

# Usporedba mehaničkih načina podizanja kapljevine s hibridnom metodom korištenjem turbine pogonjene plinom

---

Panić, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:741466>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



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

**USPOREDBA MEHANIČKIH NAČINA PODIZANJA KAPLJEVINE S  
HIBRIDNOM METODOM KORIŠTENJEM TURBINE POGONJENE PLINOM**

Diplomski rad

Kristijan Panić

N4480

Zagreb, 2024.

USPOREDBA MEHANIČKIH NAČINA PODIZANJA KAPLJEVINE S HIBRIDNOM METODOM  
KORIŠTENJEM TURBINE POGONJENE PLINOM

Kristijan Panić

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

Sažetak

Tema diplomskog rada je usporediti često primjenjive mehaničke metode podizanja kapljevine, centrifugalne i vijčane električne crpke te plinski lift s novom hibridnom metodom podizanja kapljevine uz pomoć turbine pogonjene plinom nazvane turbox. U ovom diplomskom radu bit će pobliže prikazani dijelovi plinskog lifta, centrifugalnih crpki i turbox sustava. Osim komponenti svakog od razmatranih sustava bit će prikazane prednosti, nedostaci, područje primjene i glavne karakteristike pojedine mehaničke metode. U radu je korišten program Prosper koji je dio softverskog paketa IPM kojeg distribuira tvrtka Petroleum Experts, pomoću kojeg su izrađene simulacije za svaku mehaničku metodu za slučaj zavodnjenog naftnog ležišta naziva xy.

Ključne riječi: Mehaničke metode, plinski lift, centrifugalne crpke, vijčane crpke, turbox sustav

Završni rad sadrži: 41 stranicu, 4 tablice, 20 slika, i 7 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a

Pomoć pri izradi: Nino Bošnjak, dipl. ing. naft. rud.

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, izvanredna profesorica RGNF-a  
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

COMPARISON OF ARTIFICIAL LIFTS FOR LIFTING FLUIDS WITH A HYBRID METHOD USING A  
GAS TURBINE

Kristijan Panić

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

Abstract

The topic of this thesis is to compare the often applicable artificial lifts for lifting fluids, centrifugal and screw electric pumps and a gas lift with a new hybrid method of lifting fluid with the help of a gas-powered turbine called turbox. In this thesis, the parts of the gas lift, centrifugal pumps and turbox system will be presented in more detail. In addition to the components of each of the considered systems; the advantages, disadvantages, field of application and main characteristics of each mechanical method will also be presented. The Prosper program, which is part of the IPM software package distributed by the Petroleum Experts company, was used in this thesis to provide simulations for each mechanical method in case of a water cut of an oil reservoir called xy.

Keywords: Artificial lifts, gas lift, centrifugal pumps, screw pumps, turbox system

Thesis contains: 41 pages, 4 table, 20 figures, i 7 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD

Tech. assistance: Grad. ing. petrol. Nino Bošnjak

Reviewers: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD  
Associate Professor Sonja Koščak Kolin, PhD  
Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Defense date: September 13,2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## **ZAHVALA**

Posebno bih se zahvalio mentoru, dr. sc. Vladislavu Brkiću, za svu nesebičnu pomoć i stručno vodstvo prilikom izrade diplomskog rada. Hvala Vam što ste doprinijeli mom profesionalnom rastu i razvoju te mi bili uzor kako na profesionalnoj razini tako i na privatnoj. Osobito sam zahvalan dipl. oec. Tomislavu Nižetiću i njegovoj kompaniji TERRA ENERGIJA d.o.o. na ustupljenim podacima, literaturi i podijeljenom stručnom znanju.

Nadalje, zahvalio bih se malom krugu velikih ljudi: majci Gordani, ocu Robertu, mlađoj sestri Magdaleni, ujaku Draženu, baki Mariji, baki Ružici i djevojci Sari Spajić koji su bili tu kada su mi najviše trebali tijekom mojeg studiranja.

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA.....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PLINSKI LIFT.....</b>	<b>2</b>
2.1. <b>Neprekidno (stalno) plinsko podizanje .....</b>	<b>2</b>
2.2. <b>Povremeno plinsko podizanje .....</b>	<b>3</b>
2.3. <b>Oprema i način rada neprekidnog plinskog lifta.....</b>	<b>3</b>
2.4. <b>Oprema i način rada povremenog plinskog lifta .....</b>	<b>4</b>
2.5. <b>Prednosti plinskog lifta.....</b>	<b>6</b>
2.6. <b>Nedostaci plinskog lifta .....</b>	<b>6</b>
<b>3. ELEKTRIČNE URONJIVE CRPKE .....</b>	<b>7</b>
3.1. <b>Električne vijčane uronjive crpke .....</b>	<b>8</b>
3.1.1. <i>Oprema i način rada električnih vijčanih crpki .....</i>	<i>8</i>
3.1.2. <i>Prednosti električnih vijčanih crpki.....</i>	<i>9</i>
3.1.3. <i>Nedostaci električnih vijčanih crpki .....</i>	<i>9</i>
3.2. <b>Električne centrifugalne uronjive crpke.....</b>	<b>10</b>
3.2.1. <i>Oprema i način rada centrifugalnih crpki .....</i>	<i>10</i>
3.2.2. <i>Prednosti centrifugalnih crpki.....</i>	<i>12</i>
3.2.3. <i>Nedostaci centrifugalnih crpki .....</i>	<i>12</i>
<b>4. TURBOX SUSTAV ZA PODIZANJE KAPLJEVINE.....</b>	<b>13</b>
4.1. <b>Dijelovi turbox sustava .....</b>	<b>13</b>
4.1.1. <i>Više-stupanjska aksijalna turbina.....</i>	<i>14</i>
4.1.2. <i>Centrifugalna crpka velike radne brzine.....</i>	<i>16</i>
4.2. <b>Ugradnja turbox sustava .....</b>	<b>16</b>
4.3. <b>Načini opremanja turbox sustava .....</b>	<b>17</b>
4.3.1. <i>Jednostruki niz uzlaznih cijevi.....</i>	<i>17</i>
4.4. <b>Način rada turbox sustava .....</b>	<b>19</b>
4.5. <b>Prednosti turbox sustava .....</b>	<b>19</b>
<b>5. USPOREDNI PRIKAZ PREDNOSTI I NEDOSTATAKA TURBOX SUSTAVA U ODNOSU NA DRUGE MEHANIČKE METODE.....</b>	<b>21</b>

<b>6. SIMULACIJA U PROSPERU ZA RAZLIČITE MEHANIČKIH METODA PODIZANJA KAPLJEVINE .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1. Ulazni podaci .....</b>	<b>24</b>
<b>6.2. PVT ležišta .....</b>	<b>25</b>
<b>6.3. IPR krivulja .....</b>	<b>26</b>
<b>6.4. Eruptivna proizvodnja pri trenutnom stanju (WC=10 %).....</b>	<b>27</b>
<b>6.5. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću električne uronjive crpke.....</b>	<b>29</b>
<b>6.6. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću neprekidnog plinskog lifta .....</b>	<b>31</b>
<b>6.7. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću turbox sustava .....</b>	<b>35</b>
<b>6.8. Analiza rezultata.....</b>	<b>39</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>40</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>41</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Način rada neprekidnog plinskog lifta.....	4
Slika 2-2. Način rada povremenog plinskog lifta.....	5
Slika 3-1. Oprema električne centrifugalne crpke.....	11
Slika 4-1. Komponente turbinske uronjive crpke.....	13
Slika 4-2. Konstrukcija više-stupanjske aksijalne turbine.....	14
Slika 4-3. Opremanje bušotine turbox sustavom i jednostrukim nizom uzlaznih cijevi.....	18
Slika 6-1. Ulazni PVT parametri.....	25
Slika 6-2. IPR krivulja za trenutno stanje u ležištu (WC=10 %)......	26
Slika 6-3. IPR i VLP krivulja za eruptivnu (trenutnu) proizvodnju.....	27
Slika 6-4. Scenarij prestanka eruptivne proizvodnje.....	28
Slika 6-5. Odnosa tlaka crpke i VLP krivulje.....	29
Slika 6-6. Ulazni parametri za neprekidni plinski lift (WC=80 %)......	31
Slika 6-7. Dizajn neprekidnog plinskog lifta.....	32
Slika 6-8. Krivulje ležišnog tlaka, temperature i gradijenta tlakova plinskih ventila.....	33
Slika 6-9. Krivulja odnosa utiskivanja plina i proizvodnje nafte.....	33
Slika 6-10. Prikaz proizvodnje pri različitim količinama utisnutog plina.....	34
Slika 6-11. IPR krivulja turbox sustava.....	35
Slika 6-12. Visina podizanja pomoću TSP-a.....	36
Slika 6-13. Usporedba karakteristika turbox sustava (TSP-a) i centrifugalne crpke.....	37
Slika 6-14. Usporedba karakteristika turbox sustava i neprekidnog plinskog lifta.....	38



## **POPIS TABLICA**

Tablica 5-1. Usporedni pregled prednosti i nedostataka mehaničkih metoda podizanja kapljevine.....	21
Tablica 6-1. Ulazni parametri.....	24
Tablica 6-2. Ulazni parametri turbox sustava .....	35
Tablica 6-3. Parametri TSP-a .....	37

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica/engleski naziv	Opis
<i>TSP</i>	(turbine submersible pump)	turbinska uronjiva crpka
J	m <sup>3</sup> /dan/bar	indeks proizvodnosti (metar kubni u danu po baru)
<i>Q</i>	m <sup>3</sup> /dan	proizvodnja kapljevine (metar kubni u danu)
PVT		tlak, volumen i temperatura fluida u ležištu
IPR	(inflow performance relationship)	krivulja odnosa pridobivanja i dinamičkog tlaka
API	(american petroleum institute)	američka oznaka za gustoću nafte
Pb	bar	tlak zasićenja
AOF	(absolute open flow)	teoretska/maksimalna proizvodnja
Hz		mjerna jedinica frekvencije
WC	(water cut)	udio slojne vode u kapljevini

## 1. UVOD

Pridobivanje ugljikovodika iz naftno-plinskih ležišta ostvaruje se postizanjem depresije odnosno razlike tlaka između ležišta i kanala bušotine. Uslijed razlike tlaka dolazi do kretanja fluida kroz proizvodnu opremu bušotine prema površini. Proizvodnja kapljevine iz ležišta moguća je kroz dvije faze odnosno kroz primarnu i mehaničku fazu pridobivanja kapljevine. Na početku životnog vijeka bušotine, eksploatacije se odvija primarnom metodom, što znači da je energija ležišta (tlak) dovoljno velik za savladavanje svih otpora protjecanju prilikom protoka kapljevine od dna kanala bušotine do površinskih sustava. Energija u primarnoj fazi proizvodnje je energija elastičnosti, potencijalna energija gravitacijskih sila, energija stlačena u plinskoj kapi ili energija otopljenog plina. Primarnim (eruptivnim) metodama proizvodnje moguće je proizvesti između 10% i 25% od ukupnih početnih rezervi nafte koja je uskladištena u ležištu (Brkić, 2021). Kada energija ležišta nije dovoljna za savladavanje otpora protjecanju tada se prelazi na mehaničke metode proizvodnje (engl. *artificial lift*). U naftnoj i plinskoj industriji najpoznatije i najzastupljenije su dvije mehaničke metode pridobivanja kapljevine. Jedna od mehaničkih metoda je plinski lift, a druga mehanička metoda je pridobivanje s pomoću dubinskih crpki.

Kako razvoj tehnologija u suvremenom svijetu drži korak s vremenom, tako dolazi i do stvaranja i otkrivanja novih tehnologija u području naftnog i plinskog biznisa. S obzirom na razvoj novih mehaničkih metoda proizvodnje nafte i/ili geotermalne energije u ovom diplomskom radu će se prikazati nova mehanička metoda pod nazivom turbox. Navedena mehanička metoda primjenjuje pojedine karakteristike više mehaničkih metoda podizanja kapljevine pa se svrstava u tzv. hibridne metode.

Diplomski rad opisuje dijelove, dizajn opreme, sastav alata, način rada, mjesta primjene te prednosti i nedostatke klasičnih mehaničkih metoda i turboxa kao mehaničke metode podizanja kapljevine u razvoju.

## **2. PLINSKI LIFT**

Plinski lift je jedna od već odavno poznatih mehaničkih metoda koja koristi stlačeni prirodni plin u kojemu je akumulirana energija koja olakšava stupac kapljevine iznad mjesta ulaska plina u uzlazne cijevi. Postoje dvije glavne podjele plinskog lifta, a to je s obzirom na količinu davanja kapljevine i s obzirom na indeks proizvodnosti. Ako bušotina ima malo davanje kapljevine (koje prvenstveno ovisi o tlaku) i mali indeks proizvodnosti tada se na takvu bušotinu ugrađuje povremeni plinski lift. S druge strane ako na naftnom polju postoji veliko davanje kapljevine i veliki indeks proizvodnosti tada je ta bušotina idealna za odabir i ugradnju neprekidnog plinskog lifta (Zelić, 1977).

### **2.1. Neprekidno (stalno) plinsko podizanje**

Prilikom neprekidnog plinskog podizanja dolazi do stalnog utiskivanja stlačenog prirodnog plina kroz prstenasti prostor koji preko radnog ventila ulazi u uzlazne cijevi. Usljed takvog utiskivanja dolazi do ustaljenog protoka s dna bušotine prema površini. Utiskivanjem plina omogućava se smanjenje gustoće kapljevine (olakšavanje stupca kapljevine) iznad mjesta utiskivanja plina. Kada dođe do smanjenja gustoće kapljevine dolazi do smanjenja dinamičkog tlaka na dnu kanala bušotine čime se automatski povećava depresija odnosno razlika tlaka između ležišta i kanala proizvodne bušotine. Teoretski s povećavanjem količine utisnutog plina dolazi do povećanja proizvodnje kapljevine. Količinu utisnutog plina ne može se beskonačno povećavati jer nakon određenog volumena utiskivanja dolazi do kontra efekta (smanjenja proizvodnje) zbog povećanja hidrauličkih otpora. Stalno plinsko podizanje najčešće slijedi odmah nakon eruptivnog načina proizvodnje. Količina plina koji se utiskuje u bušotinu se regulira i podešava s pomoću podesive sapnice koja se najčešće nalazi na utisnom plinovodu. Jedna od glavnih mana neprekidnog utiskivanja plina je ta što se njime ne može postići minimalni dinamički tlak na dnu bušotine kako bi se postigla maksimalna depresija, a samim time i maksimalna proizvodnja (Brkić, 2021). Upravo zbog ovog razloga se u određenim slučajevima koriste druge mehaničke metode pridobivanja.

