

# Proračun električne uronjive crpke numeričkim metodama

---

Tomljanović, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*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:169:706060>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij Naftnog Rudarstva

**PRORAČUN ELEKTRIČNE URONJIVE CRPKE NUMERIČKIM METODAMA**

Diplomski rad

Luka Tomljanović

N279

Zagreb, 2019.

PRORAČUN ELEKTRIČNE URONJIVE CRPKE NUMERIČKIM METODAMA

LUKA TOMLJANOVIĆ

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U trenutku kada tlak na dnu bušotine nije dovoljan za prevladavanje ukupnih gubitaka tlakova od bušotine do separatora, prirodna proizvodnja više nije moguća. Kako bi se proizvodnja nastavila, potrebno je primijeniti metode umjetnog podizanja kapljevine. Jedna od najraširenijih metoda umjetnog podizanja kapljevine koristi crpku koja je uronjena u kapljevinu unutar bušotine te služi za povećanje tlaka kako bi se prevladali gubici tlaka na putu do površine. Uronjiva crpka se sastoji od pokretnog dijela (rotora) pričvršćenog na rotirajuće vratilo (osovinu) te nepokretnog dijela (statora). Za pravilan dizajn uronjivih crpki potrebni su mnogi podaci poput podataka o izvedbi bušotine, svojstvima fluida te mogućim problematičnim uvjetima. Protok fluida odnosno proizvodnja nafte i plina je ulazni parametar u dizajnu ESP sustava jer je izbor crpke moguć jedino ako znamo za koje će se protoke koristiti. Crpka se određuje odabiranjem serije i tipa crpke te izračunavanjem potrebnog broja stupnjeva i snage crpke. U ovom diplomskom radu pomoću programskog jezika Python prikazan je proračun ESP-a odabirući nekoliko crpki za zadane uvjete ležišta.

Ključne riječi: električna uronjiva crpka, proizvodnja kapljevine, programski jezik Python

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 2 tablice, 21 sliku, 9 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Luka Perković, docent RGNF

Ocjenjivači: 1. Dr.sc. Luka Perković, docent RGNF

2. Dr.sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

3. Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF

Datum obrane: 20. rujna 2019.

CALCULATION OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP BY NUMERICAL METHODS

LUKA TOMLJANOVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

At the moment when the bottomhole pressure is not large enough to overcome the sum of pressure losses inside the borehole to the separator, natural production is over. In order for production to continue, artificial lift methods must be applied. One of the most widespread artificial lift methods consists of a pump that is submerged in the liquid inside the wellbore and it is used to increase the pressure of the liquid so that it can overcome the pressure losses on its way to the surface. Electrical submersible pump consists of a moving part (rotor) attached to a rotating shaft (axle) and a static part (stator). For suitable design of electrical submersible pumps, a lot of data is needed such as well performance data, fluid properties and possible troublesome working conditions. Fluid flow rate from the wellbore is an input parameter for designing the Electrical Submersible Pump system because choosing the pump is only possible for known flow rates. The pump is determined by choosing pump series and pump type while also calculating the necessary number of pump stages and pump power. In this thesis the ESP system is calculated by choosing a few pumps from Halliburton catalog for the given reservoir conditions using the Python programming language.

Keywords: electrical submersible pump, liquid production, programming language Python

Thesis contains: 35 pages, 2 tables, 21 figures, 9 references

Original in: Croatian Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Luka Perković, PhD  
2. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD  
3. Assistant Professor Sonja Koščak-Kolin, PhD

Date of defense: September 20, 2019

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA .....	III
1. Uvod .....	1
2. Teoretski opis električne uronjive crpke .....	2
2.1 Dijelovi crpke, prednosti i nedostaci .....	2
2.2 Gubici električne energije .....	6
2.3 Proizvodni principi .....	8
2.4 Karakteristike crpke.....	12
2.5 Utjecaj slobodnog plina na rad crpke .....	18
2.6 Dizajn i odabir crpke .....	23
3. Metoda proračuna električne uronjive crpke u skriptnom jeziku Python .....	25
4. Analiza slučaja .....	26
4.1 Postavke analize slučaja.....	26
4.2 Rezultati i diskusija analize slučaja .....	29
5. Zaključak.....	33
6. Reference .....	34

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Dijelovi električne uronjive crpke .....	3
Slika 2-2. Shema jednog stupnja crpke.....	4
Slika 2-3. Konfiguracija crpke za različite tipove protoka .....	4
Slika 2-4. Karakteristika crpke.....	5
Slika 2-5. Raspodjela gubitaka električne energije u naftnoj industriji .....	7
Slika 2-6. Gubici električne energije u sustavu električne uronjive crpke.....	8
Slika 2-7. Idealni profil tlaka i protoka unutar bušotine .....	10
Slika 2-8. Grafički prikaz Vogelove jednadžbe .....	12
Slika 2-9. Karakteristike crpke.....	13
Slika 2-10. Analiza proizvodnog sustava po čvorovima .....	14
Slika 2-11. Shema podizanja nafte pomoću crpke .....	15
Slika 2-12. Shema sustava električne uronjive crpke .....	17
Slika 2-13. Prikaz kretanja tekućine i plina po lopaticama .....	20
Slika 2-14. Blokiranje prolaza kapljevine plinom.....	21
Slika 2-15. Područja rada crpke .....	22
Slika 3-1. Prikaz algoritma u izračunu.....	25
Slika 4-1. Karakteristike crpke HAL538-1500 .....	28
Slika 4-2. Karakteristike crpke HAL400-6000 .....	28
Slika 4-3. Karakteristike crpke HAL400-1250 .....	29
Slika 4-4. Karakteristike crpke HAL538-11000 .....	29
Slika 4-5. Promjena tlaka sa dubinom bušotine .....	31
Slika 4-6. Promjena gustoće sa dubinom bušotine .....	32

## **POPIS TABLICA**

Tablica 4-1. Ulazni podaci za analizu slučaja.....	28
Tablica 4-2. Svojstva pojedinih crpki dobivena proračunom u Pythonu.....	30

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

ESP – električna uronjiva crpka (engl. *Electrical Submersible Pump*)

$p$  – tlak [Pa]

$\rho$  – gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  – brzina protjecanja [m/s]

$g$  - gravitacijsko ubrzanje [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]

$H$  – visinska razlika [m]

$q$  - protok, [ $\text{m}^3/\text{dan}$ ]

$k$  -efektivna propusnost, [ $\text{m}^2$ ]

$h$  -debljina sloja, [m]

$\mu$  - viskoznost kapljevine, [Pas]

$r_e$  - drenažni radijus, [m]

$r_w$  - radijus bušotine, [m]

$p_r$  - tlak ležišta, [bar]

$p_w$  - dinamički tlak na dnu bušotine, [bar]

PI - indeks proizvodnosti, [ $\text{m}^3/\text{dan}/\text{bar}$ ]

$q_{\text{max}}$  - maksimalna proizvodnja, [ $\text{m}^3/\text{dan}$ ]

$p_r$  - ležišni tlak, [bar]

$d_{\text{tub}}$  – unutarnji promjer tubinga [m]

$h_{\text{perf}}$  – dubina perforacija [m]

$p_{\text{ušće}}$  – tlak na ušću bušotine [bar]

$C$  – Hazen-Williams parametar tubinga

$T_R$  – temperatura na dnu bušotine [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$p_b$  – tlak zasićenja [bar]

$x_w$  – udio vode [-]



$z$  – faktor kompresibilnosti [-]

$\Upsilon_g$  – relativna gustoća plina [-]

$\Upsilon_w$  – relativna gustoća vode [-]

## 1. Uvod

Naftne bušotine u ranim fazama proizvode prirodnim načinom, energijom ležišta - eruptivno. Prirodna proizvodnja znači da je tlak na dnu bušotine dovoljan za savladavanje gubitaka tlaka koji se pojavljuju u bušotini te do separatora. Kada ovaj uvjet nije zadovoljen, prirodna proizvodnja prestaje te bušotina prestaje s radom. Dva glavna razloga za to su: dinamički tlak na dnu bušotine pada ispod ukupnih gubitaka tlaka u bušotini ili gubici tlaka postaju preveliki da bi se fluid iznio na površinu. Do prvog slučaja dolazi uslijed pada ležišnog tlaka, a do drugog slučaja uslijed povećanja otpora u bušotini odnosno promjene u strukturi protjecanja (smanjenja proizvodnja plina) te ovisi o načinu opremanja bušotine.

Metode umjetnog podizanja se koriste za proizvodnju fluida iz bušotina koje su prestale eruptirati ili kako bi povećali proizvodnju. Važnost metoda umjetnog podizanja se očituje u ukupnom broju instalacija u svijetu; gdje od ukupnih 2 milijuna bušotina čak 50% koristi nekakvu metodu umjetnog podizanja kapljevine (Takacs, 2018)

Jedna od najraširenijih metoda umjetnog podizanja kapljevine koristi crpku koja je uronjena u kapljevину unutar bušotine te služi za povećanje tlaka kako bi se prevladali gubici tlaka prema površini.

Sekundarne metode crpljenja nafte mogu povećati proizvodnju u kratkoročnom te srednjoročnom razdoblju nadoknađujući slabljenje energije ležišta te pridobivajući rezerve dugoročno boreći se s negativnim utjecajem povećanja udjela vode.

Električne uronjive crpke se koriste u širokoj primjeni u uvjetima podizanja kapljevina s visokom protocima fluida. Primjenjive su u dubokim te zakrivljenim bušotinama. Veličina odnosno vanjski promjer same crpke definira maksimalni kapacitet električne uronjive crpke pri danoj rotacijskoj brzini. Radi toga, proizvodna kolona zaštitnih cijevi određuje maksimalni mogući protok i veličinu crpke.

Opće prednosti električnih uronjivih crpki su (Takacs, 2018) :

- Idealne za proizvodnju velikih do ekstremno velikih volumena kapljevine iz srednje dubokih bušotina, protoci od 4770 m<sup>3</sup>/dan na dubinama od 350 m;

- Efikasnost je relativno velika (oko 50%) za protoke veće od 160 m<sup>3</sup>/dan;
- Lakše održavanje ukoliko je pravilno ugrađena i korištena;
- Površinska oprema zahtijeva malo prostora;
- Mali prostorni zahtjevi što može biti pogodno na odobalnim postrojenjima.

Opći nedostaci su :

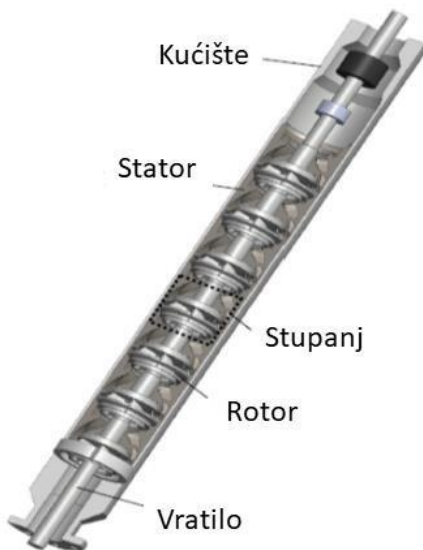
- Pouzdan izvor električne snage visokog napona mora biti prisutan;
- Fleksibilnost je mala zbog konstantne frekvencije struje;
- Prisutnost slobodnog plina znatno smanjuje efikasnost crpke te može u potpunosti zaustaviti proizvodnju fluida;
- Pijesak ili druge abrazivne čestice mogu doprinijeti zamoru materijala;
- Popravci na električnim uronjivim crpkama u uvjetima koji vladaju na naftnom polju su dosta otežani; potrebno je kompletno izvaditi opremu;
- Visoke temperature kao i visoke viskoznosti fluida mogu predstavljati problem.

