeti barem tlak zasićenja i količinu otopljenog plina u nafti. Pritiskom na tipku *Matching* u gornjoj traci prozora dobiva se pregled podataka o točnosti odabranih korelacija, što omogućava promjenu i bolji odabir korelacija koje će se koristiti. Opisane mogućnosti prikazane su na Slici 3-2.



Slika 3-2. Sučelje programa Prosper za unos PVT podataka o fluidima

3.3. Podatci o opremi

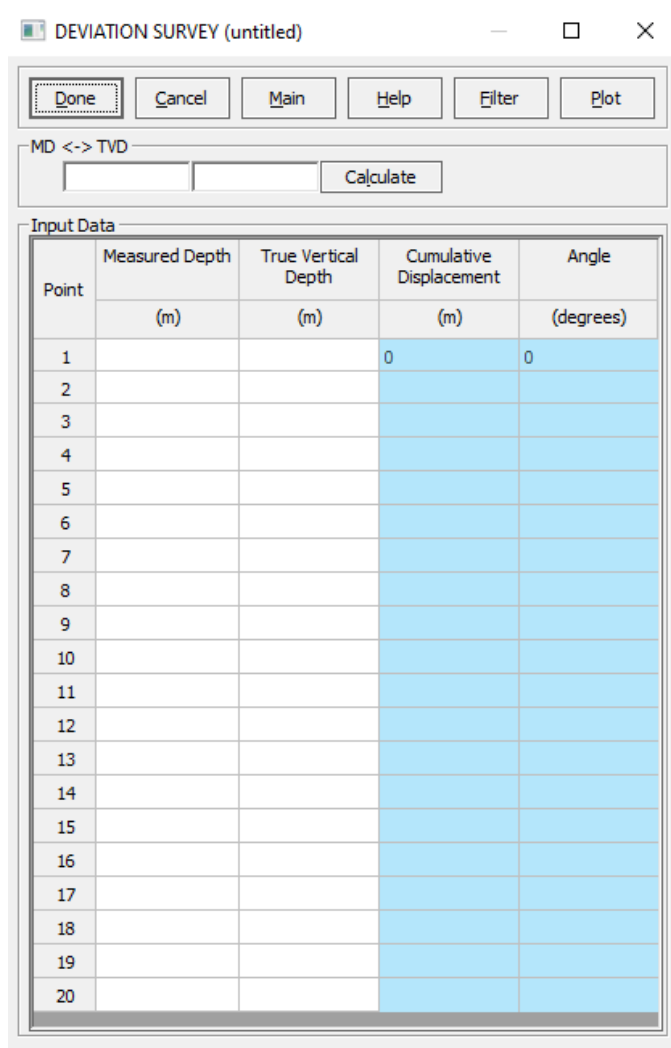
U idućem koraku potrebno je unijeti podatke vezane za ugrađenu opremu u bušotini u prozoru *Equipment Data* (hrv. podatci o opremi). Prozor je koncipiran tako da otvara zasebne prozore od kojih se svaki odnosi na zasebne dijelove sustava, a može se vidjeti na Slici 3-3.



Slika 3-3. Početni prozor programa Prosper za unos podataka o opremi

3.3.1. Otklon bušotine

U prozoru za otklon bušotine (engl. *Deviation Survey*) prikazanom na Slici 3-4. potrebno je unijeti podatke o mjerenoj (engl. *Measured Depth*) i stvarnoj vertikalnoj dubini (engl. *True Vertical Depth*) bušotine. Moguće je unijeti podatke o 20 mjerenih točaka duž cijele duljine kanala bušotine, a ukoliko postoji više od 20 mjerenih točaka, pritiskom na opciju *Filter* (hrv. Filtriraj) program će odabrati 20 izmjerenih točaka koje će najbolje opisati putanju bušotine, uzimajući u obzir ranije unesene kuteve otklona ako postoje. U slučaju da kutevi otklona ne postoje, mjerena dubina odgovara stvarnoj dubini, odnosno radi se o vertikalnoj bušotini. Pritiskom na tipku *Done* zatvara se trenutni prozor te se prelazi na iduću.



Slika 3-4. Prozor programa Prosper za unos podataka o dubini bušotine

3.3.2. Površinska oprema

U ovom prozoru (engl. *Surface Equipment*) unose se informacije u površinskoj opremi proizvodnog sustava. Opcije koje je moguće unijeti uključuju duljinu površinskih cjevovoda, dimenzije cjevovoda, postojeće filtere i sapnice te elemente cjevovoda kao što suženja, proširenja i koljena. Osim toga, treba unijeti iznos temperature okoline (engl. *Temperature of Surroundings*) i koeficijenta prijelaza topline (engl. *Overall Heat Transfer Coefficient*). Ovaj prozor također nudi opciju za isključenje površinske opreme iz proračuna (engl. *Disable Surface Equipment*) u glavnom prozoru za podatke o opremi, prikazanom na Slici 3-3. Ta opcija odabrana je kasnije kod dizajna proizvodnog sustava, s obzirom na to da je u

ovom slučaju za radnu točku sustava potrebno poznavati dinamički tlak na ušću. Opisani prozor prikazan je Slikom 3-5.

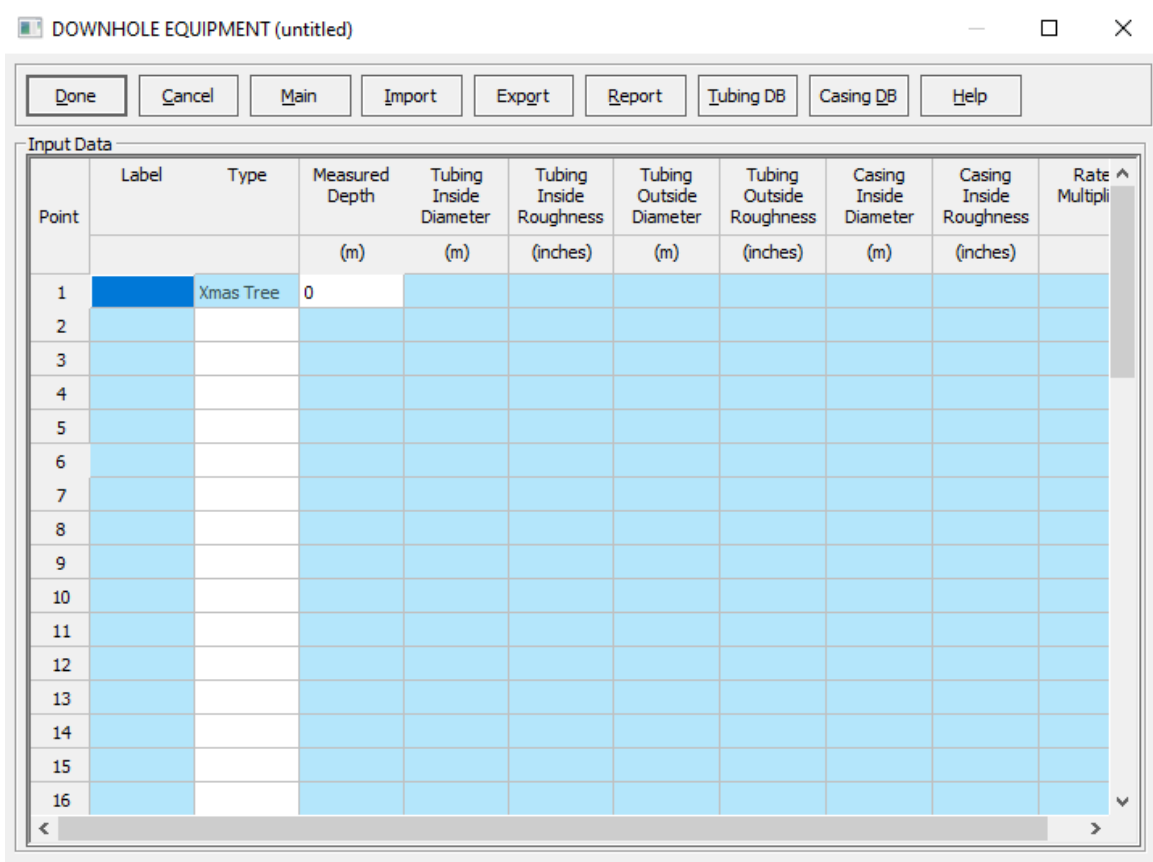
Point	Label	Type	Pipe Length (m)	True Vertical Depth (m)	Pipe Inside Diameter (m)	Pipe Inside Roughness (inches)	Rate Multiplier
1		Manifold		0			
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

Slika 3-5. Prozor programa Prosper za unos podataka o površinskoj opremi

3.3.3. Podzemna oprema

Ovaj prozor (engl. *Downhole Equipment*) služi za unos podataka o ugrađenoj podzemnoj proizvodnoj opremi, dakle o zaštitnim cijevima, uzlaznim cijevima, ugrađenim dubinskim ventilima te geometrijskim ograničenjima za buduću ugradnju opreme. Važno je napomenuti kako se u ovom prozoru unosi samo oprema koja se nalazi od proizvodnog intervala naviše. Mogućnost izbora opreme ovisit će o ranijem izboru, gdje je kod uvodnog opisa sustava trebalo odabrati generalni način opremanja u bušotini. Izbor dimenzija podzemne opreme ovisit će o generiranju gradijenta pada tlaka kroz bušotine, a zadnja dubina koja se upiše u programu će predstavljati dubinu dna bušotine ili dubinu vrha ležišta. Podatci iz prethodnog

i ovog prozora se moraju podudarati s obzirom na to da su međusobno povezani u jedinstveni sustav. Prozor s podzemnom opremom vidljiv je na Slici 3-6.



Slika 3-6. Prozor programa Prosper za unos podataka o podzemnoj opremi

3.3.4. Geotermalni gradijent

U ovom se prozoru (engl. *Geothermal Gradient*) unosi temperatura fluida kroz duljinu bušotine, a ona, kombinirano sa svim ranije unesenim relevantnim podacima, služi programu za proračun vrijednosti temperature okolnih stijena bušotine. Potrebno je unijeti barem dvije točke, na dnu i vrhu bušotine, koje će program interpolirati u geotermalni gradijent.

