

# Mogućnosti dizajniranja dubinskih mlaznih crpki u programu Prosper

---

**Liović, Marin**

**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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:519287>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**MOGUĆNOSTI DIZAJNIRANJA DUBINSKIH MLAZNIH CRPKI U  
PROGRAMU PROSPER**

Diplomski rad

Marin Liović

N406

Zagreb, 2023.

## MOGUĆNOSTI DIZAJNIRANJA DUBINSKIH MLAZNIH CRPKI U PROGRAMU PROSPER

Marin Liović

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

### Sažetak

U radu je odabrano naftno polje s bušotinom X, za koju se provodi analiza povećanja proizvodnih mogućnosti projektiranjem mlazne crpke u programu Prosper (Sveučilišna licenca za edukativne svrhe: #4186). Prosper je računalni program tvrtke Petroleum Experts koji služi za postavljanje proizvodnih modela bušotine, te za dizajn i optimizaciju različitih proizvodnih sustava. Prednost uporabe ovog računalnog alata je velika točnost i brza obrada podataka, kao i mogućnost široke primjene u praksi. Bušotinu X karakterizira dugogodišnja proizvodnja, pa se tlak ležišta smanjio, a udio vode u kapljevine popeo na 80%, te bi uskoro došlo do prestanka njenog eruptivnog rada. Pri postavljanju proizvodnog modela bušotine potrebno je odrediti optimalan sustav proizvodnje dubinskom mlaznom crpkom za zadane uvjete u bušotini i ležištu. Proizvodno modeliranje se može podijeliti u nekoliko koraka, od unosa osnovnih ulaznih podataka za bušotinu s dubinskom crpkom, PVT karakteristika proizvodnog i pogonskog fluida, unosa podatka o opremi, kreiranja IPR i VLP krivulja, te konačnog odabira i dizajna dubinske mlazne crpke. Na kraju je provedena analiza osjetljivosti kako bi se odredile radne točke sustava tj. mogućnosti rada bušotine ukoliko bi došlo do daljnjeg povećanja udjela vode u proizvodnji, te za slučajeve ako bi se ležišni tlak nastavio smanjivati.

Ključne riječi: proizvodno modeliranje bušotine, dubinska mlazna crpka, analiza osjetljivosti

Završni rad sadrži: 53 stranice, 11 tablica, 39 slika i 20 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

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

Ocjenjivači:  
1. Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a  
2. Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a  
3. Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

POSSIBILITIES FOR THE DESIGN OF SUBMERSIBLE JET PUMP IN PROSPER SOFTWARE

Marin Liović

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

Abstract

In this thesis, an oil field with Well X was chosen for analysis, focusing on enhancing production capabilities through the design of a submersible jet pump using the Prosper program (University license for educational purposes: #4186). Prosper, a computer program developed by Petroleum Experts, is employed for creating production models for wells and optimizing various production systems. The program stands out for its high accuracy, fast data processing, and versatile practical applications. Well X exhibits long-term production, leading to a decline in reservoir pressure and an increase in water cut in the fluid, reaching 80%. The objective is to establish an optimal production system with a submersible jet pump based on the well and reservoir conditions. The production modeling involves several steps, including entering basic input data for a well with a submersible pump, defining PVT characteristics of the production and power fluid, inputting equipment data, creating IPR and VLP curves, and ultimately selecting and designing the submersible jet pump. To explore further possibilities, a sensitivity analysis was conducted to assess well operation under potential increases in water cut during production and scenarios where reservoir pressure continues to decrease.

Keywords: well production modeling, submersible jet pump, sensitivity analysis

Thesis contains: 53 pages, 11 tables, 39 figures and 20 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Reviewers:  
1. Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD  
2. Associate Professor Vladislav Brkić, PhD  
3. Associate Professor Borivoje Pašić, PhD

Date of defense: January 26, 2024, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PRINCIP RADA I DIJELOVI MLAZNE CRPKE .....</b>	<b>2</b>
2.1. DIJELOVI MLAZNE CRPKE.....	4
2.2. UGRADNJA CRPKE I ODABIR POGONSKOG FLUIDA .....	6
2.3. PRINCIP RADA MLAZNE CRPKE.....	8
2.3.1. <i>Kavitacija, erozija i emulzija</i> .....	15
2.3.1.1. Kavitacija.....	15
2.3.1.2. Erozija.....	16
2.3.1.3. Emulzija.....	17
<b>3. PRIMJENA PROGRAMA PROSPER .....</b>	<b>18</b>
3.1. DIZAJNIRANJE MLAZNE CRPKE U PROGRAMU PROSPER.....	19
3.1.1. <i>Opis sustava</i> .....	20
3.1.2. <i>PVT podaci</i> .....	22
3.1.3. <i>Podaci o opremi</i> .....	23
3.1.4. <i>IPR podaci</i> .....	28
<b>4. PROJEKTIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA S MLAZNOM CRPKOM U BUŠOTINI X.....</b>	<b>32</b>
4.1. ULAZNI PODACI ZA BUŠOTINU X.....	32
4.1.1. <i>Podaci o opremi bušotine X</i> .....	32
4.1.2. <i>PVT podaci</i> .....	34
4.1.3. <i>Podaci za izračun IPR krivulje</i> .....	34
4.1.4. <i>Kriteriji za dizajniranje mlazne crpke</i> .....	35
4.2. POSTAVLJANJE MODELA PROIZVODNE BUŠOTINE X .....	36
4.2.1. <i>Analiza osjetljivosti i diskusija rezultata</i> .....	45
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>51</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>52</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Shematski prikaz proizvodnje u sustavu s mlaznom crpkom .....	2
Slika 2-2. Shematski prikaz mlazne crpke .....	3
Slika 2-3. Shematski prikaz normalnog i reverznog toka kroz mlaznu crpku.....	4
Slika 2-4. Dijelovi mlazne crpke .....	4
Slika 2-5. Prikaz postavljanja i vađenja mlazne crpke .....	6
Slika 2-6. Promjena tlaka i brzine pogonskog fluida pri prolasku kroz mlaznu crpku .....	8
Slika 2-7. Shematski prikaz promjena u površini između grla i mlaznice .....	9
Slika 2-8. Nomenklatura mlazne crpke .....	9
Slika 2-9. Radne karakteristike mlaznih crpki.....	14
Slika 2-10. Odnos protočnog volumena i visine podizanja za različite omjere protočne površine grla i mlaznice.....	15
Slika 2-11. Shematski prikaz djelovanja pogonske kavitacije .....	16
Slika 3-1. Prikaz početnog prozora programa PROSPER.....	19
Slika 3-2. System summary prozor u programu PROSPER.....	22
Slika 3-3. PVT data prozor u programu PROSPER .....	23
Slika 3-4. Prikaz prozora Equipment data u programu PROSPER .....	24
Slika 3-5. Prikaz prozora Deviation Survey u programu PROSPER .....	25
Slika 3-6. Prikaz prozora Surface Equipment u programu PROSPER .....	26
Slika 3-7. Prikaz prozora Downhole equipment u programu PROSPER.....	27
Slika 3-8. Prikaz prozora Geothermal gradient u programu PROSPER .....	28
Slika 3-9. Prikaz Inflow performance relationship prozora u programu PROSPER.....	29
Slika 3-10. Prozor za unos podataka potrebnih za dimenzioniranje mlazne crpke.....	31
Slika 4-1. Podzemna oprema ugrađena u bušotinu X.....	32
Slika 4-2. Podaci o otklonu bušotine X .....	33
Slika 4-3. Poznati podaci potrebni za izračunavanje geotermalnog gradijenta.....	34
Slika 4-4. Prozor System Summary s ulaznim podacima o bušotini X.....	36
Slika 4-5. PVT - INPUT DATA prozor s unesenim podacima o bušotini X .....	37
Slika 4-6. Specifične topline nafte, plina i vode.....	38
Slika 4-7. Prozor IPR DATA s unesenim podacima o bušotini X .....	39
Slika 4-8. Podaci za izračun skina .....	40

Slika 4-9. Podaci za pješčani zasip .....	40
Slika 4-10. IPR krivulja .....	41
Slika 4-11. Ulazni podaci za proračun dubinske mlazne crpke.....	42
Slika 4-12. Proračunati podaci o mlaznoj crpki .....	42
Slika 4-13. Odabir dubinske mlazne crpke iz baze podataka programa prosper.....	43
Slika 4-14. Stvarne karakteristike mlazne crpke .....	44
Slika 4-15. Jet pump input data prozor .....	45
Slika 4-16. Analiza osjetljivosti za različite udjele vode.....	46
Slika 4-17. Analiza osjetljivosti za različite ležišne tlakove .....	48
Slika 4-18. VLP, IPR i krivulja potisnog tlaka crpke za slučaj 1 u Tablici 4-7 .....	49

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Standardni promjeri i protočne površine sapnica i grla.....	5
Tablica 2-2. Prednosti i ograničenja nafte kao pogonskog fluida .....	7
Tablica 2-3. Prednosti i ograničenja vode kao pogonskog fluida.....	7
Tablica 2-4. Koeficijenti gubitaka prema različitim teorijama.....	12
Tablica 2-5. Standardizirani omjeri i njihove oznake.....	13
Tablica 4-1. Specifične topline nafte, plina i vode .....	33
Tablica 4-2. PVT podaci o ležišnom fluidu.....	34
Tablica 4-3. Osnovni podaci za izračun IPR krivulje.....	35
Tablica 4-4. Kriteriji za dizajniranje mlazne crpke .....	35
Tablica 4-5. Rezultati analize osjetljivosti za različite udjele vode .....	47
Tablica 4-6. Rezultati analize osjetljivosti za različite ležišne tlakove .....	49



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

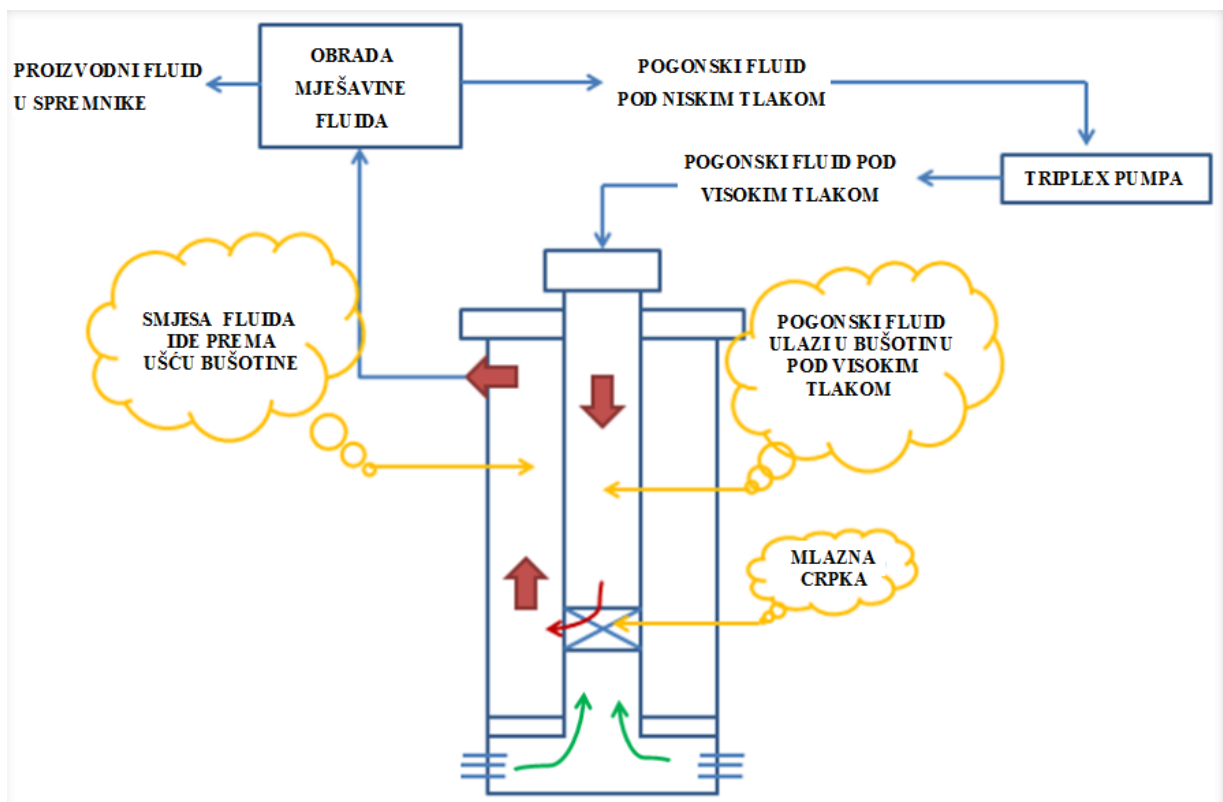
Oznaka	Jedinica	Opis
$A_j$	$m^2$	površina otvora sapnice
$A_s$	$m^2$	dio protočne površine grla kojom protječe proizvodni fluid
$A_t$	$m^2$	protočna površina grla
$E$	%	djelotvornost mlazne crpke
$g$	$m/s^2$	gravitacijska konstanta
$H$	m	potencijalna energija visine stupca
$H$	-	omjer energija visine
$K_d$	-	koeficijent gubitaka u difuzoru
$K_j$	-	koeficijent gubitaka u mlaznici
$K_s$	-	koeficijent gubitaka prije ulaska u grlo
$K_t$	-	koeficijent gubitaka u grlu
$L$	J/s	Lorenzov gubitak energije u jedinici vremena
$M$	-	omjer protoka unutar crpke
$p$	bar	tlak
$p_m$	bar	tlak pogonskog fluida u mlaznici
$p_u$	bar	tlak fluida pri izlasku iz mlaznice (tlak usisa)
$p_g$	bar	tlak fluida u grlu
$p_d$	bar	tlak u difuzoru
$q$	$m^3/dan$	protok
$R$	-	omjer protočnih površina mlaznice i grla
$v$	m/s	brzina
$v_j$	m/s	prosječna brzina pogonskog fluida kroz sapnicu
$v_s$	m/s	prosječna brzina pogonskog fluida prije miješanja s proizvodnim
$v_t$	m/s	prosječna brzina smjese fluida u grlu crpke