## **2.2. Povremeno plinsko podizanje**

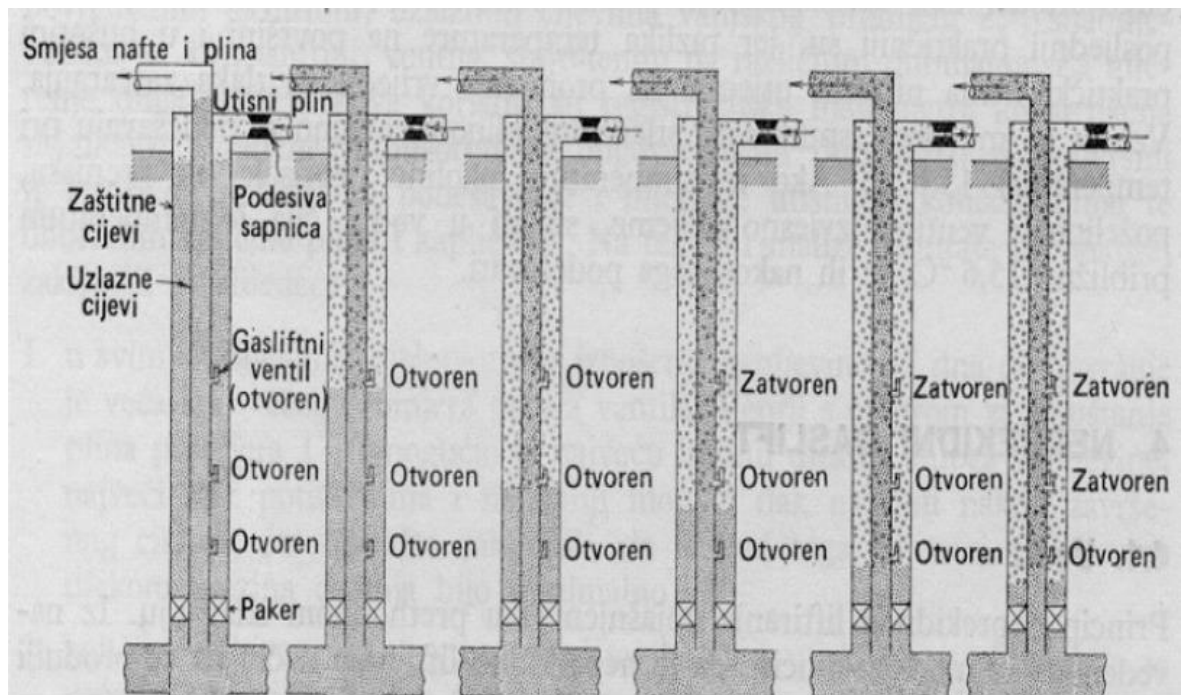
Povremeno plinsko podizanje koristi se kod bušotina koje imaju niži ležišni tlak i niži indeks proizvodnosti (Zelić, 1977). Prilikom ovakvog plinskog podizanja prirodni plin se utiskuje u prstenasti prostor u određenim vremenskim razmacima u relativno velikim količinama (obrocima) s pomoću tajmera ili budilice. Uslijed utiskivanja plina u obrocima dolazi do neustaljenog povremenog protoka s dna kanala bušotine prema površini. Nakon podizanja „obroka“ kapljevine završen je jedan ciklus, a broj ciklusa ovisi o davanju bušotine.

## **2.3. Oprema i način rada neprekidnog plinskog lifta**

Što se tiče opreme neprekidnog plinskog lifta, konstrukcija je nešto lakša i jednostavnija od povremenog plinskog lifta, ali razlike su veoma male. Podzemna oprema koja se koristi kod neprekidnog plinskog lifta sa sastoji se od (Zelić, 1977):

- uzlaznih cijevi,
- zaštitnih cijevi,
- nekoliko rasteretnih ventila,
- jednog radnog ventila,
- bočnog vretena,
- kliznih vrata,
- sigurnosne spojnice,
- pakera,
- prijelaza (spojnice) za odlaganje,
- šešir vodilice.

Princip rada neprekidnog plinskog lifta je takav da se kroz utisni plinovod konstantno utiskuje prirodni plin, koji putuje prstenastim prostorom do najdubljeg ventila za plinsko podizanje, koji je ujedno i radni ventil. Prirodni plin iz prstenastog prostora preko radnog ventila ulazi u uzlazne cijevi. Za to vrijeme su svi plinski ventili otvoreni. Kako se s vremenom sve više i više olakšava stupac kapljevine, tako dolazi do zatvaranja rasteretnih ventila od najpliće postavljenog prema najdublje postavljenog rasteretnog ventila. Smjesa kapljevine i prirodnog plina putuje ka površini kroz uzlazne cijevi i odlazi u priključni naftovod koji dalje vodi do sabirne stanice na separaciju i daljnju obradu fluida (Zelić, 1977). Način rada neprekidnog plinskog lifta prikazan je na Slici 2-1.

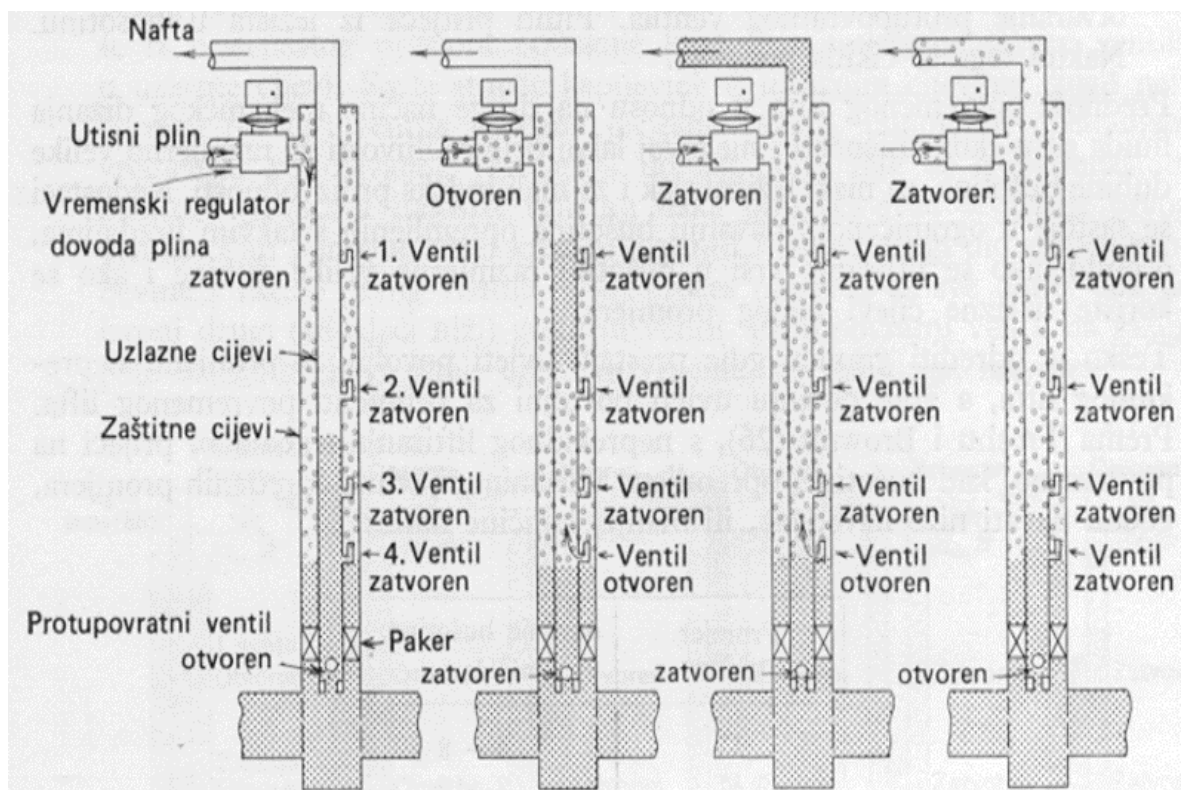


**Slika 2-1.** Način rada neprekidnog plinskog lifta (Zelić, 1977)

#### **2.4. Oprema i način rada povremenog plinskog lifta**

Oprema neprekidnog i povremenog plinskog lifta je gotovo pa identična, jedina i glavna razlika je u tome što povremeni plinski lift ima tajmer koji nakon određenog vremena otvara motorni ventil na utisnom plinovodu i omogućava utiskivanje prirodnog plina u prstenasti prostor. Za razliku od neprekidnog plinskog lifta, postoji nekoliko vrsta povremenog plinskog lifta poput: komornog plinskog lifta, klipnog lifta, dvostrukog plinskog lifta i jednorednog plinskog lifta (Zelić, 1977). Naravno da svaka vrsta povremenog plinskog lifta ima nekoliko glavnih dijelova opreme koji ju karakteriziraju i odvajaju od ostalih vrsta povremenog plinskog lifta.

Naravno da način rada pojedinog tipa povremenog plinskog lifta nije jednaka i varira od tipa do tipa, zato će u ovom radu biti općeniti način rada povremenog plinskog lifta koji je prikazan na Slici 2-2. Na početku ciklusa, motorni ventil na utisnom plinovodu je zatvoren, kao i svi rasteretni i radni ventili. Protupovratni ventil koji se nalazi na samom dnu uzlaznih cijevi (neposredno ispod pakera) je u otvorenom stanju. Uloga protupovratnog ventila u ovoj fazi je da omogući dotjecanje kapljevine iz područja većeg tlaka u područje manjeg tlaka, drugim riječima iz ležišta u kanal bušotine. Kada je pritjecanje fluida dovršeno, ventil na utisnom plinovodu se otvara, plin ulazi u prstenasti prostor i povećava tlak koji otvara radni ventil (rasteretni ventili su i dalje zatvoreni). Uslijed povećanja tlaka plina također dolazi do zatvaranja protupovratnog ventila. Nakon toga započinje podizanje kapljevine prema površini sve dok ne dođe do ponovnog pada tlaka plina, tada prestane iznošenje kapljevine. Zatim opet dolazi do ponovnog otvaranja protupovratnog ventila i ponovnog dotjecanja kapljevine iz sloja u kanal bušotine (Zelić, 1977).



**Slika 2-2.** Način rada povremenog plinskog lifta (Zelić, 1977)

## 2.5. Prednosti plinskog lifta

Plinski lift ima veliku mogućnost primjene pa se može koristiti u uvjetima (Zelić, 1977):

- Akumulacije parafina i emulzija,
- malog davanja bušotine,
- velikog davanja bušotine,
- visokog ležišnog tlaka,
- niskog ležišnog tlaka,
- visokog udjela plina u kapljevini,
- velikog udjela vode u kapljevini,
- malog indeksa proizvodnosti (ispod 1 m<sup>3</sup>/dan/bar),
- velikog otklona kanala bušotine,
- koji ne zahtijevaju korištenje električne energije.

## 2.6. Nedostaci plinskog lifta

Plinski lift se ne preporučuje primjenjivati u uvjetima (Zelić, 1977):

- dubljih bušotina (od 3500 metara pa nadalje),
- velike akumulacije pijeska,
- otvorenog kanala bušotine,
- vađenje ventila nije uvijek moguće opremom na žici, ponekad je potrebno vaditi cijeli niz uzlaznih cijev.



### **3. ELEKTRIČNE URONJIVE CRPKE**

Odabir načina i vrste mehaničkog podizanja kapljevine prvenstveno ovisi o ležišnim parametrima i uvjetima. Osim ležišnih parametara na odabir mehaničke metode također utječe i cijena opreme, troškovi popravka, učestalost remonta, trenutna cijena nafte na tržištu, raspoloživa oprema i infrastruktura na pojedinoj lokaciji. Plinski lift može se koristiti ako na lokaciji imamo na raspolaganju plin za utiskivanje. Plin se može dobiti iz plinskih bušotina, plinske kape naftnog ležišta, kaptažnog plina (plin proizveden iz naftne bušotine pa odvojen na separatoru), a ako ne postoje gore navedene opcije, plin se može kupiti iz transportnog sustava. Ako na lokaciji ne postoji mogućnost kupovine prirodnog plina, tada se može ustvrditi kako uvjeti i infrastruktura ne omogućava primjenu plinskog lifta na određenoj lokaciji. U tom slučaju koristi se druga dobro poznatoj mehanička metoda podizanja kapljevine, a to su električne uronjive crpke. Postoje dvije glavne vrste električnih uronjivih crpki, a to su centrifugalne i vijčane električne uronjive crpke. U idućim poglavljima biti će detaljnije opisane obje vrste električnih uronjivih crpki.

### **3.1. Električne vijčane uronjive crpke**

#### *3.1.1. Oprema i način rada električnih vijčanih crpki*

Električne vijčane crpke sastoje se od (Kimray, n.d., Zelić i Čikeš, 2006):

- elektromotora,
- brtvene sekcije,
- reduktora,
- gibljive osovine ležajeva,
- usisne sekcije,
- rotora,
- statora,
- električnog kabela,
- štitnika za električni kabel,
- frekventnog pretvarača.