GEOTHERMAL GRADIENT (untitled)

Done Cancel Main Import Export Plot Help

Overall Heat Transfer Coefficient W/m2/K

Formation Gradient

Depth Reference RKB

Point	Formation TVD	Formation Measured Depth	Formation Temperature
	(m)	(m)	(deg C)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Slika 3-7. Prozor programa Prosper za unos podataka za proračun geotermalnog gradijenta

3.3.5. Prosječne specifične topline

Ovaj prozor (engl. *Average Heat Capacities*) je zadnji u izborniku za unos podataka o opremi, a služi za unos prosječnih spcifičnih toplina svih fluida koji se nalaze u bušotini. Program pomoću unesenih vrijednosti i toplinskog modela računa prosječni koeficijent prijelaza topline i koristi ga u daljnjim proračunima.

3.4. Unos podataka o ležištu

Sljedeći je korak unos podataka o ležišnim parametrima, a konačni rezultat ovog dijela dizajna je IPR ili indikatorska krivulja (engl. *Inflow Performance Relationship*), koja pokazuje dotok fluida iz ležišta u bušotinu. Sučelje za ovaj korak sastoji se od četiri različite sekcije opisane u nastavku.

3.4.1. Model ležišta

U ovoj se sekciji (engl. *Reservoir Model*) određuje model za proračun IPR krivulje, skin faktor te oprema za kontrolu pijeska ukoliko se ona koristi. Postoji više desetaka modela koji se mogu primijeniti u raznim bušotinskim uvjetima, a neki od njih su Vogel, Darcy, Fetkovich, *Dual Porosity* (hrv. model dvojne poroznosti), model za horizontalne bušotine, model za višeslojna ležišta itd. Njihov odabir ovisit će o dostupnim podacima o bušotini i ležištu. Ako se ranije odabere opcija *Cased Hole*, moguć je izbor modeliranja skin faktora. Ukoliko postoje podaci iz hidrodinamičkih mjerenja u bušotini (engl. *Well Testing*), najpreciznije je vrijednost skina unijeti ručno. Ako ne postoje navedeni podaci, dostupna su tri različita modela za računanje skin faktora: Locke, MacLeod te Karakas i Tariq model. Ukoliko je ugrađena, odabire se metoda kontrole pijeska, a dostupne su četiri opcije: pješčani zasip (engl. *Gravel Pack*), predpakirani filter (engl. *Pre-Packed Screen*), žicom omotani filter (engl. *Wire Wrapped Screen*) i prorezani lajner (engl. *Slotted Liner*).

3.4.2. Podatci o ležištu

U ovom segmentu (engl. *Reservoir Data*) se unose sljedeći podaci:

- a) Ležišni tlak (engl. *Reservoir Pressure*)
- b) Ležišna temperatura (engl. *Reservoir Temperature*)
- c) Udio vode u protoku (engl. *Water Cut*)
- d) Ukupna količina otopljenog plina u nafti (engl. *Total GOR*)

Nakon unosa navedenih podataka, program generira IPR krivulju koja se može prikazati i u tablici s rezultatima (engl. *Results*). Prikaz cijelog opisanog sučelja nalazi se na Slici 3-8.

Model Data

Reservoir Model | Well-Geom Skin | Dev-PT, Skin | Sand Control | Rel Perms | Viscosity | Completion

PT Entry Reservoir Model

Productivity Index (PI) m³/D/Bar

Reservoir Data

Reservoir Pressure BarG

Reservoir Temperature deg C

Water Cut percent

Total GOR m³/m³

Compaction Permeability Model No

Relative Permeability No

Reservoir Model

Done | Cancel | Calculate | Plot | Sensitivity | Sand Failure

Help | Export | Validate | Transfer Data

PT Entry

- Well
- Composite
- Fekovich
- Multirate Fekovich
- Multirate Jones
- Transient
- Hydraulically Fractured Well
- Horizontal Well - Constant Pressure
- Horizontal Well - Constant Pressure Upper Boundary
- Multilayer Reservoir
- External Entry - dp Friction Loss In WellBore
- Multilayer - dp Loss In WellBore
- Shimada (BF)
- Dual Porosity
- Vertical Well - Transverse Vertical Fractures
- SFOCT

Mechanical/Geometric Skin

Deviation/Partial Penetration Skin

Sand Control

- Sand Control
- Control Pack
- Pre-Placed Screen
- Wire Wrapped Screen
- Shut-In Lifter

INFLOW PERFORMANCE DATA (OIL WELL)

Inflow Type Single Branch

Completion Cased Hole

Sand Control None

Reservoir Model PI Entry

Perm(k) Reduction Model No

Relative Permeability No

Reservoir Pressure (bar)

Reservoir Water Cut (per)

Total GOR 28.52 (m³)

CALCULATED DATA

AOI : 0 (m³/k)

PSI

Inflow (IPR) Plot

Results

Point	Rate (m ³ /day)	Pressure (BarG)	Temperature (deg C)	Total Skin (bar)	dp Completion Skin (bar)	dp Completion Skin (bar)	dp Sand Control Skin (bar)	dp Sand Control Skin (bar)	Perforation (bar)	dp Dan Skin (bar)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Slika 3-8. Sučelje programa Prosper za unos podataka za konstrukciju IPR krivulje

Koristeći parametre navedene u ovom poglavlju, modeliranje proizvodnog sustava bušotine može se nastaviti s dizajniranjem uronjive centrifugalne crpke. To se obavlja u prozoru prikazanom na Slici 3-9. U dijelu prozora pod nazivom *Input Data* (hrv. ulazni podatci) unose se zadani ulazni podatci, od kojih su najvažniji dubina ugradnje crpke (engl. *Pump Depth*), vanjski promjer crpke (engl. *Maximum Pump OD*), očekivani protok te udio vode i plina u fluidu. Pritiskom na tipku, odnosno naredbu *Calculate Pump Duty* (hrv. proračun crpke) računaju se parametri radne karakteristike crpke s pomoću unesenih podataka. Nakon toga se odabire crpka u dijelu prozora *Equipment* (hrv. oprema) tako što se odabere željena crpka, elektromotor i kabel. Prilikom odabira opreme ponudene su samo crpke koje svojim radnim karakteristikama i dimenzija odgovaraju ranije unesenim podacima, a završetkom proračuna program daje rezultate, koji su pojašnjeni u nastavku na primjeru za bušotinu X.

Calculate Pump Duty			Done	Cancel	Report	Export	Help	Pump Plot
Input Data			Equipment					
Pump Depth (Measured)	2590.8	m	Pump	CENTRILIFT GC8200 0.1303 m (4400-10000 RB/day)				
Operating Frequency	60	Hertz	Motor	Centrilift 544 275HP 1565V 105A				
Maximum Pump OD	0.1524	m	Cable	#1 Copper 0.26 (Volts/1000ft) 115 (amps) max				
Length Of Cable	2743.2	m	Results					
Gas Separator Efficiency	0	percent	Number Of Stages	111				
Design Rate	1271.9	m3/day	Power Required	252.914	hp			
Water Cut	80	percent	Pump Efficiency	68.6575	percent			
Total GOR	141	m3/m3	Pump Outlet Temperature	100.242	deg C			
Top Node Pressure	18.25	BARa	Current Used	98.4567	amps			
Motor Power Safety Margin	0	percent	Motor Efficiency	83.8875	percent			
Pump Wear Factor	0	fraction	Motor Power Generated	252.914	hp			
Pipe Correlation	Beggs and Brill		Motor Speed	3458.35	rpm			
Tubing Correlation	Petroleum Experts 2		Voltage Drop Along Cable	280.596	Volts			
Gas DeRating Model	<none>		Voltage Required @ Surface	1845.6	Volts			
Pump Duty			Surface KVA	314.733				
Well Head Pressure	18.25	(BARa)	Torque On Shaft	520.761	N m			
Flowing Bottomhole Pressure	143.358	(BARa)	Motor Power Factor	0.80423	fraction			
Water Cut	80	(percent)						
Pump Frequency	60	(Hertz)						
Pump Intake Pressure	124.219	(BARa)						
Pump Intake Temperature	98.4598	(deg C)						
Pump Intake Rate	9677.33	(RB/day)						
Free GOR Entering Pump	77.9786	(m3/m3)						
Pump Discharge Pressure	199.966	(BARa)						
Pump Discharge Rate	9056.02	(RB/day)						
Total GOR Above Pump	141	(m3/m3)						
Mass Flow Rate	2822962	(lbm/day)						
Total Fluid Gravity	0.86569	(sp. gravity)						
Average Downhole Rate	9302.53	(RB/day)						
Head Required	893.153	(m)						
Actual Head Required	893.153	(m)						
Fluid Power Required	173.514	(hp)						
GLR @ Pump Intake (V/V)	0.13086	(fraction)						
Gas Fraction @ Pump Intake	0.11572	(fraction)						
Bo @ Pump Intake	1.19595	(m3/m3)						
Bg @ Pump Intake	0.0089756	(m3/m3 (st))						
Average Cable Temperature	84.7992	(deg C)						

Slika 3-9. Prozor za podatke o dizajnu crpke

4. DIZAJN SUSTAVA PROIZVODNJE S URONJIVOM CENTRIFUGALNOM CRPKOM U BUŠOTINI X

U ovom poglavlju prikazan je način dizajniranja sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom u bušotinu X. Potreba za ugradnjom ovakvog sustava nastala je zbog povećanja udjela vode u proizvodnji nakon dugogodišnjeg rada bušotine, kao i radi smanjenja ležišnog tlaka. Ove dvije promjene uzrokovale su drastični pad u proizvodnji, a procijenjeno je da će, ukoliko se ne uvedu promjene u načinu proizvodnje, bušotina u potpunosti prestati proizvoditi nakon tri mjeseca (Prosper Manual, 2018). Slijedi primjer dizajna ESP sustava za zadane bušotinske i ležišne uvjete, u svrhu optimizacije proizvodnog sustava, a u primjeru se radi o odobalnoj bušotini.

4.1. Ulazni podatci za bušotinu X

Ulazni podatci potrebni za unos u program Prosper nalaze se u sljedećem nizu tablica.

4.1.1. PVT podatci

U Tablici 4-1 nalaze se izmjereni PVT podatci o fluidu koji se proizvodi iz bušotine X. Fluid iz ovog primjera ima zanemarive količine neugljikovodičnih plinova, pa zbog toga one nisu navedene u tablici.