## 1. UVOD

Ugljikovodici su glavni izvor energije modernog svijeta. S konstantnim povećanjem svjetske populacije raste i potražnja za energijom. Od početka proizvodnje nafte u 19. stoljeću razvile su se razne suvremene metode proizvodnje ugljikovodika. Primarna metoda je eruptivna proizvodnja. Ležišta ugljikovodika svojom „snagom“ svladavaju otpore i podižu kapljevina do ušća bušotine. Ležišna snaga očituje se u tlaku na kojem se ugljikovodici nalaze. Kapljevina se do ušća podiže zbog tlaka koji u ležištu stvaraju geološke strukture nad ležištem te prisutni voda i/ili plin. Kada je energija ležišta premala da bi se nastavilo eruptivno proizvoditi koriste se mehaničke metode. Mehaničke metode primjenjuju se kako bi se poboljšala proizvodnja i povećao iscrpak. Mehaničke metode su plinsko podizanje i korištenje dubinskih crpki. Postoje mnoge izvedbe dubinskih crpki kao što su klipne, koje su ujedno i najkorištenije, centrifugalne, vijčane, mlazne i druge. Mlazne crpke, za razliku od ostalih nemaju pokretnih dijelova i svoj rad ostvaruju prijenosom energije s pogonskog na proizvodni fluid. Najveća prednost mlaznih crpki, uz to što nemaju pokretnih dijelova, je što nemaju ni brtvećih dijelova koji su skloni trošenju. Zbog toga su povoljne za proizvodnju „nečistih“ fluida koji u sastavu imaju plinove koji uzrokuju koroziju, onečišćeni su pijeskom ili su previskozni za druge vrste crpki. Uglavnom se koriste u visokoproduktivnim, zaplinitim bušotinama. Unatoč svojim prednostima, mlazne crpke nisu primjenjive u svim bušotinama. Glavne dvije karakteristike mlaznih crpki koje ograničavaju njihovu primjenu jesu potreba za relativno visokim usisnim tlakom kako bi se izbjegla kavitacija, te njihova niska mehanička djelotvornost, što iziskuje višu pogonsku snagu nego u slučaju konvencionalne hidrauličke crpke (Zelić i Čikeš, 2006). Iz tog razloga potrebno je dobro ispitati ležište i dimenzionirati mlazne crpke kako bi proizvodnja bila ekonomski isplativa. S obzirom na to da su mlazne crpke relativno otporne na sve uvjete u ležištu, kao i na fizikalna te kemijska svojstva fluida, najbitniji faktor u dimenzioniranju je potrošnja energije za potiskivanje primarnog fluida. U ovom radu će se mlazna crpka dimenzionirati u programu Prosper u svrhu povećanja proizvodnih mogućnosti nafte na odabranoj bušotini X.

## 2. PRINCIP RADA I DIJELOVI MLAZNE CRPKE

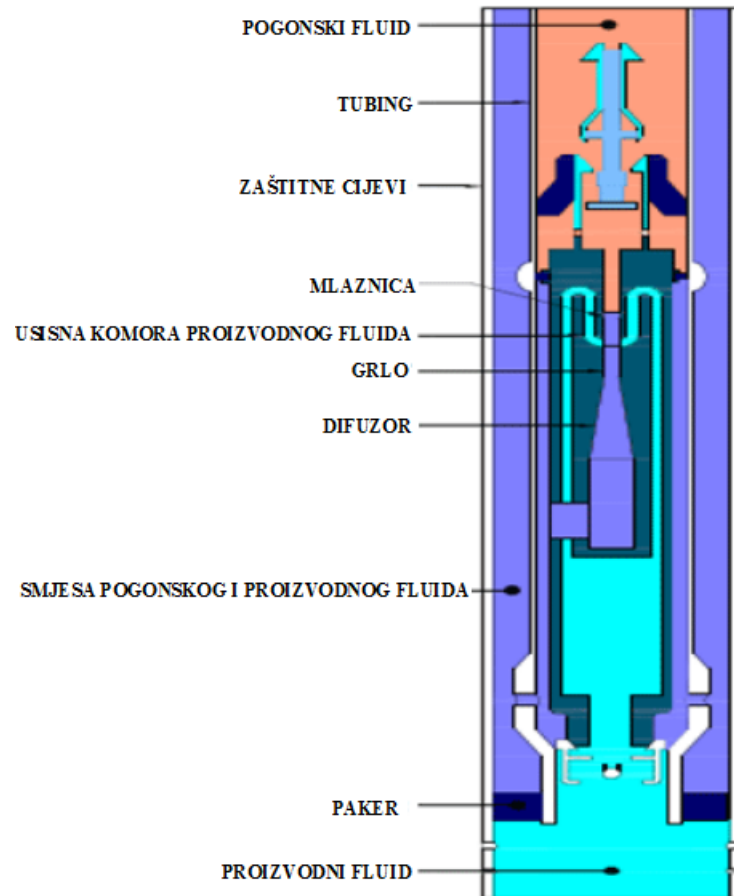
Mlazne crpke posebna su vrsta hidrauličkih crpki. Za hidrauličke crpke postoje dva temeljna sustava pogonskog fluida. Otvoreni sustav u kojemu se pogonski i proizvodni fluid miješaju u bušotini i na površinu se vraćaju kao smjesa te zatvoreni sustav u kojemu pogonski fluid cirkulira u zatvorenom krugu i ne miješa se s proizvodnim fluidom. S obzirom na to da se u mlaznoj crpki miješaju pogonski i proizvodni fluid svojstvena joj je primjena samo otvorenog sustava pogonskog fluida. Otvoreni sustav jednostavniji je i ekonomičniji. Ono što umanjuje ekonomičnost otvorenog sustava je potreba za kontinuiranim dodavanjem primjesa zbog miješanja fluida. Slika 2-1. shematski je prikaz proizvodnje s mlaznom crpkom.



Slika 2-1. Shematski prikaz proizvodnje u sustavu s mlaznom crpkom (Fetoui, 2017)

U otvorenom sustavu, kakav se primjenjuje pri korištenju mlaznih crpki, potrebno je imati dva protočna kanala u bušotini. Jedan je kanal potreban za dovođenje pogonskog fluida, a drugi kanal služi za iznošenje smjese pogonskog i proizvodnog fluida do površine. U sustavu opreme s mlaznom crpkom ta dva kanala su tubing i prstenasti prostor. Pogonski se fluid može utiskivati kroz tubing ili kroz prstenasti prostor ovisno o orijentaciji mlaznice na dnu bušotinskog sklopa. Na Slici 2-2. prikazana je tipična mlazna crpka s mlaznicom okrenutom

prema dolje. U takvom se sustavu uglavnom proizvodi anularno, a pogonski fluid utiskuje se kroz tubing.

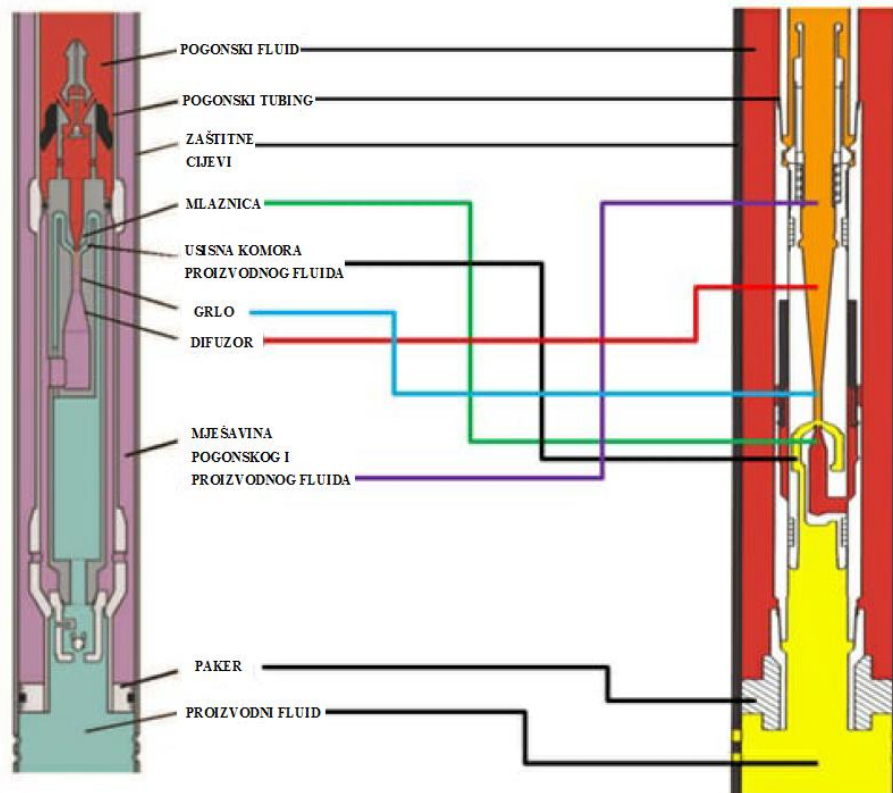


**Slika 2-2.** Shematski prikaz mlazne crpke (Prime Tech, 2019)

Za pogonski fluid koristi se uglavnom proizvedena voda i nafta. Fluid prolazi kroz mlaznicu koja stvara suženje što rezultira smanjenjem tlaka i povećanjem brzine fluida. Fluid pri izlasku iz mlaznice stvara vakum koji povlači proizvodni fluid iz usisne komore. Pogonski i proizvodni fluid miješaju se u grlu mlaznice iz kojega smjesa fluida izlazi s velikom kinetičkom energijom. Zatim smjesa ulazi u difuzor u kojemu se kinetička energija fluida pretvara u potencijalnu tj. tlačnu. Taj je tlak dovoljno visok da podigne smjesu fluida do ušća bušotine. Slika 2-3. prikazuje mlazne crpke s obrnuto okrenutim mlaznicama. Princip rada isti je kao i na Slici 2-2. osim što se, u slučaju kada je mlaznica okrenuta prema gore, smjesa fluida iznosi kroz tubing, a pogonski fluid se utiskuje kroz prstenasti prostor.

## STANDARNI TOK

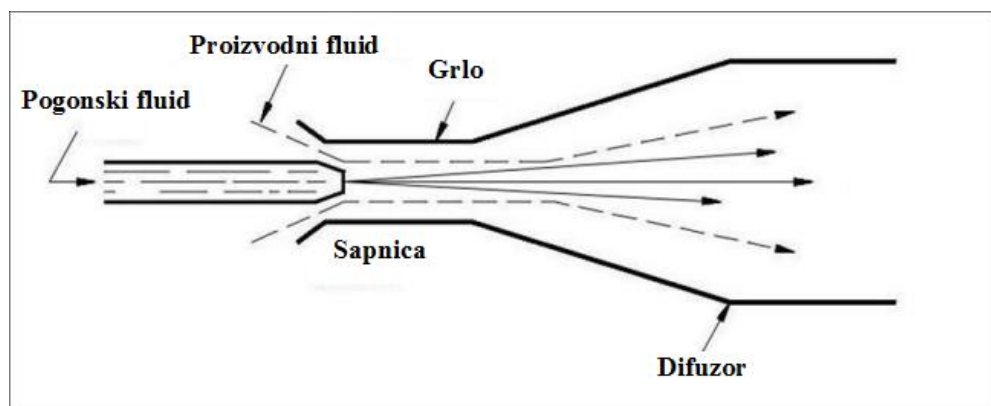
## REVERZNI TOK



Slika 2-3. Shematski prikaz normalnog i reverznog toka kroz mlaznu crpku (Fetoui, 2017)

### 2.1. Dijelovi mlazne crpke

Kao što je već rečeno, mlazna crpka nema pokretnih niti brtvećih dijelova. Njen dizajn je jednostavan i odlikuju ga tri glavna dijela. Slika 2-4. prikazuje glavne dijelove crpke i fluide i smjer toka fluida.



Slika 2-4. Dijelovi mlazne crpke (Khammassi, 2021)

Glavni dijelovi mlazne crpke su mlaznica, grlo i difuzor. Mlaznica je prepreka protjecanju i smatra se „motorom“ mlazne crpke s obzirom na to da je odgovorna za pretvaranje kapljevine pod visokim tlakom (potencijalna energija) u kapljevinu velike brzine (kinetička energija) (Khammassi, 2021). Drugi dio podzemnog sklopa mlazne crpke je vrat koji je uobičajeno većeg promjera od promjera mlaznice. Zbog razlike u površini ulaz u vrat je otvoren i kroz zazor između vrata i mlaznice kapljevina iz ležišta ulazi u crpku. Kapljevina iz ležišta ulazi u grlo zbog pada tlaka koji stvara mlaznica. U grlu se pogonski i proizvodni fluid miješaju prije ulaska u difuzor. Ono mora biti dovoljno dugo kako bi se fluidi izmiješali, ali ne predugo zbog otpora koji nastaju zbog trenja. El-Sawaf et al. (2011) nalaze da je optimalna duljina grla jednaka 7,25 duljina njegovog promjera. Također, Prabkeao i Aoki (2005) zaključili su da se duljina grla treba smanjiti s povećanjem otvora mlaznice. Tablica 2-1. prikazuje standardne promjere i protočne površine sapnice i grla.