## **2. Teoretski opis električne uronjive crpke**

### 2.1 Dijelovi crpke, prednosti i nedostaci

Tipični sustav električne uronjive crpke čine: elektromotor, štitnik (brtvena sekcija), plinski separator (usisna sekcija), višestupanjska centrifugalna crpka, električni kabel, površinski upravljački uređaj, razvodna kutija i transformator.

Centrifugalna crpka se sastoji od pokretnog dijela (rotora), poznatog pod imenom impeler (radno kolo s lopaticama), pričvršćenog na rotirajuće vratilo (osovinu) i nepokretnog dijela (statora), zvanog difuzor, kojeg čini niz nepokretnih prolaza s postupno rastućom (uvećavajućom) poprečnom površinom.



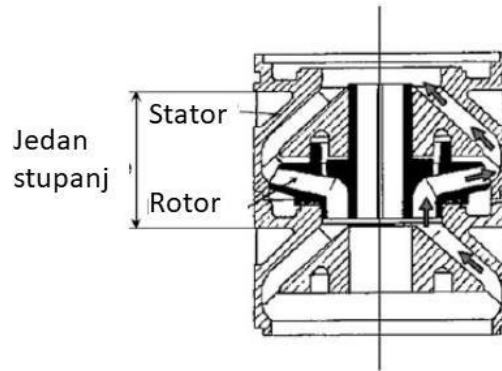
Slika 2-1. Dijelovi električne uronjive crpke (Stel et al. 2015)

Na slici 2-1. prikazana je shema električne uronjive crpke sa 7 stupnjeva. Svaki stupanj se sastoji od rotirajućeg dijela odnosno rotora (engl. *impeller*) i statičkog dijela odnosno statora (engl. *diffuser*). Vratilo (engl. *shaft*) prolazi od električnog motora kroz sve stupnjeve i pričvršćeno je za sve rotore. Svi stupnjevi su grupirani i zaštićeni sa cilindričnim kućištem čije dimenzije su uvjetovane brojem stupnjeva ovisno o primjeni crpke.

Električne uronjive crpke su pogonjene električnim motorom. Unutar crpke kinetička energija fluida se povećava te se zatim pretvara u tlačnu energiju koja pokreće fluid kroz crpku. Električne uronjive crpke ugrađene u bušotinu su centrifugalne crpke sa vertikalno orijentiranom osovinom. Neke od najvažnijih osobitosti ovakvih crpki su slijedeće (Stel et al. 2015) :

- Višestupanjske crpke sa nekoliko desetaka ili stotina stupnjeva povezanih u seriju;
- Rotori imaju dizajn zatvorene lopatice;
- Usis sa jedne strane;
- Imaju konfiguraciju radijalnog ili mješovitog protoka.

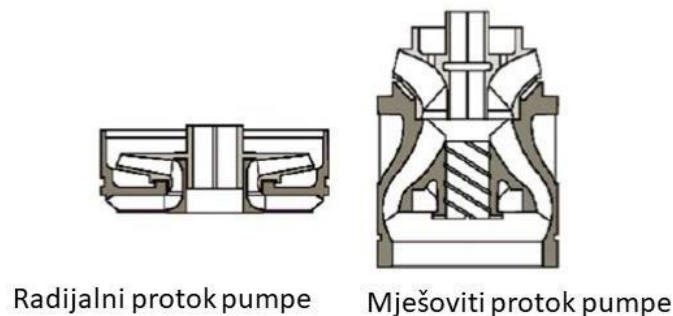
Jedan stupanj centrifugalne crpke pokreće se primarnim pokretačem koji osigurava rotaciju. Stupanj se sastoji od dvije komponente: rotora, koji je ustvari rotacijski niz lopatica, te statora koji sadrži kućište rotora, kao i ležajeve i brtve za normalan rad crpke. Na slici 2-2. može se vidjeti jedan klasični stupanj centrifugalne crpke.



Slika 2-2. Shema jednog stupnja crpke (Takacs, 2018)

Fluid iz prethodnog stupnja ulazi u rotor od dolje vertikalno relativno malom brzinom te zbog velike rotacijske brzine lopatica rotora, ubrzava se na izlazu iz rotora. Torzija koju motor daje crpki se pretvara u kinetičku energiju lopatica. Fluid velike brzine izlazi iz rotora pod kutem te ulazi u statični dio crpke gdje se kinetička energija pretvara u tlačnu energiju. Uslijed svega toga, fluid koji izlazi iz jednoga stupnja odnosno iz statora je pod većim tlakom nego u prethodnom stupnju. Ovaj proces se ponavlja ovisno o tome koliko stupnjeva crpka ima.

Energetski prijelaz u centrifugalnoj crpki opisani gore odvijaju se po općoj energetskeo jednadžbi koja opisuje očuvanje energije među dvije toče u fluidu koji protječe kroz crpku. Promjena u sadržaju energije fluida jednaka je radu učinjenom na fluidu. Fluid u crpki može imati 3 oblika energije: kinetički, potencijalni i tlačni oblik. Zbroj tlačne i kinetičke energije je konstantan te se rad motora pretvara u povećanje tlačne energije samog fluida. Centrifugalne crpke mogu se klasificirati po smjeru izlaza fluida iz rotora te mogu biti radijalni, aksijalni ili mješovitog protoka. Kod električnih uronjivih crpki koriste se samo tipovi radijalnog i mješovitog protoka (Slika 2-3.).



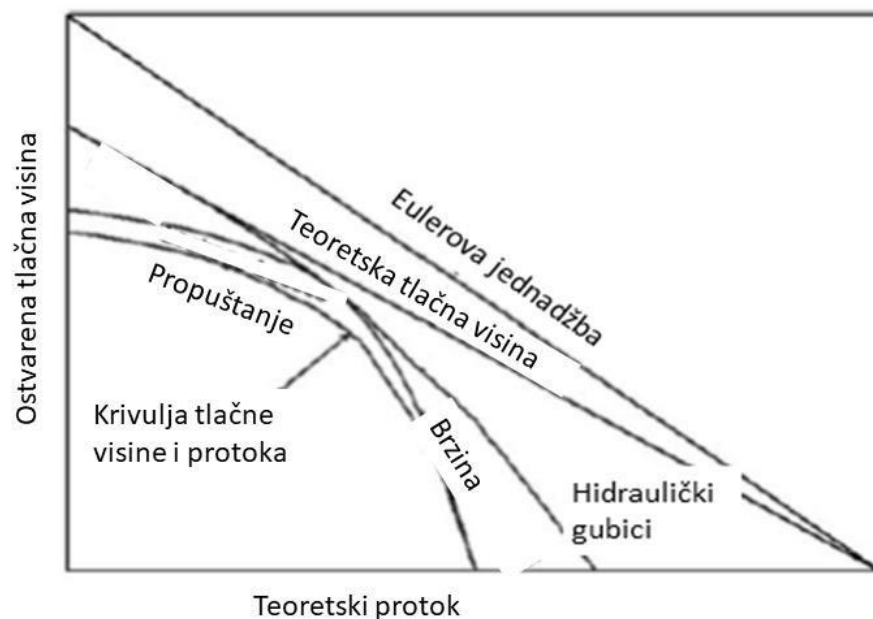
Slika 2-3. Konfiguracija crpke za različite tipove protoka (Takacs, 2018)

Radijalni protok se koristi kod crpki manjeg kapaciteta koje proizvode manje od 480 m<sup>3</sup> na dan dok se crpke tipa mješovitog protoka koriste kod većih proizvodnih protoka.

Kao što je već rečeno, centrifugalna crpka pretvara mehaničku energiju dobivenu od motora u kinetičku energiju fluida. Kinetička energija je proporcionalna izrazu  $\rho v^2$  (produkt gustoće i kvadrata brzine). Prema tome, crpka koja radi na određenoj brzini te isto tako ima konstantu izlaznu brzinu iz rotora prenosi različite količine energije fluidima različitih gustoća. Iz ovoga proizlazi da pojedini stupanj crpke ili cijela crpka daje veći tlak ukoliko fluid ima veću gustoću. Drugim riječima, povećanje tlaka uzrokovano radom crpka podijeljeno sa gustoćom fluida nam daje tlačnu visinu, jednu od najvažnijih karakteristika crpke. Tlačna visina je konstantna za određenu crpku i određeni protok. Zbog ovoga, u svim proračunima sa centrifugalnim crpkama koristi se tlačna visina umjesto tlaka jer je ona konstantna za sve tekućine (Takacs, 2018)

Stvarna ostvarena tlačna visina je uvijek manja od teoretske zbog raznih gubitaka u crpki koji mogu biti hidraulički uslijed trenja u rotoru te gubici zbog propuštanja između rotora i statora.

Raspodjela gubitaka te stvarne i teoretske tlačne visine je prikazana na slici 2-4.



Slika 2-4. Karakteristika crpke (Takacs, 2018)

Električne uronjive crpke su poznate po tome što imaju predvidljivu izvedbu u radu sa jednofaznim fluidima te fluidima sa malom viskoznošću. Izvedba crpke se pogoršava kako se povećava udio plina na ulazu u crpku. Još ne postoji dobra metoda za predvidjeti izvedbu

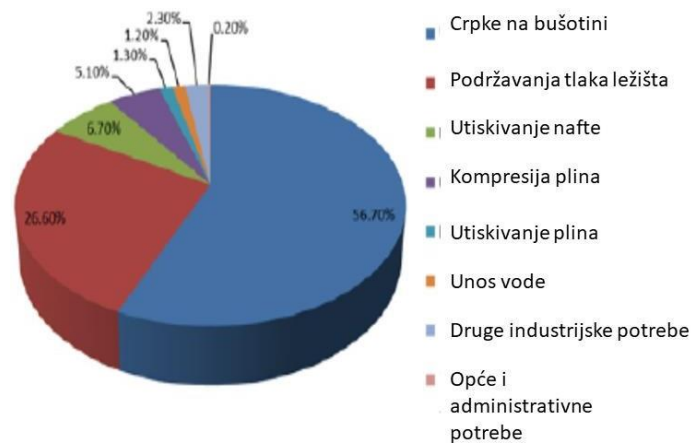
električne uronjive crpke u radu sa dvofaznim protokom. Trenutno industrija koristi homogeni model, korelacije i druge modele za predvidjeti ponašanje crpke u takvim uvjetima (Beltur et al. 2003).

U homogenom modelu pretpostavlja se da je tlačna visina pri radu sa dvofaznim protokom jednaka tlačnoj visini pri radu sa jednofaznim protokom. Homogeni model daje dobro predviđanje samo pri malom udjelu plina pri ulazu u crpku (2-5 %). Još nije razvijeni opći model za predviđanje ponašanja crpke pri dvofaznom protoku zbog složenosti dvofaznog protoka, geometrije crpke te brzine pri kojoj crpka radi.

Veza između tlačne visine koju crpka može ostvariti i protoka kroz crpku pri danoj rotacijskoj brzini je određena posebnom krivuljom izvedbe, koja je eksperimentalno određena koristeći vodu kao jednofazni fluid. Krivulje za tlačnu visinu su valjane za bilo koji drugi jednofazni fluid male viskoznosti, neovisno o gustoći fluida.

## 2.2. Gubici električne energije

Na slici 2-5. prikazana je struktura potrošnje električne energije uslijed raznih tehnoloških procesa u naftno-plinskim kompanijama. Kao što se i vidi na grafu, energetske najintenzivniji tehnološki proces u naftno plinskoj industriji je podizanje nafte pomoću bušotinskih crpki gdje su električne uronjive crpke najzastupljenija metoda podizanja. Radi toga, optimizacija metode podizanja nafte pomoću električnih uronjivih crpki može pridonijeti značajnom smanjenju troškova energije (Khakimyanov et al. 2016).