Tablica 4-1. Ulazni PVT podatci o bušotini X

GOR	141 m ³ /m ³
Gustoća nafte	840 kg/m ³
Relativna gustoća plina	0,76
Salinitet vode	23000 ppm

Pri temperaturi od 100°C izmjerene su vrijednosti GOR-a, volumnog koeficijenta nafte B_o i viskoznosti nafte za pet različitih tlakova. Prikaz tih vrijednosti nalazi se u Tablici 4-2.

Tablica 4-2. Mjereni podatci na temperaturi 100°C

p, bar	GOR, m ³ /m ³	B _o , m ³ /m ³	Viskoznost, Pa s
276,8	141,7	1,42	0,000364
242,3	141,7	1,43	0,00035
207,9	116,1	1,35	0,000403
166,5	88,6	1,27	0,00048
69,96	33,66	1,12	0,0007205

4.1.2. Podatci o opremi bušotine X

U narednim tablicama se nalaze podatci redosljedom kako je objašnjeno u poglavlju 3.3., s naglaskom da se u ovom slučaju podatci o površinskoj opremi ne unose.

Tablica 4-3. Podatci o otklonu bušotine X

MD, m	TVD, m	Kut otklona, °
0	0	0
182,88	182,88	0
306,324	304,8	9,01245
1242,06	1219,2	12,2587
2346,96	2286	15,0902
2827,02	2743,2	17,7528

Tablica 4-4. Podatci o podzemnoj opremi bušotine X

Vrsta	MD, m	Unutarnji promjer uzlaznih cijevi, m	Unutarnja hrapavost uzlaznih cijevi, m	Vanjski promjer uzlaznih cijevi, m	Vanjska hrapavost uzlaznih cijevi, m	Unutarnji promjer zaštitnih cijevi, m	Unutarnja hrapavost zaštitnih cijevi, m
Xmas Tree	182,88						
Uzlazne cijevi	304,8	0,10292	1,524e-5	0,12192	1,524e-5	0,16256	1,524e-5
Podzemni sigurnosni ventil		0,094488					
Uzlazne cijevi	2590,8	0,10292	1,524e-5	0,12192	1,524e-5	0,16256	1,524e-5
Zaštitne cijevi	2827,02					0,16256	1,524e-5

U Tablici 4-4. je vrijednost za podzemni sigurnosni ventil navedena pod unutarnji promjer uzlaznih cijevi, a označava vrijednost promjera samog ventila, koja mora biti manja od unutarnjeg promjera uzlaznih cijevi. Također, s obzirom na to da se radi o odobalnoj bušotini, dubina erupcijskog uređaja od 182,88 metara označava dubinu mora, odnosno erupcijski uređaj se nalazi na dnu mora.

Tablica 4-5. Podatci o geotermalnom gradijentu za bušotinu X

TVD, m	MD, m	Temperatura formacije, °C
0	0	15,556
182,88	182,88	4,44
2743,2	2827,02	98,88

Treba naglasiti kako je unesen i podatak o prvoj procjeni ukupnog koeficijenta prijelaza topline, čija vrijednost iznosi 49,0755 W/m²/K.

Kod unosa specifičnih toplina za naftu, plin i vodu, preuzete su njihove uobičajene vrijednosti pri standardnim uvjetima (Tablica 4-6).

Tablica 4-6. Specifične topline za naftu, plin i vodu

Fluid	Specifične topline, J/kg/K
Nafta	2219
Plin	2135,27
Voda	4186,8

4.1.3. Podatci za proračun IPR krivulje

U Tablici 4-7 sadržani su podatci iz prozora *IPR Input* o modelu ležišta i korelacijama koje se koriste za računanje skin faktora, kao i metodi kontrole utoka pijeska u bušotinu, dok se u Tablici 4-8 nalaze ostali parametri potrebni za proračun IPR krivulje.

Tablica 4-7. Podatci o modelu ležišta i korištenim korelacijama

Ležišni model	Darcy
Mehanički skin	Karakas i Tariq
Skin uzrokovan djelomičnom penetracijom	Cinco/Marting-Brons
Kontrola pijeska	Pješčani zasip

Tablica 4-8. Podatci za proračun IPR krivulje

Ležišni tlak	238,9 bar
Ležišna temperatura	100°C
Udio vode	80%
Ukupni GOR	141 m ³ /m ³

4.1.4. Kriteriji ugradnje centrifugalne crpke

U Tablici 4-9 prikazani su primjerom zadani kriteriji za dizajn ovog proizvodnog sustava.

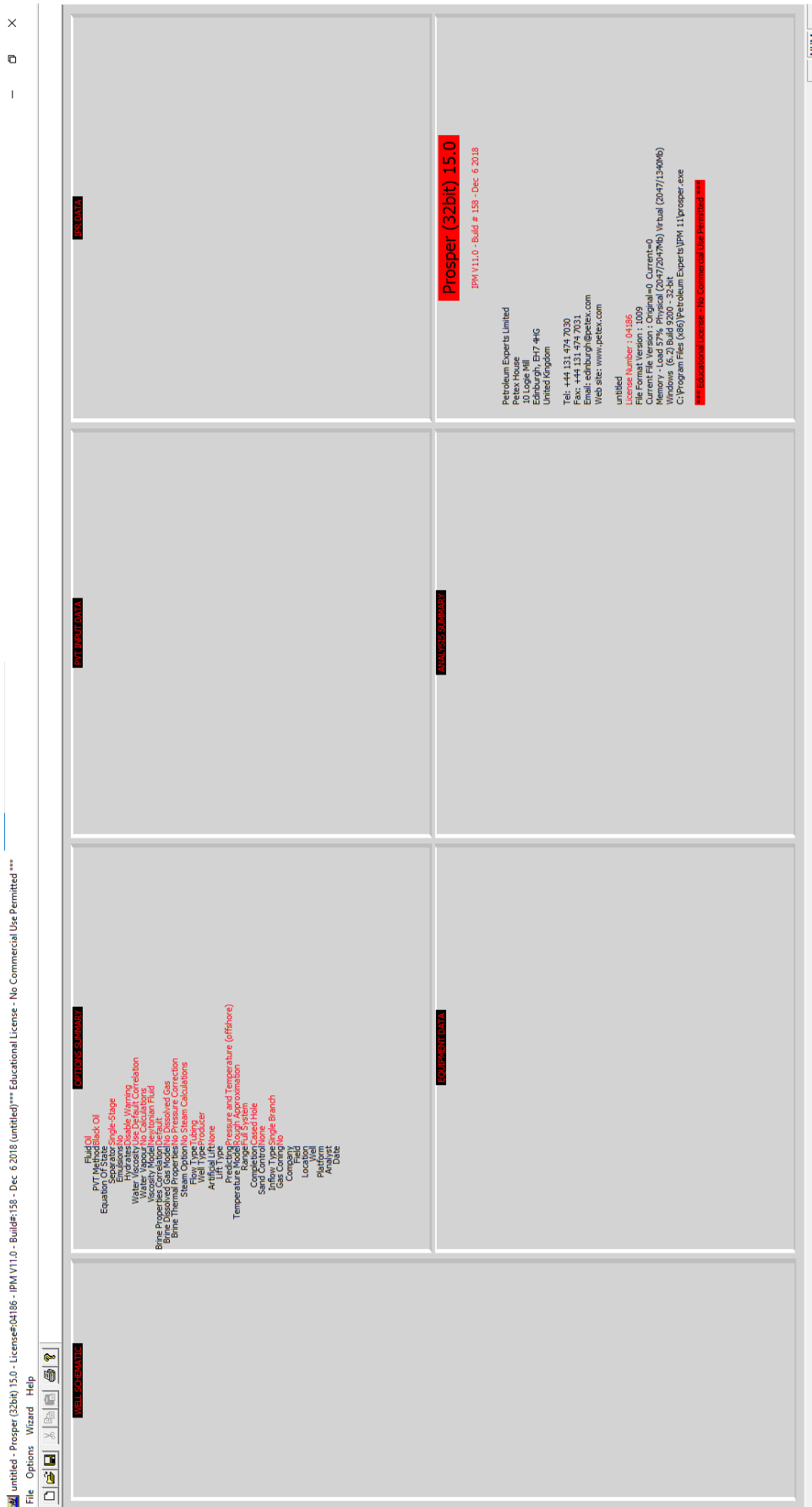
Tablica 4-9. Kriteriji za ugradnju centrifugalne crpke

Dubina ugradnje crpke (engl. <i>Pump Depth</i>)	2590,8 m
Radna frekvencija (engl. <i>Operating Frequency</i>)	60 Hz
Najveći dozvoljeni vanjski promjer crpke (engl. <i>Maximum OD</i>)	0,1524 m
Duljina kabla (engl. <i>Length of Cable</i>)	2743,2 m
Efikasnost separatora plina (engl. <i>Separator Efficiency</i>)	0
Dizajnirani protok crpke (engl. <i>Design rate</i>)	1271,9 m ³ /d
Udio vode (engl. <i>Water Cut</i>)	80%
GOR	141 m ³ /m ³
Tlak na ušću bušotine (engl. <i>Top Node Pressure</i>)	18,25 bar
Korelacija za umjetno podizanje (engl. <i>Vertical Lift Correlation</i>)	Petroleum Experts 2

Poznavajući prethodno prikazane ulazne podatke, može se pristupiti postavljanju proizvodnog modela bušotine.

4.2. Proizvodni model bušotine X

U ovom je poglavlju prikazan cjeloviti dizajn proizvodnog modela bušotine X po koracima kako je objašnjeno u poglavlju 3. Na Slici 4-1. nalazi se početno sučelje programa Prosper iz kojeg se ulazi u sve ostale prozore koji su prikazani u prethodnom poglavlju.