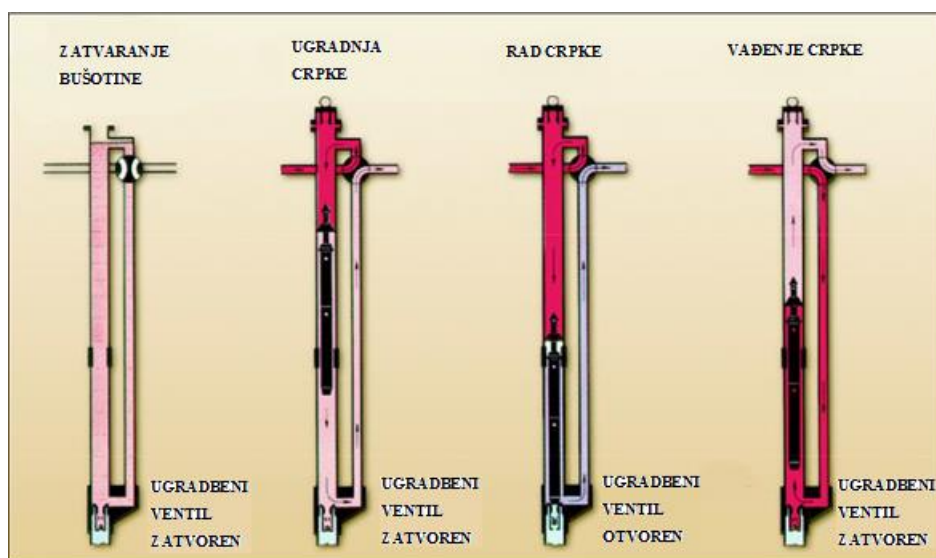
**Tablica 2-1.** Standardni promjeri i protočne površine sapnica i grla (Zelić i Čikeš, 2006)

Mlaznica			Grlo		
Broj	Promjer, mm	Površina, mm <sup>2</sup>	Broj	Promjer, mm	Površina, mm <sup>2</sup>
1	1,745	2,391	1	2,726	5,837
2	1,951	2,989	2	3,048	7,297
3	2,181	3,736	3	3,408	9,121
4	2,438	4,670	4	3,810	11,401
5	2,726	5,837	5	4,260	14,251
6	3,048	7,297	6	4,963	17,814
7	3,408	9,121	7	5,325	22,267
8	3,810	11,401	8	5,953	27,834
9	4,260	14,251	9	6,656	34,793
10	4,763	17,814	10	7,441	43,491
11	5,325	22,268	11	8,320	54,364
12	5,953	27,834	12	9,302	67,955
13	6,656	34,793	13	10,400	84,944
14	7,441	43,491	14	11,627	106,179
15	8,320	54,364	15	13,000	84,944
16		67,955	16	14,534	165,905
17		84,944	17	16,250	207,382
18		106,180	18	18,168	259,227
19		132,725	19	20,312	324,034
20		165,905	20	22,709	405,043
			21	25,390	506,303
			22	28,387	632,879
			23	31,737	791,099
			24	35,483	988,873

Posljednji dio mlazne crpke je difuzor koji kinetičku energiju pretvara u potencijalnu energiju tlaka. Difuzor je konusna cijev koja se širi od grla prema van, odnosno prema unutarnjem promjeru tubinga. Teamia et al. (2012) tvrde da bi kut širenja difuzora trebao biti  $5,5^\circ$ , ali je taj kut teško odrediti i to se uglavnom radi eksperimentalno.

## 2.2. Ugradnja crpke i odabir pogonskog fluida

Jedna od najvećih prednosti mlaznih crpki je način njihove ugradnje. Crpka se ugrađuje i vadi samo cirkulacijom što uvelike umanjuje troškove jer nema dugačkih pauza u radu ni potrebe za remontnim postrojenjem. Slika 2-5. prikazuje proces ugradnje mlazne crpke.



Slika 2-5. Prikaz postavljanja i vađenja mlazne crpke (Lake, 2007)

Nakon zatvaranja bušotine i cirkuliranja, crpka se postavlja u tubing i potiskuje pogonskim fluidom. Donji protupovratni ventil crpke prilikom ugradnje zatvoren je i omogućava „utiskivanje“ crpke do sjedišta u koje odsjeda. Proces vađenja također je jednostavan i odrađuje se obrnutom cirkulacijom kada je gornji protupovratni ventil zatvoren i omogućava podizanje crpke. Za vrijeme crpljenja ugradbeni protupovratni ventil otvara se pomoću proizvodnog fluida koji se „usisava“ u usisnu komoru.

Kao što je spomenuto, pogonski fluid može se dovoditi kroz tubing (engl. *Direct circulation system*) ili kroz prstenasti prostor (engl. *Reverse circulation system*). Što se tiče pogonskih fluida, svaki ima svoje prednosti. Tablice 2-2. i 2-3. prikazuju prednosti i ograničenja proizvedene vode i sirove nafte kao pogonskih fluida.

**Tablica 2-2.** - Prednosti i ograničenja nafte kao pogonskog fluida (Brown, 1965)

Prednosti	Ograničenja
Nafta po svojoj prirodi podmazuje pa se smanjuje trošenje podzemne i nadzemne opreme	U slučaju izlivanja ili curenja nafta je opasna zbog svoje zapaljivosti
Proizvedena nafta kompatibilna je s proizvodnim fluidom	U slučaju izlivanja ili curenja postoji opasnost od zagađenja
	Prevelika viskoznost može izazvati otpore zbog trenja
	Problemi s parafinom

**Tablica 2-3.** - Prednosti i ograničenja vode kao pogonskog fluida (Brown, 1965)

Prednosti	Ograničenja
Znatno jeftinija od nafte jer nema potrebe za velikim spremnicima	Voda ne podmazuje pa bi se trebali dodati lubrikatori
Manja opasnost od požara ili zagađenja okoliša ukoliko dođe do izlivanja ili curenja	Potrebno je dodati inhibitore korozije
Voda je uvijek dostupna, nakon uklanjanja čestica proizvedena voda može se koristiti kao pogonski fluid	Ukoliko je proizvedena voda visokog saliniteta postoji opasnost od nakupljanja soli u ventilima ili drugim dijelovima opreme

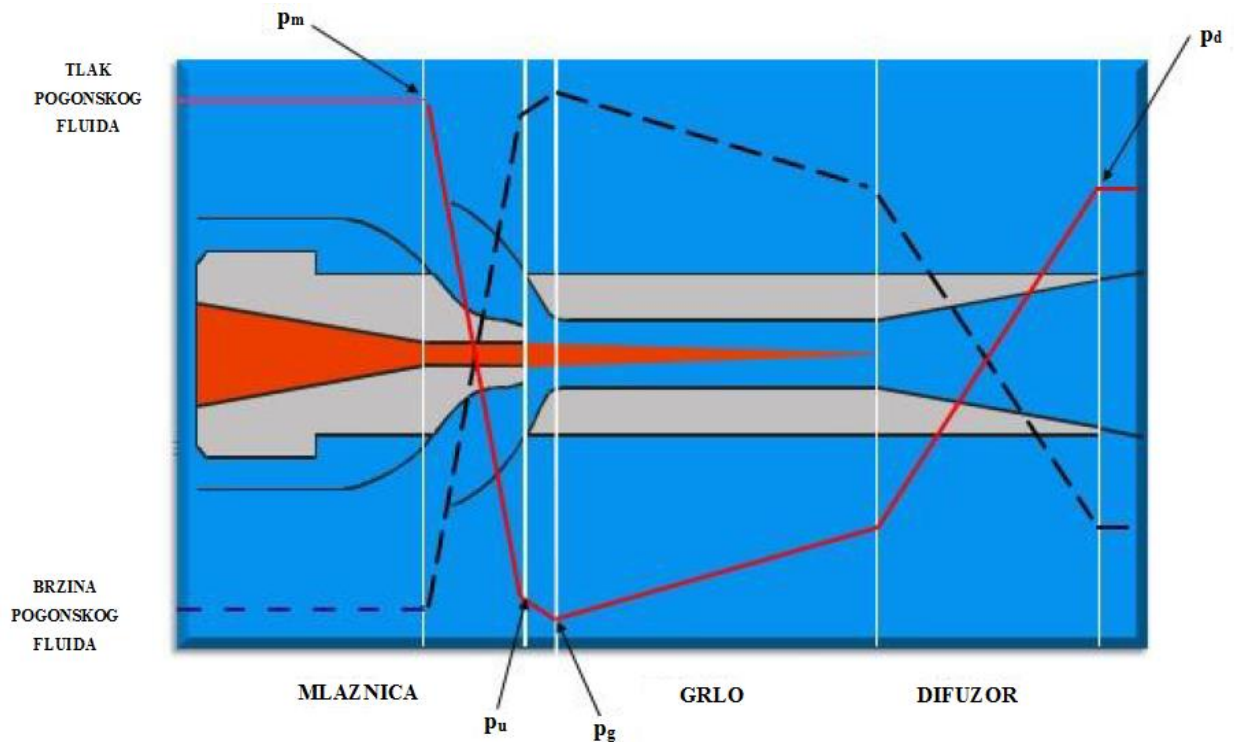
Najbitnija karakteristika nafte u odnosu na vodu je ta što voda ne podmazuje kao nafta. To je bitno zbog pumpi na površini kod kojih puno kasnije dolazi do zamora materijala kada se koristi nafta. Također, nafta je stlačiva pa pumpe ne trpe hidrauličke udare. Mana nafte je što u slučaju da je previskozna izaziva velike gubitke zbog trenja zbog čega treba povećati snagu utisnih pumpi. Topivost vode ujedno je i ograničenje i prednost jer se u vodu mogu dodati surfaktanti i inhibitori korozije. Uz vodu i naftu kao pogonski fluid koristili su se i dizel i plin. Dizel se, osim toga što je skup, ne koristi zbog svoje zapaljivosti i zato što je zagađivač. Plinu se prolazom kroz mlaznicu smanjuje temperatura pa postoji opasnost od



stvaranja hidrata i začepljenja crpke. Odabir pogonskog fluida dakle ovisi o više čimbenika. Najbitniji je kompatibilnost s proizvodnim fluidom zbog rizika od stvaranja stalnih emulzija. Zbog ekoloških razloga, ali i zbog jednostavnosti rada s vodom, voda se uglavnom koristi kao pogonski fluid.

### 2.3. Princip rada mlazne crpke

Kao što je već rečeno, pad tlaka nakon izlaska pogonskog fluida iz mlaznice uzrokuje „povlačenje“ proizvodnog fluida u crpku. Protok kroz crpku i količina proizvedenog fluida ovise o odabiru promjera mlaznice i grla (Tablica 2-1.). Promjena tlaka i brzine pogonskog fluida pri prolasku kroz mlaznu crpku prikazan je na Slici 2-6.

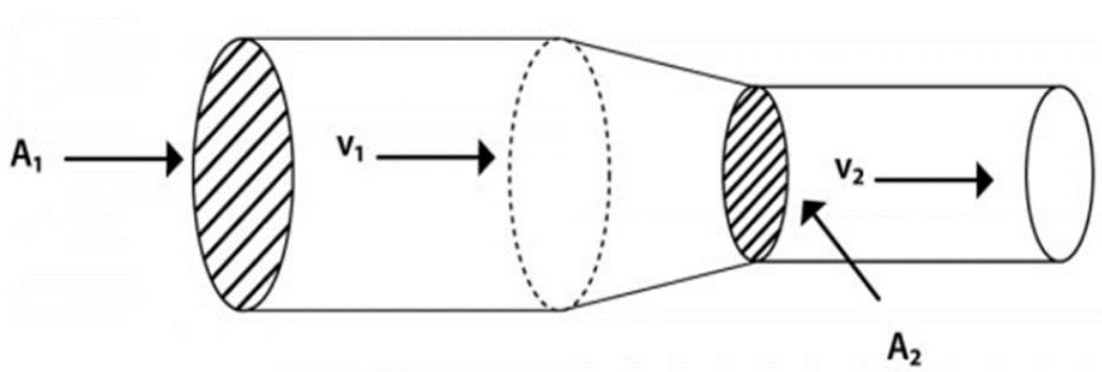


**Slika 2-6.** Promjena tlaka i brzine pogonskog fluida pri prolasku kroz mlaznu crpku (Pugh, 2005)

Promjena tlaka označena je crvenom linijom i može se prikazati preko 4 tlaka:

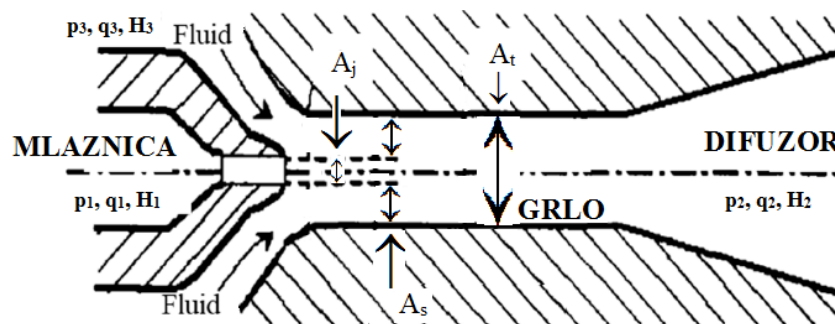
- $p_m$ : Tlak pogonskog fluida u mlaznici
- $p_u$ : Tlak fluida pri izlasku iz mlaznice (tlak usisa)
- $p_g$ : Tlak fluida u grlu
- $p_d$ : Tlak u difuzoru

Pogonski fluid koji velikom brzinom izlazi iz mlaznice uzrokuje povlačenje proizvodnog fluida u grlo pumpe zbog pada tlaka i trenja koje se ostvaruje pri njihovoj interakciji. Povlačenje je odgovorno za miješanje dvaju fluida u grlu crpke. Smjesa fluida iz grla odlazi u difuzor čije se protočna površina postepeno povećava i time stvara efekt suprotan onome mlaznice. Brzina smjese fluida pada, a tlak raste na razinu koja treba biti dovoljna da se smjesa iznese na površinu. Zbog gubitaka u procesu tlak koji smjesa fluida ima na izlasku iz difuzora nije jednak onom tlaku s kojim je pogonski fluid došao do mlaznice (Pugh, 2005). Rad mlazne pumpe zasniva se na Bernoulijevom principu iz kojeg slijedi da se povećanje brzine fluida događa u isto vrijeme kao i pad tlaka. Također, rad se opisuje i zakonima očuvanja mase i gibanja. Slika 2-7. prikazuje razlike u površinama dvaju poprečnih presjeka, u slučaju mlazne crpke, grla i mlaznice.