Uloga frekventnog pretvarača je omogućiti kontrolu brzine rada crpke. To se postiže tako da frekventni pretvarač povećava ili smanjuje brzinu okretaja rotora. Električni kabel ima funkciju dovoda električne energije od površine do elektromotora. Štitnik se postavlja duž cijelog niza uzlaznih cijevi kako bi se smanjila vjerojatnost habanja i trošenja električnog kabla, sve u svrhu smanjenja učestalosti remontnih radova. Električne vijčane crpke rade na principu rotacije rotora unutar statora. Uslijed te rotacije dolazi do kretanja fluida kroz šupljine između rotora i statora. Gibljiva osovina ležajeva ima zadatak amortizirati odnosno ublažiti gibanje rotora od gibanja elektromotora i reduktora. Kako samo ime kaže, reduktor ima ulogu reducirati velike brzine rotacije koje elektromotor može proizvesti. Reduktor reducira velike brzine elektromotora na manje i željene brzine potrebne za normalan rad crpke. Brtvena sekcija ima ulogu odijeliti radne fluide (ulja) potrebne za rad crpke od bušotinskih fluida kako ne bi došlo do njihovog neželjenog miješanja (Zelić i Čikeš, 2006).

### 3.1.2. Prednosti električnih vijčanih crpki

Prednosti električnih vijčanih crpki u odnosu na druge mehaničke metode su (Brkić, 2021):

- manji kapitalni troškovi,
- proizvodnja viskoznih fluida,
- izborom elastomera (kompozitnih materijala kojima se oblaže unutarnja strana statora) moguće je prilagođavanje uvjetima u bušotini i svojstvima fluida kojeg se namjerava pridobivati,
- smanjuje se pulzacija u pri bušotinskoj zoni, što dovodi do smanjena krutih čestica koje dotječu u kanal bušotine,
- proizvodnja fluida s visokim udjelom plina u sastavu kapljevine,
- proizvodnja fluida s velikim udjelom pijeska,
- uklonjena površinska oprema (za razliku od usadnih vijčanih crpki),
- smanjeni troškovi nabavke klipnih šipki,
- rjeđi remontni uslijed oštećenja (za razliku od usadnih vijčanih crpki),
- moguća ugradnja u horizontalne i koso usmjerene bušotine,
- manji pad tlaka uslijed manjeg trenja zbog većeg promjera protjecanja fluida jer je omogućen puni presjek uzlaznih cijevi za protok.

### 3.1.3. Nedostaci električnih vijčanih crpki

Nedostaci električnih vijčanih crpki u odnosu na druge mehaničke metode su (Brkić, 2021):

- ograničena dubina ugradnje,
- ograničena maksimalna temperatura u bušotini,
- veći kapitalni i operativni troškovi uslijed nabavke štitnika i električnog kabela,
- kraći radni vijek ako je pogrešno izabran elastomer,
- mogućnost proizvodnje u bušotinama malih dobava.

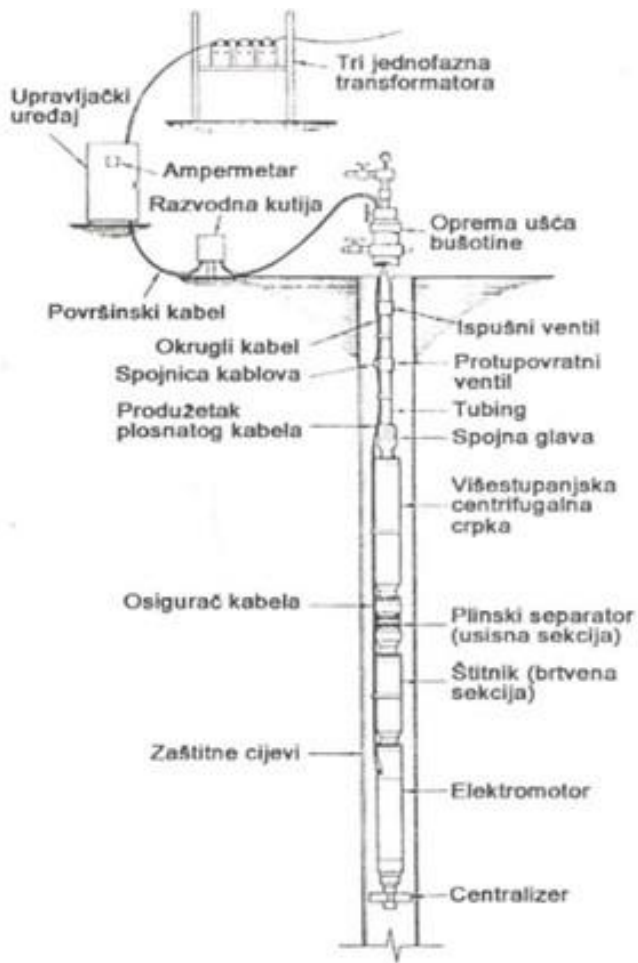
## 3.2. Električne centrifugalne uronjive crpke

### 3.2.1. Oprema i način rada centrifugalnih crpki

Osnovna oprema potrebna za rad sustava električnih centrifugalnih crpki je (Zelić i Čikeš, 2006):

- Elektromotor,
- brtvena sekcija,
- usisna sekcija (plinski separator),
- električni kabel,
- površinska oprema za električno upravljanje crpkom.

Centrifugalna crpka sastoji se od impelera i kućišta. Impeler tjera fluid koji se želi stlačiti u rotacijsko gibanje, a kućište usmjerava fluid na impeler i odvod. Uslijed rotacijskog gibanja, fluid izlazi iz impelera s većom brzinom i tlakom u odnosu na ulaznu brzinu i tlak. Centrifugalna crpka omogućava podizanje fluida tako da povećava brzinu uzlaznog fluida, uslijed rotacije impelera dolazi do povećanja kinetičke energije. Nakon izlaska fluida iz impelera i ulaska u difuzor dolazi do pada brzine fluida, a samim time dolazi i do pada kinetičke energije. Kinetička energija se pretvara u potencijalnu energiju koja omogućava fluidu savladavanje sile trenja, gravitacijske sile i svih otpora protjecanju (Fetoui, 2017). Glavni zadatak brtvene sekcije je onemogućiti ulazak bušotinskog fluida u motor. Uloga plinskog separatora je odvojiti slobodni plin iz kapljevine i usmjeriti ga kroz prstenasti prostor do površine. Ako kapljevina ima zanemariv udio plinske faze, plinski separator nije obavezna oprema u sustavu (Fetoui, 2017). Na Slici 3-1. prikazana je oprema neophodna za opremanje bušotine za rad pomoću električne centrifugalne crpke.



Slika 3-1. Oprema električne centrifugalne crpke (Zelić i Čikeš, 2006.)

### 3.2.2. Prednosti centrifugalnih crpki

Prema Zeliću i Čikešu prednosti centrifugalnih crpki su sljedeće (Zelić i Čikeš, 2006):

- veća dubina ugradnje (do 4500 m) u odnosu na vijčane,
- proizvodnja većih količina kapljevine (do 10 000 m<sup>3</sup>/d),
- primjena u različitim bušotinskim uvjetima,
- primjena u bušotinama s velikim udjelom plina u kapljevini,
- proizvodnja viskoznih fluida,
- primjena od koso usmjerenih do horizontalnih bušotina,
- minimalna količina površinske opreme što znači da je pogodna za urbana područja i odobalnu proizvodnju.

### 3.2.3. Nedostaci centrifugalnih crpki

Nedostaci centrifugalnih crpki (Zelić i Čikeš, 2006):

- učestaliji i veći troškovi remonta,
- povećana potrošnja električne energije,
- osjetljivost na čestice pijeska,
- osjetljivost na veliki udio plina u kapljevini,
- pri većoj proizvodnji je potreban veću unutarnji promjer zaštitnih cijevi,
- gubiti uslijed curenja, trenja diska i hidraulički gubitci.

## 4. TURBOX SUSTAV ZA PODIZANJE KAPLJEVINE

Turbox sustav za podizanja kapljevine je nova hibridna mehanička metoda pridobivanja kapljevine koja objedinjuje dvije već odavno poznate mehaničke metode; neprekidni plinski lift i uronjive crpke. Umjesto elektromotora, turbox koristi plinsku turbinu koja služi za pokretanje crpke. Plinska turbina se pokreće s pomoću stlačenog prirodnog plina koji se utiskuje kroz prstenasti prostor. Stlačeni prirodni plin iskoristi se dvaput, prvi put za pokretanje turbine, a drugi put nakon izlaska iz turbine za olakšavanje stupca kapljevine. Turbox sustav ima nekoliko mjesta primjene, prvenstveno se koristi za povećanje proizvodnje na zrelih naftnim poljima, ali također se uspješno može primjenjivati i na geotermalnim bušotinama (Terra energija d.o.o., 2023a).

### 4.1. Dijelovi turbox sustava

Glavna komponenta turboxa je turbinska uronjiva crpka (engl. *Turbine submersible Pump*, skraćeno TSP). Turbinska uronjiva crpka se sastoji od tri glavne komponente (Terra energija d.o.o., 2023b):

- više-stupanjske aksijalne turbine,
- centrifugalne crpke,
- regulacijskog plinskog ventila.

Turbinska uronjiva crpka može biti napravljena i ugrađena na jednostruki niz uzlaznih cijevi (uzlazne cijevi istog promjera) i na kombinirani niz uzlaznih cijevi (uzlazne cijevi različitih promjera). Osnovne komponente TSP-a su prikazane na Slici 4-1.

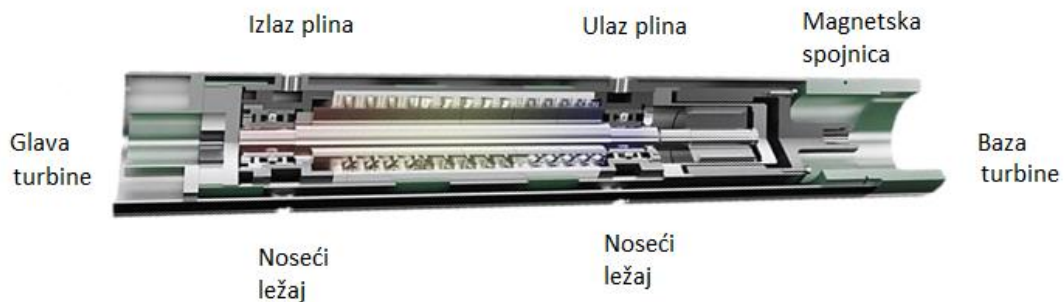


**Slika 4-1.** Komponente turbinske uronjive crpke (Terra energija d.o.o., 2023b)

Ako situacija na terenu zahtijeva ugradnju određene dodatne opreme, u sastav turboxa može se ugraditi oprema poput: plinskih ventila, različitih mjernih senzora, pakera itd.

#### 4.1.1. Više-stupanjska aksijalna turbina

Kao što je već spomenuto, izvor energije za pokretanje turbox sustava je energija stlačena u prirodnom plinu. Postoje dvije glavne kategorije ekspandera koji mogu biti: ekspanderi brzine, još poznati kao turbine i volumetrijski ekspanderi. Turbine nadalje mogu biti aksijalne i radijalne, ovisno o načinu strujanja fluida kroz turbinu. Turbine pretvaraju kinetičku energiju fluida koji protječe, u mehaničku energiju s pomoću rotirajuće osovine i lopatica rotora. Turbox koristi aksijalnu turbinu zbog toga što aksijalne turbine omogućuju aksijalno strujanje i protok fluida. Protjecanje u aksijalnom smjeru omogućava velike protoke s malim padom tlaka što dovodi do manjih gubitaka i do povećane učinkovitosti. Prema tome, uloga više-stupanjske aksijalne turbine je pretvorba stlačene energije iz prirodnog plina u mehaničku energiju koja služi za pokretanje uronjive crpke bilo kojeg tipa (vijčana, centrifugalna, i druge). Plin nakon izlaska iz turbine služi za dodatno olakšavanje kapljevine i njezino iznošenje na površinu. Fleksibilna konstrukcija turbine omogućuje različite izvedbe mjesta ulaska i izlaska plina i proizvodnog fluida što omogućava prilagodbu različitim uvjetima u kanalu bušotine. Unutar same turbine nalaze se kućišta koja omogućavaju prolaz proizvodnog fluida iz izlaza crpke turbine (Terra energija d.o.o., 2023b). Slika 4-2. pokazuje konstrukciju više-stupanjske aksijalne turbine.



**Slika 4-2.** Konstrukcija više-stupanjske aksijalne turbine (Terra energija d.o.o., 2023b)



Rad turbine se regulira s povećanjem ili smanjenjem protoka prirodnog plina. Kao što je vidljivo na slici, aksijalna turbina sastoji se od: glave, baze, dva ležaja, magnetske spojnice, ulaza i izlaza plina. U konstrukciji aksijalne turbine nalazi se magnetska spojnica koja omogućava spoj turbine i centrifugalne crpke. Osim što osigurava povezivanje turbine i crpke, magnetska spojnica osigurava i brtvljenje (hermetičnost) te onemogućuje ulazak proizvodnog fluida unutar samog sustava. Ako dođe do kvara rotacijskih dijelova TSP-a, ulazak plina je i dalje moguć zbog magnetske spojnice koja osigurava razliku tlaka između zaštitnih cijevi i uzlaznog niza turbine (Terra energija d.o.o., 2023b).

Turbina ima dvije glavne radne karakteristike, a to su: snaga i broj okretaja u minuti. Turbina postiže snagu od 1 kW pa sve do 1000 kW i više, dok je brzina rotacije u rasponu od 2000 do 15 000 okretaja u minuti turbine (Terra energija d.o.o., 2023b).

Prednosti turbine u odnosu na klasične elektromotore su (Terra energija d.o.o., 2023a):

- manje dimenzije,
- ne zagrijava se u radu,
- duži radni vijek,
- pouzdaniji rad,
- otpornost na visoke temperature, veće i od 288 °C,
- nema potrebe za vanjskim hlađenjem,
- nema ograničenja u broju zaustavljanja i ponovnog pokretanja,
- veća širina radnog područja, broj okretaja u minuti od 2000 do 15 000 i više.