Slika 4-1. Početno sučelje u programu Prosper

Prema poglavlju 3-1. ovog rada, na početku je potrebno unijeti općenite podatke u prozoru *System Summary*. Uneseni podatci prikazani su Slikom 4-2. Kao što je na slici vidljivo, odabrani fluid koji protječe bušotinom je kombinacija nafte i vode, a PVT metoda kao osnova za buduće proračune je *Black Oil*. S obzirom na to da se ovim primjerom prikazuje dizajn uronjive centrifugalne crpke, opcija ESP odabrana je u sekciji *Artificial lift*, a odostalih ulaznih opcija odabrane su sljedeće:

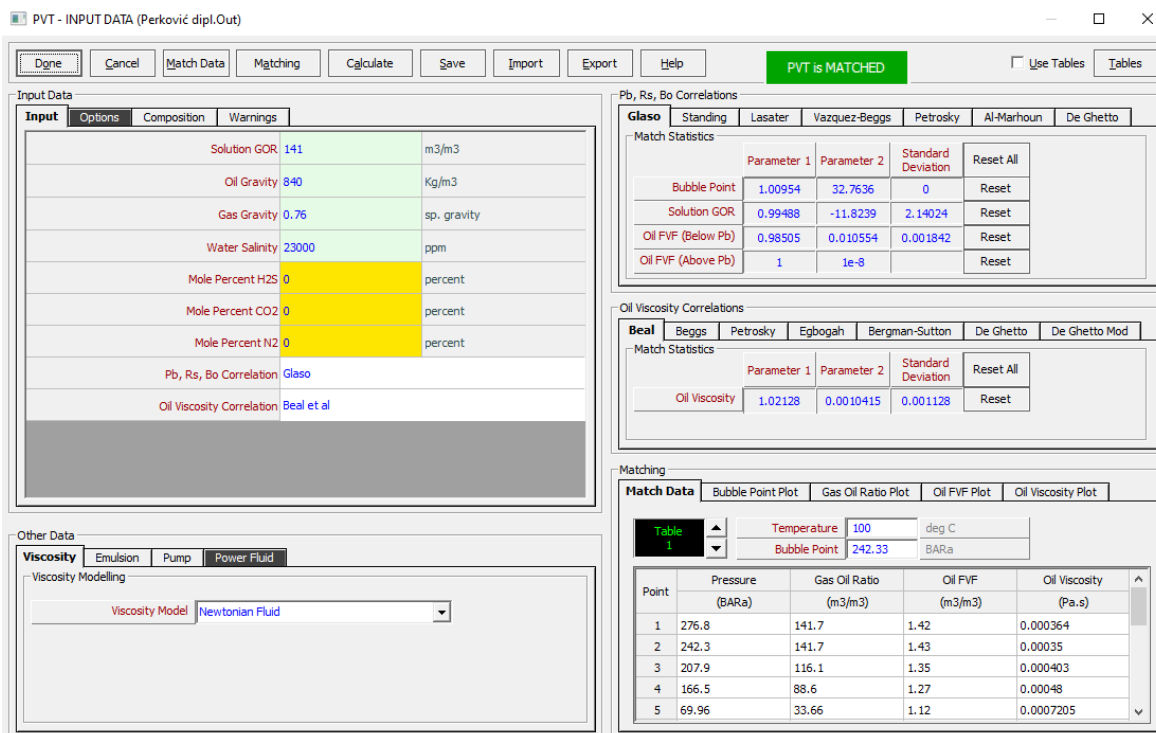
- U programu se predviđaju i tlak i temperatura (uz odabir opcije da se radi o odobalnoj bušotini);
- Bušotina je zacijevljena;
- Postoji kontrola pijeska, odnosno korištenje pješčanog zasipa;
- Nema konusiranja plina.

The screenshot shows the 'System Summary' window with the following settings:

Section	Parameter	Value
Fluid Description	Fluid	Oil and Water
	Method	Black Oil
	Separator	Single-Stage Separator
	Emulsions	No
	PVT Warnings	Disable Warning
	Water Viscosity	Use Default Correlation
	Viscosity Model	Newtonian Fluid
Calculation Type	Predict	Pressure and Temperature (offshore)
	Model	Rough Approximation
	Range	Full System
Brine Modelling	Brine Properties Correlation	Default
Well	Flow Type	Tubing Flow
	Well Type	Producer
Well Completion	Type	Cased Hole
	Sand Control	Gravel Pack
Artificial Lift	Method	Electrical Submersible Pump
	Type	Model Produced Oil and Gas in Annulus
Reservoir	Inflow Type	Single Branch
	Gas Coning	No
User information	Company	
	Field	
	Location	
	Well	
	Platform	
	Analyst	
Date	13. srpnja 2023.	
Comments (Ctrl-Enter for new line)		

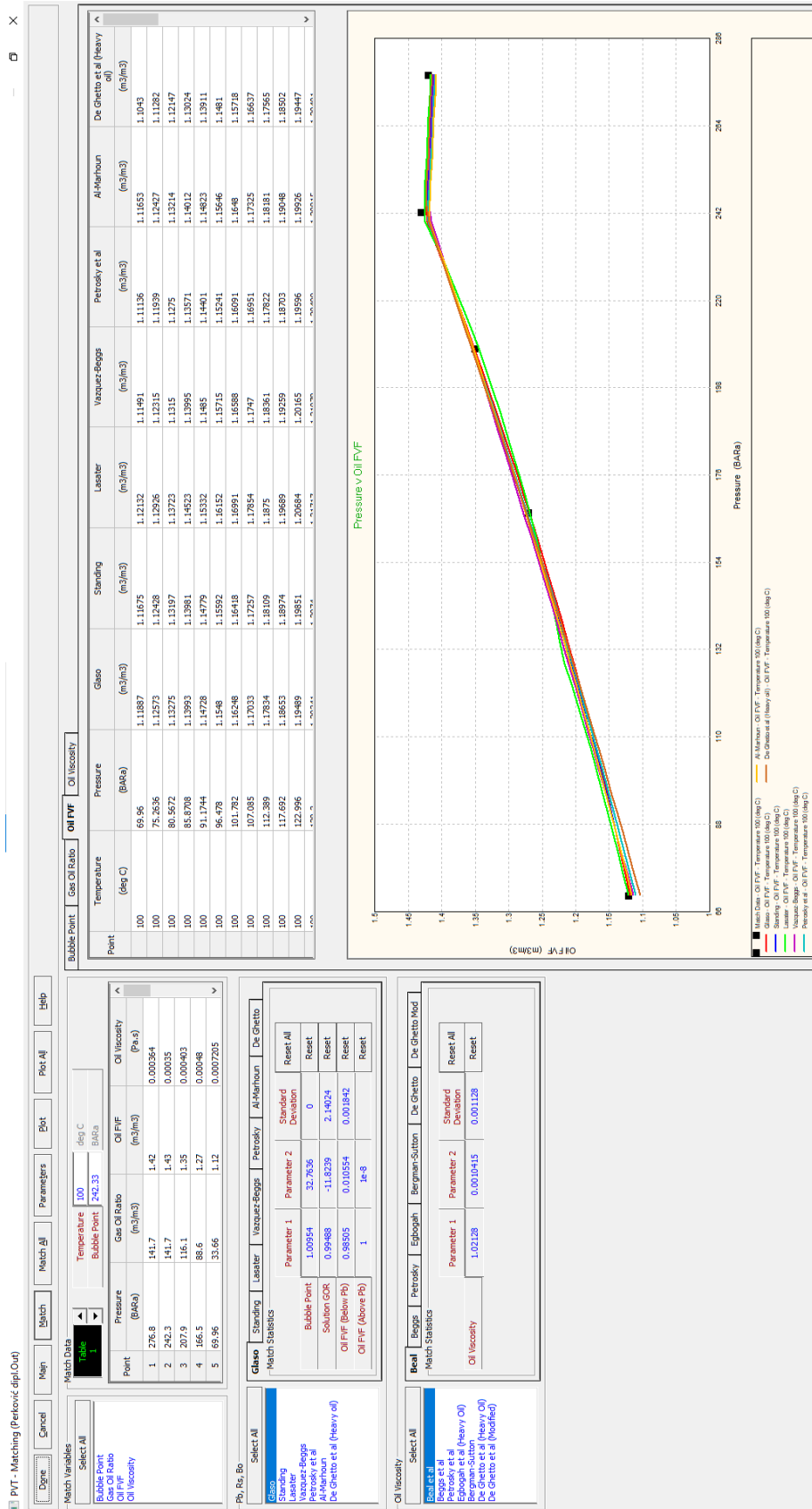
Slika 4-2. Ulazni podatci za proizvodni model bušotine X

Sljedeći korak u dizajnu sustava je unos PVT karakteristika fluida. To se obavlja otvaranjem *PVT Input Data* prozora, koji se nalazi na Slici 4-3. U njega su uneseni podatci iz Tablice 4-1.



Slika 4-3. Ulazni PVT podatci

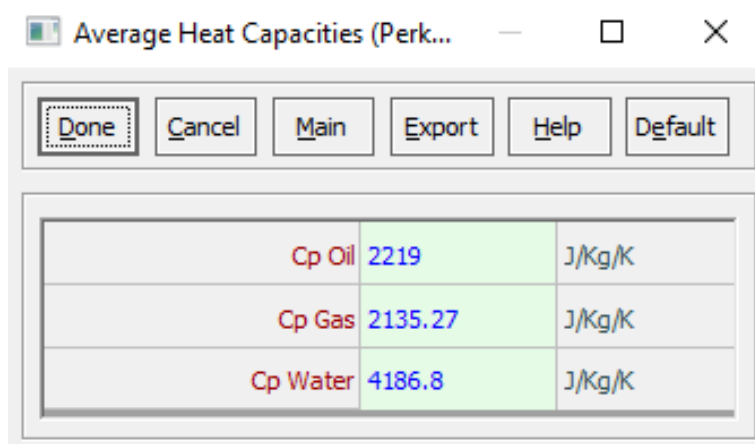
Na prethodnoj slici je vidljivo da se u izbornicima korelacija mogu odabrati korelacije za određene parametre. Program automatski računa rješenja za sve navedene korelacije, ali pritiskom na pripadajuću tipku svake od njih moguće je otvoriti rješenje samo odabrane korelacije. Tako je za P_b , R_s i B_o odabrana Glaso korelacija, dok je za viskoznost nafte odabrana Beal korelacija. Također, pritiskom na tipku *Matching* u gornjem izborniku otvara se detaljnije sučelje koje omogućava brzi odabir korelacija koje će se usklađivati s mjerenim podatcima. Osim toga, u matching prozoru je moguće tablično prikazati sve dobivene podatke i nacrtati odgovarajuće krivulje, što se vidi na desnoj strani prozora. *Matching* prozor prikazan je na Slici 4-4.