**Slika 2-7.** Shematski prikaz promjena u površini između grla i mlaznice (Apsley, 2005)

Iz jednadžbe kontinuiteta slijedi da fluid koji ulazi u cijev u istoj količini mora izaći van, u slučaju da nema gubitaka. Slika 2-8. prikazuje nomenklaturu mlazne crpke.



**Slika 2-8.** Nomenklatura mlazne crpke (Jia et al., 2023)

Na slici su prikazane oznake koje redom predstavljaju:

$A_j$  – površina otvora sapnice ( $m^2$ );

$A_s$  – dio protočne površine grla kojom protječe proizvodni fluid ( $m^2$ );

$A_t$  – protočna površina grla ( $m^2$ );

$p_{1,2,3}$  - tlakovi pogonskog fluida (1), smjese fluida(2) i proizvodnog fluida (3) (Pa);

$q_{1,2,3}$  - protoci pogonskog fluida (1), smjese fluida (2) i proizvodnog fluida (3) ( $m^3/s$ );

$H_{1,2,3}$  - visina podizanja pogonskog fluida (1), smjese fluida (2) i proizvodnog fluida (3) (m).

Jednadžba kontinuiteta glasi:

$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 = q = const \quad (2-1)$$

Iz jednadžbe (2-1) po nomenklaturi sa Slike 2-7. mogu se izraziti:

Jednadžba kontinuiteta za mlaznicu:

$$q_1 = A_j \times v_j \quad (2-2)$$

gdje je:

$v_j$  – prosječna brzina protoka pogonskog fluida kroz mlaznicu (m/s),

Jednadžba kontinuiteta za „usisni“ dio koji se nalazi između otvora mlaznice i početka grla:

$$q_3 = A_s \times v_s \quad (2-3)$$

gdje je:

$v_s$  – prosječna brzina proizvodnog fluida prije miješanja s pogonskim (m/s),

Jednadžba kontinuiteta za grlo mlaznice:

$$q_2 = A_t \times v_t \quad (2-4)$$

ili

$$q_2 = q_1 + q_3 = A_t \times v_t \quad (2-5)$$

gdje je:

$v_t$  – prosječna brzina smjese fluida u grlu mlaznice (m/s),

te se može izraziti:

$$A_t = A_s + A_j \quad (2-6)$$

Iz jednadžbi 2-5 i 2-6 slijedi da je:

$$v_t = \frac{q_1 + q_3}{A_t} = \frac{q_1 + q_3}{A_s + A_j}$$

Za stacionarni protok neviskozno i nestlačivo fluida poznata je osnovna Bernoulijeva jednadžba koja glasi:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gH = konst. \quad (2-7)$$

gdje su:

$p$  – tlak (Pa);

$\rho$  - gustoća fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  - brzina (m/s)

$g$  – gravitacijska konstanta ( $\text{m/s}^2$ )

$p/\rho$  - specifična potencijalna energija tlaka, tj. energija jedinice mase fluida poradi tlaka po kojim se fluid nalazi (J/kg);

$v^2/2$  – specifična kinetička energija brzine, tj. energija jedinice mase fluida poradi brzine protjecanja fluida (J/kg);

$gH$  – specifična potencijalna energija položaja, tj. energija jedinice mase fluida poradi geodetske visine fluida (J/kg).

Dijeljenjem jednadžbe 2-7 s gravitacijskom konstantom ( $g$ ) dobiva se njen često rabljeni oblik:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + H = konst. \quad (2-8)$$

iz kojeg se može izraziti  $H$ :

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (2-9)$$

gdje su:

$H$  – potencijalna energija visine stupca (m)

$\frac{p}{\rho g}$  – potencijalna energija poradi tlaka pod kojim se fluid nalazi

$\frac{v^2}{2g}$  – kinetičku energiju poradi brzine protjecanja fluida

Rad mlazne crpke ovisi o četiri parametra koja su bazirana na teoremima Gosline-a i O'Brien-a (1934) i na laboratorijskim ispitivanjima. Ti parametri su:

- $M$  - omjer ( $M$ ) koji je funkcija protoka u pumpi, a može se izraziti kao:

$$M = \frac{q_3}{q_1} \quad (2-10)$$

- $R$  - omjer ( $R$ ) koji je geometrijska karakteristika crpke, a računa se kao omjer protočnih površina mlaznice i grla:

$$R = \frac{A_j}{A_t} \quad (2-11)$$

- H - omjer (H) koji se računa kao odnos povećanja i gubitka tlaka pogonskog fluida tijekom protoka kroz pumpu. Aproximiran je statičkim tlakovima u pumpi pa se računa kao:

$$H = (p_2 - p_3)/(p_1 - p_2) \quad (2-12)$$

- Djelotvornost pumpe (E) koja je definirana kao snaga koju pogonski fluid dobiva pa gubi pri prolasku kroz crpku:

$$E = \left(\frac{q_3}{q_1}\right) \times \left(\frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_2}\right) \times 100 \quad (2-13)$$

ili, analogno ostalim parametrima

$$E = M \times H \times 100 \quad (2-14)$$

Teoriju mlaznih crpki razvio je 1870. J.M.Rankine, a uz njegov rad te rad Goslinea i O'Briena za razmatranje rada mlaznih crpki bitan je i Lorenzov rad iz 1910., a njegov model „gubitka miješanja“ općenito je prihvaćen (Zelić i Čikeš, 2006).

Lorenz (1910) u svojoj knjizi Technische Hydromechanik tvrdi da su gubici energije zbog miješanja proporcionalni kvadratu razlike brzina miješajućih struja:

$$L = q_1 \times \rho \times \frac{(v_j - v_t)^2}{2} + q_3 \times \rho \times \frac{(v_s - v_t)^2}{2}$$

gdje su:

L – Lorenzov gubitak energije u jedinici vremena (J/s)

$\rho$  - gustoća smjese fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

Gubici u mlaznim pumpama ovise o omjeru površina grla i mlaznice (R), protocima (M-omjer) i o tlakovima. Mnoge su teorije koje predlažu različite koeficijente gubitaka, a s pripadajućim autorima prikazani su u Tablici 2-4.

**Tablica 2-4.** Koeficijenti gubitaka prema različitim teorijama (Coppes et al., 1988)

	$K_j$	$K_S$	$K_t$	$K_d$	$K_t+K_d$
Gosline i O'Brien	0,15	0,0	0,28	0,1	0,38
Cunningham	0,1	0,0	-	-	0,3
Petrie et al.	0,03	0,0	-	-	0,2
Sanger	0,09	0,008	0,098	0,102	0,2

gdje su:

- $K_j$  – koeficijent gubitaka u mlaznici (-);
- $K_S$  – koeficijent gubitaka prije ulaska u grlo (-);
- $K_t$  – koeficijent gubitaka u grlu (-);
- $K_d$  – koeficijent gubitaka u difuzoru (-).

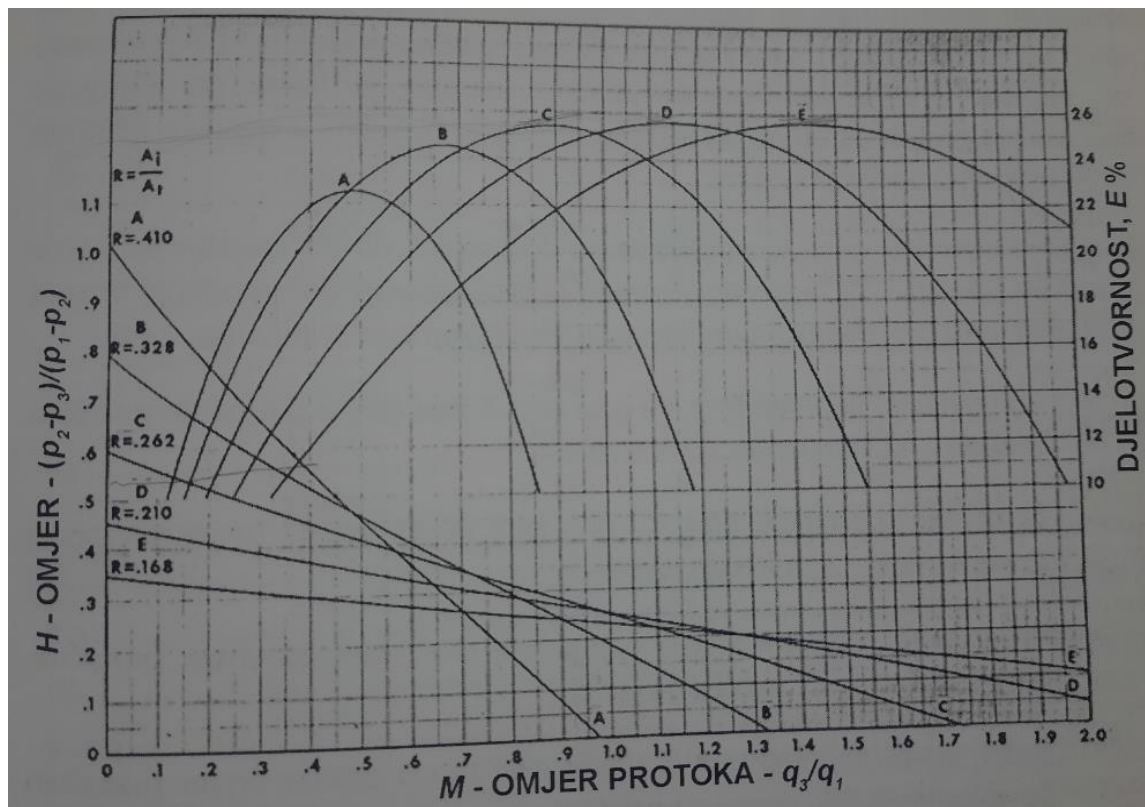
Različiti iznosi koeficijenata rezultat su različitih omjera protočnih površina grla i protočne površine mlaznice. Danas su promjeri grla i mlaznica standardizirani i prikazani su u Tablici 2-1. Protočne površine mlaznica postupno se povećavaju od broja 1 do 20 koracima jednakim faktorom 1,25. Mlaznica 2 ima 1,25 puta veću površinu od mlaznice 1 itd. Protočne površine mlaznica takve su da najmanja mlaznica omogućuje protok 30 do 50 m<sup>3</sup>/dan za tipičnu bušotinu, a najveća 2500 do 3000 m<sup>3</sup>/dan (Zelić i Čikeš, 2006). Jednako tako povećavaju se i protočne površine grla. Grla i mlaznice dimenzionirani su tako da njihove kombinacije vode do određenih omjera R. U slučaju da se broj mlaznice i grla odnosno mlaznice označi s X tada će:

- Kombinacija mlaznice broja X i grla broj X dati omjer R= 0,410
- Kombinacija mlaznice broja X i grla broj (X+1) dati omjer R= 0,328
- Kombinacija mlaznice broja X i grla broj (X+2) dati omjer R= 0,262
- Kombinacija mlaznice broja X i grla broj (X+3) dati omjer R= 0,210
- Kombinacija mlaznice broja X i grla broj (X+4) dati omjer R= 0,168

Nazovu li se standardizirani omjeri kao u Tablici 2-5. moguće je prikazati radne karakteristike mlaznih crpki (Slika 2-9.).

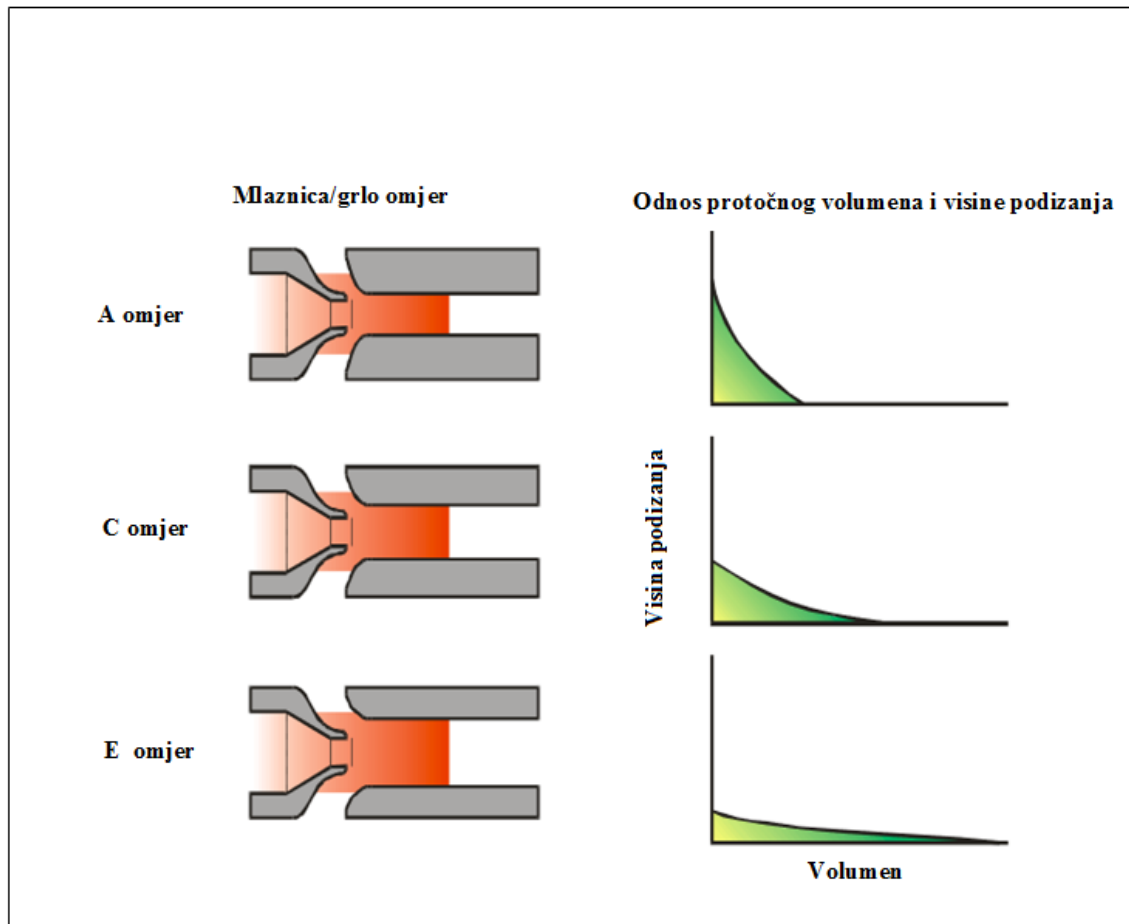
**Tablica 2-5.** Standardizirani omjeri i njihove oznake

Standardizirani omjer R	Oznaka	Maksimalna djelotvornost, %
0,410	A	22,6
0,328	B	24,6
0,262	C	25,4
0,210	D	25,6
0,168	E	25,6



Slika 2-9. Radne karakteristike mlaznih crpki (Zelić i Čikeš, 2006)

Na slici je vidljivo kako različiti standardizirani omjeri protočnih površina pokrivaju široki raspon crpki. A crpka ima veliku energiju visine i nju treba rabiti u dubokim bušotinama, a crpka E ima malu energiju visine, ali veliki omjer protoka fluida. Efikasnost crpke A najveća je kada je omjer protoka 0,5 što znači da protok pogonskog fluida treba biti dva puta veći od protoka proizvodnog fluida. Crpka E ima najveću efikasnost kada omjer protoka iznosi 1,5 što znači da će protok proizvodnog fluida biti 1,5 puta veći od protoka pogonskog fluida. Slika 2-10. prikazuje odnose podizanja i protoka za crpke s omjerima A, C i E.