Slika 2-5. Raspodjela gubitaka električne energije u naftnoj industriji (Khakimyanov et al. 2016)  
 Potrebno je analizirati potrošnju energiju električnog pokretača (motora) uronjivih crpki kako bi se mogla procijeniti efikasnost energije tijekom planiranja potrošnje električne struje. U ovu svrhu potrebno je imati metodologiju za proračun potrošnje energije ovisno o ugrađenoj opremi i tehnološkim parametrima naftne bušotine.

Na slici 2-6. vidi se struktura gubitaka električne energije u električnim uronjivim crpkama.

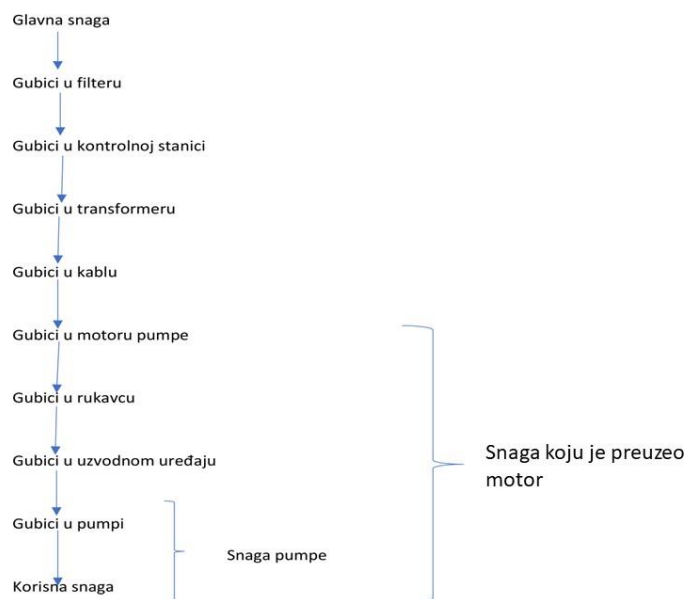
Potrošnja električne energije crpke se sastoji od korisne snage  $P_{UP}$  koja se utroši na podizanje bušotinskog fluida, kao i gubitaka u svim elementima jedinice.

Korisna snaga  $P_{UP}$ , koja je utrošena kako bi se ležišni fluid podigao na površinu, ovisi o dosta faktora kao što su: tlak crpke, gustoća kapljevine, tlačna visina, tlak vrha zaštitnih cijevi, tlak u



prstenastom prostoru, hidraulički otpori u bušotini, tlak zasićenja, plinski faktor i mnogi drugi faktori.

Gubici energije u električnoj uronjivoj crpki određeni su efikasnošću crpke uvjetovane crpkim COP-om (engl. *Coefficient of performance*). Efikasnost same crpke varira ovisno svojstvima istoka iz crpke. Vrhunac efikasnosti je u nominalnom modu rada.



Slika 2-6. Gubici električne energije u sustavu električne uronjive crpke (Khakimyanov et al. 2016)

### 2.3. Proizvodni principi

Za jednodimenzionalni stacionarni protok neviskoznog (idealnog) i nestlačivog fluida, energetska jednadžba za jednu strujnicu je poznata kao osnovna Bernoullijeva jednadžba, koja glasi:

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

Bušotina i ležišna stijena povezane su na pješčanom licu (engl. *sandface*) koje je ustvari cilindrična površina gdje je ležište otvoreno. Dok je bušotina zatvorena, tlak na pješčanom licu je jednak ležišnom tlaku te zbog toga nema utoka fluida u bušotinu. Bušotina počinje proizvoditi kada je tlak na pješčanom licu manji od ležišnog tlaka. Čestice fluida u blizini se kreću u smjeru smanjenja tlaka te se nakon početnog perioda pojavljuje stabilni protok. Na taj

protok utječu mnogi parametri poput ležišnih svojstva (propusnost stijene, debljina sloja, itd.), svojstva fluida (gustoća i viskoznost) te opremljenost bušotine (perforacije, oštećenost proizvodne formacije). Većina ovih parametara je konstantna za određenu bušotinu za velik dio vremena. Zbog toga, na protok najviše možemo utjecati promjenom dinamičkog tlaka na dnu bušotine. S toga, ponašanje bušotine se najbolje može odrediti vezom između dinamičkog tlaka bušotine i protoka kapljevine odnosno proizvodnjom ležišnih fluida. Veza između tih dviju parametara naziva se IPR (engl. *Inflow Performance Relationship*) krivulja i dobiva se bušotinskim testiranjem.

Najjednostavniji pristup za opisati davanje bušotine je koristeći koncept indeksa proizvodnosti (engl. *Productivity index*). On je razvijen na temelju slijedećih pretpostavki:

- Protok oko bušotine je radijalan;
- Protok je jednofazan i fluid nestlačiv
- Distribucija propusnosti u formaciji je homogena;
- Formacija je u potpunosti zasićena s danim fluidom.

Za ove uvjete, Darcyeva jednadžba nam daje proizvodnju bušotine (Takacs, 2018) :

$$q = \frac{2\pi k h}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} (p_r - p_w) \quad (2.2.)$$

gdje su:

$q$  = protok, m<sup>3</sup>/dan

$k$  = efektivna propusnost, m<sup>2</sup>

$h$  = debljina sloja, m

$\mu$  = viskoznost kapljevine, Pas

$r_e$  = drenažni radijus, m

$r_w$  = radijus bušotine, m

$p_r$  = tlak ležišta, bar

$p_w$  = dinamički tlak na dnu bušotine, bar

Većina parametara sa desne strane jednadžbe su konstantnih vrijednosti, pa ih se može prikazati jednim koeficijentom koji se naziva indeks proizvodnosti:

$$q = PI (p_r - p_w) \quad (2.3.)$$

gdje su:

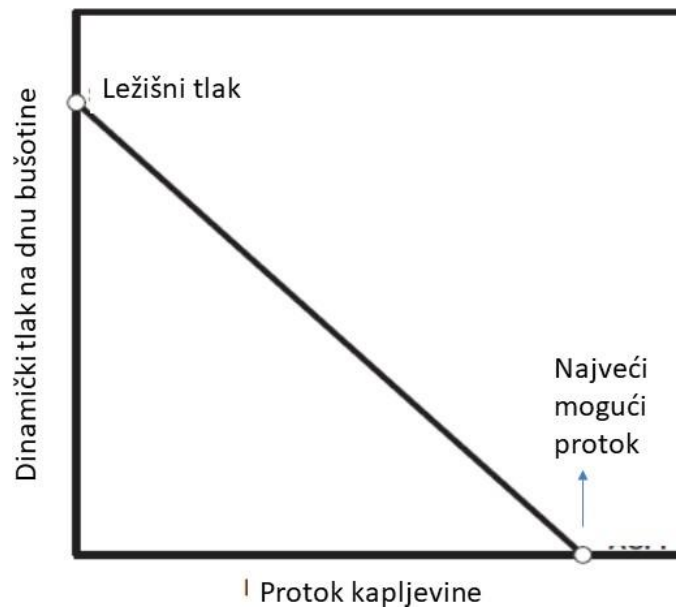
$q$  = protok,  $m^3/dan$

$PI$  = indeks proizvodnosti,  $m^3/dan/bar$

$p_r$  = tlak ležišta, bar

$p_w$  = dinamički tlak na dnu bušotine, bar

Ova Jednadžba(2.3.) pokazuje da je utok kapljevine direktno proporcionalan razlici tlakova.



Slika 2-7. Linearnost indeksa proizvodnosti (Takacs, 2018)

Linija indeksa proizvodnosti je prikazana kao pravac na dijagramu tlaka i protoka (Slika 2-7.). Krajnje točke linije su prosječni ležišni tlak u uvjetima bez protoka; te najveći potencijalni protok u slučaju da je dinamički tlak na dnu bušotine jednak nuli. U mnogim bušotinama s umjetnim podizanjem kapljevine, tlakovi na dnu bušotine su vrlo često ispod tlaka zasićenja. Zbog toga, prisutan je slobodni plin u ležištu blizu bušotine, te prošle pretpostavke za indeks

proizvodnosti ne vrijede. Uslijed toga, proizlazi da linija indeksa proizvodnosti nije konstanta već je zakrivljena prema dolje što je dokazano raznim ispitivanjima u bušotinama.

Glavni razlog zakrivljenosti linije indeksa proizvodnosti je oslobođenje plina iz kapljevine zbog pada tlaka u neposrednoj blizini bušotine. Ovaj efekt uzrokuje povećanje zasićenja bušotine plinom te istovremeno smanjuje efektivnu propusnost za kapljevinu. Protok kapljevine je smanjen u odnosu na jednofazni protok i bušotina proizvodi manje kapljevine no što to pokazuje ravna linija indeksa proizvodnosti. Zbog toga, ne može se uzeti u obzir da je linija indeksa proizvodnosti konstanta za bušotine koje proizvode ispod tlaka zasićenja. Vogel je raznim simulacijama došao do jednadžbe koja opisuje ponašanja ispod tlaka zasićenja (Takacs, 2018) :

$$\frac{q}{q_{max}} = 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{p_r} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \quad (2.4.)$$

gdje su:

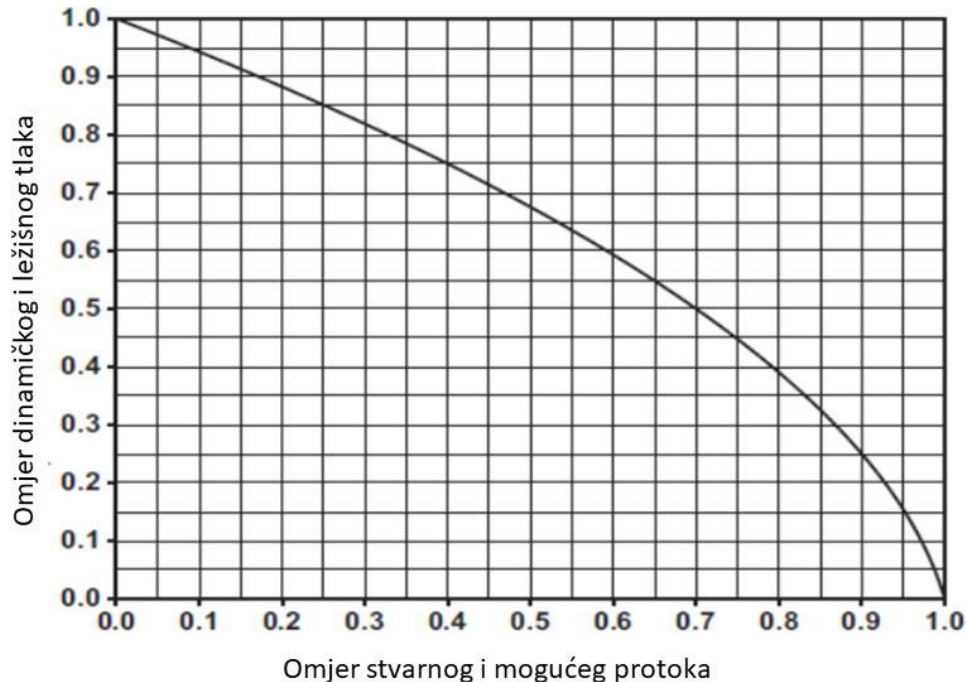
$q$  = proizvodnja pri tlaku  $p_{wf}$ , m<sup>3</sup>/dan

$q_{max}$  = maksimalna proizvodnja, m<sup>3</sup>/dan

$p_r$  = prosječni ležišni tlak, bar

$p_{wf}$  = dinamički tlak na dnu bušotine, bar

Na slici 2-8. grafički je prikazana Vogelova jednadžba.