#### 4.1.2. Centrifugalna crpka velike radne brzine

Što se tiče centrifugalne crpke poželjno je da ona bude konstruirana za velike radne brzine kako bi se omogućio rad turbine pri većem broju okretaja u minuti. Centrifugalna crpka velike brzine ima znatno veću radnu brzinu u odnosu na klasične električne uronjive centrifugalne crpke. Veća radna brzina centrifugalne crpke omogućava veći radni raspon, čime se smanjuje duljina samog sustava (opreme) i olakšava se njegova manipulacija prilikom ugradnje i izvlačenja. Upotrebom veće radne brzine dolazi do povećanja energetske učinkovitosti same crpke. No to ne znači da ne postoji mogućnost rada turbine pri manjem broju okretaja u minuti, ukoliko se to zahtijeva uslijed odabira pojedine centrifugalne crpke. Kako bi se produžio životni vijek centrifugalne crpke, materijali koji se koriste u njezinoj izgradnji vrhunske su kvalitete. Materijali poput dvostruko nehrđajućeg čelika, keramike, volframovog karbida, silicijevog dioksida, legure nikla i kobalta se koriste za izradu dijelova turbina i centrifugalnih crpki. Ovi materijali imaju iznimnu otpornost tijekom duljeg vremenskog perioda. Tvrđi materijali poput volframovog karbida i silicijevo dioksida otporni su na abraziju, habanje i koroziju uslijed određenih uvjeta u kanalu bušotine (Terra energija d.o.o., 2023b).

Karakteristike centrifugalne crpke velike brzine, koje ju razlikuju od klasičnih centrifugalnih crpki manje radne brzine su (Terra energija d.o.o., 2023a):

- radna snaga u rasponu od 1 kW do 1000 kW,
- broj okretaja u minuti u rasponu od 1000 do 15 000 okretaja u minuti,
- dnevna proizvodnja kapljevine od 5 m<sup>3</sup> pa na više.

#### 4.2. Ugradnja turbox sustava

Postoje tri načina ugradnje turbox opreme (Terra energija d.o.o., 2023a):

- pomoću remontnog postrojenja,
- prva ugradnja turbox opreme s pomoću remontnog postrojenja, a sve ostale manipulacije s pomoću opreme na žici ili savitljivog tubinga,
- pomoću savitljive uzlazne cijevi ili opremom na žici.

Ugradnja turbox opreme u bušotinu najčešće se obavlja klasičnim remontnim postrojenjem sa standardnom opremom. Postoji verzija turboxa kod kojega se samo prva ugradnja opreme mora obaviti s remontnim postrojenjem, a svaki idući remont je moguć s pomoću savitljivog tubinga ili opremom na žici. Također postoji verzija turbox opreme koji za opremanje kanala bušotine ne zahtijeva klasično remontno postrojenje nego se može primjenjivati ugradnja s pomoću opreme na žici (Terra energija d.o.o.,2023a).

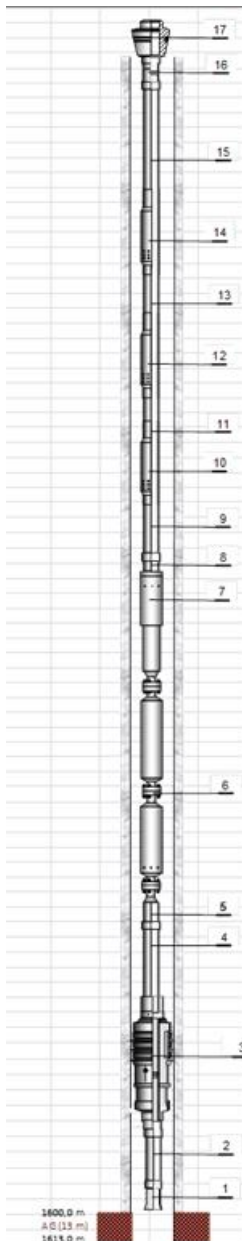
Koji način ugradnje turbox opreme će se koristiti ovisi o tehničkim karakteristikama pojedine bušotine, o ugrađenoj bušotinskoj opremi, cijeni remonta i operativnim troškovima. Turbinska uronjiva crpka isporučuje se sastavljena i spremna za spajanje s gornje i donje strane na uzlazne cijevi, što uvelike smanjuje nepotrebni gubitak vremena i sredstava za njezino sastavljanje na određenoj lokaciji.

### **4.3. Načini opremanja turbox sustava**

Turbinska uronjiva crpka može biti ugrađena na jednostruki niz uzlaznih cijevi (uzlazne cijevi istog promjera), ali i na kombinirani niz uzlaznih cijevi (uzlazne cijevi različitih promjera). Način opremanja uvelike ovisi o konstrukciji bušotine i specifičnim uvjetima unutar kanala bušotine.

#### *4.3.1. Jednostruki niz uzlaznih cijevi*

Postavljanje turbox opreme na jednostruki niz uzlaznih cijevi ima velike sličnosti sa stalnim plinskim liftom uz jednu glavnu razliku. Na mjesto radnog ventila se ugrađuje turbinska uronjiva crpka. Iz ovoga proizlazi da se bušotine koje proizvode plinskim liftom, uz male preinake mogu opremiti turbox sustavom. Slika 4-3. prikazuje opremanje bušotine turbox sustavom na jednostrukom (jednoobraznom) niz uzlaznih cijevi.



Broj	Naziv opreme	Komadi	Duljina (m)
1	Peta uzlaznih cijevi	1	0,2
2	Kratka spojnica 73 mm, EU	1	2
3	Paker- Ar1 47B2	1	1,5
4	Uzlazne cijevi 73 mm, EU		
5	Kratka teška šipka (prijelaz)	1	0,3
6	Odvajач plina	2	0,4
7	TSP- plinski ventil + plinska turbina + crpka	1	2
8	TSP kratka teška šipka (prijelaz)	1	0,3
9	Uzlazne cijevi 73 mm, EU		
10	Bočno vreteno – ugrađen plinski ventil	1	0,9
11	Uzlazne cijevi 73 mm, EU		
12	Bočno vreteno – ugrađen plinski ventil	1	0,9
13	Uzlazne cijevi 73 mm, EU		
14	Bočno vreteno – ugrađen plinski ventil	1	0,9
15	Uzlazne cijevi 73 mm, EU		
16	Završna spojnica za manipulaciju ventilima	1	0,35
17	Vješalica uzlaznih cijevi		0,4

**Slika 4-3.** Opremanje bušotine turbox sustavom i jednostrukim nizom uzlaznih cijevi (Terra energija d.o.o., 2023b)

Izlazni plin (koji je osigurao pokretanje turbine) izlazi iz turbine i ulazi u uzlazne cijevi, koje su preko plinskog ventila povezane s proizvodnim uzlaznim cijevima. To mjesto se naziva „vrat“. „Vrat“ osigurava optimalnu vrijednost tlaka u točki ulaska plina u proizvodnu cijev (Terra energija d.o.o., 2023b).

#### **4.4. Način rada turbox sustava**

Rad turbine (a samim time i cijelog turbox sustava) se regulira s povećanjem ili smanjenjem protoka i tlaka prirodnog plina čime se automatski utječe i na rad plinskog lifta. Regulacija je moguća s pomoću ventila koji regulira količinu dovedenog plina u turbinu. Upravljanje ventilom je automatizirano čime se olakšava cijeli proces upravljanja.

#### **4.5. Prednosti turbox sustava**

Opće prednosti turbox sustava su (Terra energija d.o.o., 2023a):

- ostvarivanje veće proizvodne količine u odnosu na neprekidni plinski lift,
- optimizacija postojećeg plinskog lifta bez potrebe za izvlačenjem opreme iz bušotine, turbinska uronjiva crpka se ugrađuje na mjesto radnog ventila,
- mogućnost ugradnje opremom na žici (brza i sigurna ugradnja),
- učinkovitije korištenje utisnutog plina,
- jednostavno upravljanje i pouzdan rad,
- standardizirano opremanje bušotine i manji broj rezervnih dijelova,
- nije potrebno savladavanje novog znanja o radu i uporabi turbox sustava,
- rad u uvjetima visoke temperature ( $>288$  °C),
- mogućnost ugradnje i u uzlazne cijevi malih promjera (88,9 milimetara ili 73 milimetara),
- sekundarni učinak uslijed pada tlaka dovodi do povećanja dodatnog iscrpka.

Prednosti turbox sustava sa strane kapitalnih i operativnih troškova (Terra energija d.o.o., 2023a):

- povećanje proizvodnje u odnosu na plinski lift i električnu uronjivu crpku, veći prihodi,
- smanjenje emisija stakleničkih plinova iskorištavanjem toplinske energije iz obnovljivih izvora energije bez dodatnog ulaganja i kapitalnog troška,
- smanjenje troškova ugradnje, servisa i rezervnih dijelova na skladištu,
- smanjenje gubitka proizvodnje zbog čekanja na dolazak remontnog toranja,
- izostanak potrebe za električnom energijom što znači da su manji kapitalni troškovi prilikom ugradnje,
- optimiziran je rad centralnog kompresora bez dodatnih ulaganja i troškova,
- veća energetska učinkovitost utječe na smanjenje emisije stakleničkih plinova što posljedično dovodi do manjih troškova u svrhu zbrinjavanja emisijskih plinova.

## 5. USPOREDNI PRIKAZ PREDNOSTI I NEDOSTATAKA TURBOX SUSTAVA U ODNOSU NA DRUGE MEHANIČKE METODE

U Tablici 5-1. koja slijedi istaknute su prednosti i nedostaci mehaničkih metoda podizanja kapljevine (plinski lift i električne crpke) u odnosu na turbox sustav podizanja. Također je prikazana njihova međusobna usporedba i navedene su pojedina karakteristike i parametri koji su važni i o kojima ovisi uspješnost proizvodnje različitim mehaničkim metodama podizanja kapljevine.

**Tablica 5-1.** Usporedni pregled prednosti i nedostataka mehaničkih metoda podizanja kapljevine

KARAKTERISTIKA	PLINSKI LIFT	ELEKTRIČNE CRPKE	TURBOX
Jednostavnost	✓		✓
Kompleksnost		✓	
Radni vijek opreme do 2 god.		✓	
Radni vijek opreme do 3 i više godina	✓		✓
Veći troškovi ugradnje i izvlačenja	✓	✓	
Manji troškovi ugradnje i izvlačenja			✓
Visoki tlak utiskivanja plina	✓		
Niski tlak utiskivanja plina			✓
Veliki udio vode u kapljevini		✓	✓
Mali udio vode u kapljevini	✓		✓
Veliki udio plina u kapljevini	✓		✓
Mali udio plina u kapljevini		✓	✓
Otpornost na temperaturu veću od 288 °C			✓
Učestali remont		✓	
Direktno korištenje obnovljive energije u radu			✓
Korištenje električne energije u radu		✓	

✓ karakteristika u kojoj pojedina mehanička metoda ima prednost i primjenu

Kada se spomene kompleksnost, prvenstveno se misli na kompleksnost električnih uronjivih crpki u smislu da je za njih potrebno uložiti više vremena, sredstva, planiranja i resursa za dovođenje električne energije do crpke. Kod plinskog lifta i turbox sustava to nije slučaj.

Prosječni radni vijek pojedinih dijelova opreme kod električnih uronjivih crpki iznosi do dvije godine, dok kod plinskog lifta i turbox sustava oprema ima prosječni radni vijek duži od tri godine. Razlog tome su kvalitetniji materijali od kojih je oprema izrađena i način funkcioniranja samog sustava podizanja kapljevine.

Kod turbox sustava su manji remontni troškovi ugradnje i izvlačenja opreme zbog toga što je moguća manipulacija s pomoću opreme na žici ili savitljivih uzlaznih cijevi.

Udio vode u kapljevini za turbox sustav ne predstavlja nikakav problem, odnosno može se primjenjivati u uvjetima velikog i malog udjela vode u kapljevini. Kod stalnog plinskog lifta situacija je drugačija, plinski lift se ne preporučuje primjenjivati u uvjetima gdje je veći udio vode u kapljevini jer je samim time i stupac kapljevine teži pa je i davanje bušotine manje.

Što se tiče udjela plina u kapljevini, turbox sustav može se koristiti u uvjetima velikog i malog udjela plina u kapljevini. Veliki udio plina u kapljevini ometa normalan rad električnih uronjivih crpki pa se one ne preporučuju koristiti u navedenim uvjetima. Ukoliko se koriste električne uronjive crpke u uvjetima visokog udjela plina u kapljevini, tada je potrebno ugraditi plinski separator kako bi se plin usmjeravao kroz prstenasti prostor do površine.

Turbox sustav se može primjenjivati u uvjetima visokog tlaka i visoke temperature.

Za rad turbox sustava nije potrebna električna energija za razliku od električnih uronjivih crpki.



Tablica prikazuje da odabir vrste mehaničke metode podizanja uvelike ovisi o svojstvima ležišta, dostupnoj opremi i troškovima pojedinih operacija. Ne može se govoriti o dominaciji samo jedne mehaničke metode, jer svaka mehanička metoda u određenim uvjetima ima prednosti zbog kojih se ugrađuje u određenu bušotinu. Iz tablice je vidljivo kako nova hibridna metoda nadomještava nedostatke ostale dvije mehaničke metode i najveću primjenu ima upravo u tim situacijama.