**Slika 2-10.** Odnos protočnog volumena i visine podizanja za različite omjere protočne površine grla i mlaznice (Pugh, 2014)

### 2.3.1. Kavitacija, erozija i emulzija

#### 2.3.1.1. Kavitacija

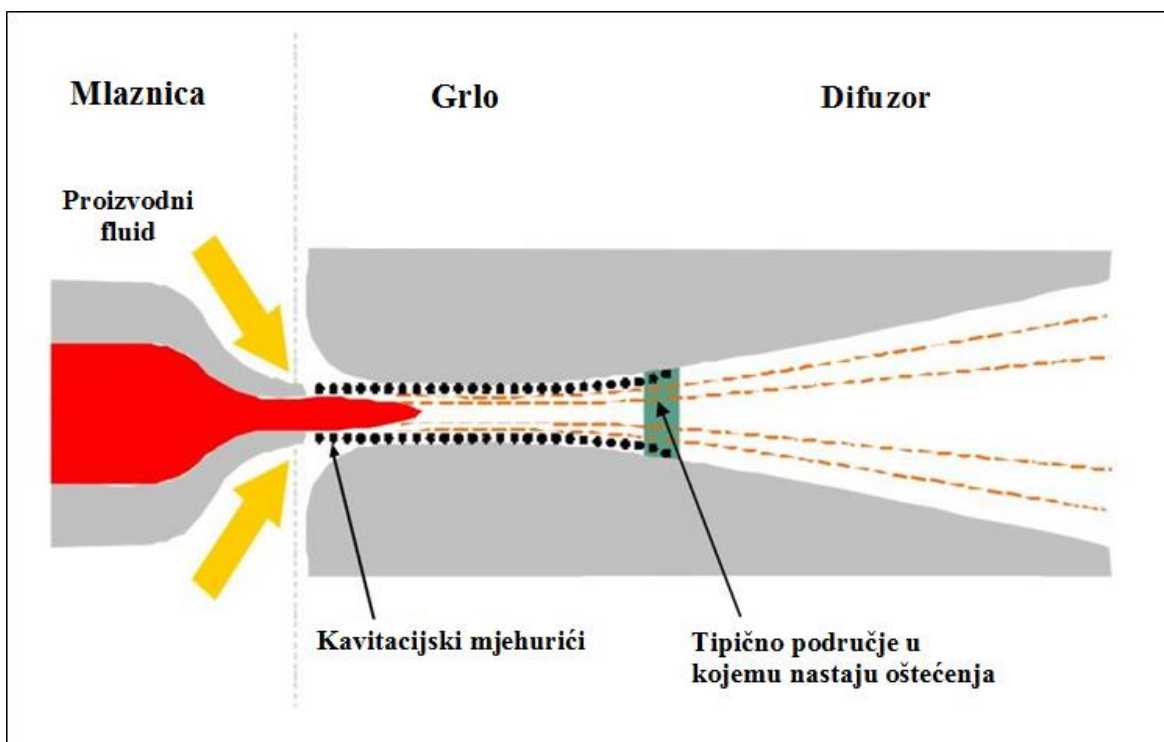
Pri odabiru mlazne crpke potrebno je obratiti pozornost na kavitaciju. Prolaskom pogonskog fluida kroz mlaznicu zbog pada tlaka započinje isparavanje i stvaranje mjehurića pare. Mjehurići prate kretanje kapljevine i pri dolasku u područje višeg tlaka, kada je apsolutni tlak kapljevine ponovno viši od tlaka zasićenja para, kondenziraju u obliku implozije, a njihove prostore popunjava kapljevinina zbog čega nastaje hidraulički udar. Kavitacija za posljedicu ima razaranje materijala stijenki crpke te smanjenje visine podizanja, protoka i djelotvornosti. Za mlazne crpke postoje dva tipa kavitacije:

- „Proizvodna kavitacija“ – kavitacija nastala kao rezultat pada tlaka proizvodnog fluida na ulazu u grlo zbog prevelikog protoka u odnosu na protočnu površinu. Po jednadžbi kontinuiteta, ako se poveća protok kapljevine kroz određenu



nepromijenjenu površinu njena brzina će se povećati i doći će do pada tlaka. Tada se u toku proizvodnog fluida pojavljuju mjehurići nekada i u tolikoj mjeri da zatvore ulaz u grlo i blokiraju proizvodnju. Prava štete crpki nastaje kada mjehurići implodiraju, najčešće uz stijenku grla. Uz oštećenja materijala njihova implozija uzrokuje i vibracije i šumove. Ovaj tip kavitacije često se javlja i u centrifugalnim pumpama;

- „Pogonska kavitacija“ – kavitacija koja nastaje u prostoru između grla i mlaznice, a javlja se zbog velikih brzina i pada tlaka pogonskog fluida nakon izlaza iz mlaznice. Pad tlaka javlja se i zbog interakcije toka pogonskog fluida i toka proizvodnog fluida koji ima malu brzinu i volumen (Pugh, 2005). „Pogonska kavitacija“ može uzrokovati štetu u grlu ili u difuzoru kao što je prikazano na Slici 2-11.



**Slika 2-11.** Shematski prikaz djelovanja pogonske kavitacije (Batool i Arhamna, 2010)

Čak i najmanje geometrijske promjene u grlu i difuzoru izazvane kavitacijom povećavaju trenje, pojačavaju turbulencije i sveukupno gubitke. Također, promjena u omjeru protočnih površina grla i mlaznice izazvati će pad djelotvornosti, a nekada i lom opreme.

### 2.3.1.2. Erozija

Erozija je gubitak ili trošenje materijala s površine opreme, tubinga itd. U mlaznim crpkama dijelovi koji su najizloženi eroziji su grlo i difuzor. Javljaju se tri vrste erozije:

- Trošenje materijala čvrstim česticama (engl. *Solid particle erosion*) – erozija koju izaziva pijesak, ukoliko proizvodni fluid ima puno pijeska mješavina fluida iznositi će se kroz prstenasti prostor zbog zaštite tubinga;
- Trošenje materijala kapljicama fluida (engl. *Liquid droplet erosion*) – erozija koja se javlja zbog sudara brzog fluida i površine materijala;
- Trošenje materijala zbog korozije (engl. *Erosion – corrosion*)

Kako bi se izbjegla erozija osjetljivih dijelova mlazne crpke proizvode se od krutih materijala kao što je volframov karbid. Korištenje krutih materijala omogućuje crpki duži rad i manje održavanja.

#### 2.3.1.3. *Emulzija*

Emulzija je pojava miješanja dvaju nemješivih fluida. Kapljice jednog fluida dispergirane su u drugom fluidu. Zbog miješanja fluida unutar mlazne crpke potrebno je dodavati deemulgatore.

Uz emulziju, kavitaciju i eroziju u obzir je potrebno uzeti i ograničenja površinske opreme. Zbog ograničenja utisne pumpe potrebno je izabrati mlaznu crpku takvu da utisna pumpa može izdržati tlakove i potrebnu dobavu. To znači da kombinacija pumpi koja nudi maksimalnu proizvodnju nije optimalna kombinacija (Keneth, 2007).

### 3. PRIMJENA PROGRAMA PROSPER

Prosper je računalni program tvrtke Petroleum Experts Ltd. koji služi za analizu poboljšanja proizvodnih mogućnosti bušotine, te za dizajn i optimizaciju različitih proizvodnih sustava (PROSPER User Manual, 2018). Ime programa dolazi od kratice „**PRO**duction and **S**ystems **PER**formance analysis software“ i dio je softverskog paketa IPM (engl. *Integrated Production Modeling*), koji se koristi za projektiranje, analizu i optimizaciju svih sustava u proizvodnom inženjerstvu nafte i plina. U softveru je omogućeno sljedeće:

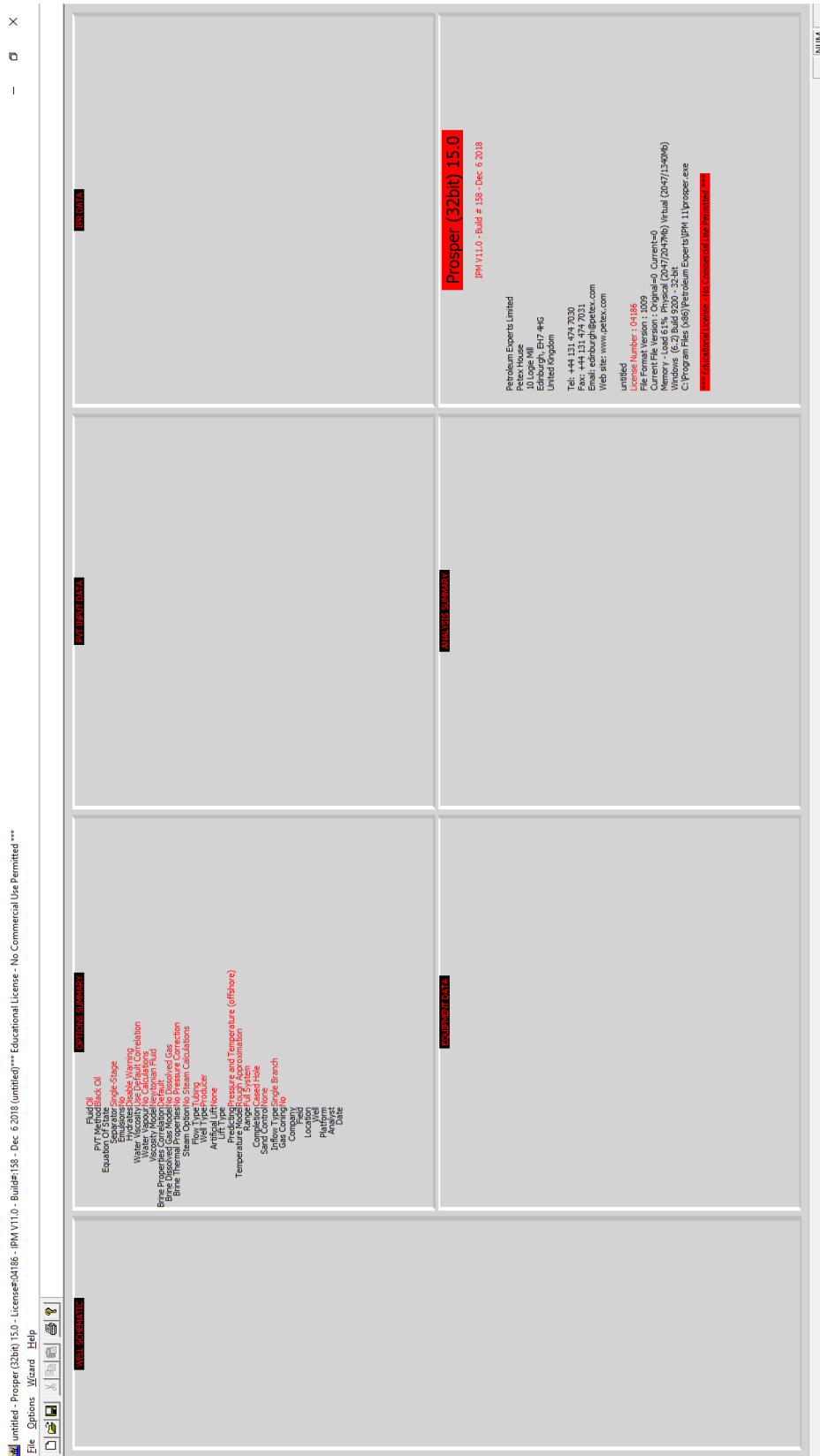
- VLP (engl. *Vertical lift performance*) – proračun dinamičkog tlaka u tubingu i grafički prikaz;
- IPR (engl. *Inflow performance relationship*) – prikaz krivulja i određivanje modela utoka fluida iz ležišta u bušotinu;
- Dimenzioniranje tubinga i zaštitnih cijevi;
- Modeliranje svih vrsta potpomognutog podizanja kapljevine;
- Primjena Nodal analize za proračun pada tlaka;
- Dimenzioniranje površinskih komponenti (separatori, pumpe, cjevovodi);
- Analiza osjetljivosti.