Slika 4-4. Opcija Matching za usklađivanje korelacija s mjerenim podacima

Klikom na tipku *Done* zatvara se trenutni prozor, a znak da su PVT podatci uspješno usklađeni je zeleni pravokutnik s natpisom „*PVT IS MATCHED*“ (Slika 4-3).

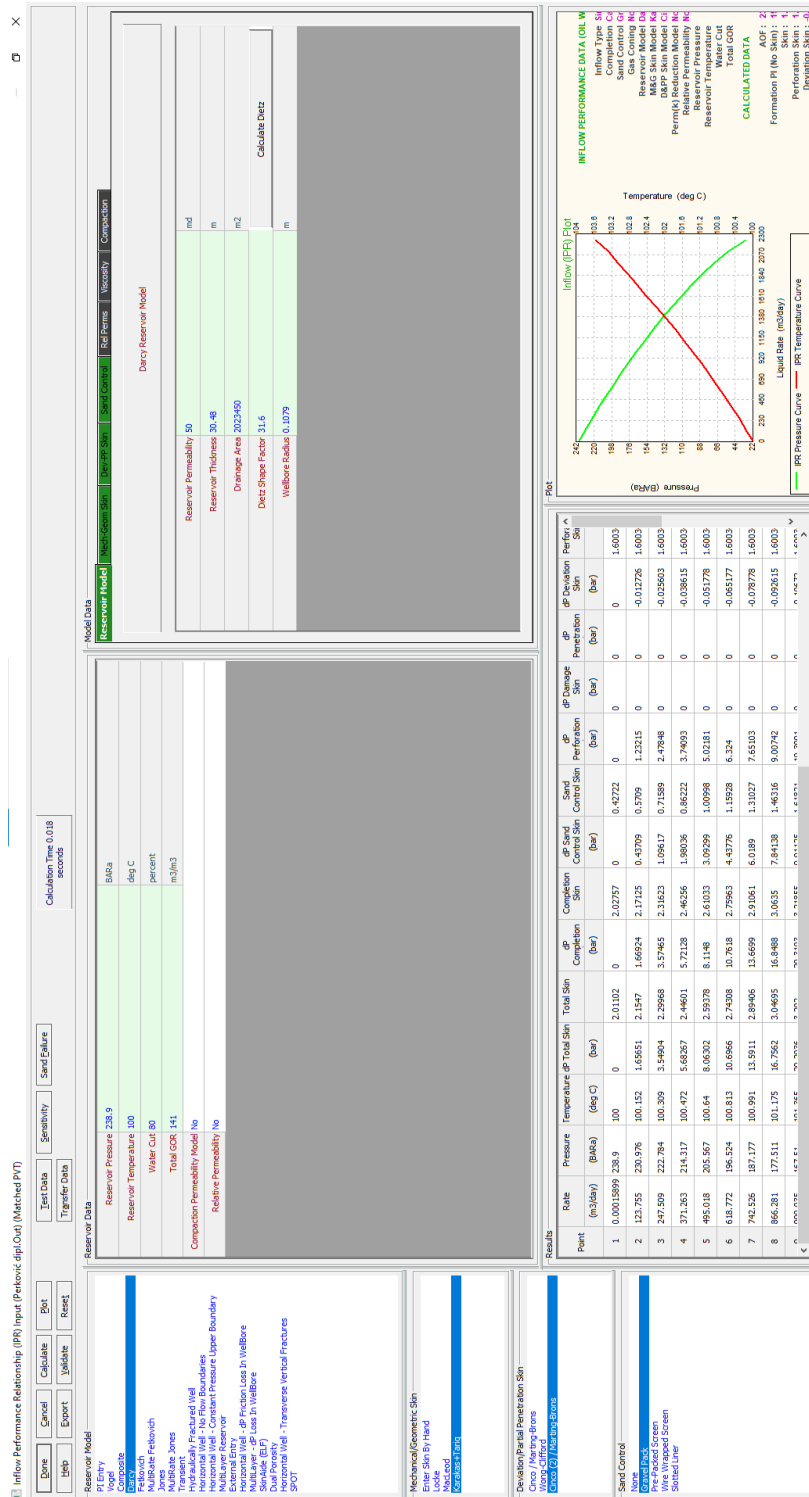
Sljedeći korak odnosi se na unos podataka o opremi u bušotini. Prozori za unos su identični onima sa Slika od 4-4. do 4-7. (izuzev Tablice 4-5. koja se odnosi na površinsku opremu, koja je u programu isključena), a u njih su uneseni podatci prikazani u Tablicama od 4-3. do 4-5. Dakle, prvo se unose podatci o mjerenoj duljini i stvarnoj vertikalnoj dubini bušotine, iz čega program računa kut otklona bušotine (ako postoji). Nakon toga se unose podatci o ugrađenoj opremi u bušotinu i dubini ugradnje opreme. Zaključno, unose se podatci o mjerenom geotermalnom gradijentu u bušotini. Dodatak na navedene korake je prihvaćanje zadanih vrijednosti specifičnih toplina nafte, plina i vode, kako je objašnjeno u poglavlju 3.3.5., a prikaz tog prozora nalazi se na slici 4-5.



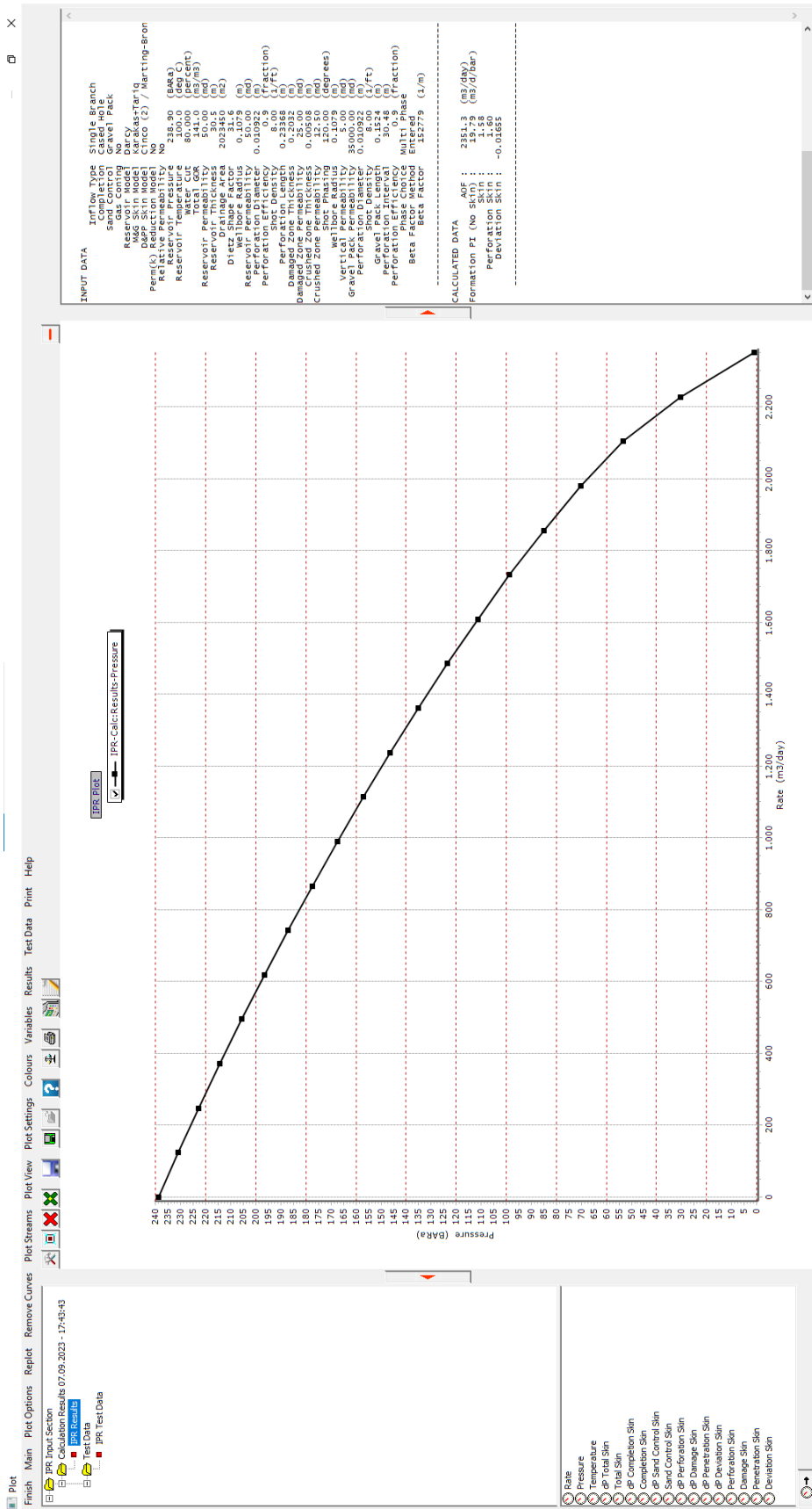
Slika 4-5. Prozor s prikazom specifičnih toplina nafte, plina i vode

Nakon točnog unosa svih podataka o opremi, moguće je preći na idući korak, koji se odnosi na postavljanje IPR modela bušotine X. Klikom na *IPR Data* otvara se prozor za određivanje IPR krivulje, prikazan na Slici 4-6), a gdje se najprije na lijevoj strani odabiru opcije navedene u Tablici 4-7. Potom se iz Tablice 4-8. unose podatci u središnji dio pod nazivom *Reservoir Data*. S obzirom na unesene podatke i ostale unaprijed postavljene parametre, program izračunava vrijednosti skin faktora, vidljive u izborniku na desnoj strani prozora. Pritiskom na tipku *Calculate* (hrv. izračunaj) program izračunava IPR krivulju, maksimalnu teoretsku proizvodnju i indeks proizvodnosti. Potom se IPR krivulja može i nacrtati, a vidljiva je na Slici 4-7. S desne strane grafa se mogu očitati vrijednosti *AOF* –

Absolute Open Flow (hrv. maksimalna teoretska proizvodnja) i *Formation PI – Productivity Index* (hrv. indeks proizvodnosti). AOF u ovom slučaju iznosi 2351,3 m³/d, a indeks proizvodnosti iznosi 19,79 m³/d/bar.