Slika 2-8. Grafički prikaz Vogelove jednadžbe (Takacs, 2018)

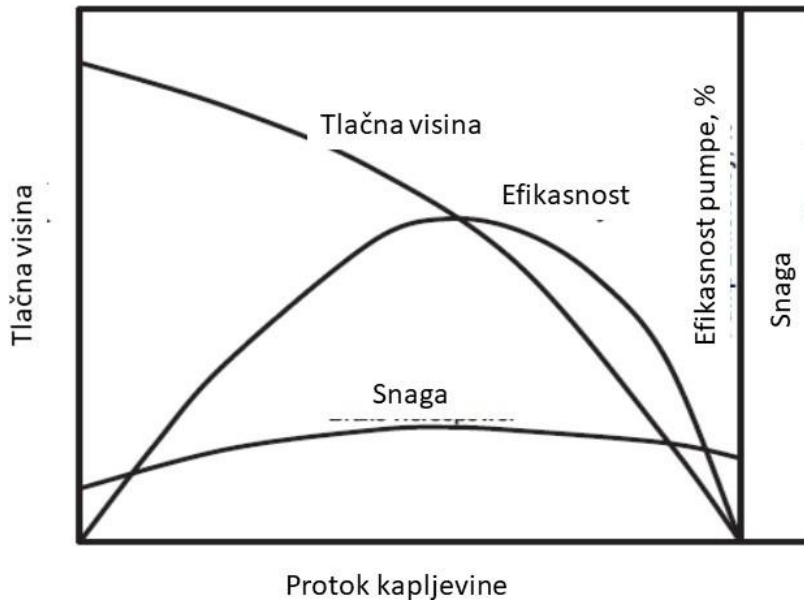
Fluid potisnut električnom uronjivom crpkom ulazi u tubing te bi izlazni tlak trebao nadvladati ukupni pad tlaka koji se pojavljuje na putu do površine prilikom proizvodnje. Komponente potrebnog izlaznog tlaka su tlak na bušotinskoj glavi, hidrostatski tlak i pad tlaka zbog trenja. Tlak na bušotinskoj glavi ovisi o tlaku separatora i tlaka u površinskim vodovima. Pošto je uvijek prisutna određena količina fluida iznad crpke u prstenastom prostoru, hidrostatski tlak se može izračunati preko vertikalne dubine fluida i gradijenta tlaka proizvedenog fluida (Takacs, 2018). Padovi tlakova uslijed trenja u tubing u prilikom proizvodnje mogu biti računani raznim jednadžbama (npr. Darcy-Weisbachova jednadžba).

#### 2.4. Karakteristike crpke

Centrifugalne crpke se testiraju vrtnjom pri konstantnoj brzini te pritom varirajući protok na izlazu iz crpke. Prilikom testiranja, prate se parametri poput protoka kapljevine, tlaka na ulazu i izlazu iz crpke te snaga potrebna za pokretanje same crpke. Efikasnost crpke se izračunava iz tih podataka te ona predstavlja sposobnost crpke da pretvori mehaničku energiju predanu preko motora u hidrauličku snagu korištenu za pokretanje fluida. Na osnovi mjerenja pri različitim protocima, 3 parametra se stavljaju u odnos sa protokom (Slika 2-9.) :

1. Tlačna visina koju daje crpke;

2. Snaga potrebna za pokretanje crpke u slučaju da je voda fluid;
3. Efikasnost crpke.



Slika 2-9. Karakteristike crpke (Takacs, 2018)

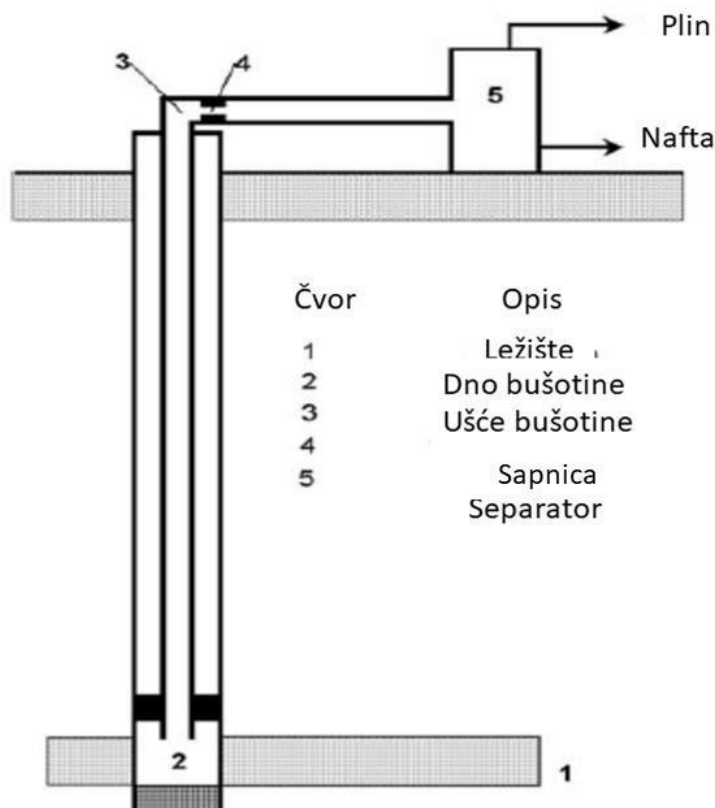
Prilikom crpljenja fluida, tlak ni na jednom mjestu unutar crpke ne smije pasti ispod zasićenog tlaka para jer može doći do kavitacije. To uključuje pojavu malih mjehurića pare, koji putuju zajedno sa kapljevinom te uslijed dolaska u područje viših tlakova pucaju. Ovakvo pucanje mjehurića pare uzrokuje naglo povećanje tlaka i može uzrokovati jaku eroziju crpke te isto tako mogu znatno smanjiti efikasnost same crpke. Kavitacija se može pojaviti u rotoru gdje dolazi do velikog povećanja brzine.

Minimalni tlak potreban na usisu crpke da bi se spriječila kavitacija je razlika apsolutnog tlaka u zaštitnim cijevima na razini prvog stupnja te tlaka para. Električne uronjive crpke u pravilu nemaju problema u radu na naftnim poljima zbog odgovarajuće kolone stupca fluida iznad usisa crpke.

Analiza sustava proizvodnih naftnih i plinskih bušotina (engl. *Nodal Analysis*) je jedan od najnovijih dodataka alatima kojima se koristi proizvodni inženjer. Naftni fluidi koji se nalaze u ležištu kreću se kroz složeni sustav kako bi dostigli površinu. Taj sustav se zove proizvodni sustav i sastoji se od slijedećih komponenti: ležište, proizvodna bušotina, površinski vodovi i

separator. Neki od ovih se mogu podijeliti i u manje elemente, na primjer, bušotina, osim tubinga može sadržavati sigurnosne i/ili plinske ventile, kao i druge komponente. Proizvodni sustav je stoga sustav povezanih i međudjelujućih elemenata od kojih svaki ima svoju specifičnu zadaću, ali istovremeno ovisi i utječe na druge elemente u sustavu. Kako bi proizveli fluide, sve komponente u sustavu moraju djelovati kao cjelina.

Jednostavna shema proizvodne bušotine prikazana je na slici 2-10.

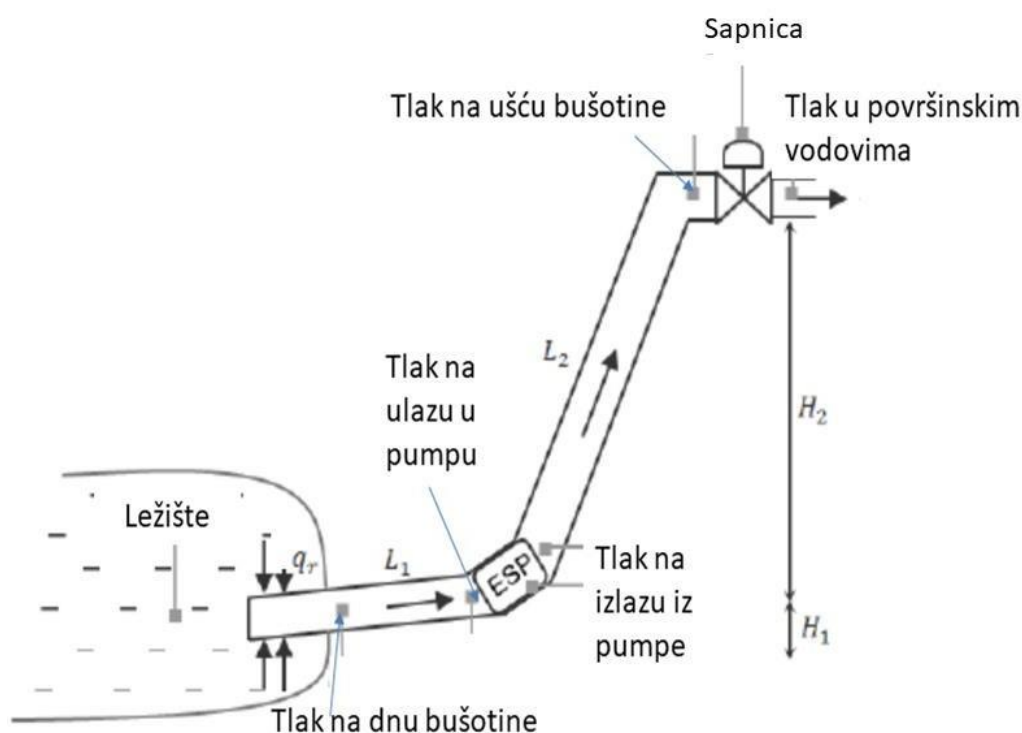


Slika 2-10. Prikaz proizvodnog sustava po čvorovima (Takacs, 2018)

Fluidi iz ležišne stijene protječu do bušotine od granice drenažnog područja (1). Nakon ulaska fluida u bušotinu preko perforacija vertikalni protok u tubingu započinje na dnu bušotine (2). U tubingu se odvija vertikalni protok ili protok pod kutom ovisno o konstrukciju bušotine do bušotinske glave na površini (3). Sapnica (4.) te je ujedno ulazna točka fluida u površinske vodove. Nadalje se protok odvija do separatora (5.) Točke u proizvodnom sustavu bušotine prikazane na slici označavaju 'čvorove' u teoriji analize sustava. Oni odvajaju različite

komponente sustava: ležište, tubing, površinske vodove. Između bilo koja dva čvora, dinamički tlak se smanjuje u smjeru protoka te može biti izračunat. Jedine dvije točke odnosno čvorovi u sustavu gdje možemo pretpostaviti konstantan tlak su čvor 1 odnosno samo ležište te čvor 5 koji predstavlja separator (Krishnamoorthy et al. 2016).

Kod multilateralnih bušotina, može postojati više grana pritoka iz samoga ležišta. U takvim bušotinama, ležišni fluidi iz pojedinačne grane se spajaju prije električne uronjive crpke. Svaka grana pritoka može imati i dodatan ventil koji se zove protočno-kontrolni ventil (engl. *Inflow Control Valve*).