Prosper je svjetski standard u modeliranju proizvodnih parametara bušotine, a koristi se u proizvodnji i razradi naftnih i plinskih ležišta za predviđanje hidrauličkih i temperaturnih promjena u uzlaznim i površinskim cjevovodima. Prednost uporabe ovog računalnog alata je velika točnost i brza obrada podataka, kao i mogućnost široke primjene u praksi. To se posebice odnosi na proračune kojima se optimira sadašnje stanje proizvodnih bušotina, kao i na mogućnost efikasne analize budućih promjena u cjelokupnom sustavu. Program omogućuje izradu pouzdanih modela bušotina i generiranje PVT, VLP i IPR krivulja s pomoću numeričkih metoda kojima se usklađuje, odnosno „mečira“ ugrađene korelacije s izmjerenim podacima.

IPM je programski paket koji uz PROSPER sadrži i numerički simulator ležišta (Mbal), korelacije PVT svojstava ležišnih fluida (PVTp), program za nadzor cijelokupne integrirane proizvodnje (Resolve), specijalizirani simulator ležišta i pribušotinske zone (Reveal), te program za analizu površinskog sustava i višefaznog protoka (Gap). Navedene programe je moguće digitalno povezati u svrhu modeliranja i optimizacije cjelokupnog proizvodnog sustava (Vedriš, 2023).

### 3.1. Dizajniranje mlazne crpke u programu PROSPER

Pri otvaranju PROSPER-a prikazuje se prozor kao na Slici 3-1.



Slika 3-1. Prikaz početnog prozora programa PROSPER

Prozor je podijeljen na sedam različitih dijelova tj. potprograma, koji su ovdje izvorno navedeni na engleskom jeziku, a u nastavku tekstualnog dijela su dani i na hrvatskom jeziku, pri čemu su za prijevod odabrani samo parametri čije značenje je ključno u postavljanju proizvodnog modela bušotine s dubinskom mlaznom crpkom:

- System summary
- PVT data
- Equipment data
- Analysis summary
- IPR data
- Well schematic
- Prozor koji prikazuje licencu

Dimenzioniranje bilo kojeg sustava potpomognutog podizanja kapljevine u PROSPER-u radi se u koracima. U daljnjem dijelu rada je korak po korak objašnjeno dimenzioniranje dubinske mlazne crpke.

### 3.1.1. Opis sustava

Otvaranjem prvog prozora prikazuju se opcije za unos podataka kao na Slici 3-2. System summary (hrv. opis sustava) je zapravo prozor u koji se unose osnovni podaci u bušotini. Prozor je i sam podijeljen na par dijelova. Opis proizvodnog fluida (engl. *Fluid description*) je dio u koji se unose podaci o proizvodnom fluidu. U izborniku fluid moguće je odabrati između nafte, nafte i vode, plina te kondenzata. Izbornik metoda (engl. *Method*) za proizvodnju nafte nudi dvije metode: Teška nafta (engl. *Black oil*) ili jednadžbu stanja (engl. *Equation of State*). Ovisno o odabranoj metodi, program nudi različite korelacije za usklađivanje s mjerenim podacima uz ugrađene metode linearne regresije. Za „Black oil“ metodu nudi se sedam različitih korelacija, a za jednadžbu stanja izbor je sužen na Peng-Robinson ili Soave-Redlich-Kwong korelacije. Ukoliko se odabere neki drugi fluid, program će ponuditi ostale, poznate PVT korelacije. Pod opis fluida unosi se i tip separatora, stvaraju li se emulzije, odabire se viskoznost vode i modeli viskoznosti.

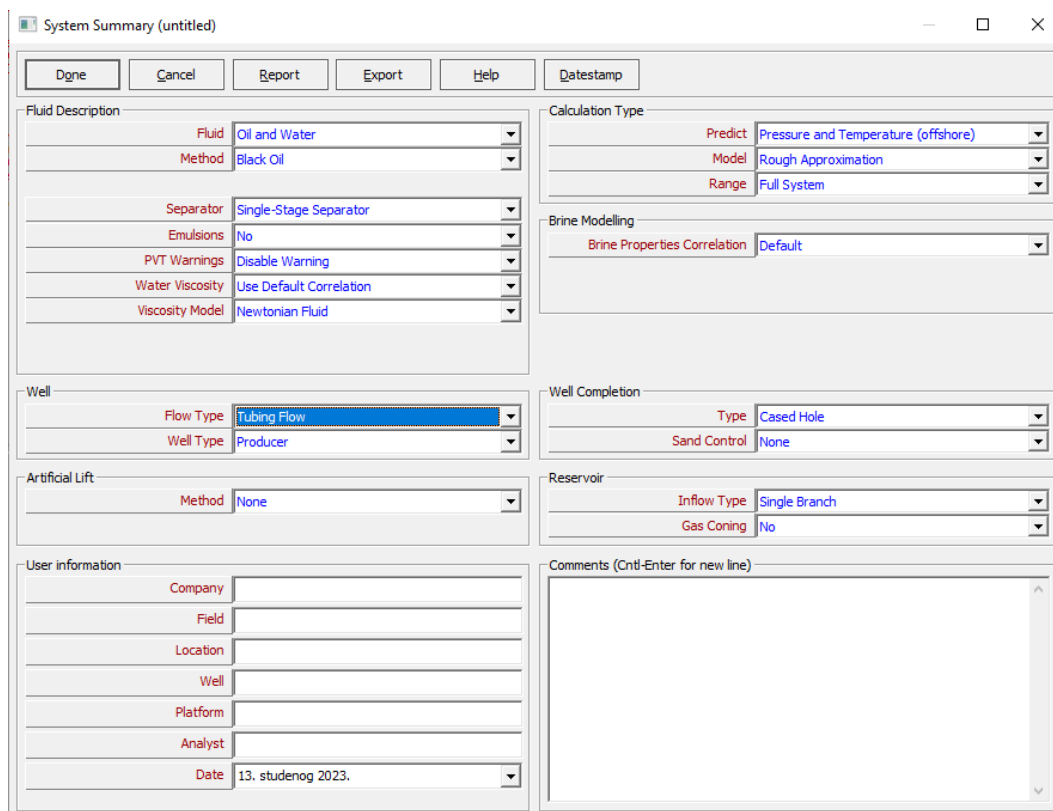
Dio prozora označen s „Well“ služi kako bi se opisala bušotina. Definira se tip toka (engl. *Flow type*) koji opisuje kroz koji dio bušotine protječe proizvodni fluid. Program nudi tri opcije; tubing, zaštitne cijevi ili i jedno i drugo. Izbornik tipa bušotine (engl. *Well type*) nudi opcije za odabir između proizvodne, utisne, vodoutisne i bušotine koja proizvodi metan.

Umjetno podizanje (engl. *Artificial lift*) je dio prozora u kojemu se bira metoda umjetnog podizanja ukoliko postoji. Od cijelog niza ponuđenih metoda za plinsko podizanje neke od najpoznatijih su plinski lift (kontinuirani i povremeni), potopna ili uronjiva centrifugalna crpka, hidraulička i mlazna crpka, dubinska crpka s klipnim šipkama itd. Ovaj rad opisuje mlaznu crpku i njeno dimenzioniranje prikazano je u nastavku.

Dio prozora označen s „User information“ (hrv. informacije o korisniku) služi kako bi tvrtke ili projektanti koji imaju veliku količinu projekata lakše pratili sve u stvarnom vremenu. Ovaj dio nema izbornika, osim za datum, već se svi podaci unose ručno.

Na desnoj strani prozora pri vrhu odabire se model računanja (engl. *Calculation Type*). Model se odnosi na tlak i temperaturu, u izborniku „Predict“ bira se što će program aproksimirati. Ponuđeno je da program radi aproksimaciju samo tlaka ili tlaka i temperature. Ukoliko se odabere aproksimacija samo tlaka, temperaturu je potrebno ručno unijeti, a ukoliko je odabrana aproksimacija tlaka i temperature program će sam generirati tlačne i temperaturene profile. PROSPER temperaturu računa po tri modela: gruba pretpostavka (engl. *Rough Approximation*), entalpijska ravnoteža (engl. *Enthalpy Balance*) te napredna procjena (engl. *Improved Approximation*). Pri korištenju prvog modela unosi se koeficijent prijelaza topline, a PROSPER preko masenih protoka fluida u bušotini stvara temperaturni profil. Isto treba napraviti i ako se odabere napredna procjena temperature koja isto kao i opcija entalpijska ravnoteža prati promjene u sustavu. Zbog toga proračun kod ove dvije opcije traje duže, ali su dobre za praćenje promjena temperature u dugim cjevovodima itd. Iduća je sekcija „Well Completion“ (hrv. bušotinsko opremanje) u kojoj se odabire tip opremanja bušotine. Izbornika tipa opremanja nudi „Cased hole“ tj. zacijevljeni perforirani kanal bušotine ili „Open hole“ u slučaju da je proizvodni interval otvoren tj. nezacijevljen.

Također, u toj sekciji je i izbornik kojim se bira kontrola utoka pijeska u bušotinu u slučaju da je takvo nešto ugrađeno. Reservoir (hrv. ležište) sekcija sadrži dva izbornika: izbornik za odabir broja proizvodnih kanala koji nudi Single Branch (hrv. jendnokanalna bušotina) ukoliko bušotina ima jedan kanal ili Multilateral Well (hrv. višekanalna bušotina) ukoliko bušotina ima više proizvodnih kanala te izbornik u kojeg se unosi dolazi li do konusiranja plina ili ne. Posljednja je sekcija za ostaviti komentar ili napomenu kako bi se u slučaju promjene korisnika lakše shvatio razlog unosa podataka. Nakon unošenja svih podataka potrebno je odabrati Done (hrv. završeno) i time su uneseni svi osnovni podaci o bušotini.

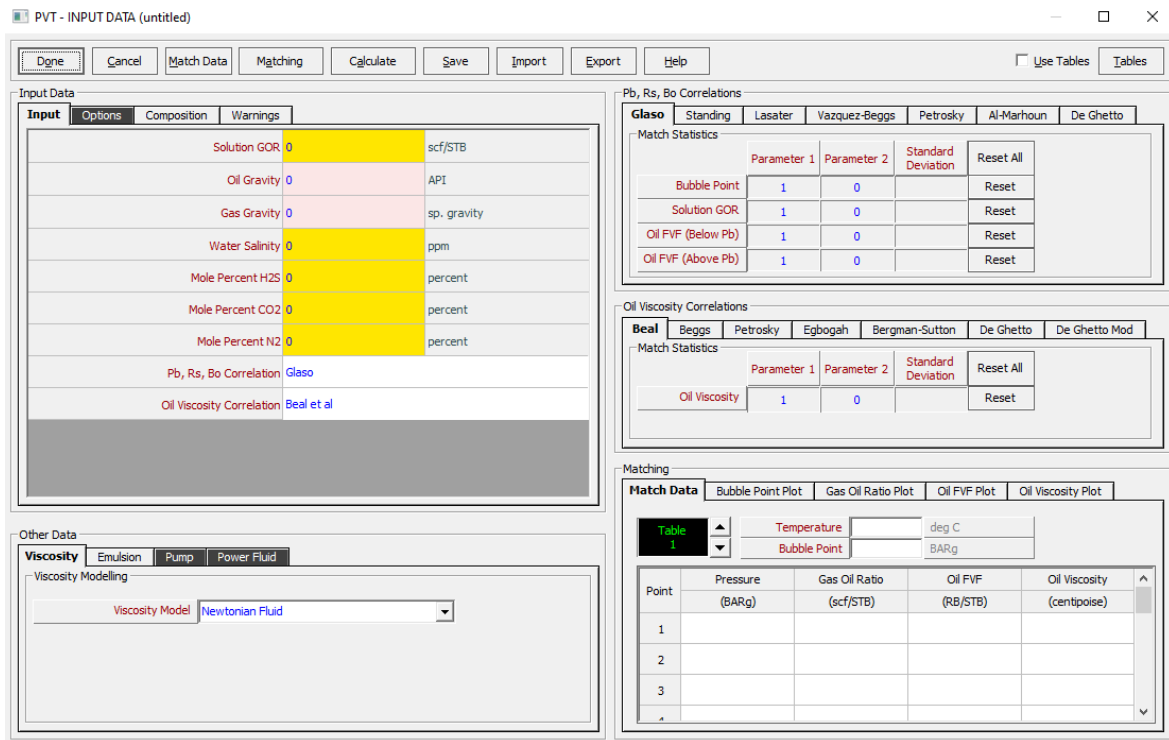


**Slika 3-2.** System summary prozor u programu PROSPER

### 3.1.2. PVT podaci

Odabirom „PVT data“ (hrv. PVT podaci) tipke otvara se prozor kao na Slici 3-3. Prozor s PVT podacima nudi niz opcija za unošenje podataka o fluidu. Prozor je podijeljen na pet dijelova. „Input data“ (hrv. unos podataka) je dio prozora u koji se unose podaci o količini otopljenog plina u nafti GOR (engl. *Gas to oil ratio*), gustoća nafte i plina, salinitet vode (engl. *Water salinity*) te udio dušika, ugljikovog dioksida i sumporvodika. Odabiru se i korelacije za proračun tlaka zasićenja i faktora otopljenog plina i korelacija za računanje viskoznosti nafte. U donjem lijevom dijelu prozora nalazi se „Other data“ (hrv. ostali podaci) dio je u kojemu je izbornik za odabir hidrauličkog modela fluida. Uz to, pri odabiru mlazne crpke potrebno je ispuniti podatke o pogonskom fluidu. Izbornik za odabir pogonskog fluida nudi vodu pri čemu treba unijeti njen salinitet i opciju „Other fluid“ (hrv. drugi fluid) uz koju je potrebno unijeti sve podatke o fluidu. U desnoj gornjoj strani prozora prikazan je izbornik korelacija za proračun tlaka zasićenja i faktora otopljenog plina te korelacije za proračun viskoznosti nafte. U donjem desnom uglu nalazi se „Matching“ sekcija koja služi za usklađivanje unesenih podataka metodom nelinearne regresije. U Matching odjeljak potrebno je unijeti dio podataka, barem udio otopljenog plina u nafti ili tlak zasićenja. Po

završetku unosa podataka potrebno je odabrati tipku Matching na gornjoj traci prozora kako bi se dobio pregled o točnosti odabranih korelacija. Ukoliko program izbacuje grešku ili vrijednosti koje se ne slažu s mjerenim podacima (ako postoje) potrebno je promijeniti odabir korelacija. Kada se dobiju zadovoljavajući podaci unos je potrebno završiti pritiskom na tipku Done. Unos PVT podataka bitan je za predviđanje varijacija tlakova i temperatura pri proizvodnji fluida.