## 6. SIMULACIJA U PROSPERU ZA RAZLIČITE MEHANIČKIH METODA PODIZANJA KAPLJEVINE

### 6.1. Ulazni podaci

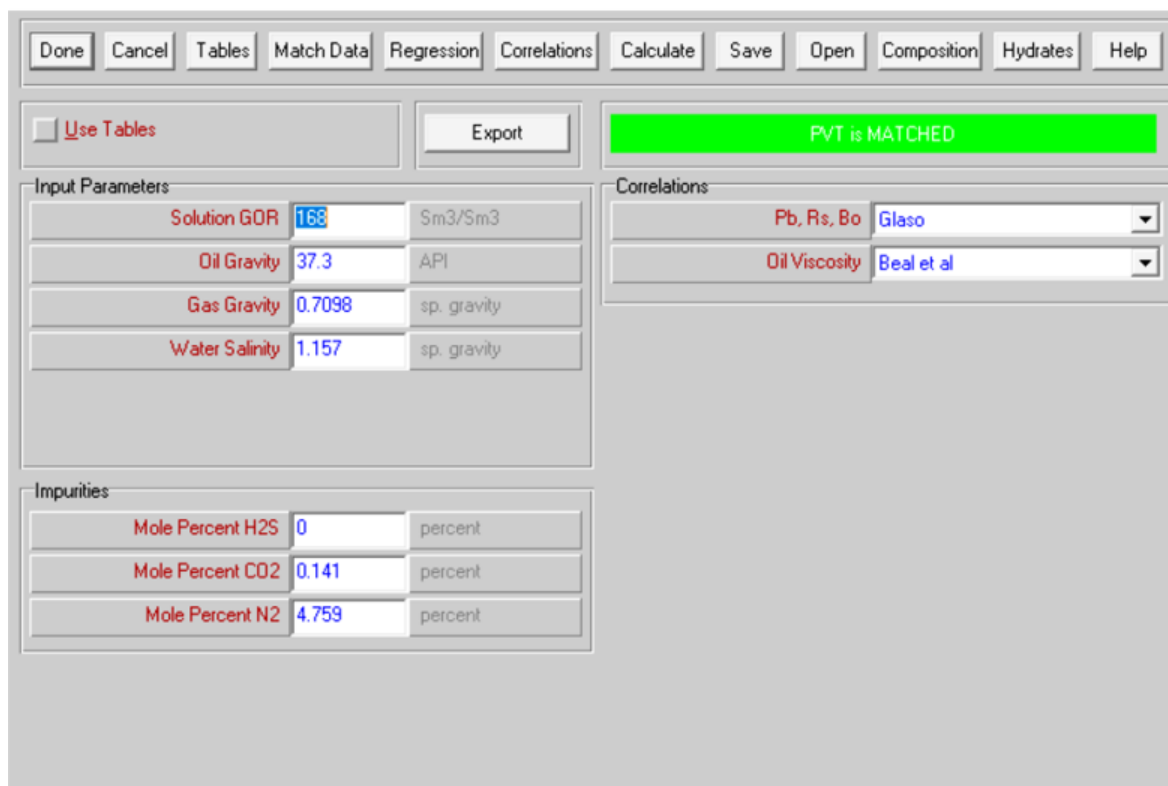
Tablica 6-1. prikazuje ulazne parametre za bušotinu xy za koju će se raditi simulacija u programskom paketu pod nazivom „Petroleum Experts- PROSPER“. Ležišni tlak iznosi 120 bar, a tlak na dnu bušotine iznosi 54 bar (zbroy hidrostatičkog tlaka i tlaka na ušću). Razlika ova dva tlaka daje depresiju od 66 bar. Bušotina trenutno proizvodi 111 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno (Slika 6-3. prikazuje dnevnu proizvodnju). Ono što je veoma važno je to da bušotina trenutno proizvodi eruptivnim načinom uz zavodnjenje (WC) od 10 %. Osim navedenog, Tablica 6-1. prikazuje tlak zasićenja (Pb) koji je puno veći od ležišnog tlaka, s obzirom na to preporuča se dodatno provjeriti predviđanje povećanja udjela plina u kapljevini. To je potrebno napraviti jer se očekuje da će se udio plina u kapljevini eksponencijalno povećavati uslijed daljnjeg smanjenja ležišnog tlaka. Taj je podatak bitan ukoliko se planira ugraditi električna uronjiva crpka. U slučaju ugradnje crpke morat će se ugraditi i dubinski plinski separator kako bi se odijelio plin od kapljevine. Ovo također ukazuje da je u ležištu nastupio dvofazni režim protjecanja.

**Tablica 6-1.** Ulazni parametri

Indeks proizvodnosti	m <sup>3</sup> /d /bar	0,377
Ležišni tlak	Pa	12 000 000
Tlak u kanalu bušotine	Pa	54 000 000
Protok	m <sup>3</sup> /d	18,762
Udio slojne vode	%	10
Gustoća nafte	kg/m <sup>3</sup>	838
Gustoća slojne vode	kg/m <sup>3</sup>	1157
Gustoća prirodnog plina	/	0,71
Tlak zasićenja	Pa	22 850 000
Plinski faktor	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	168
Viskoznost nafte	mPas	1,5
Ležišna temperatura	°C	87

## 6.2. PVT ležišta

Uslijed dostupnosti laboratorijskog uzorka fluida na bušotini xy provedeno je podudaranje podatka. Slika 6-1. prikazuje PVT ulazne parametre za bušotinu xy.



Parameter	Value	Unit
Solution GOR	168	Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup>
Oil Gravity	37.3	API
Gas Gravity	0.7098	sp. gravity
Water Salinity	1.157	sp. gravity

Correlation	Method
Pb, Rs, Bo	Glaser
Oil Viscosity	Beal et al

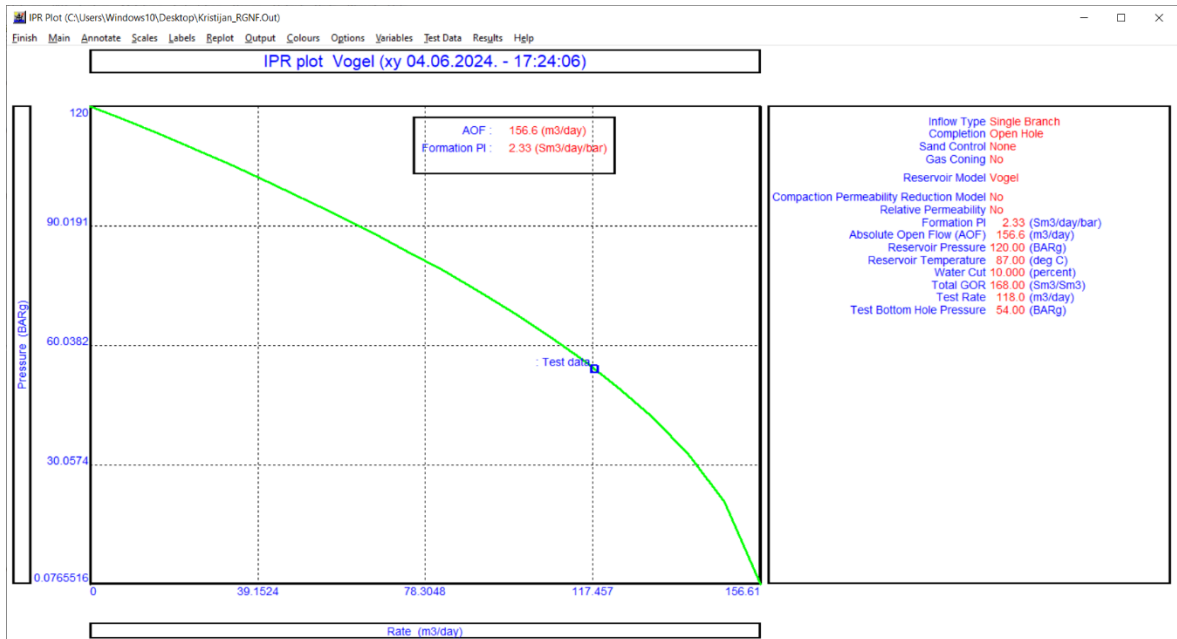
Impurity	Value	Unit
Mole Percent H <sub>2</sub> S	0	percent
Mole Percent CO <sub>2</sub>	0.141	percent
Mole Percent N <sub>2</sub>	4.759	percent

**Slika 6-1.** Ulazni PVT parametri

Iz laboratorijskih uzoraka određen je udio plina u kapljevine od 168 m<sup>3</sup> po metru kubnom pridobivene kapljevine. Što se tiče gustoće nafte, ona iznosi 37,3 API-a što je veće od 31,1 API-a što ukazuje da se radi o lakoj nafti koja ima manju gustoću i veću kvalitetu. Relativna gustoća plina koji je otopljen u nafti iznosi 0,71 što je zapravo gustoća plina u odnosu na gustoću zraka koja iznosi 1. Primjese u otopljenom prirodnom plina skoro i da nema, molni udio ugljikovog dioksida iznosi 0,14 %, a molni udio dušika iznosi 4,76 %. Slika 6-1. također prikazuje korištene korelacije.

### 6.3. IPR krivulja

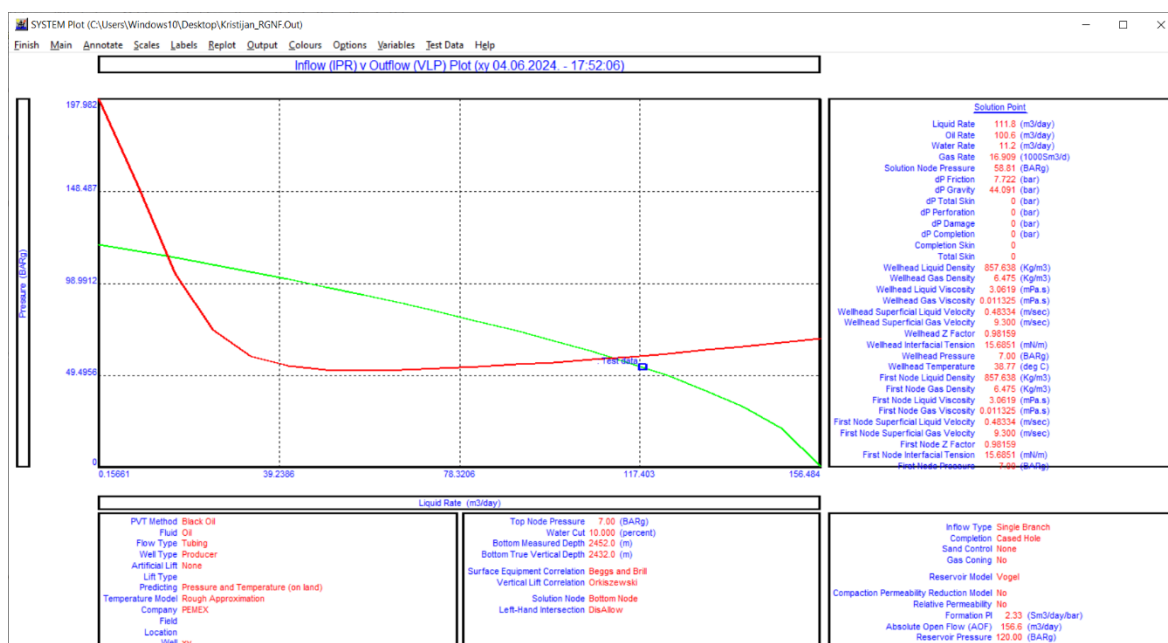
IPR krivulja izračunata je po Vogelovoj korelaciji uslijed nedovoljnog broja podataka za korištenje drugih dostupnih metoda i korelacija. Izabrana je navedena korelacija kako bi rješenja bila što je moguće bliže rezultatima dobivenih testiranjem (eng. *test data*). Slika 6-2. prikazuje IPR krivulju za trenutno stanje u ležištu s zavodnjenjem od 10 %. AOF iznosi 156,6 m<sup>3</sup> po danu



Slika 6-2. IPR krivulja za trenutno stanje u ležištu (WC=10 %)

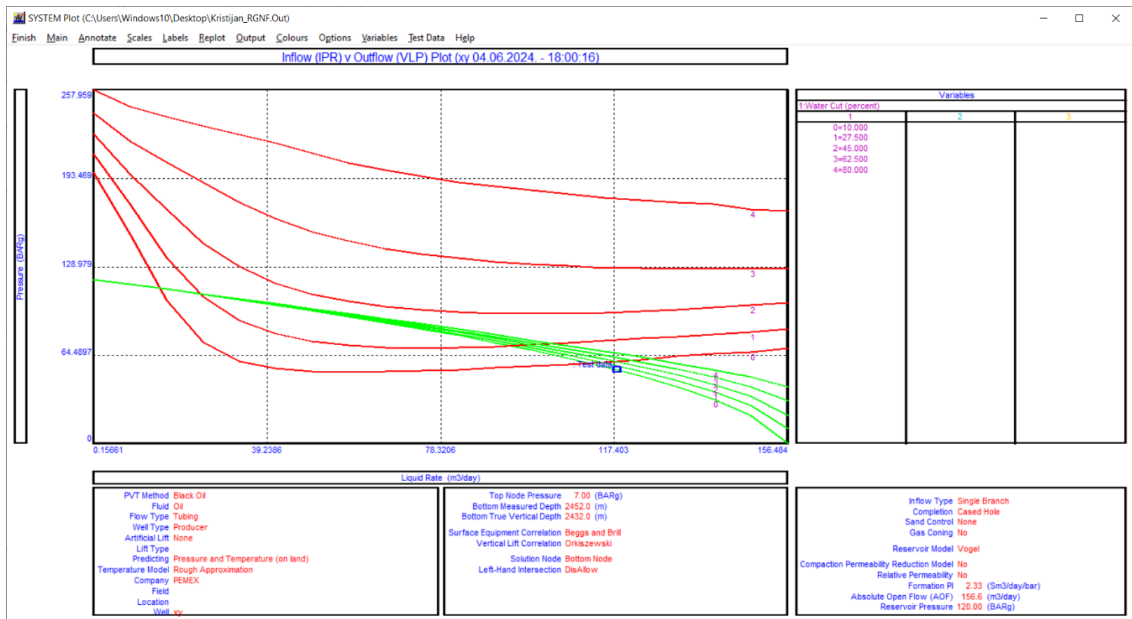
## 6.4. Eruptivna proizvodnja pri trenutnom stanju (WC=10 %)

Slika 6-3. prikazuje trenutnu, eruptivnu proizvodnju bušotine pri 10 % udjelu vode u kapljevini.