Slika 2-11. Shema podizanja nafte pomoću crpke u kosim bušotinama (Krishnamoorthy et al. 2016)

Na slici 2-11. prikazana je shema podizanja nafte pomoću električne uronjive crpke. Ležišni fluidi (nafta, voda, i moguće plin) ulaze u bušotinu kroz perforacije, ulaze u crpku koja zatim podiže fluide do sapnice (engl. *choke*) koja se nalazi na ušću bušotine. Nizvodno od sapnice, fluid ulazi u priključni cjevovod koji je povezan s procesnim postrojenjem. Proizvodnja svake bušotine se kontrolira brzinom motora električne uronjive crpke i proizvodnom sapnicom.

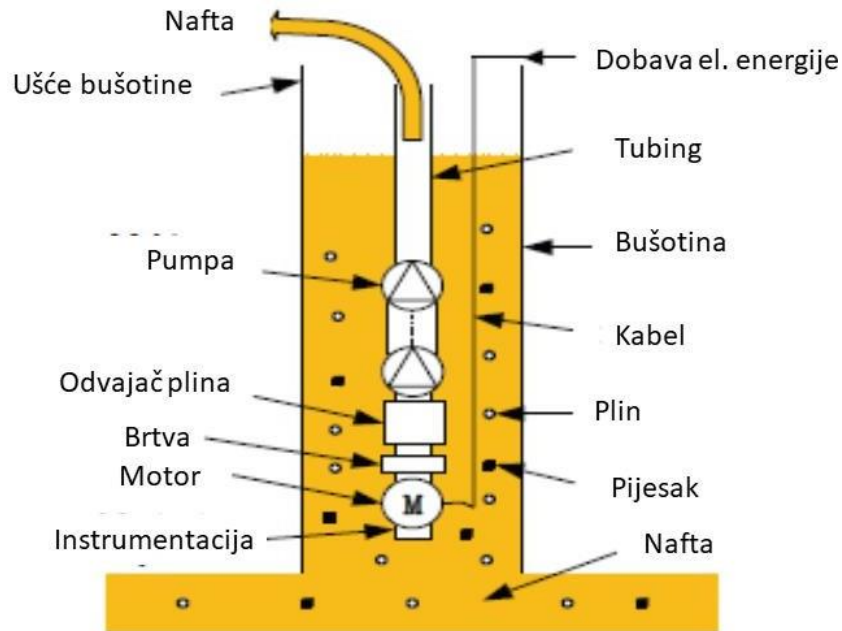


Pomoćna oprema odnosno instrumentacija kod električnih uronjivih crpki se ugrađuje ispod motora i sastoji se od potrebnih mjernih uređaja za konstantno praćenje tlaka i temperature u bušotini, kao i nekih drugih parametara. Konstantno praćenje tlaka i temperature u bušotini daje informacije o dotoku u bušotinu i omogućuje analizu radnih uvjeta električne uronjive crpke.

Instrumentacijski paketi koriste iznimno precizne transducere, uređaje za mjerenje naprezanja odnosno tlaka te jako otporne termalne uređaje za mjerenje temperature. Mjereni podaci se mogu spremati u memoriju uređaja te se mogu prikazati u grafičkom obliku. Mjereni parametri su (Takacs, 2018) :

- Tlak i temperatura na ulazu u crpku;
- Ulje motora i temperatura motora;
- Izlazni tlak i temperatura iz crpke;
- Podaci o mehaničkim vibracijama;
- Gubici električne struje.

Na slici 2-12. prikazana je shema podizanja nafte pomoću sustava električne uronjive crpke u vertikalnoj bušotini.



Slika 2-12. Shema sustava električne uronjive crpke (Zhang et al. 2017)

Korištenje uronjivih centrifugalnih crpki u bušotinama koje proizvode tešku naftu se uobičajno ne nalazi u praksi, iako ima jednu veliku prednost u radu. Razlog tomu je što teške nafte velike viskoznosti imaju vrlo niske tlakove zasićenja te praktički nema slobodnog plina na usisu crpke. Ovaj uvjet eliminira sve moguće probleme uzrokovane ulaskom slobodnog plina u crpku te tako čine električne uronjive crpke dobro rješenje u uvjetima teških nafta. Fluidi s viskoznostima mnogo većim od vode uzrokuju gubitke uslijed trenja te trenje diskova u stupnjevima centrifugalne crpke što rezultira u ostvarenju manje tlačne visine, manjoj efikasnosti crpke te većim zahtjevima za snagom koja pogoni crpku kao i smanjenim kapacitetom crpke (Zhang et al. 2017).

Zbog toga standardne krivulje izvedbi crpke koje su dobivene testiranjem prilikom protoka vode kroz crpku ne mogu biti korištene sa velikom preciznošću ukoliko se crpi fluid koji ima veliku viskoznost. Ukoliko se viskoznost ne uzme u obzir prilikom biranja opreme, može doći do preopterećenja električne uronjive crpke.

Jedno od ograničenja za postizanje punog potencijala u bušotinama u kojima su ugrađene električne uronjive crpke (ESP) za proizvodnju nafte je višak slobodnog plina na ulazu fluida u

crpku. Prisutnost slobodnog plina na usisu crpke utječe negativno na izvedbu odnosno efikasnost same crpke zbog smanjenja protoka kapljevine i zbog tlaka koji crpka mora nadoknaditi. Ovakvo smanjenje efikasnosti crpke može biti poprilično ozbiljno, rezultirajući nestabilnim radom crpke, znatnim gubicima u proizvodnji, smanjenoj pouzdanosti i povećanim operativnim troškovima zbog preuranjenog kvara opreme odnosno zamora materijala. Trenutno u svijetu kompanije proizvode iz bušotina koje imaju zahtjevne operativne uvjete sa velikim udjelom slobodnog plina. U bušotinama sa velikim udjelom slobodnog plina, električne uronjive crpke moraju biti opremljene sa tehnologijama za rukovanje slobodnim plinom. Napravljeni su znatni napretci u opremljenosti ESP-a te su one sada znatno učinkovitije u bušotinama sa većim količinama slobodnog plina (Zhou et al. 2010).

Rotacijska brzina električnih uronjivih crpki ovisi o izmjeničnoj struji odnosno njenoj frekvenciji. Proizvodnja kapljevine se može kontrolirati preko frekvenciji struje koju motor predaje crpki. Crpka ima najveću efikasnost pri crpljenju čiste kapljevine. Ukoliko je volumni udio plina u kapljevini iznad 20 % može doći do problema u radu crpke te treba ugraditi plinske separatore.

Klipovanje je fenomen povezan sa nestabilnim radom crpke. Ovaj fenomen je prisutan prilikom malih protoka kroz crpku te pogotovo u području lijevo od najveće efikasnosti unutar donje i gornje granice. Klipovanje može biti uzrokovano promjenama u režimu protjecanje te povećanom količinom plina na ulazu u crpku. Plinsko čepljenje se pojavljuje nakon klipovanja. Prilikom čepljenja crpke, crpka gubi sposobnost crpljenja fluida. Električna uronjiva crpka se može normalizirati povećavanjem ulaznog tlaka ili zaustavljanjem crpke tako da kapljevina istjera plin iz usisa.

## 2.5. Utjecaj slobodnog plina na rad crpke

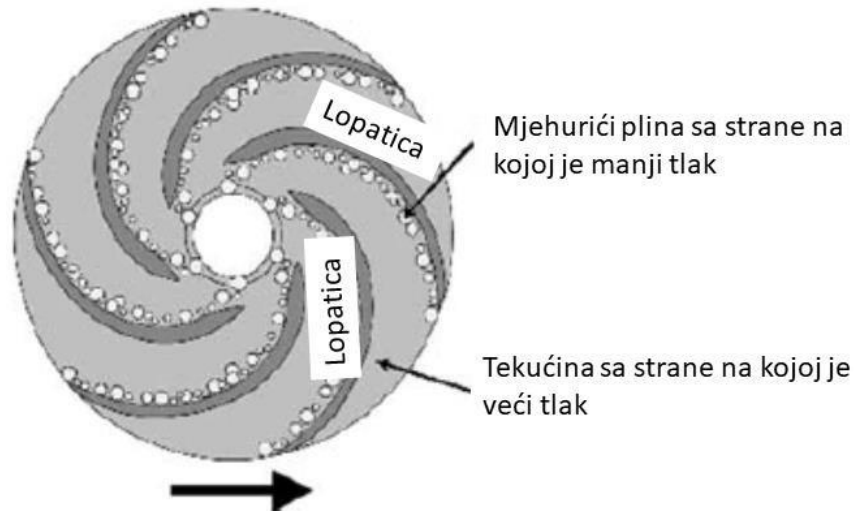
Slobodni plin na ulazu u crpku je proizveden putem pješćanih slojeva, sekundarne plinske kape, padom tlaka ispod tlaka zasićenja. Oprema za manipuliranje i odstranjivanje plina može podnijeti do 40 % slobodnog plina. Nove električne uronjive crpke mogu podnijeti protoke do 800 m<sup>3</sup>/dan (5000 Bbl/dan) sa 70 % slobodnog plina na ulazu u crpku.

U bušotinama gdje je tlak pao ispod tlaka zasićenja, električne uronjive crpke će morati raditi sa većim količinama slobodnog plina. Jedinica za manipuliranje plinom (engl. *gas handler*) se ugrađuje na ulazu kapljevine u crpku te se ugrađuje ukoliko je prisutno više od 20 % slobodnog plina. Takve jedinice tlače plin natrag u kapljevinu prije no što fluid uđe u samu električnu uronjivu crpku. Ovakva tehnologija omogućuje električnoj uronjivoj crpki da radi sa do 45 % plina. Ukoliko je prisutan slobodan plin iznad 45 %, potrebno je uz ovakve jedinice ugraditi i separator plina. Oni se postavljaju ispod električne uronjive crpke i odvajaju plin koji onda prolazi kroz prstenasti prostor (kroz paker ukoliko se koristi) . Odvojeni plin se na ušću bušotine odnosno na površini odvaja u protočni vod prema sustavu utiskivanja (Takacs, 2018).

Slobodni plin na usisu električne uronjive crpke utječe na izvedbu pojedinog stupnja crpke; pritom ima najveći utjecaj na krivulju tlačne visine. Svi istražitelji slažu se da su problemi povezani sa slobodnim plinom zbog rada rotora te da stator igra zanemaruju ulogu kod višefaznih protoka. Slobodni plin u rotoru smanjuje efektivno područje za protok kapljevine, povećava hidrauličke gubitke i smanjuje tlačnu visinu koju daje crpka.

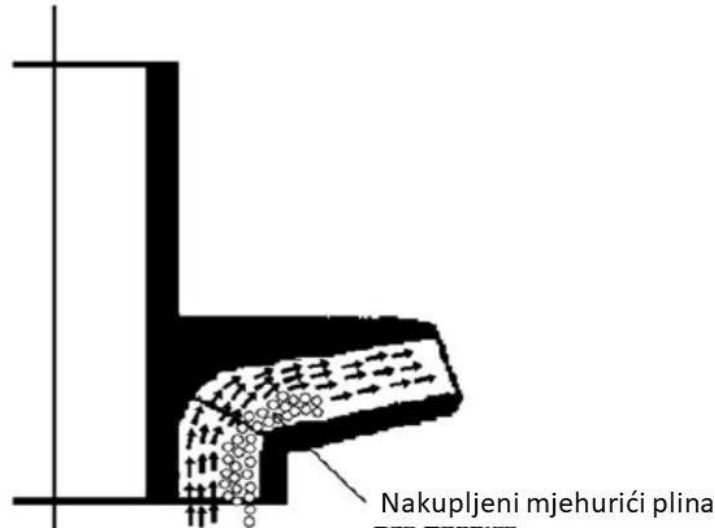
Protok fluida u rotoru je nehomogen zbog razlike u gustoćama između kapljevine i plina. Čestice kapljevine su nemjerljivo puno gušće od plina te samim time imaju puno veću kinetičku energiju nego plin i kreću se puno većim brzinama unutar lopatica rotora. S druge strane, mjehurići plina nisu podvrgnuti toliko velikim centrifugalnim silama i kreću se sporije. Centrifugalne sile razdvajaju plin i kapljevinu brže no što ih turbulencija unutar lopatica može pomiješati. Zbog toga je homogeni protok teško održiv te kapljevina i plin imaju tendenciju da teku neovisno jedno od drugoga unutar rotora (Suat, 2010).