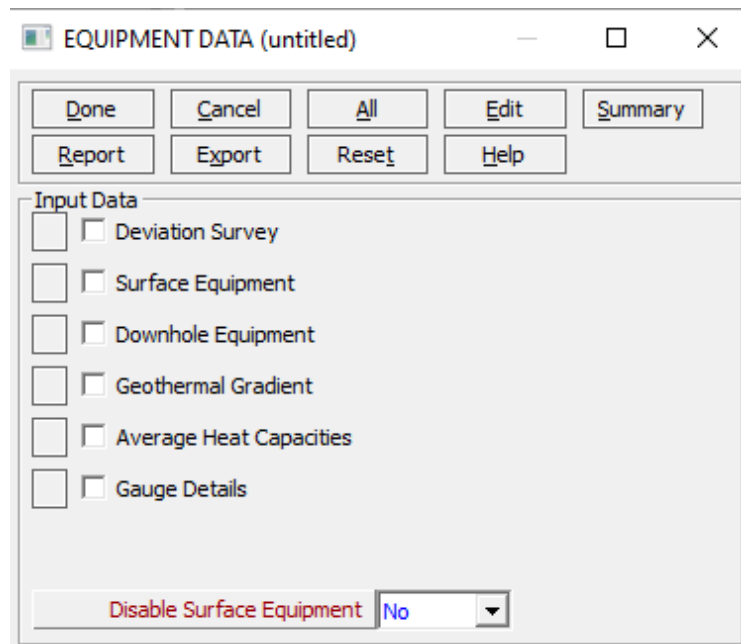
Slika 3-3. PVT data prozor u programu PROSPER

### 3.1.3. Podaci o opremi

Nakon unosa i provjere podataka u fluidu za nastavak dimenzioniranja potrebno je otvoriti prozor Equipment data (hrv. podaci o opremi). Prozor nudi šest mogućih unosa podataka ovisno o njihovoj dostupnosti (Slika 3-4). Ti podaci su:

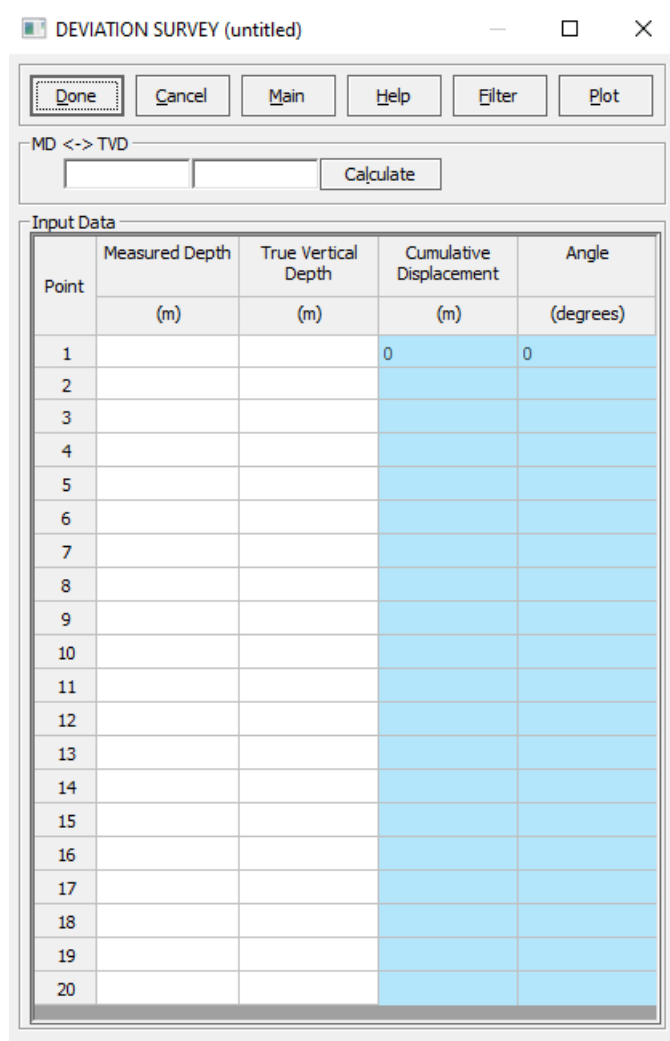
1. Deviation survey (hrv. odklon bušotine)
2. Surface equipment (hrv. površinska oprema)
3. Downhole equipment (hrv. podzemna oprema)
4. Geothermal gradient (hrv. geotermalni gradijent)
5. Average heat capacities (hrv. prosječne specifične topline)
6. Gauge details (hrv. detalji o ventilima)





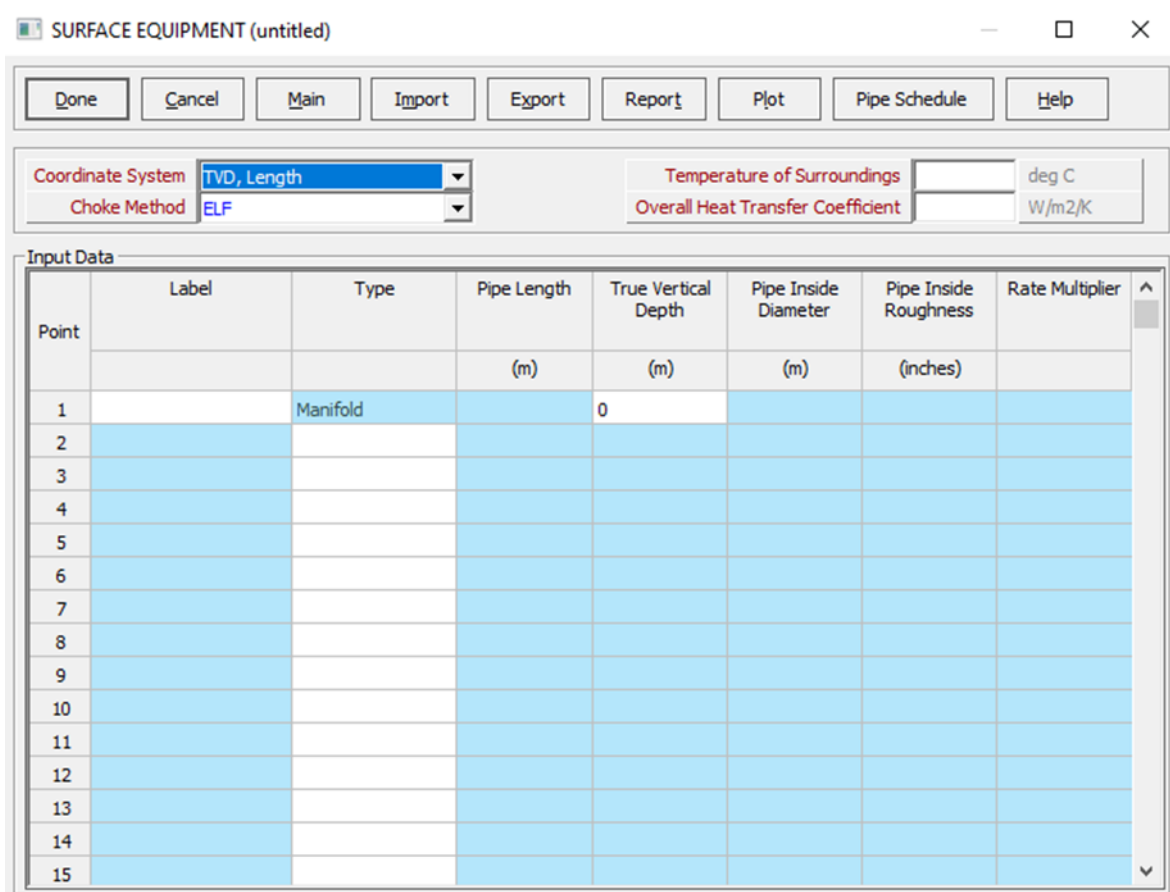
**Slika 3-4.** Prikaz prozora Equipment data u programu PROSPER

Odabirom prve opcije otvara se prozor za unos podataka o otklonu bušotine (Slika 3-5.). U prvi stupac prozora potrebno je unijeti mjerenu dubinu (engl. *Measured depth*), a u drugi stvarnu vertikalnu dubinu (engl. *True vertical depth*). Moguće je unijeti 20 točaka ukoliko postoji toliko podataka. U slučaju da je poznato više od 20 točaka PROSPER nudi opciju filtriranja (engl. *Filter*) smještenu na gornjoj traci prozora. Nakon filtriranja program bira točke koje najbolje opisuju putanju bušotine. Opcija Plot (hrv. nacrtaj) na gornjoj traci prozora omogućava prikaz trajektorije bušotine. Nakon unosa podataka pritiskom na tipku Done (hrv. završeno), unos je spremljen i program ponovno pokazuje prozor za unos podataka o opremi.



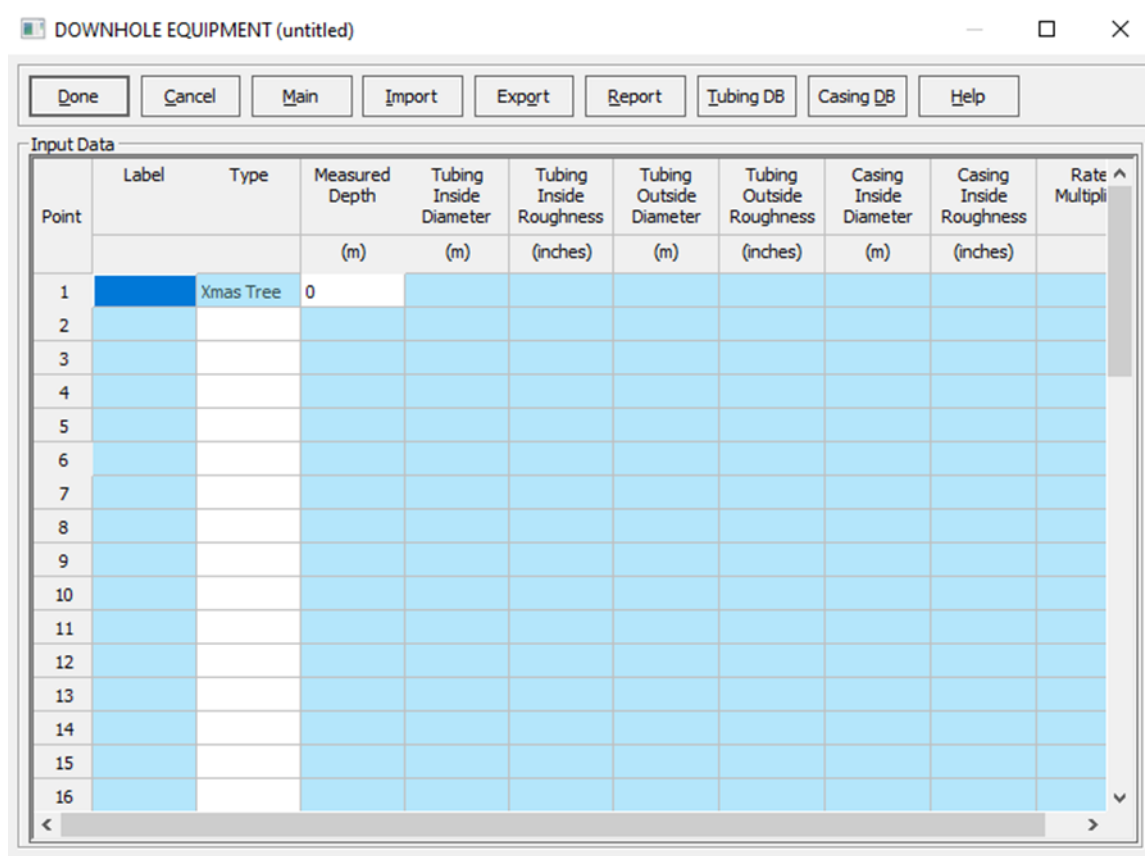
**Slika 3-5.** Prikaz prozora Deviation Survey u programu PROSPER

Nakon unosa podataka o odklonu bušotine potrebno je unijeti podatke o površinskoj opremi. U prozoru za površinsku opremu (Slika 3-6.) moguće je unijeti sve specifikacije površinske opreme. Duljina cjevovoda, koljena, sapnice, filtere i proširenja. Potrebno je unijeti i temperaturu radne okoline (engl. *Temperature of surroundings*) i koeficijent prijelaza topline (engl. *Overall heat transfer coefficient*). S obzirom na to da je u ovom slučaju pri dimenzioniranju mlazne crpke potrebno znati samo dinamički tlak na ušću, ova se opcija u ovom radu neće koristiti, a onemogućiti će se pri dnu Equipment data prozora u izborniku Disable surface equipment (hrv. onemogućiti površinsku opremu).