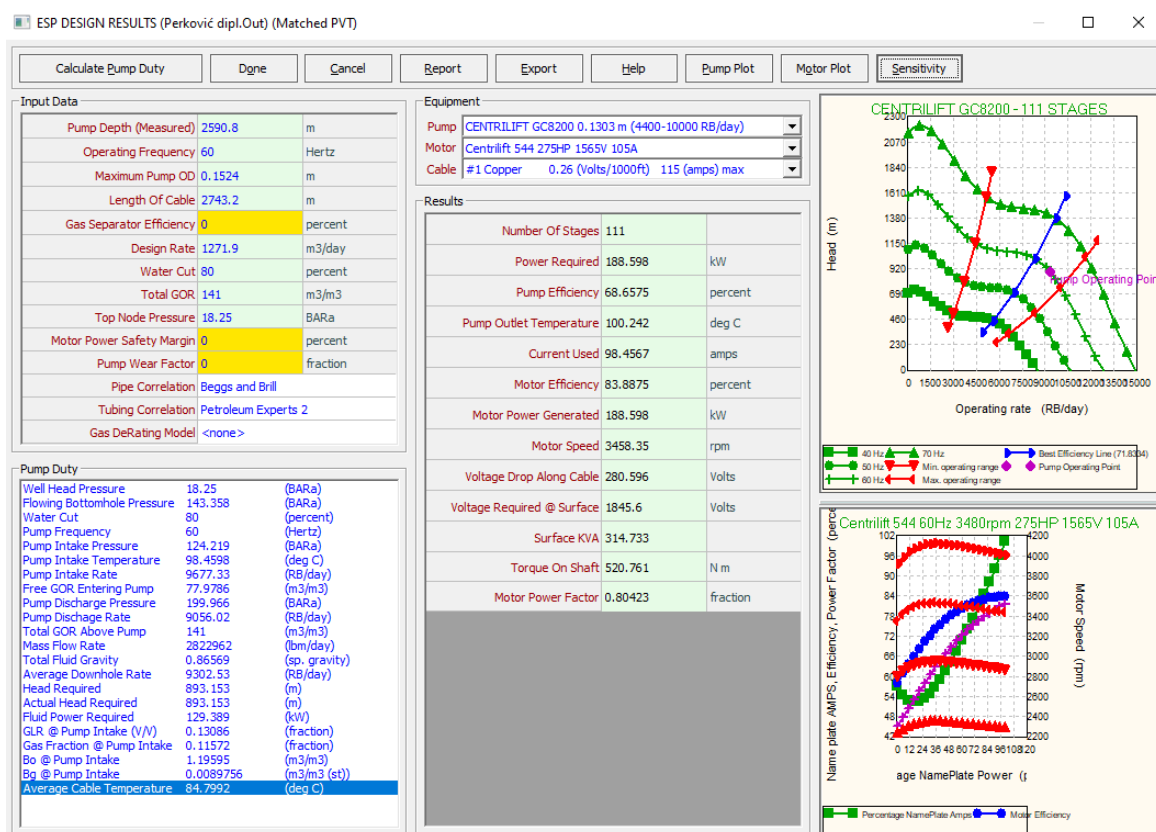


Slika 4-6. Prozor za određivanje IPR krivulje



Slika 4-7. IPR krivulja s rezultatima

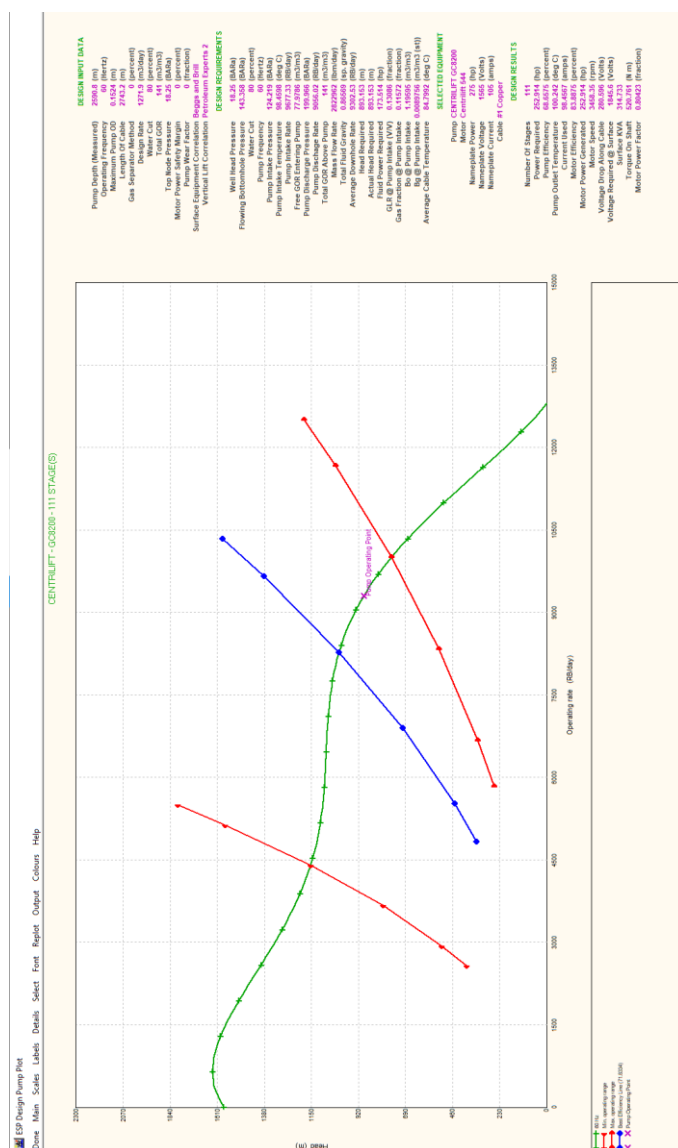
Sljedeći korak u ovom primjeru je ugradnja uronjive centrifugalne crpke u sustav i njen dizajn. Taj korak kreće pritiskom na opciju *Design* te se odabirom opcije *Electrical Submersible Pump* iz padajućeg izbornika otvara prozor imena *ESP Design*. Navedeni prozor sa svim sekcijama prikazan je na Slici 4-8.



Slika 4-8. Prozor za projektiranje ESP

Iz Tablice 4-9., se svi neophodni podatci za dizajn uronjive centrifugalne crpke unose s lijeve strane u dio pod nazivom *Input Data*. Vidljivo je kako su uneseni svi važni podatci koji se tiču dimenzija ugradnje pumpe, ali i podatci o fluidu koji se proizvodi, koje onda program kombinira s ranije unesenim informacijama i računa radne karakteristike crpke, vidljive ispod opisanog prozora u prozoru pod nazivom *Pump Duty*, kao što je opisano u prethodnom poglavlju. Tada program odabire sve moguće crpke koje zadovoljavaju postavljene kriterije, a na korisniku je da odabere crpku i kombinira je s motorom, u cilju stvaranja optimalnog sustava. Dva najvažnija kriterija u odabiru crpke su vanjski promjer crpke (engl. *Maximum Pump OD*) te prosječni protok na dnu bušotine (engl. *Average Downhole Rate*), prikazan u *Pump Duty* prozoru. U ovom radu odabrana je crpka

CENTRILIFT GC8200 0.1303 m (4400-10000 RB/day), koja zadovoljava sve ranije postavljene uvjete, a također ima visoku ukupnu djelotvornost koja iznosi 68,66%. Također, crpka je vanjskog promjera od 0,1303 m što je manje od maksimalno dopuštenog vanjskog promjera koji iznosi 0,1524 m, a može raditi s protocima od 4400 do 10000 RB/d (RB – *Reservoir Barrel*) ili od 700 m³/d do 1589,87 m³/d. Dakle, srednji protok kroz crpku može iznositi 9302,53 RB/d ili 1479 m³/d i nalazi se unutar granica kojima je crpka određena, što znači da crpka zadovoljava postavljene uvjete. Nakon odabira crpke, program omogućava crtanje dijagrama radnog područja crpke pritiskom na opciju *Pump Plot*, prikazanog Slikom 4-9.

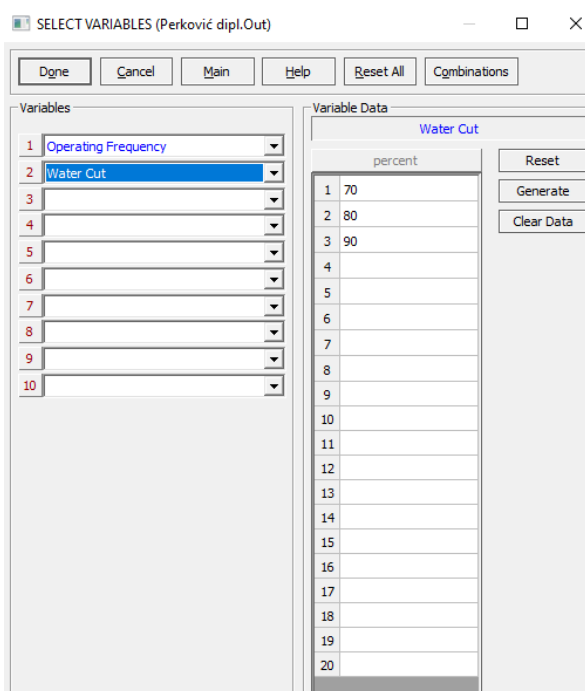


Slika 4-9. Dijagram radnog područja crpke

Na slici 4-9 crvene linije označavaju granice protoka unutar kojih crpka može raditi, gdje zelena linija predstavlja frekvenciju rada motora, koja iznosi 60 Hz, a plava linija predstavlja liniju maksimalne moguće djelotvornosti crpke, koja u ovom slučaju iznosi 71,83%. Ljubičasta točka pod nazivom *Pump Operating Point* (hrv. radna točka crpke) prikazuje točku pri kojoj odabrana crpka radi, uzevši u obzir sve razmatrane uvjete i kriterije, a obvezno se mora nalaziti između dvije crvene linije i što je bliže moguće plavoj liniji. Uz dijagram se nalaze i svi ulazni i izlazni parametri proračuna, pri čemu je vidljivo da je za ukupnu visinu podizanja kapljevine potrebno 111 stupnjeva crpke (Slika 2-4).