Slika 6-3. IPR i VLP krivulja za eruptivnu (trenutnu) proizvodnju

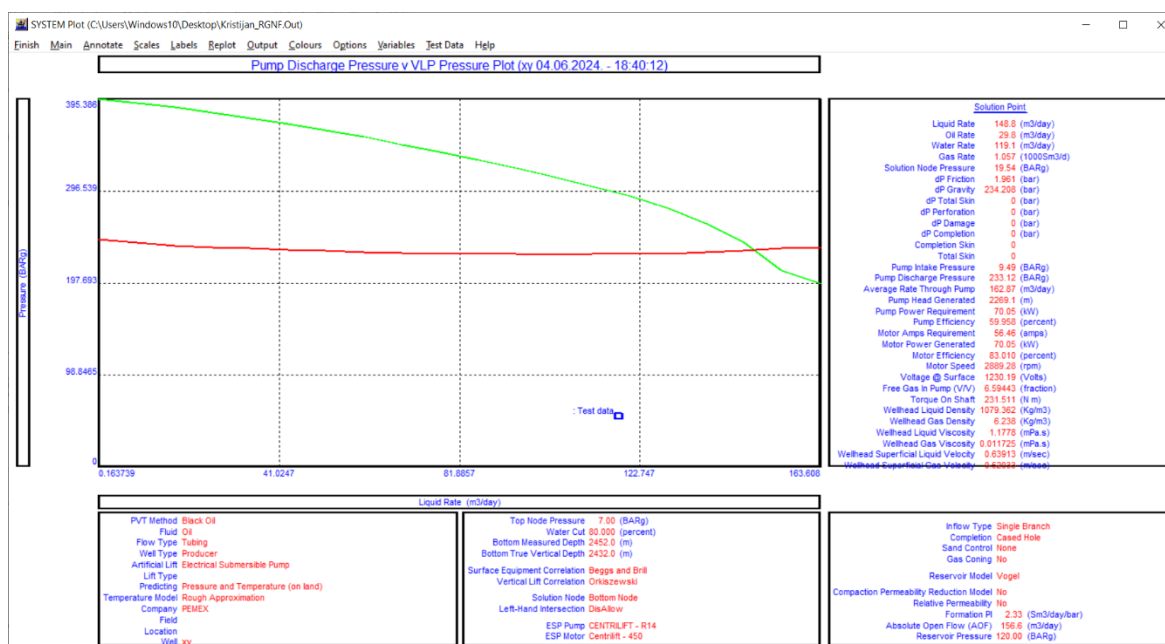
Slika 6-3. prikazuje dnevno pridobivanje kapljevine od 111 m<sup>3</sup>. Od navedenih 111 m<sup>3</sup> kapljevine, 100 m<sup>3</sup> je pridobivena nafta, a 11 m<sup>3</sup> je slojna voda. Što računski odgovara udjelu od 10 % vode u kapljevini. Pri ovim uvjetima proizvodnje udio otopljenog plina u pridobivenoj kapljevini iznosi oko 16 900 m<sup>3</sup> po danu. Tlak na ušću bušotine iznosi 7 bara što je dovoljno za daljnji transport nafte i sabirne stanice. Za proizvodnju su izabrane uzlazne cijevi vanjskog promjera 73 milimetra. Na Slici 6-4. prikazani su različiti scenariji proizvodnje s obzirom na udio vode u kapljevini. Na Slici 6-4. vidljivo je da pri nultom (0.) slučaju kada je udio vode 10 % eruptivna proizvodnja postoji. Pri prvom (1.) slučaju gdje je udio slojne vode 27,5 % također postoji eruptivna proizvodnja. Kod drugog (2.) slučaja nema eruptivne proizvodnje, odnosno kada udio slojne vode u kapljevini prijeđe cca 40 % tada prestaje eruptivna proizvodnja.



Slika 6-4. Scenarij prestanka eruptivne proizvodnje

## 6.5. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću električne uronjive crpke

Simulacija je provedena za najgori mogući scenarij, a to je četvrti (4.) slučaj gdje udio vode u kapljevini iznosi 80 %. Sve tri simulacije su provedene na način da se dobije maksimalna moguća proizvodnja iz bušotine. Na Slici 6-5. prikazana je proizvodnja pomoću električnih centrifugalnih uronjivih crpki. Zelena linija na slici predstavlja izlazni tlak električne uronjive crpke, a crvena linija označava krivulju vezanu za promjer tubinga.



Slika 6-5. Odnos tlaka crpke i VLP krivulje

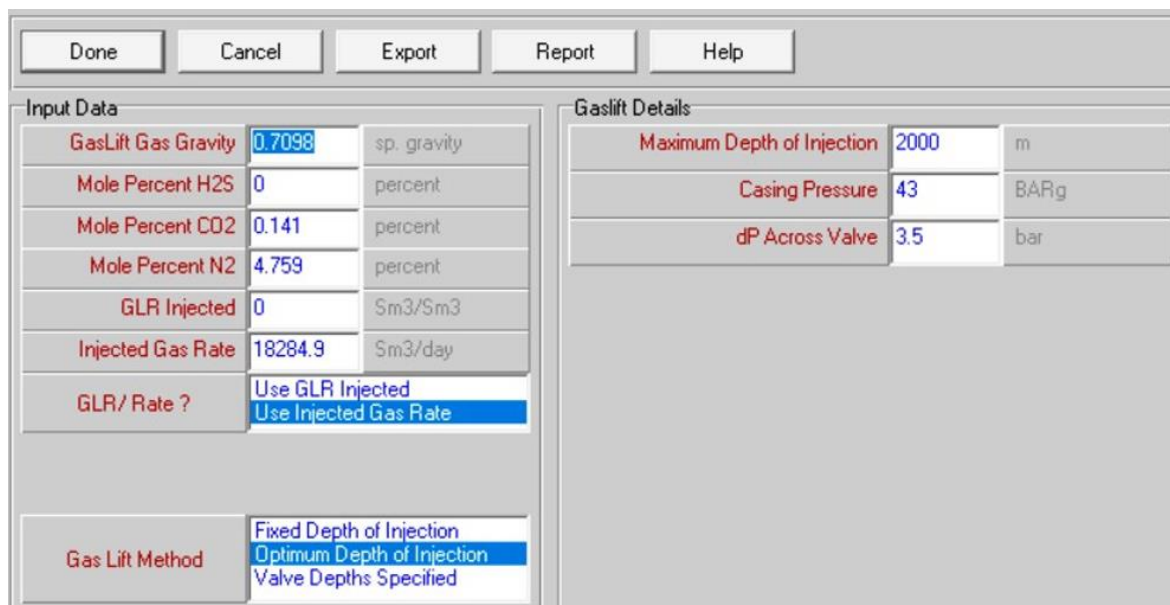
Slika 6-5. prikazuje dnevno pridobivanje kapljevine, koja iznosi 149 m<sup>3</sup>. Udio nafte u kapljevini iznosi 30 m<sup>3</sup> dnevno, dok udio slojne vode iznosi velikih 119 m<sup>3</sup> dnevno. Udio pridobivenog plina na površini se povećao na 1 057 000 m<sup>3</sup> dnevno. Centrifugalna crpka za razliku od klipne crpke mora imati ulazni tlak inače neće raditi. Ulazni tlak u centrifugalnu crpku iznosi 9,5 bar, a izlazni tlak iznosi 233 bar. Tlak na ušću bušotine iznosi 7 bar. Dnevni protok kroz crpku, u ležišnim uvjetima iznosi 163 m<sup>3</sup>, od čega 149 m<sup>3</sup> iznosi kapljevina, a ostatak (14 m<sup>3</sup>) je protok prirodnog plina. Dubina ugradnje crpke iznosi 2300 metara. Crpka se ne smije ugraditi preplitko jer će biti na suhom i neće proizvoditi, a s druge strane ne smije se ugraditi ni preduboko. Ukoliko se ugradi dublje nego što je to potrebno, bespotrebno se povećavaju kapitalni troškovi uslijed potrebe za većom duljinom električnog kabla i dolazi do bespotrebnog izlaganja motor crpke većim temperaturama. Što se tiče promjera crpke, unutar zaštitnih cijevi unutarnjeg promjera 177,8 milimetara, maksimalno je moguće ugraditi crpku vanjskog promjera 139,7 milimetara.

Za bušotinu xy provedena je simulacija ugradnje električne centrifugalne crpke maksimalnog promjera (139,7 milimetara), jer je takva bila dostupna na skladištu unutar kompanije koja je zahtijevala navedeni proračun. Uslijed predimenzioniranja crpke dolazi do bespotrebne potrošnje električne energije potrebne za rad crpke. Iz navedenog se može zaključiti da dolazi do nepotrebnih operativnih troškova. Navedeni operativni troškovi mogu se manjiti pomoću frekventnog pretvarača. Frekventni pretvarač je uređaj na površini koji omogućava promjenu frekvencije rada električne crpke. Ukoliko se poveća frekvencija (npr s 50 Hz na 52 Hz) dolazi do povećanja snage same crpke što za posljedicu ima manju potrošnju električne energije.



## 6.6. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću neprekidnog plinskog lifta

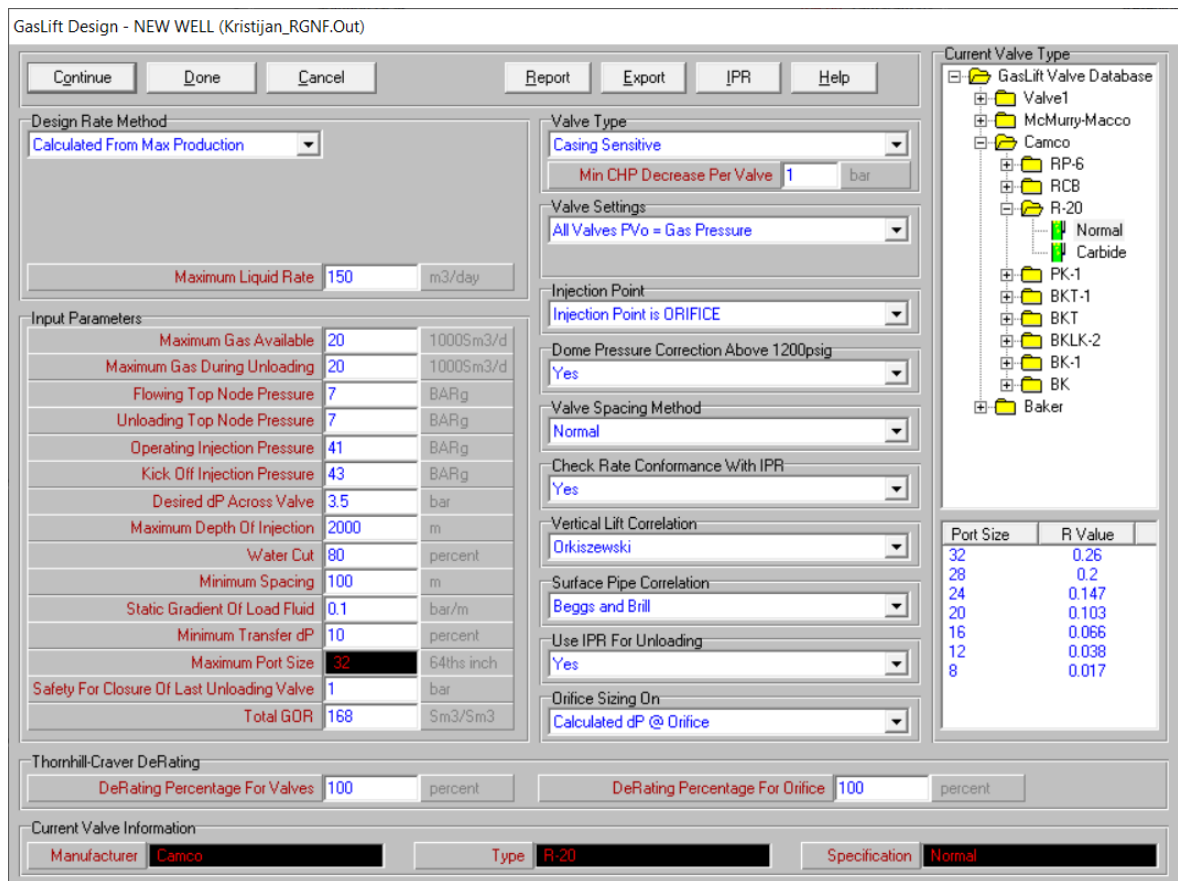
Kako bi se povećala proizvodnja s neprekidnim plinskim liftom, potrebno je povećati tlak utiskivanja plina. Radi postizanja maksimalne proizvodnje potrebno je postići minimalni tlak utiskivanja od 60 bar. Ukoliko se pristupi tolikom tlaku utiskivanja sustav će postati neefikasan. Slika 6-6. prikazuje ulazne parametre za neprekidni plinski lift pri simulaciji gdje udio vode u kapljevini iznosi 80 %.



Input Data			Gaslift Details		
GasLift Gas Gravity	0.7098	sp. gravity	Maximum Depth of Injection	2000	m
Mole Percent H2S	0	percent	Casing Pressure	43	BARg
Mole Percent CO2	0.141	percent	dP Across Valve	3.5	bar
Mole Percent N2	4.759	percent			
GLR Injected	0	Sm3/Sm3			
Injected Gas Rate	18284.9	Sm3/day			
GLR/ Rate ?	Use GLR Injected Use Injected Gas Rate				
Gas Lift Method	Fixed Depth of Injection Optimum Depth of Injection Valve Depths Specified				

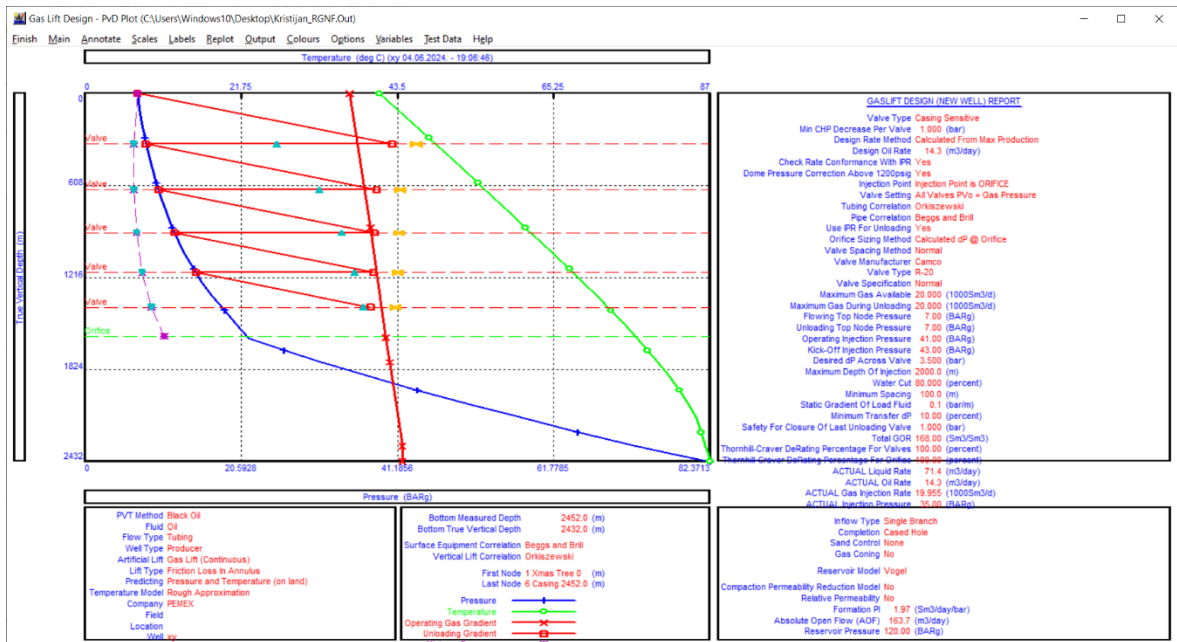
**Slika 6-6.** Ulazni parametri za neprekidni plinski lift (WC=80 %)

Slika 6-7. prikazuje dizajn neprekidnog plinskog lifta. Na raspolaganju je 20 000 m<sup>3</sup> plina dnevno za potrebe plinskog lifta. Simulacija je provedena do maksimalne moguće proizvodnje od 150 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno. Rezultati provedene simulacije prikazuje da nije moguće ostvariti ni približno 150 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno.