Plin, koji je lakša faza, ima tendenciju kretanja na niskotlačnim stranama lopatice rotora, dok tekućina teče na visokotlačnim stranama, kao što je prikazano na slici 2-13.



Slika 2-13. Prikaz kretanja tekućine i plina po lopaticama (Takacs, 2018)

Protok kapljevine povlači manje mjehuriće plina prema statoru; to je situacija kada male količine plina ulaze u crpku. Režim protoka naziva se mjehuričasti, a raspršeni fini mjehurići se pokreću tekućinom bez klizanja između faza. Kako se volumen slobodnog plina kod usisavanja crpke povećava i više malih mjehurića ulaze u usis rotora, mjehuričasti režim više nije moguć jer se postojeći mjehurići spajaju i stvaraju se veći mjehurići. Kada veličina tih velikih mjehurića plina dosegne kritičnu vrijednost, plin počinje stagnirati na ulazu rotora što uzrokuje daljnje nakupljanje mjehurića i stvaranje plinskog džepa. Plinski džepovi uzrokuju nestabilan rad stupnja crpke te samim time prenaprezanje karakterizirano iznenadnim ispuštanjem tekućine i plina iz crpke i dovode do ozbiljnih kvarova na opremi. Ako se ti džepovi ne prenesu protokom kapljevine prema izlazu rotora dostatnom brzinom, oni će rasti i moći će konačno u potpunosti blokirati protok tekućine kroz rotor i dolazi do blokade plinom (engl. *gas lock*). Slika 0-14. predstavlja tipičnu raspodjelu mjehurića plina u oku rotora; stagnirajući mjehurići blokiraju dio područja dostupnog za protok. U slučaju blokiranja rotora plinom, mjehurići zauzimaju ukupno područje protoka i proizvodnja prestaje uz teške posljedice na rad ESP-a (Takacs, 2018).



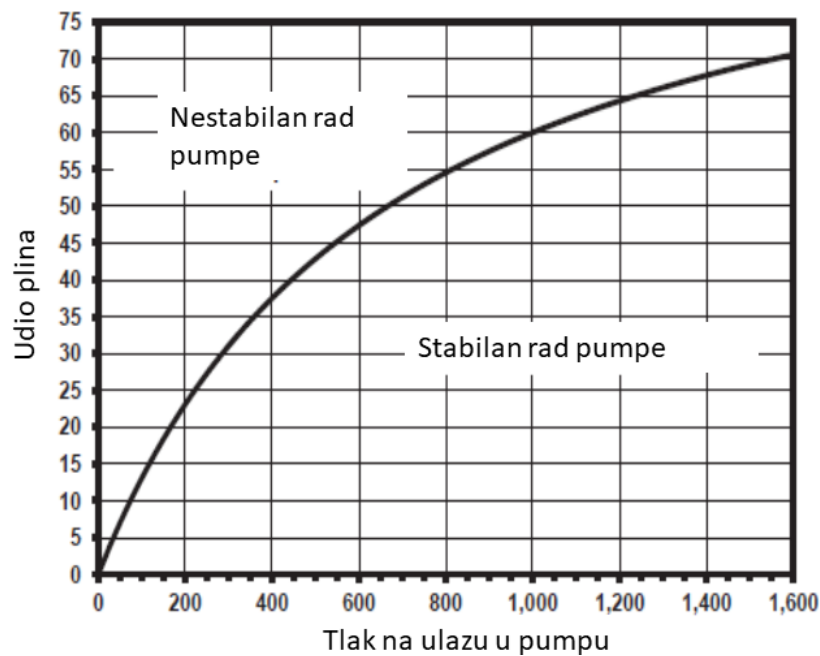
Slika 2-14. Blokiranje prolaza kapljevine plinom (Takacs, 2018)

Kao što je i ranije naglašeno, većina problema sa slobodnim plinom se događa zbog odvajanja faza u rotoru crpke. Odvajanje faza se događa zbog raznih parametara:

- Geometrija stupnja – Sposobnost centrifugalne crpke za rukovanje slobodnim plinom ovisi o specifičnoj brzini. Što je veća specifična brzina crpke, to je veća količina slobodnog plina sa kojim može raditi crpka. Dakle, radijalne crpke s niskim specifičnim brzinama su vjerojatnije da će imati problema s odvajanjem nego što su to crpke s miješanim protokom koje imaju mnogo više specifične brzine. S druge strane, aksijalne crpke su najbolje u rukovanju slobodnim plinom. Također, geometrije stupnjeva crpke s niskim vrijednostima potrebnog ulaznog usisnoga tlaka mogu podnijeti veće količine slobodnog plina bez pojave blokiranja crpke plina.
- Veličina mjehurića. Veličina mjehurića plina ima veliki utjecaj na povlačenje (engl. *drag*) ili nateg i uzgonske sile koje djeluju na mjehuriće uronjene u tekuću fazu. Sile opterećenja pokušavaju zadržati mjehuriće plina s tekućinom, a sila uzgona pokušava ih odvojiti od tekućine. Manji mjehurići teku s tekućom fazom, a fino raspršene mjehuriće je mnogo teže odvojiti.
- Fazna gustoća. Pojedinačne gustoće tekuće i plinske faze, posebno njihov omjer, određuju veličinu sila uzgona koje mogu uzrokovati razdvajanje faza. Što su gustoće bliže jedna drugoj po veličini smanjuje se opasnost od razdvajanja faza.

- Viskoznost tekućine. Viskoznost tekućine utječe na sile natega koje djeluju na mjehuriće plina, a veće sile pri većim viskoznostima tekućine rade protiv odvajanja faza.
- Brzina crpke. Brzina vrtnje crpke ima dvostruki učinak zato jer povećanjem iste se povećavaju centrifugalne sile koje pokušavaju odvojiti faze, ali se također povećava turbulencija koja smanjuje veličinu mjehurića plina i raspršuje se u tekućini.

Turpinova korelacija povezuje izvedbu crpke se volumenima kapljevine i plina te sa ulaznim tlakom u crpku (Slika 2-15).



Slika 2-15. Područja rada crpke (Takacs, 2018)

Električne uronjive crpke rade pri visokim rotacijskim brzinama te imaju stator i rotor koji se podmazuju fluidom koji prolazi kroz crpku. Kako fluidi proizvedeni na naftnim poljima često sadrže krute čestice, njihovo abrazivno djelovanje vrlo lako može oštetiti kretajuće dijelove crpke. Gubitak metala uzrokovan abrazijom i/ili erozijom na kritičnim točkama u stupnju crpke ili različitim ležajevima može dovesti do kritičnog kvara same crpke.

Iako krute čestice poput željezovog sulfida i kalcijevog karbonata, mogu uzrokovati abraziju u centrifugalnim crpkama, većina problema dolazi zbog proizvodnje pijeska (kvarc, SiO<sub>2</sub>) zajedno sa bušotinskim fluidima. Proizvodnja pijeska većinom počinje pri velikim protocima u bušotini te se količina proizvedenog pijeska nakon proboja vodene fronte. Isto tako, promjena protoka u bušotini može uzrokovati porast proizvodnje pijeska.

Električne uronjive crpke se uglavnom instaliraju u bušotine s velikim protocima fluida te malim tlakovima na dnu bušotine i često su prvi izbor za zavodnjena polja. U ovakvim uvjetima, proizvodnja pijeska je velika te su crpke izložene problemima.

## 2.6. Dizajn i odabir crpke

Za pravilan dizajn uronjivih crpki potrebni su mnogi podaci. Najvažnija je produktivnost same bušotine i sve relativne informacije u vezi toga. Protok fluida odnosno proizvodnja nafte i plina je ulazni parametar u dizajnu ESP sustava jer izbor crpke je moguć jedino ako znamo za koje protoke će se koristiti. U nastavku je dan pregled ulaznih podataka za odabir i dizajn crpke (Takacs, 2018) :

### 1. Podaci o opremanju bušotine:

- Promjer, težina i dubina ugradnje kolone zaštitnih cijevi i lajnera;
- Promjer, vrsta i težina tubinga;
- Ukupna dubina bušotine;
- Dubina perforacija ili otvorenog kanala bušotine;
- Zakrivljenje kanala bušotine;

### 2. Proizvodni podaci:

- Tlak na tubing u određenom protoku;
- Tlak u prstenastom prostoru;
- Željeni protok u bušotini;
- Statički tlak na dnu bušotine;
- Dinamički tlak na dnu bušotine;
- Indeks proizvodnosti;
- Omjer plina i nafte (engl. *Gas-Oil ratio*);
- Proizvodnja vode;
- Temperatura na dnu bušotine pri određenom protoku.



### 3. Svojstva fluida:

- API i relativna gustoća proizvedene nafte;
- Relativna gustoća vode;
- Relativna gustoća plina;
- Maksimalna gustoća fluida za gušenje bušotine;
- Tlak zasićenja;
- Viskoznost nafte;
- pVT podaci proizvedenog fluida (volumni faktor, GOR, itd.).

### 4. Podaci o električnoj energiji:

- Napon dostupan na bušotini;
- Frekvencija dobave struje;
- Raspoloživ kapacitet dobave struje.

### 5. Problematični operativni uvjeti:

- Proizvodnja pijeska;
- Taloženje parafina;
- Stvaranje emulzije;
- Tip i intenzitet korozije;
- Ekstremno visoke temperature u bušotini.

Odabir odgovarajuće električne uronjive crpke za rad u određenoj bušotini uključuje:

- Određivanje serije crpke (vanjski promjer);
- Određivanje potrebnog tipa crpke;
- Izračun potrebnog broja stupnjeva;
- Provjera mehaničke snage odabrane crpke.

Kao i sa svim komponentama električne uronjive crpke, najvažniji kriterij odabira je da odabrana crpka stane u zaštitni niz cijevi bušotine. Centrifugalne crpke se proizvode u različitim vanjskim promjerima. Broj serije crpke većinom predstavlja njihove vanjske promjere, naprimjer crpka serije 338 ima vanjski promjer od 3.38 inča dok serija 400 ima vanjski promjer 4.00 inča. Kod izbora serije, ekonomika igra ulogu te se uglavnom uzima crpka s najvećim mogućim promjerom koji stane u bušotinu zato jer crpke s većim promjerom imaju veće efikasnosti i manje zahtjeve za pogonskom snagom. Isto tako, dijelovi ESP sklopa (crpka,

motor, itd.) ukoliko imaju iste tehničke karakteristike, a različite promjere, više su isplativi dijelovi većega promjera jer su jeftiniji (Takacs, 2018).