4.2.1. Analiza osjetljivosti i diskusija rezultata

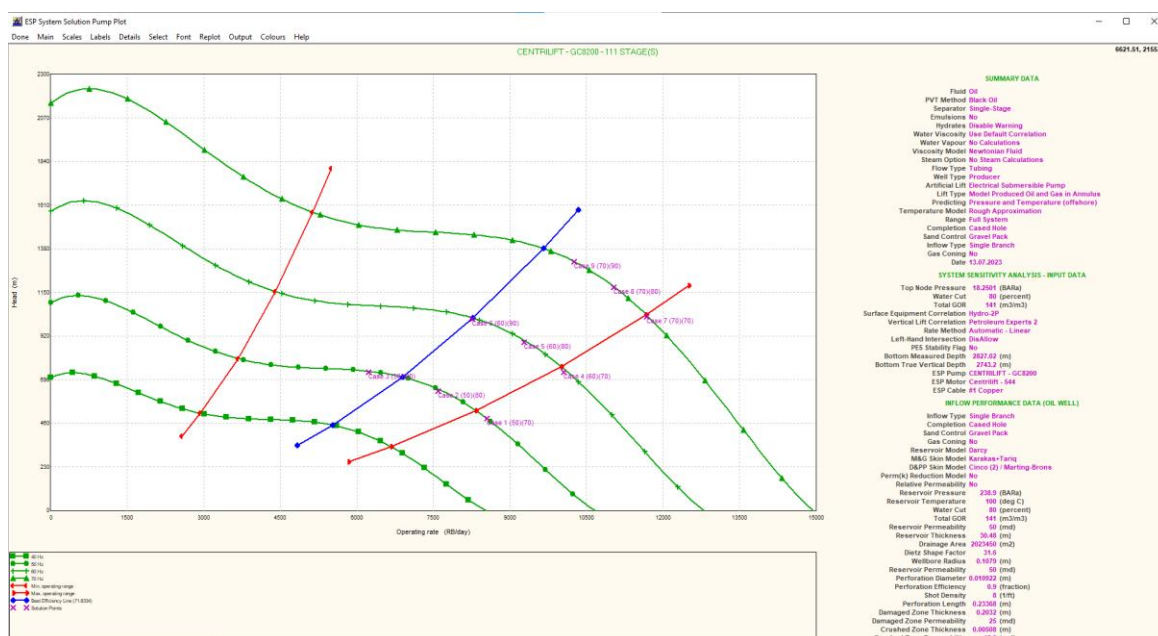
Sljedeći korak u programu Prosper je primjena njegove značajne prednosti, koja se odnosi na prognozirane i analizu proizvodnih mogućnosti dizajniranog proizvodnog sustava u ovisnosti o parametrima ležišta i bušotine, za koje se pretpostavlja da bi se najvjerojatnije mogli mijenjati, što se naziva analizom osjetljivosti (engl. *Sensitivity Analysis*) proizvodnog sustava. To znači da se s pomoću ove opcije može provjeriti zadovoljava li odabrana crpka sve zadane uvjete i u slučaju promjene nekih od ulaznih parametara. Za ovu analizu osjetljivosti je kao promjenjivi parametar odabran udio vode u proizvodnom fluidu, odnosno pretpostavlja se da će udio vode s vremenom rasti, kao što se vidi na Slici 4-10, dok je drugi parametar radna frekvencija crpke.



Slika 4-10. Odabir varijabli za analizu osjetljivosti

S obzirom na to da je početni udio vode 80%, provest će se analiza za slučaj gdje je udio vode 90%, ali i za slučaj gdje je udio vode manji od početnog, odnosno gdje iznosi 70%. Paralelno s tim, provedena je i analiza za promjenu radne frekvencije crpke, odnosno osim početnih 60 Hz, napraviti će se provjera i za slučajeve frekvencije od 50 Hz i 70 Hz. Kako se radi o ukupno tri vrijednosti za svaku odabranu varijablu, to znači da bi se kao rezultat ukupno moglo dobiti devet slučajeva, pri kojima bi crpka mogla nastaviti s radom i uslijed pretpostavljenih promjena u sustavu.

Na Slici 4-11. su vidljivi rezultati analize osjetljivosti, odnosno radne točke crpke u svim analiziranim slučajevima.

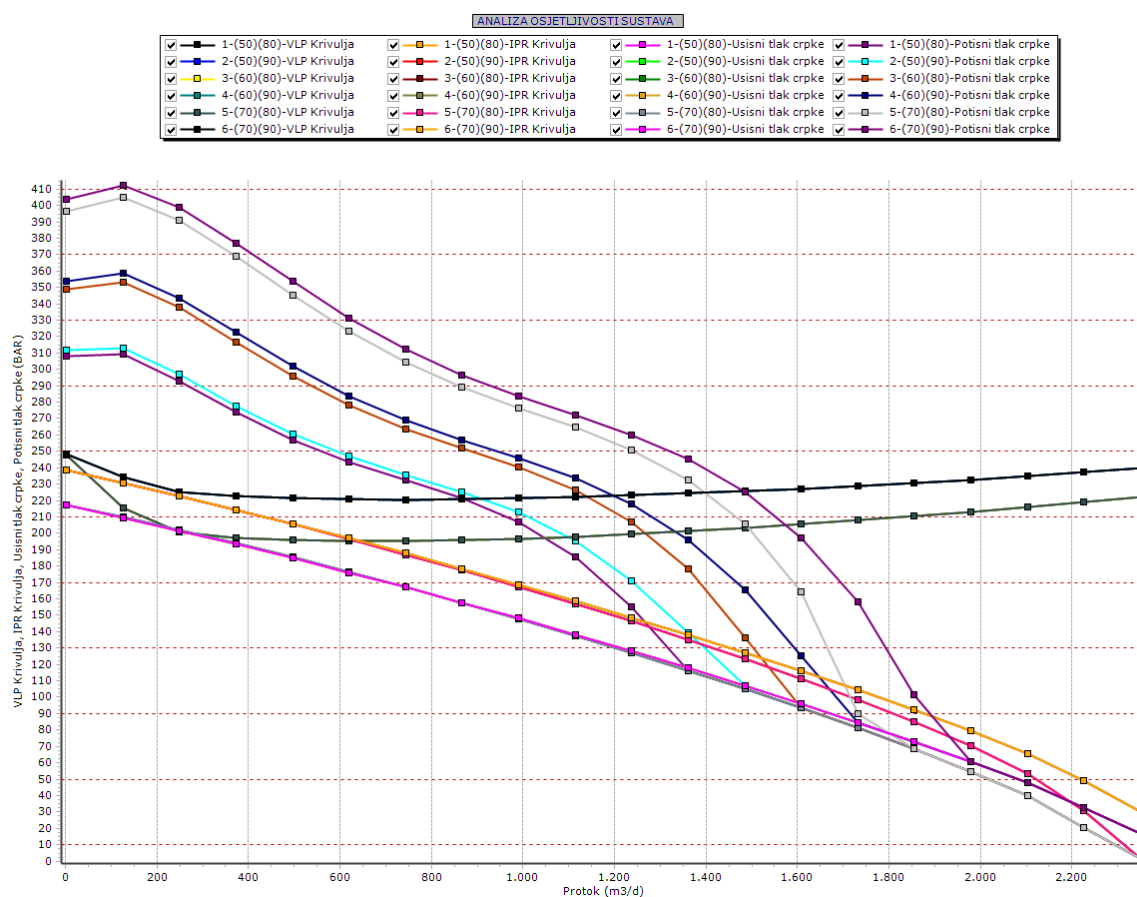


Slika 4-11. Prikaz radnih točaka crpke dobivenih analizom osjetljivosti

U skladu s navedenim uvjetima, slučajevi 1, 4 i 7 ne predstavljaju dovoljno pouzdan rad crpke niti pri jednoj odabranoj frekvenciji, pa su iz daljnje analize isključeni, a sva tri slučaja odnose se na pretpostavku da je udio vode smanjen na 70%. Za ostalih šest analiza tj. za slučajeve 2, 3, 5, 6, 8, 9, gdje peti predstavlja trenutne uvjete rada crpke pri 60 Hz i s 80% udjela vode, određene su radne točke proizvodnog sustava (*engl. solution point*). One se kod eruptivnih bušotina dobivaju kao presjecište IPR i VLP (*engl. Vertical Lift Performance*) krivulje, koja predstavlja gradijente dinamičkih tlakova u uzlaznim cijevima. Kod sustava s uronjivom centrifugalnom crpkom se ova rješenja prikazuju s dodatne dvije krivulje. To su krivulje *Intake* (hrv. usisni tlak) i *Discharge* (hrv. potisni tlak), a odnose se na usisni i potisni tlak crpke, kao što je pojašnjeno u teoretskom dijelu rada, jednadžbom 2-23 i Slikom 2-11.