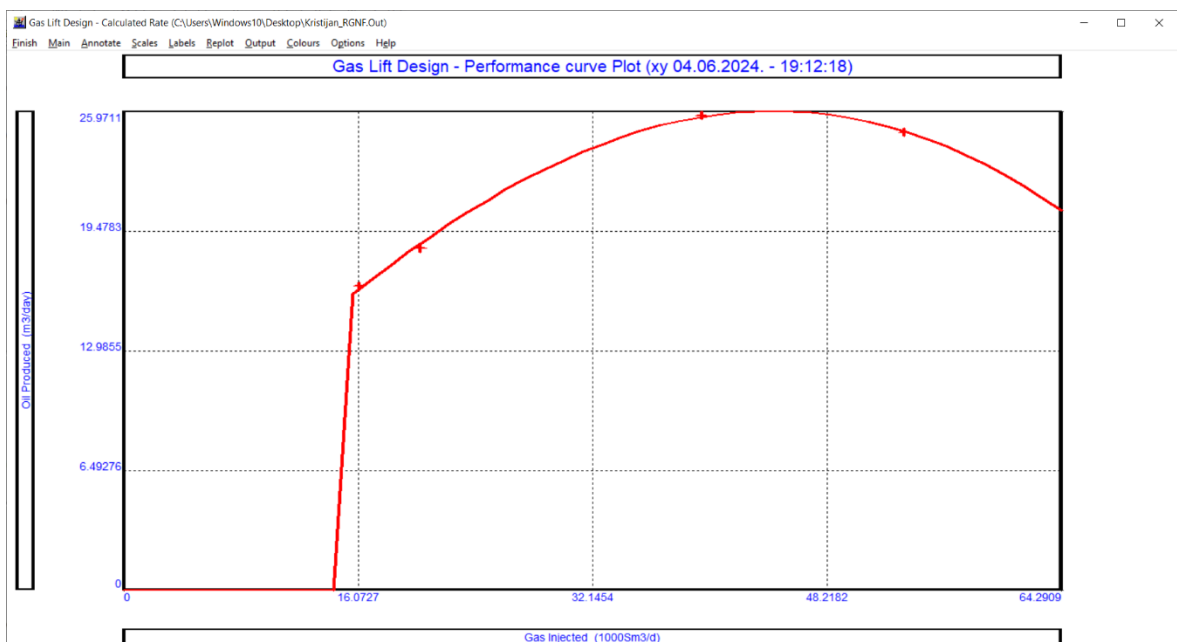
**Slika 6-7.** Dizajn neprekidnog plinskog lifta

Slika 6-8. Prikazuje krivulje ležišnog tlaka, temperature i gradijenta tlakova pojedinih plinskih ventila tijekom rada plinskog lifta. Pridobivanje neprekidnim plinskim liftom u simuliranom scenariju od 80 % udjela vode iznosi 18,6 m<sup>3</sup> nafte dnevno. Istovremeno od dostupnih 20 000 m<sup>3</sup> plina dnevno, utiskivala bi se gotovo cijela dostupna količina (19 955 m<sup>3</sup>).



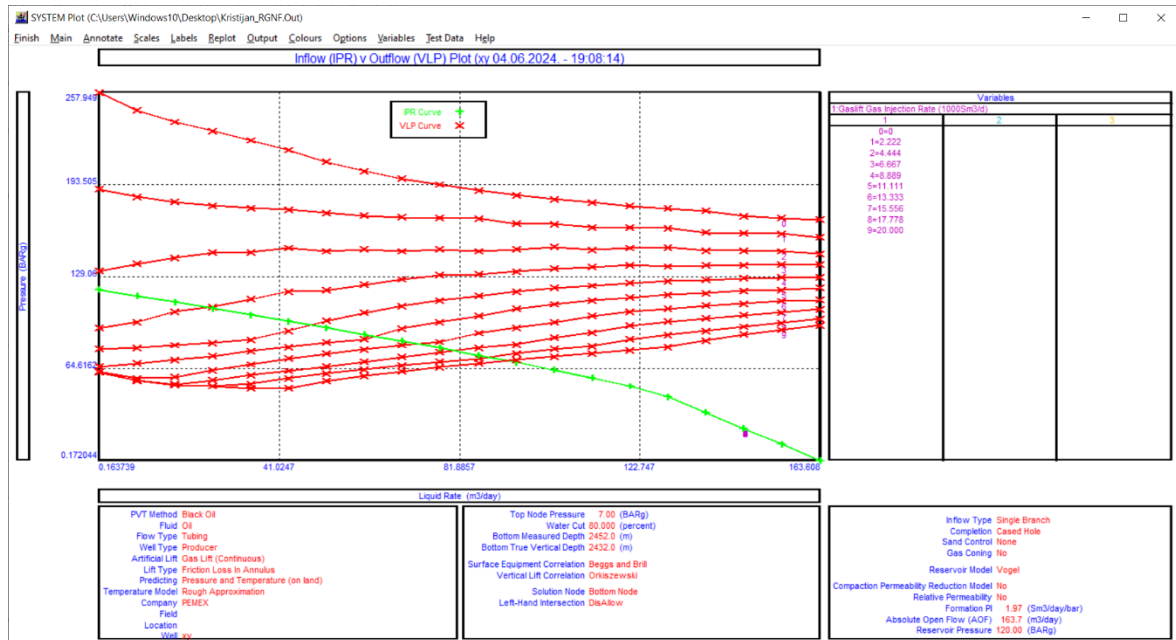
Slika 6-8. Krivulje ležišnog tlaka, temperature i gradijenta tlakova plinskih ventila

Slika 6-9. prikazuje krivulju odnosa utiskivanja prirodnog plina i količine pridobivanja nafte. Maksimalna moguća proizvodnja iznosi 26 m<sup>3</sup> nafte dnevno uz utiskivanje cca 42 000 m<sup>3</sup> prirodnog plina dnevno. No kako je već navedeno na lokaciji je dostupno maksimalno 20 000 m<sup>3</sup> prirodnog plina. Uslijed takve količine utiskivanja moguće je ostvariti proizvodnju od 93 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno. Budući da voda čini 80 %, uz 20 000 m<sup>3</sup> prirodnog plina dnevno moguće je pridobiti 18,6 m<sup>3</sup> nafte dnevno.



Slika 6-9. Krivulja odnosa utiskivanja plina i proizvodnje nafte

Primjera radi, na Slici 6-10. prikazane su simulacije proizvodnje pri različitim količinama utisnutog prirodnog plina. Ukoliko se iz nekog razloga odluči za utiskivanje 6 600 m<sup>3</sup> plina dnevno, može se pridobiti 25 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno. Zbog zavodnjenja, 20 % smjese kapljevine čini nafta, što znači da se pri 6 600 m<sup>3</sup> plina može proizvesti 5 m<sup>3</sup> nafte dnevno.



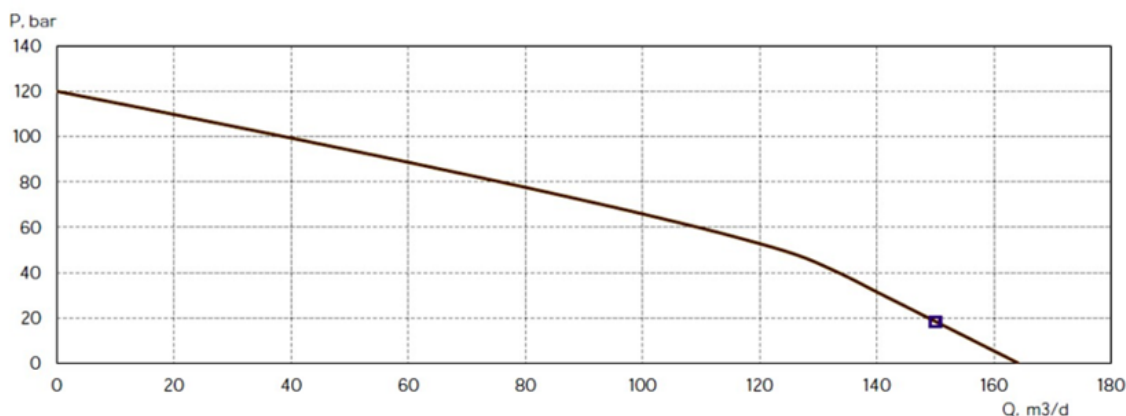
Slika 6-10. Prikaz proizvodnje pri različitim količinama utisnutog plina

## 6.7. Simulacija pridobivanja kapljevine pomoću turbox sustava

Rad turbox sustava, odnosno TSP-a u potpunosti je kontroliran pomoću količine i tlaka utiskivanja prirodnog plina sa površine. Radne karakteristike TSP-a obuhvaćaju široki raspon količina utisnutog plina što je osobito značajno u bušotinama u kojima dolazi do povećanja udjela vode u kapljevini. Tlak na ušću iznosi 7 bar, dok je ležišni tlak 120 bar. Ukoliko se želi zadržati stabilna i konstantna proizvodnja potrebno je održavati ležišni tlak na 120 bar. Ukoliko dođe do pada tlaka na ušću (u bušotinskoj glavi), TSP će trebati veće količine utisnutog plina sa površine kako bi se nastavila željena proizvodnja. Tablica 6-2. osim već navedenog ležišnog tlaka, tlaka zasićenja prikazuje i maksimalnu proizvodnju koja se želi ostvariti pomoću turbox sustava. Slika 6-11. prikazuje IPR krivulju s ugrađenim turbox sustavom.

**Tablica 6-2.** Ulazni parametri turbox sustava

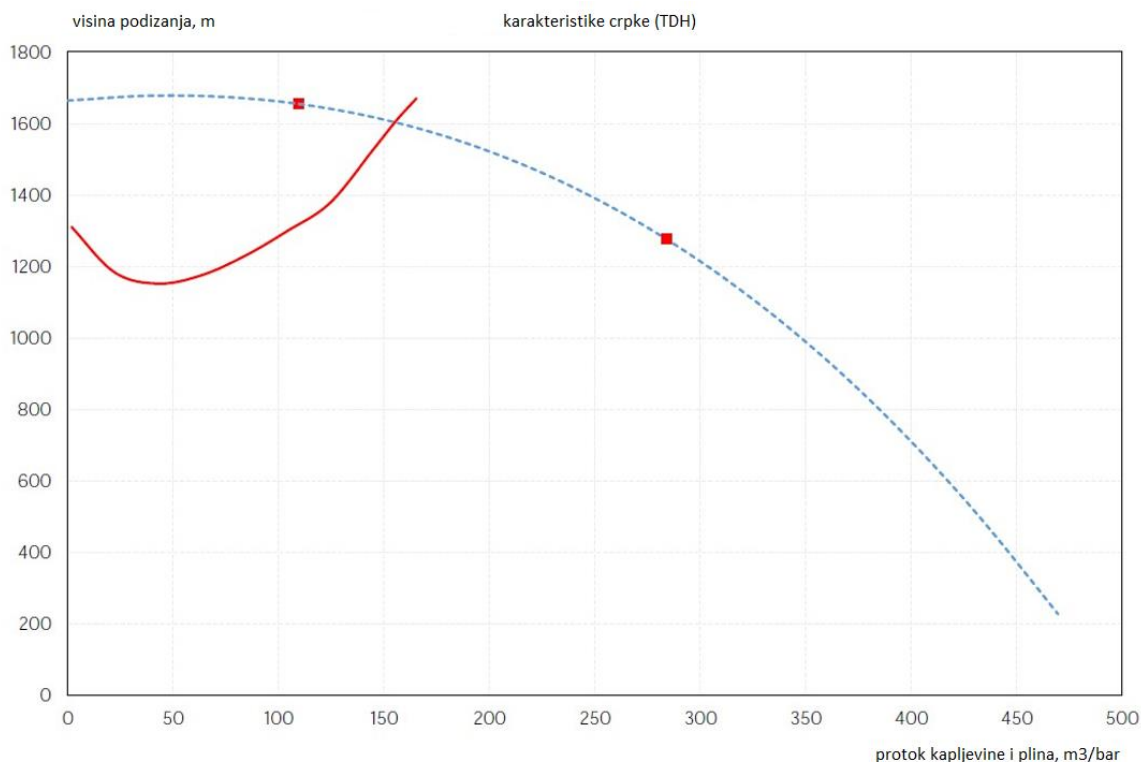
Jednadžba	/	Vogel
Ležišni tlak	Pa	12 000 000
Tlak zasićenja	Pa	22 850 000
Protok	m <sup>3</sup> /d	150
Udio slojne vode	%	80



**Slika 6-11.** IPR krivulja turbox sustava

Proizvodnja tubox sustavom približno je jednaka kao i proizvodnja s električnom centrifugalnom crpkom.