Nakon odabira serije, odabire se tip crpke iz raspoloživih opcija. Tipovi crpki se razlikuju u dizajnu stupnjeva i broju lopatica te visini, kutu i dužini lopatica. Sve to utječe na protok kapljevine i tlačnu visinu koju može ostvariti stupanj crpke. Odabrani tip električne uronjive crpke treba zadovoljiti traženi protok te pri tom biti u opsegu optimalnog kapaciteta crpke i imati što je veću moguću efikasnost crpke. Ukoliko više crpki zadovoljava uvjete, konačni odabir se zasniva na usporedbi izvedbi različitih crpki pri željenom protoku (gledajući krivulje izvedbi). Radni vijek crpke je povećan ukoliko željeni protok pada na točku najveće efikasnosti. Usporediti tlačne visine crpki i snage potrebnu za rad crpke te odabrati crpku sa najvećom ostvarivom tlačnom visinom i najmanjom potrebom za snagom.

### 3. Metoda proračuna električne uronjive crpke u skriptnom jeziku Python



Slika 3-1. Prikaz algoritma u izračunu

Algoritam započinje unosom podataka o bušotini, ležištu, ležišnom fluidu i podacima o crpki. Temeljem ležišnih podataka izračunava se indeks proizvodnosti. Numerički proračun podrazumijeva izračun pada tlaka u svim segmentima bušotine. Algoritam prepoznaje segment u kojem dolazi do prelaska u dvofazno stanje (odn. u kojem je pad tlaka padne ispod tlaka zasićenja) te koji mora biti prirast tlaka da bi se u separatoru ostvario potrebni protutlak. Temeljem dva parametra:

- traženi volumni protok proizvedenog fluida
- potrebnog prirasta tlaka

izračunava se, temeljem zakona sličnosti i kataloških vrijednosti iz kataloga crpki, potreban broj segmenata crpke i potrebnu snagu elektromotora crpke.

## 4. Analiza slučaja

### 4.1. Postavke analize slučaja

U ovom diplomskom radu zadani su razni proizvoljni parametri bušotine, ležišta te samoga fluida. Brojčane ulazne vrijednosti za analizu slučaja pokazuje Tablica 4-1.

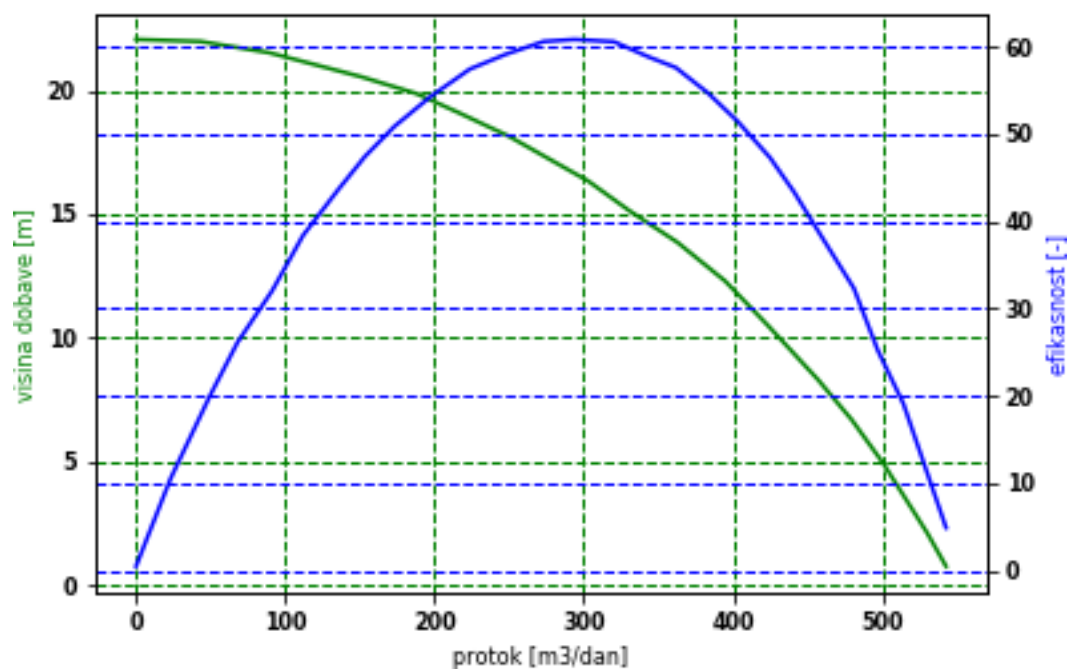
Tablica 4-1. Ulazni podaci za analizu slučaja

Podaci o bušotini			
$d_{\text{tub}}$	0.073	m	unutarnji promjer tubinga
$h_{\text{perf}}$	2500	m	dubina perforacija
$p_{\text{ušće}}$	10	bar	tlak na ušću bušotine
C	100	-	Hazen-Williams parametar tubinga
podaci o ležištu			
$p_{\text{R}}$	228	bar	Statički tlak ležišta
$p_{\text{wr}}$	186	bar	Dinamički tlak pri referentnom protoku
$q_{\text{ref}}$	135	$\text{m}^3/\text{dan}$	Referentni protok
$T_{\text{R}}$	71	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura na dnu bušotine
Podaci o proizvedenom fluidu			
$p_{\text{b}}$	50	bar	Tlak zasićenja

Gustoća	32 865	°API kg/m <sup>3</sup>	API gustoća Gustoća u kg/m <sup>3</sup>
x_w	0.75	-	Udio vode
z	0.85	-	Faktor kompresibilnosti plina
Y <sub>g</sub>	0.7	-	Relativna gustoća plina
Y <sub>w</sub>	1.085	-	Relativna gustoća vode
Numerički podaci			
N	10	-	broj segmenata ležišta
q <sub>vin</sub>	300	m <sup>3</sup> /dan	Protok na ulazu

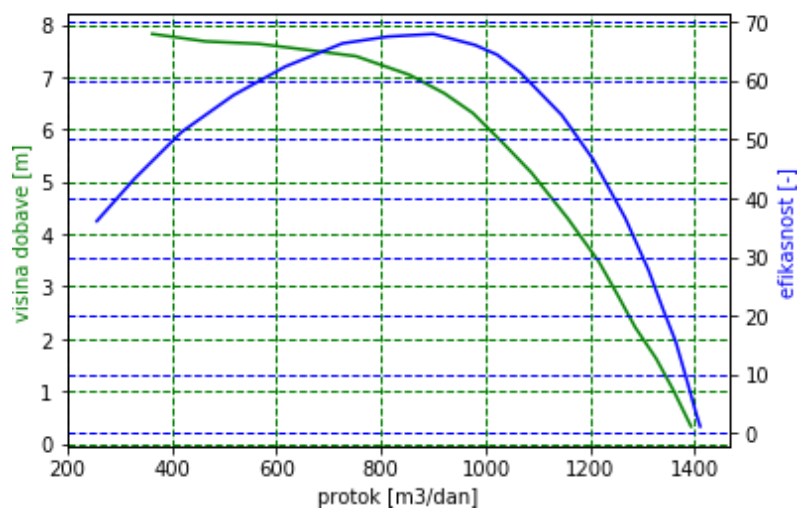
Na temelju zadanog proizvoljnog protoka na ulazu u crpku ( $q_{vin} = 300 \text{ m}^3/\text{dan}$ ), slijedeći korak je odrediti nekoliko električnih uronjivih crpki za zadano ležište te usporedba karakteristike crpki i crtanje grafove pomoću programskog jezika Python. Odabrane crpke su HAL538-1500, HAL400-6000, HAL 400-1250 te HAL538-11000 (Halliburton, 2016). Zatim se pomoću programa Plot Digitizer pretvaraju grafovi crpki iz kataloga u CSV datoteke u MS Excelu kako bi se koristili u Python skripti. Na slikama 4-1. , 4-2. , 4-3. i 4-4. prikazani su grafovi karakteristika crpki odnosno ovisnost visine dobave i efikasnosti o protoku kroz crpku. Grafovi su dobiveni u programskom jeziku Python.

Karakteristike za pumpu HAL538-1500 (SI)

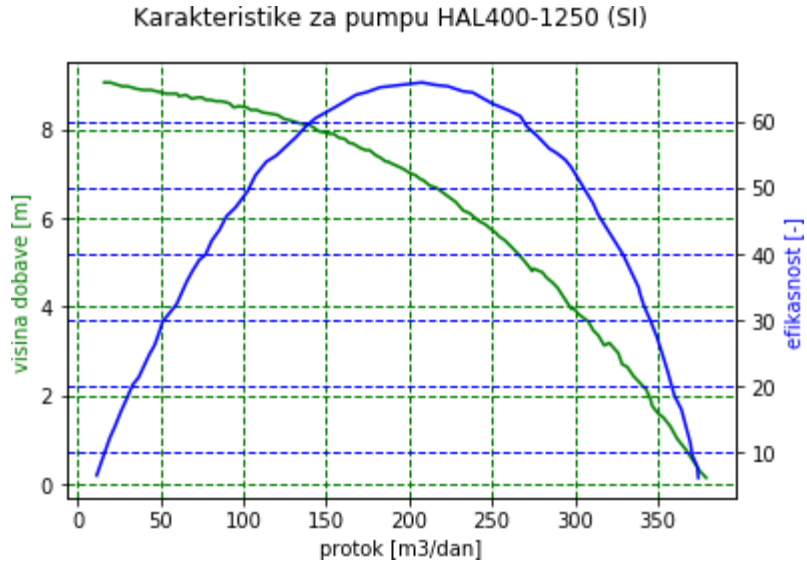


Slika 4-1. Karakteristike crpke HAL538-1500

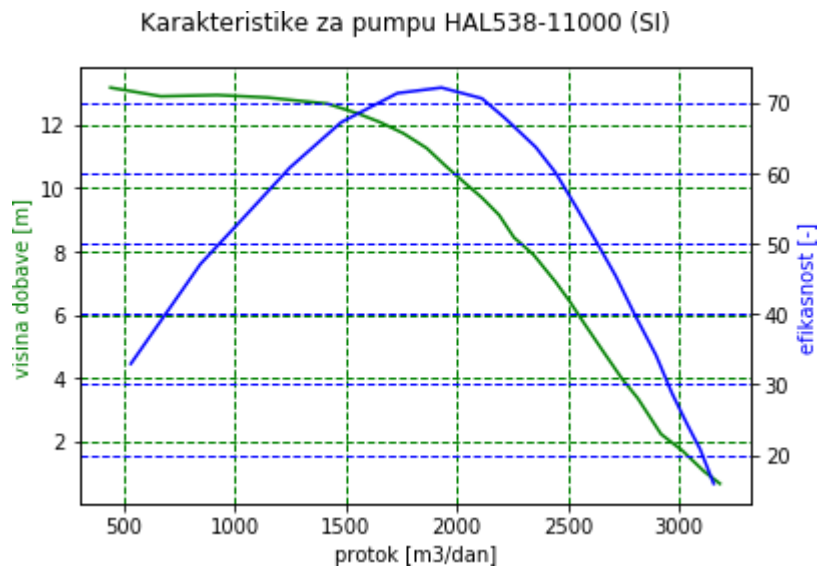
Karakteristike za pumpu HAL400 - 6000 (SI)



Slika 4-2. Karakteristike crpke HAL400-6000



Slika 4-3. Karakteristike crpke HAL400-1250



Slika 4-4. Karakteristike crpke HAL538-11000

#### 4.2. Rezultati i diskusija analize slučaja

Koristeći drugu Python skriptu dobili su se neka od svojstava odabranih crpki koja se vide u tablici 4-2. kao i dubinski profil bušotine odnosno promjenu tlaka te gustoće kapljevine kako se mijenja dubina ležišta odnosno kako se kapljevina kreće prema površini (Slika 4-5. i Slika 4-6.)