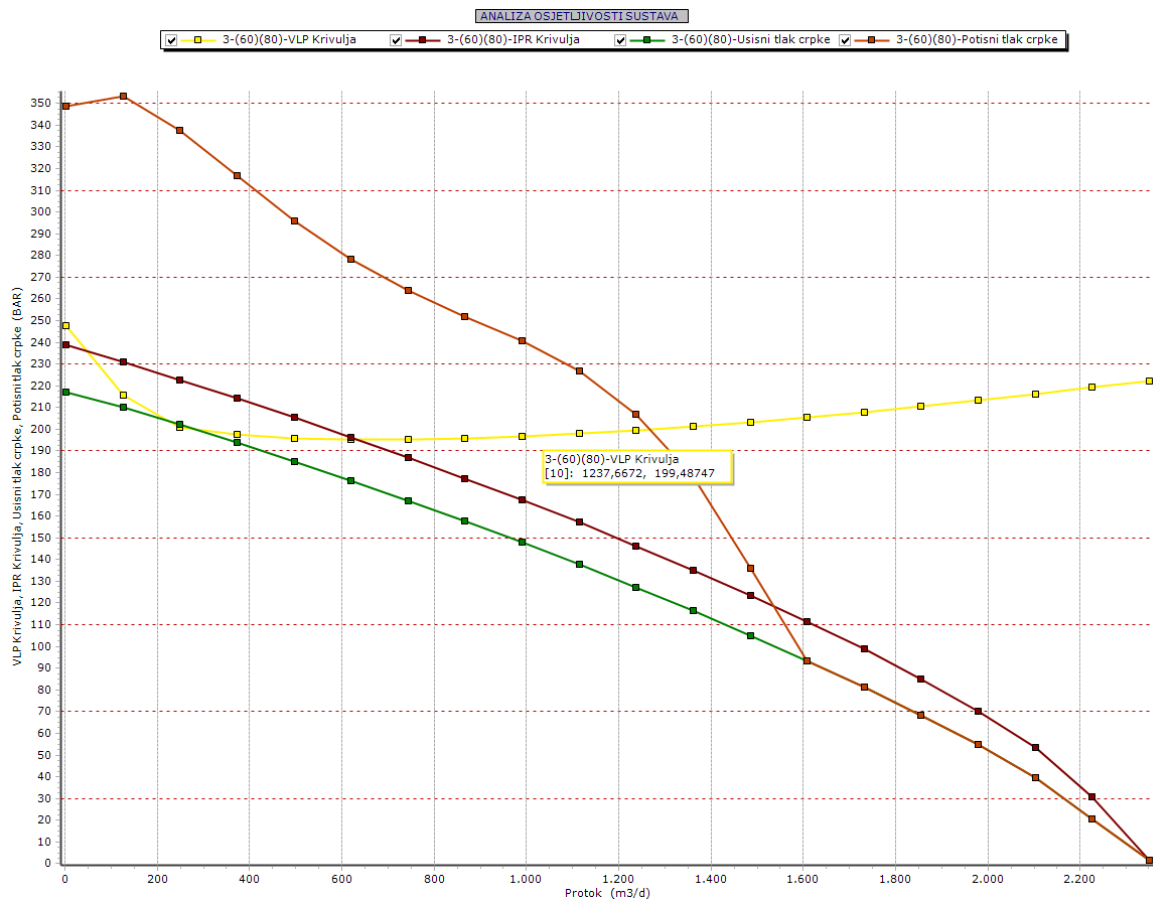
Uobičajeno je da se kod sustava s UCC kao radna točka odabire presjecište VLP i Discharge krivulje.

Na dijagramu prikazanom Slikom 4-12. nalazi se šest preostalih presjecišta, odnosno radnih točaka sustava. Prvi slučaj se sada odnosi na frekvenciju od 50 Hz i udio vode od 80 %, drugi na 50 Hz i 90 % vode, treći na 60 Hz i 80 % vode, odnosno na trenutno stanje, a šesti, sedmi i osmi slučaj se redom odnose na 60 Hz i 90 % vode, 70 Hz i 80 % vode, te 70 Hz i 90 % vode. Za sve četiri karakteristične krivulje (IPR, VLP, Intake, Discharge), koje su navedene i na ordinati dijagrama, u opisu dijagrama nalaze se iznosi promjenjivih varijabli za šest analiziranih slučajeva, što bi ukupno dalo 24 krivulje, ali se IPR i Intake krivulje u većini slučajeva preklapaju, radi sličnog dinamičkog tlaka na dnu bušotine i sličnog usisnog tlaka crpke, pa su spojene.



Slika 4-12. Prikaz radnih točaka proizvodnog sustava dobivenih analizom osjetljivosti

Na sljedećem dijagramu izdvojena je samo radna točka za trenutno stanje proizvodnje, koje se odvija uz crpku koja radi pri 60 Hz, te je udio vode u proizvodnoj kapljevini 80%, a u ovoj analizi osjetljivosti označena je kao 3. slučaj.



Slika 4-13. Radna točka proizvodnog sustava za odabran slučaj analize osjetljivosti

Protok od 1237 m³/dan, u ovom slučaju, crpka obavlja pri potisnom tlaku od 199 bara, dok je usisni tlak na Intake krivulji pri istom protoku oko 124 bara, što znači da crpka CENTRILIFT GC8200 ostvaruje diferencijalni tlak od 75 bara, kroz 111 stupnjeva (Slika 4-9).

5. ZAKLJUČAK

Primjena uronjive centrifugalne crpke (UCC) jedna je od najčešće korištenih metoda mehaničkog podizanja kapljevine. U usporedbi s ostalim metodama mehaničkog podizanja kapljevine, uronjive centrifugalne crpke mogu podizati najveće količine fluida. Moguće su razne dimenzije crpke, što znači da je UCC primjenjiva u širokom spektru slučajeva u naftno-inženjerskoj praksi. Također, važna prednost ove metode je da se crpka može ugraditi na odobalnim poljima ugljikovodika, kako je prikazano u ovom radu, ali i u slučajevima proizvodnje nafte iz bušotina na kopnu. Oprema UCC ne zauzima puno prostora na površini, a njezin najveći nedostatak je relativno visoka cijena. Od svih sustava za mehaničko podizanje kapljevine, za ovaj su sustav potrebna najveća kapitalna ulaganja, tako da je iznimno važno ispravno obraditi sve podatke i optimalno projektirati crpku, kako bi ulaganja bila opravdana. Osim toga, ograničenje ove metode jest dubina ugradnje. Proporcionalno s dubinom na kojoj je potrebno ugraditi uronjivu centrifugalnu crpku, raste i cijena kabela za napajanje njezina elektromotora, što znači da na određenim dubinama ugradnja ovog sustava prestaje biti financijski isplativa.

Prosper je izuzetno jak računalni program koji omogućava veliki broj opcija kod projektiranja sustava u proizvodnom inženjerstvu nafte i plina, a moguće ga je koristiti i kod geotermalnih bušotina. U ovom radu prikazan je način projektiranja sustava za mehaničko podizanje kapljevine ugradnjom uronjive centrifugalne crpke, iako je Prosper u mogućnosti dizajnirati i puno veći spektar proizvodnih sustava. Kao glavni rezultat rada odabrana je crpka koja u zadanim uvjetima ostvaruje dvostruko veći protok u odnosu na eruptivnu proizvodnju bušotine, koja je iznosila oko $620 \text{ m}^3/\text{d}$. Crpka ostvaruje diferencijalni tlak od 75 bara, odnosno potisni tlak od 199 bara, pri čemu je frekvencija rada motora 60 Hz, a udio vode u proizvodnji 80%. U nastavku je provedena analiza osjetljivosti sustava uzevši u obzir promjenu frekvencije rada motora i udjela vode u proizvodnji u svrhu prognožiranja proizvodnih mogućnosti sustava. Utvrđeno je da bi u šest od devet analiziranih slučajeva bušotina ostvarivala odgovarajuću proizvodnju, što se u modeliranju uronjivih centrifugalnih crpki očituje kao presjecište VLP i *Discharge* krivulja. U slučaju manje frekvencije i istog udjela vode, crpka daje manji protok, koji se ostvaruje pri manjem diferencijalnom tlaku. Sukladno tome, pri višoj frekvenciji i većem udjelu vode, crpka može ostvariti veći protok, ali je pri tome veći i diferencijalni tlak.

6. LITERATURA

1. ABBAS, R., 2020. *Artificial Lift Overview*, Predavanje, Missan, Amarah
2. ABDELHADY, A., GOMAA, S., RAMZI, H., HISHAM, H., GALAL, A., ABDELFATTAH, A., 2020. Electrical Submersible Pump Design in Vertical Oil Wells. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, 4(5): 000237, The British University in Egypt
3. BAKER HUGHES, 1989., *Centrilift ESP Equipment Catalog*
4. BROWN, K.E., 1980. *The Technology of Artificial lift Methods, Volume 2b*, The University of Tulsa
5. BROWN, K.E., 1982. *Overview of Artificial Lift Systems*. SPE 9979, 18.-26. Ožujak 1982., Peking
6. BROWN, K.E., 1984. *The Technology of Artificial lift Methods, Volume 4*, The University of Tulsa
7. LEA J.F., BEARDEN J.L., 1980. *Effect of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance*, Journal of Petroleum Technology. SPE 9218, 21.-24. Rujan 1980., Dallas
8. MORRISON, G., PIROUZPANAH, S., KIRLAND, K., SCOTT, S.L., BARRIOS, L.J., 2014. *Performance Evaluation of a Multiphase Electric Submersible Pump*. OTC-25080-MS, 5.-8. Svibanj 2014., Houston
9. PETROLEUM EXPERTS, 2018. Prosper User Manual – Version 15. Edinburgh.
10. SAPUTELLI, L., MARAVEN S.A., 1997. *Combined Artificial Lift System – An Innovative approach*. SPE 39041, 30. Kolovoz-3. Rujan 1997., Rio de Janeiro
11. SARVESTANI A.D., HADIPOUR A., 2019. *Artificial Lift Method Selection for Mature Oil Fields: A Case Study*. SPE-198424-MS, 16.-18. Listopad 2019., Baku
12. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. *Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
13. ZHU, J., ZHANG, H., 2018. *A Review of Experiments and Modeling of Gas-Liquid Flow in Electrical Submersible Pumps*, The University of Tulsa

Internetski izvori:

14. Pumps and Systems. *n.d.* Electric Submersible Pumps in the Oil and Gas Industry.
URL: <https://www.pumpsandsystems.com/electric-submersible-pumps-oil-and-gas-industry> (10.9.2023.)

15. Schlumberger. 2015. The Defining Series: Electrical Submersible Pumps, URL: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp> (10.9.2023.)
16. Kimray. *n.d.* How Does an ESP Work, URL: <https://kimray.com/training/how-does-electric-submersible-pump-esp-work> (18.9.2023.)
17. Schlumberger. *n.d.* VGSA Vortex Gas Separator Assembly, URL: [VGSA Vortex Gas Separator Assembly for ESPs | SLB](#) (16.9.2023.)

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.



Luka Perković



KLASA: 602-01/23-01/171
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 21.09.2023.

Luka Perković, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/171, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 10.07.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

MOGUĆNOSTI PROJEKTIRANJA URONJIVIH CENTRIFUGALNIH CRPKI U PROGRAMU PROSPER

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)