No Slika 6-12. prikazuje jednu od prednosti turbox sustava u odnosu na električne centrifugalne crpke, a to je visina podizanja kapljevine. Kod električne uronjive crpke, crpka mora stvarati izlaznu snagu za podizanje kapljevine svih 2300 metara, a kod turbox sustava TSP mora podizati kapljevinu samo 1600 metara. Razlog tomu je taj što se prirodni plin osim za pokretanje TSP-a koristi i za olakšavanje stupca kapljevine. U ovom slučaju plin je olakšao stupac kapljevine te je smanjio iznos tlaka potrebnog za podizanje kapljevine. Smanjenje tog tlaka iznosi cca 50 bar, odnosno za cca 700 metara.



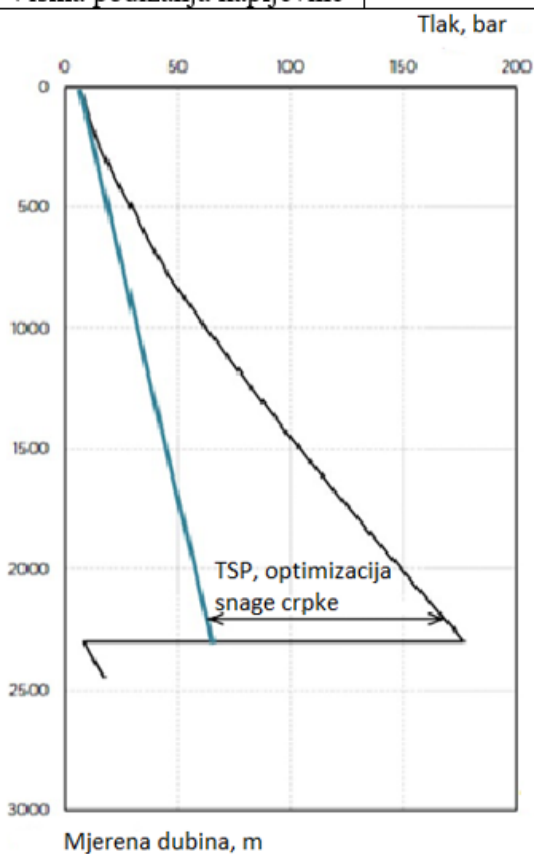
**Slika 6-12.** Visina podizanja pomoću TSP-a

Tablica 6-3. prikazuje parametre TSP-a. Tlak na ulazu u TSP iznosi 8,8 bar, za usporedbu, tlak na ulazu u električnu centrifugalnu pumpu iznosio je 9,5 bar. Uslijed razlike između 9,5 i 8,8 bar došlo je do povećanja depresije. Posljedično je potrebna manja snaga odnosno manje kW. Usporedbe radi; električna centrifugalna crpka je koristila 69 kW, dok je TSP koristio 56 kW. Uslijed ovakve promjene potrebne snage dolazi do smanjenja potrošnje električne energije za 19 %. Ukoliko je nemoguće povećati pridobivanje zbog karakteristika ležišta, prednost TSP-a iskazuje se u manjoj potrebnoj snazi. U ovom slučaju nije moguće postići proizvodnju veću od 150 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno zbog toga što AOF iznosi 156 m<sup>3</sup> kapljevine dnevno. Turbox sustav zapravo zadržava količinu proizvodnje koja bi se postigla električnim centrifugalnim crpkama, ali uz karakteristike plinskog lifta.

Slika 6-13. prikazuje krivulju usporedbe karakteristika turbox sustava (TSP-a) i centrifugalne crpke.

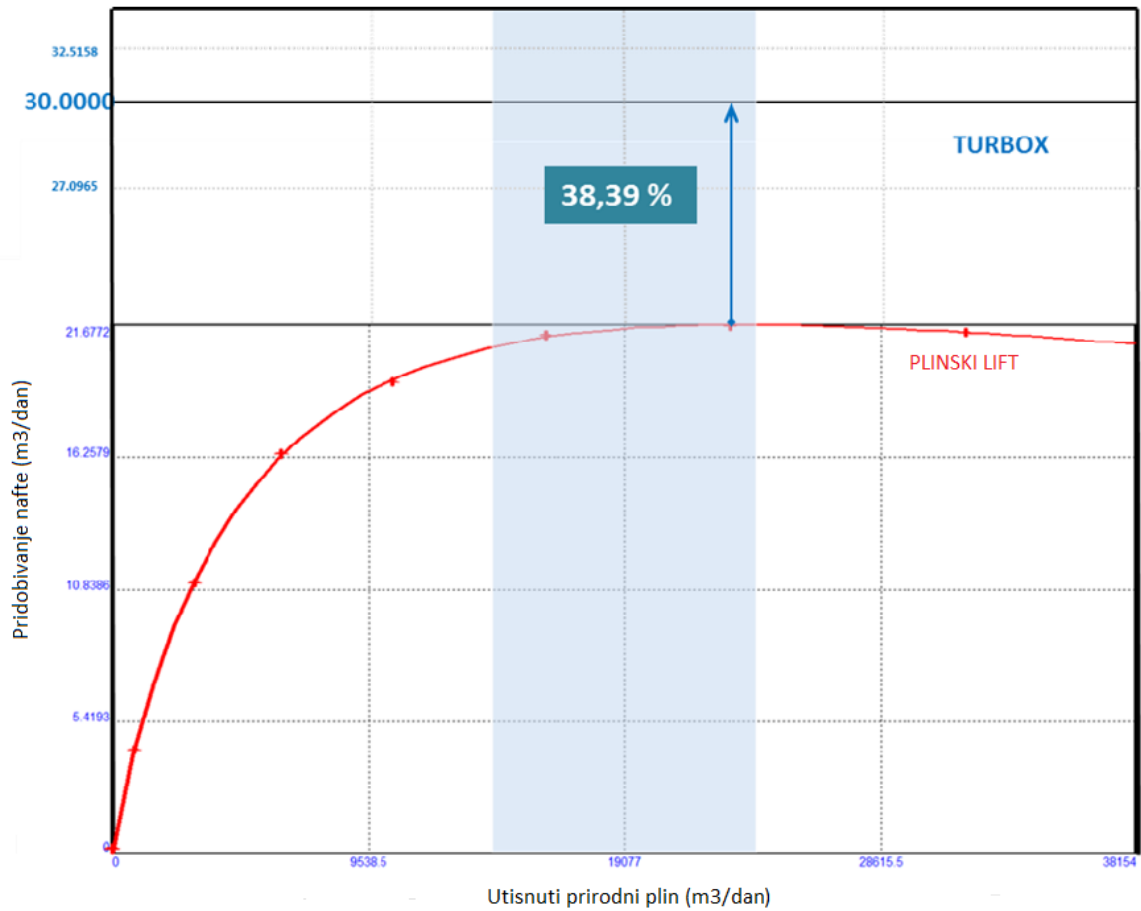
**Tablica 6-3.** Parametri TSP-a

Protok	$\text{m}^3 / \text{d}$	150
Prosječni protok kroz crpku	$\text{m}^3 / \text{d}$	155,6
Ulazni tlak crpke	Pa	880 000
Izlazni tlak crpke	Pa	17 760 000
Ulazna temperatura crpke	$^{\circ}\text{C}$	85
Izlazna temperatura crpke	$^{\circ}\text{C}$	94
Snaga crpke	kW	56,8
Visina podizanja kapljevine	m	1606,8



**Slika 6-13.** Usporedba karakteristika turbox sustava (TSP-a) i centrifugalne crpke

Slika 6-14. prikazuje prednosti turbox sustava u odnosu na neprekidni plinski lift za zadanu bušotinu xy. Prikazani podaci ukazuju na to da je za postizanje iste proizvodnje pomoću turbox sustava potrebno 38,4 % manje količine utisnutog prirodnog plina u odnosu na neprekidni plinski lift.



**Slika 6-14.** Usporedba karakteristika turbox sustava i neprekidnog plinskog lifta



## 6.8. Analiza rezultata

Primarni zadatak i cilj prilikom projektiranja dizajna opremanja bušotine je postići maksimalno pridobivanje ugljikovodika. Drugi cilj prilikom pridobivanja je održavati stabilnu i konstantnu potrošnju prirodnog plina (u slučaju neprekidnog plinskog lifta i turbox sustava). Navedeni cilj se postiže održavanjem povoljnog omjera utisnutog prirodnog plina po volumenu proizvedenog fluida kroz cijeli životni vijek bušotine. Posljednji cilj je pronalazak najoptimalnijeg rješenja za ugradnju i korištenje opreme, kako bi se smanjili troškovi ugradnje i izvlačenja iz kanala bušotine.

Analiza osjetljivosti prikazuje mogućnost ugradnje turbox sustava na određenom naftnom polju za koju su dobiveni ulazni podaci i parametri ležišta. Analiza osjetljivosti uključuje jedan scenarij u kojem je simulirano zavodnjenje u ležištu od 80 %. Tijekom eksploatacije, s vremenom kako dolazi do povećanja zavodnjenja, sustav proizvodnje postaje sve manje učinkovit i sve više ovisan o dodatnoj, dovedenoj hidrauličkoj snazi. Dovedena hidraulička snaga proizvodnom fluidu u turbox sustavu omogućena je s manjim brojem impelera crpke u odnosu na električne uronjive crpke. Manji broj impelera crpke rezultira se nižim ispusnim tlakom pumpe koji turbox sustav zahtijeva.

Dostupna količina prirodnog plina za plinski lift iznosi 20 000 m<sup>3</sup> dnevno. Tijekom rada turbox sustav troši 38 % manje utisnutog prirodnog plina dnevno u odnosu na neprekidni plinski lift. Povećanje proizvodnje neprekidnim plinskim liftom nije moguća bez povećanja tlaka utiskivanja na minimalno 60 bar što sustav čini ne efikasnim.

Usljed pada tlaka u uzlaznim cijevima, dolazi do povećanje snage koju turbina stvara jer dolazi do povećanja omjera ulaznog i izlaznog tlaka turbine. Posljedice ovoga je povećana energetska učinkovitost sustava u odnosu na prijašnji neprekidni plinski lift.

Povećanje proizvodnje može se postići ugradnjom turbox sustava ili električnih uronjivih crpki. No ukoliko se odluči ugradnja turbox sustava izbjegava se:

- povećanje troškova operativnih troškova ugradnje jer je oprema za neprekidno plinsko podizanje već ugrađena u kanal bušotine,
- upotreba elektromotora uslijed visokih temperatura u ležištu,
- veći broj kvarova kućišta i električnih dijelova električnih crpki.

## 7. ZAKLJUČAK

Dizajn turbox bušotinske opreme je jednostavniji za primjenu od izvedbe električnih uronjivih crpki. Uslijed te jednostavnosti primjene dolazi do manjeg broja oštećenja prilikom ugradnje i tijekom radnog vijeka, što rezultira smanjenom broju remontnih radova. Glavna razlika u odnosu na električne uronjive crpke je ta što za pogon turboxa nije potrebna električna energija pa samim time nije potreban elektromotor. Samim time je smanjen broj kvarova električnih dijelova električnih uronjivih crpki uslijed visokih temperatura u ležištu. Umjesto elektromotora, turbox sustav koristi plinsku turbinu. Iduća prednost turbox sustava u odnosu na električne centrifugalne crpke je ta što prirodni plin olakšava stupac kapljevine pa TSP ima manju visinu podizanja kapljevine. Uzrok smanjena visine podizanja proizlazi iz toga što se prirodni plin osim za pokretanje TSP-a koristi i za olakšavanje stupca kapljevine. Uslijed smanjena potrebne visine podizanja kapljevine (jer se preostala visina podizanja postiže prirodni plinom koji olakšava stupac kapljevine) dolazi do smanjenja potrebne snage, a to rezultira smanjenjem potrošnje električne energije. Osim navedenih prednosti u odnosu na električne uronjive crpke, turbox također ima prednosti u odnosu na neprekidni plinski lift. Prednost je ta što turbox sustav koristi značajno manje količine utisnutog prirodnog plina prilikom proizvodnje. Ukoliko je nemoguće povećati proizvodnju zbog ograničenosti ležišta, prednost TSP-a iskazuje se u manjoj potrebnoj snazi. Turbox sustav zapravo zadržava količinu proizvodnje koja bi se postigla električnim centrifugalnim crpkama, ali uz karakteristike plinskog lifta. Osim u naftnoj i plinskoj industriji, turbox sustav pronalazi svoju primjenu i u geotermalnim bušotinama.

## 8. LITERATURA

1. BRKIĆ, V., 2021. Prezentacije i bilješke s predavanja iz kolegija Proizvodnja nafte i plina 1 – neobjavljeno
2. Terra energija d.o.o. 2023a. Interna literatura
3. Terra energija d.o.o. 2023b. Poslovna arhiva
4. ZELIĆ, M., 1977. Tehnologija pridobivanja nafte i plina eruptiranjem i gasliftom. Zagreb: Grafički zavod Hrvatske.
5. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

### Internetski izvori:

FETOUI, I., 2017., Centrifugal Pump (ESP Pump), URL: <https://production-technology.org/centrifugal-pump/> (12.10.2020.)

Kimray, *n.d.* How Does an ESP Work, URL: : <https://kimray.com/training/how-does-electric-submersible-pump-esp-work> (18.09.2023.)

## **IZJAVA**

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

*Uroš Pantić*

---

Student



KLASA: 602-01/24-01/140  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 12. 7. 2024.

**Kristijan Panić, student**

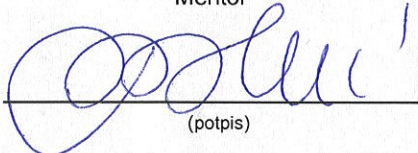
## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/140, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 08.07.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### USPOREDBA MEHANIČKIH NAČINA PODIZANJA KAPLJEVINE S HIBRIDNOM METODOM KORIŠTENJEM TURBINE POGONJENE PLINOM

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor

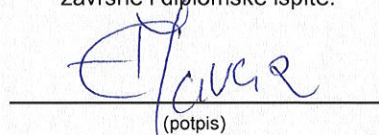


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

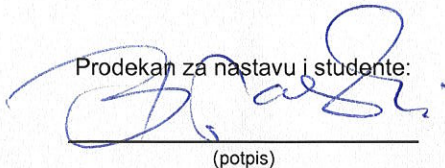


(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:



(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)