Tablica 4-2. Svojstva pojedinih crpki dobivena proračunom u Pythonu

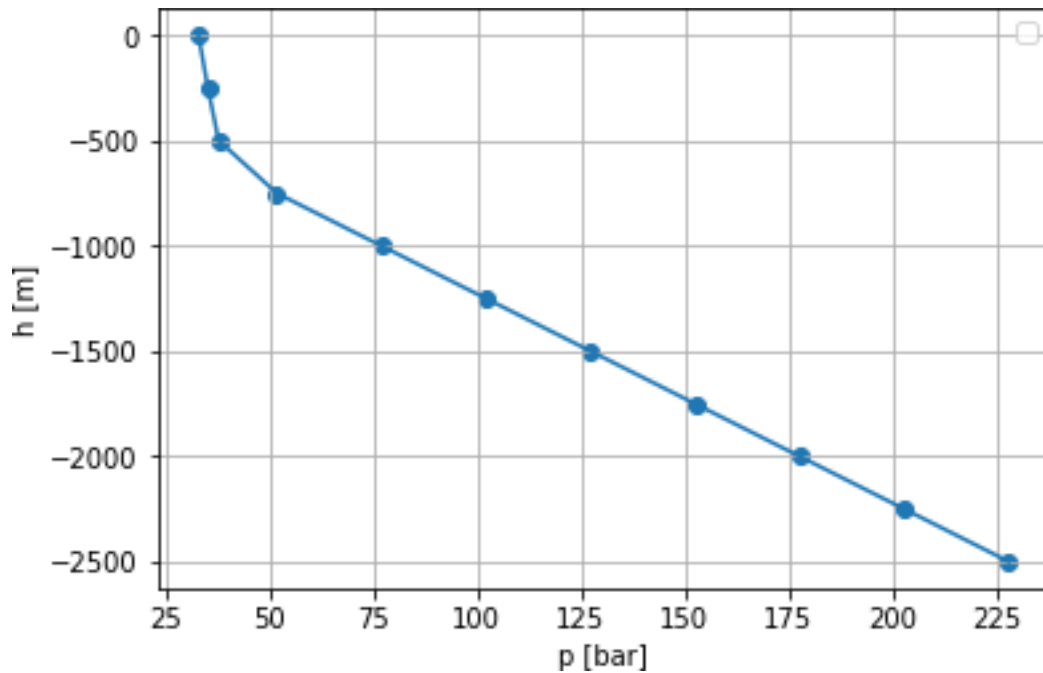
<b>Crpka</b>	Visina dobave jednog segmenta (m)	Efikasnost (%)	Broj stupnjeva (-)	Snaga (kW)
HAL538-11000	13.17	32.94	41	55.82
HAL400-1250	3.93	52.13	135	34.7
HAL400-6000	7.82	40.46	68	44.77
HAL538-1500	16.44	60.74	33	30.42

Za ležište zadanih parametara, odnosno za bušotinu u kojoj je narinuti protok jednak  $300 \text{ m}^3$  po danu dobiveno je da crpka HAL538-1500 (Halliburton, 2016.) najbolje odgovara spomenutim uvjetima. To se može vidjeti u tablici 2 gledajući parametre crpke kao što su visina dobave jednog stupnja, efikasnost crpke, broj stupnjeva te snaga crpke. Crpka HAL538-1500 za ovaj slučaj ima najbolju visinu dobave te uvjerljivo najbolju efikasnost u odnosu na druge crpke. Isto tako, najniži broj stupnjeva kao i najniža snaga su potrebni crpki HAL538-1500 kako bi se nastavila proizvodnja u slučaju ove bušotine. Ostale crpke su poprilično neekonomične za ovaj slučaj. Uzimajući crpku HAL538-11000 za primjer, jasno se vidi da je ova crpka predimenzionirana za ovaj slučaj te bi bila korisna kod bušotina s puno većim protocima. To se vidi iz jako male efikasnosti crpke te uvjerljivo najveće snage potrebne crpki u odnosu na druge primjere. Crpke iz serije HAL400 su podjednako dobre za ovaj pojedini slučaj. Crpka HAL400-1250 ima najmanju visinu dobave jednog stupnja te samim time zahtjeva najveći broj stupnjeva no ima najveću efikasnost pojedinog stupnja. S druge strane, crpka HAL400-6000 ima nešto veću visinu dobave te zahtjeva manje stupnjeva, no nedostatak joj je smanjena efikasnost u odnosu na HAL400-1250.

Gledajući cjelokupnu analizu, jasno se vidi da je u zadanom slučaju crpka HAL538-1500 uvjerljivo najbolji izbor jer je po svim parametrima puno bolja od drugih odabranih crpki.

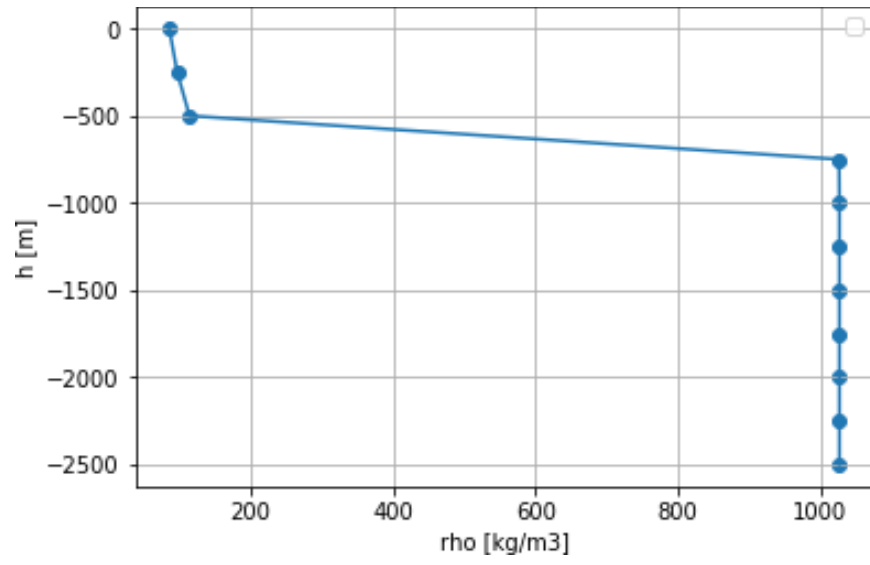
Na slici 4-5. prikazana je promjena tlaka sa visinom/dubinom bušotine. Prema podacima iz zadanog slučaja, za svakih 500 metara koje fluid napravi prema površini tlak pada za 50 bar.

Vidi se promjena oblika krivulje u točki od 50 bara što je u ovom slučaju tlak zasićenja. Na slici 4-6. prikazana je promjena gustoće kapljevine kako fluid protječe prema površini. Gustoća kapljevine je konstantna do otprilike 750 metara od površine. Na toj dubini odnosno visini, zbog tlaka zasićenja od 50 bar, dolazi do odvajanja plina iz fluida tedom značajnog smanjenja gustoće kapljevine.



Slika 4-5. Promjena tlaka s dubinom bušotine





Slika 4-6. Promjena gustoće s dubinom bušotine

## 5. Zaključak

Pravilni odabir električne uronjive crpke za određeno ležište odnosno bušotinu nije jednostavan zadatak zbog velikog broja parametara koji dolaze u obzir pri odabiru crpke. Protok fluida odnosno proizvodnja nafte i plina je ulazni parametar u dizajnu ESP sustava jer izbor crpke je moguć jedino ako znamo za koje protoke će se koristiti. Grafovi karakteristika crpki su jedni od najvažnijih alata inženjera za pravilan odabir električnih uronjivih crpki. Ti grafovi prikazuju ovisnost triju komponenti o protoku kroz samu crpku. To su: tlačna visina koju daje crpka, snaga potrebna za pokretanje crpke i efikasnost crpke. Na temelju proizvoljno zadanih parametara ležišta i bušotine, odabrano je par crpki iz kataloga proizvođača te su navedene crpke digitalizirane pomoću programa Plot Digitizer i programskog jezika Python. Izvođenjem Python skripti dobiveni su grafovi karakteristika crpki HAL538-11000, HAL400-1250, HAL400-6000 i HAL538-1500 te tablica parametara istoimenih crpki u radu sa zadanim protocima bušotine. Pomoću tablice, utvrđeno je kako crpka HAL538-1500 ima mnogobrojne prednosti nad drugim crpkama što se tiče parametara poput visine dobave jednog stupnja, same efikasnosti crpke kao i potrebnog broja stupnjeva i potrebne snage za pokretanje crpke. U diplomskom radu prikazana je metoda odabira električnih uronjivih crpki za određeni slučaj pomoću programskog jezika Python. Moguće je mijenjati svojstva ležišta, bušotine i proizvodnog fluida kako bi se razmatrale karakteristike ovakvih crpki u drukčijim uvjetima. Isto tako moguće je iz kataloga proizvođača odabirati drukčije crpke za iste uvjete zadanog ležišta te uspoređivati parametre različitih crpki.

## 6. Reference

1. BELTUR, R. , PRADO, M. , DURAN, J. , PESSOA, R. , 2003. , Analysis of Experimental Data of ESP Performance Under Two-Phase Flow Conditions, SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 22-25 March
2. KRISHNAMOORTHY, D. , BERGHEIM, M.E. , PAVLOV, A. , FREDRIKSEN, M. , FJALESTAD, K., 2016. , *Modelling and Robustness Analysis of Model Predictive Control for Electrical Submersible Pump Lifted Heavy Oil Wells* , 11th IFAC Symposium of Dynamics and Control of Process Systems, June 6-8, NTNU,Trondheim, Norway
3. KHAKIMYANOV, M.I. , SHAFIKOV, I.N. , KHUSAINOV, F.F. , 2016. , *Electric Submersible Pumps in Oil Production and Their Efficiency Analysis*, 4th International Conference on Applied Innovations in IT, March 2016
4. STEL, H. , SIRINO, T. , PONCE, F.J. , CHIVA, S. , MORALES, R.E.M. , 2015. , *Numerical Investigation of the flow in multistage electric submersible pump*, Journal of Petroleum Science and Engineering 136 (2015) 41-54
5. SUAT BAGCI, A. , KECE, M. , NAVA, J. , 2010. , *Challenges of Using Electrical Submersible Pump (ESP) in High Free Gas Applications*, SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, 8-10 June
6. TAKACS, G., 2018., *Electrical Submersible Pumps Manual Design, Operations, and Maintenance Second edition*, Elsevier Gulf Professional Publisher
7. ZHANG, P. , CHEN, T. , WANG, G. , PENG, C. , 2017. , *Ocean Economy and Fault Diagnosis of Electric Submersible Pump applied in Floating platform*, International Journal of Navigation and Maritime Economy 6 (April, 2017)
8. ZHOU, D. , SACHDEVA, R. , 2010. , *Simple model of electric submersible pump in gassy well*, Journal of Petroleum Science and Engineering 70 (2010) 204-213
9. HALLIBURTON, 2016, Electrical Submersible Pumps Product Catalog, <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.halliburton.co>

[m/content/dam/ps/public/artificial\\_lift/contents/Books\\_and\\_Catalogs/web/Halliburton-2016-ESP-Product-Interactive-Catalog.pdf&ved=2ahUKEwjNy7aRwdLiAhUrIIsKHacHBdMQFjAAegQIBBAB&usg=AOvVaw2J\\_mtFiNocqyuaoQYvIchI](https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/artificial_lift/contents/Books_and_Catalogs/web/Halliburton-2016-ESP-Product-Interactive-Catalog.pdf&ved=2ahUKEwjNy7aRwdLiAhUrIIsKHacHBdMQFjAAegQIBBAB&usg=AOvVaw2J_mtFiNocqyuaoQYvIchI)

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

---

Luka Tomljanović