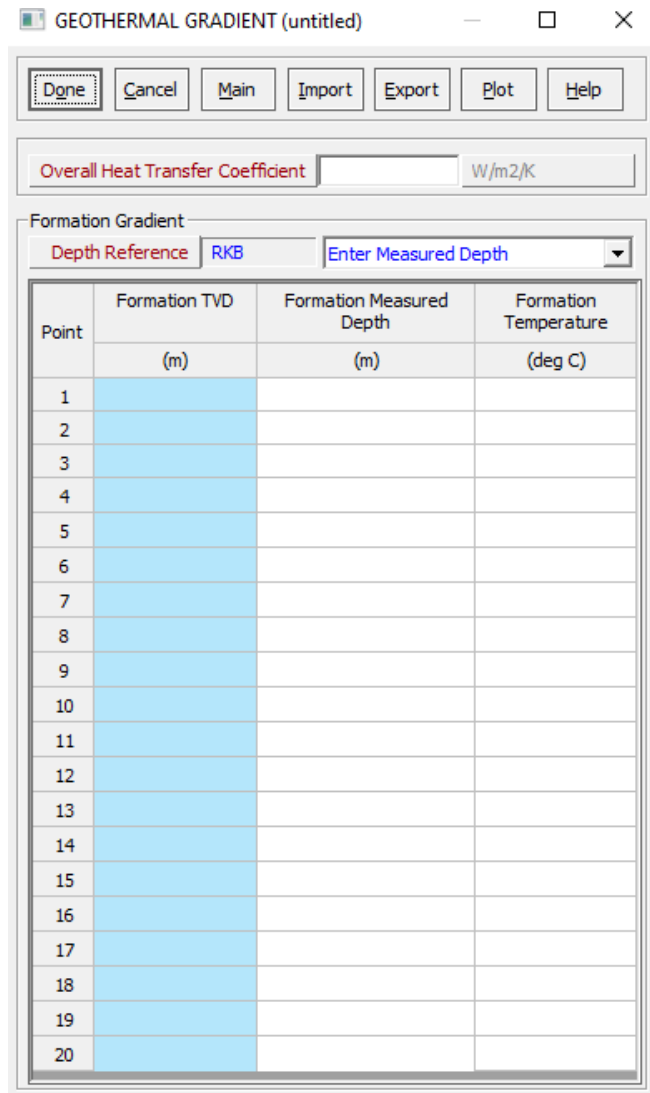
**Slika 3-6.** Prikaz prozora Surface Equipment u programu PROSPER

Idući unos koji je potrebno unijeti je unos o ugrađenoj podzemnoj opremi (engl. *Downhole equipment*). Pritiskom na Downhole equipment otvara se prozor kao na Slici 3-7. U ovaj se prozor unosi sva oprema od proizvodnog intervala do ušća. To obuhvaća zaštitne cijevi, tubing, sigurnosni ventil i svu ostalu opremu koja može poslužiti za naknadnu ugradnju dodatne opreme i opremu koja stvara restrikciju ugradnji nove opreme. Bitno je naglasiti da program zadnju unesenu dubinu smatra dubinom bušotine ili dubinom vrha ležišta. Potrebno je unijeti unutarnje i vanjske promjere tubinga i zaštitnih cijevi te njihovu hrapavost zbog izračuna pada tlaka pri protjecanju. Površinska oprema i podzeman oprema povezane su pa se podaci unesi u prozor za unos podzemne opreme trebaju poklapati s podacima u prozoru za unos površinske opreme.



**Slika 3-7.** Prikaz prozora Downhole equipment u programu PROSPER

Nakon unosa podataka o podzemnoj opremi programu je potrebno dati podatke za izračun temperaturnog gradijenta. Program proračunava temperaturu okolnih stijena prema unosu podataka o temperaturama fluida na određenim dubinama. Zbog toga je prije unosa dubina i mjerenih temperatura potrebno unijeti i specifične toplinske kapacitete za vodu, naftu i plin koji se unose u opciji Average Heat Capacities kojoj se pristupa iz prozora Equipment data. Kao što je vidljivo na Slici 3-8. moguće je unijeti 20 različitih dubina i temperatura prema kojima program radi profil temperaturnog gradijenta okolnih stijena i koristi ga u narednim proračunima. Potrebno je unijeti minimalno dvije dubine iako je poželjno unijeti ih više. Za unos ovih podataka potrebno je poznavati otklon bušotine jer se unosi stvarna vertikalna dubina ili mjerena dubina. Odabirom opcije Plot moguće je grafički prikazati temperaturni gradijent.

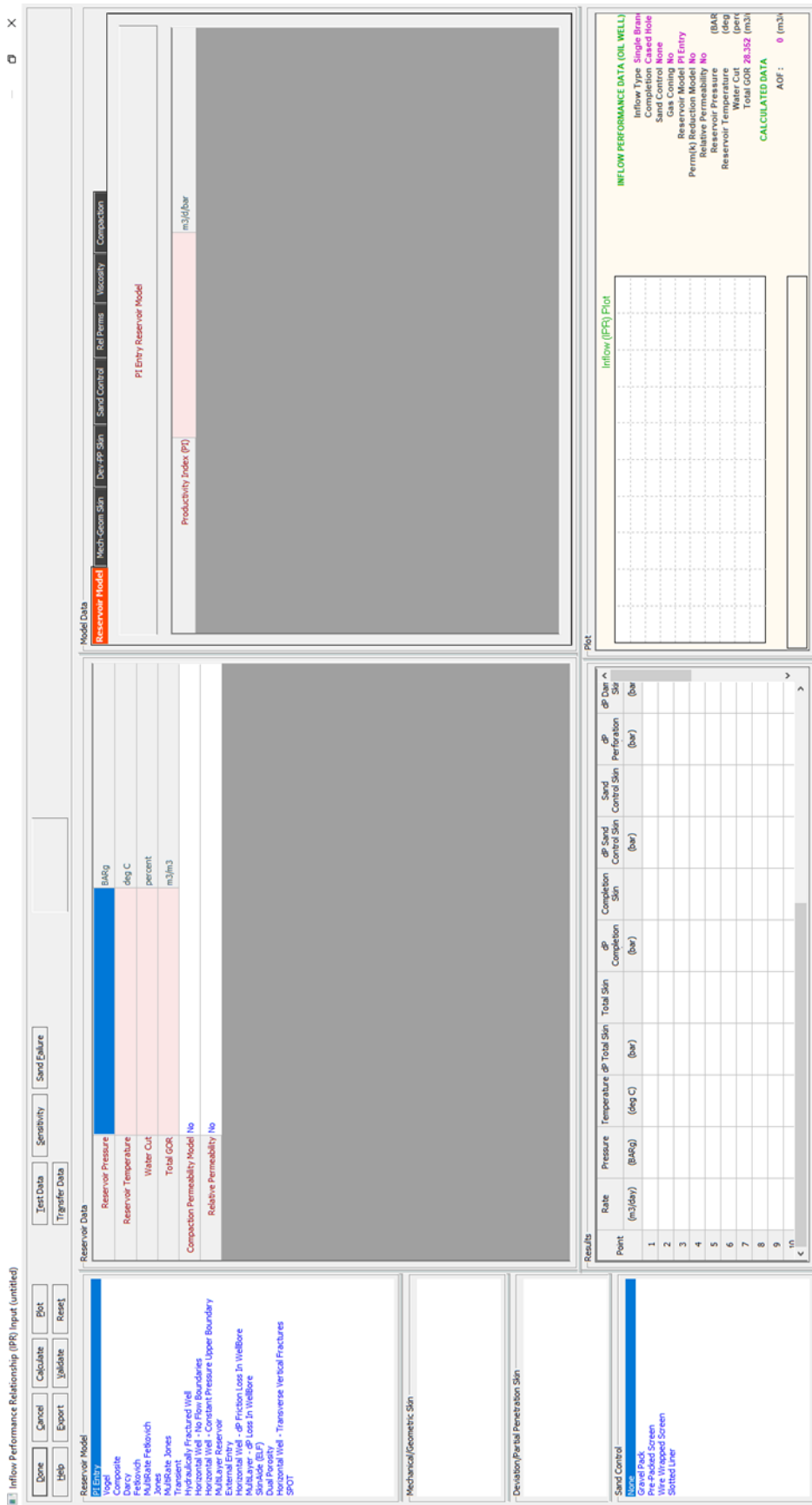


**Slika 3-8.** Prikaz prozora Geothermal gradient u programu PROSPER

S unesenim podacima za računanje geotermalnog gradijenta završen je unos podataka vezanih uz bušotinu. Kao što je vidljivo na Slikama za unos svih podataka osim podataka vezanih uz otklon bušotine, sve podatke je moguće uvesti (engl. *Import*) iz vanjskog programa ukoliko postoje u takvom obliku. To uvelike ubrzava i olakšava proces unosa podataka.

#### 3.1.4. IPR podaci

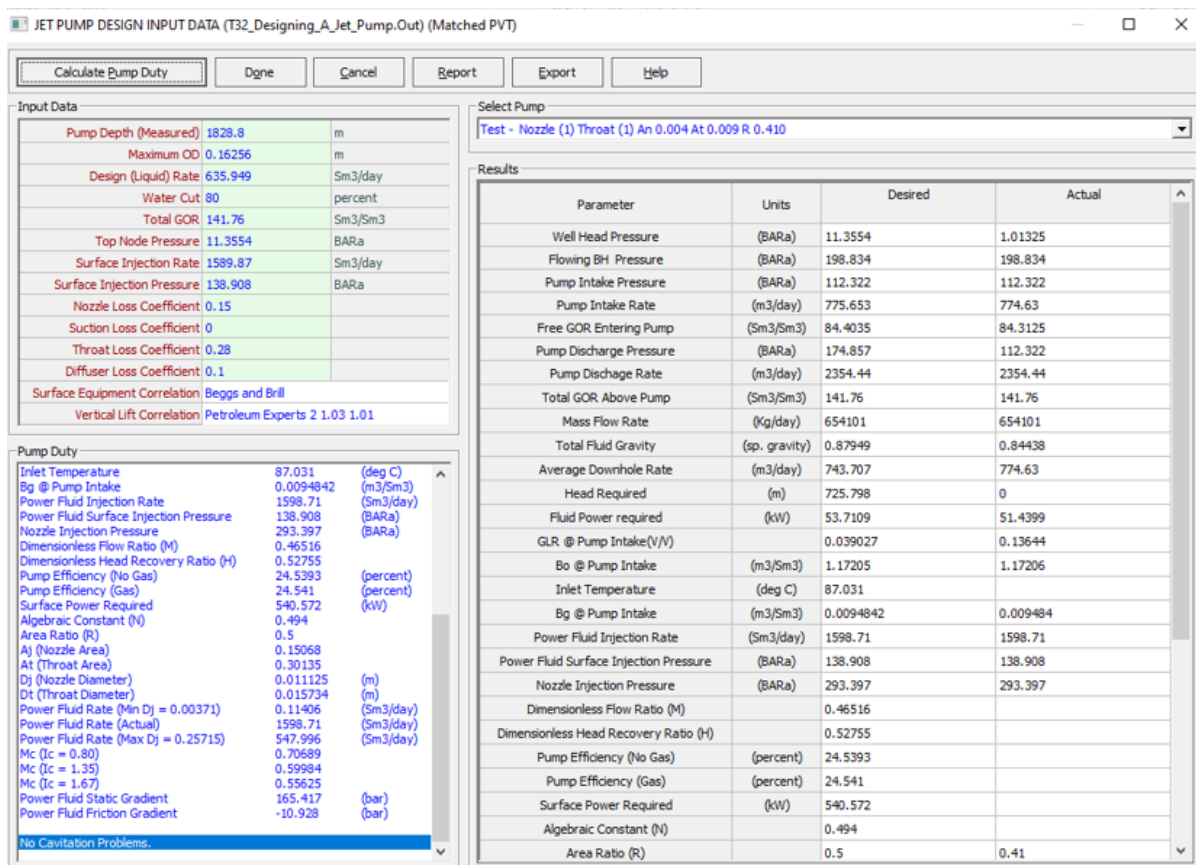
Idući korak pri dimenzioniranju je unos podataka o ležištu u svrhu izračuna IPR ili indikatorske krivulje. S tim se počinje odabirom na IPR data (hrv. IPR podaci) opciju. Prozor koji se otvara prilikom IPR data opcije prikazan je na Slici 3-9.



Slika 3-9. Prikaz Inflow performance relationship prozora u programu PROSPER

U gornjem lijevom dijelu prozora potrebno je izabrati model ležišta. Po odabranom modelu računati će se IPR krivulja, skin faktor i podaci vezani uz opremu za kontrolu utoka pijeska. Model se bira prema dostupnosti podataka. Neki modeli traže veći unos podataka, a neki aproksimiraju unose koji im nedostaju. Nakon odabira modela poznate podatke o ležištu potrebno je unijeti u Model data sekciju koja se nalazi na desnoj strani ekrana. Ukoliko je bušotina zacijevljena može se odabrati između tri analitička modela za proračun utjecaja skin faktora koji će računati geometrijski i mehanički skin ovisno o duljini, promjeru i broju perforacija, propusnosti oštećene zone itd. Nadalje je potrebno odabrati metodu kontrole utoka pijeska ukoliko postoji. Ponuđen je odabir između pješčanog zasipa (engl. *Gravel pack*), predpakiranog filtra (engl. *Prepacked screen*), žicom omotanog filtra (engl. *Wire wrapped screen*) i prorezanog lajnera (engl. *Slotted liner*). Nakon unosa podataka i definiranja modela, potrebno je unijeti podatke o ležištu (engl. *Reservoir data*). Podaci koje je potrebno unijeti su ležišni tlak i temperatura, udio vode i omjer plina i kapljevine. Nakon unosa svih podataka program generira IPR krivulju koju se može pogledati u odjeljku Results (hrv. rezultati).

Idući je korak odabir crpke za ugradnju. Program sam radi proračun crpke nakon što se u prozoru analysis summary odabere „Jet pump design“. Prikaz proračunatih podataka prikazan je na Slici 3-10.



Slika 3.10. Prozor za unos podataka potrebnih za dimenzioniranje mlazne crpke

Program koristi sve prethodno unesene podatke kako bi napravio optimalan dizajn crpke. U odjeljku „Input data“ potrebno je ispuniti podatke o dubini crpke, najvećem vanjskom promjeru crpke, očekivanim protocima te udjelu plina u vodi. Također, s obzirom na to da su gubitci u pumpi uglavnom tajni podaci određeni eksperimentalno, u ovom radu gubitci će imati iznose prema teoriji Goslinea i O'Briena. Nakon unosa podataka pritiskom na tipku „Calculate Pump Duty“ (hrv. proračun crpke) program proračunava koje crpke mogu zadovoljiti zadane uvjete. Na temelju izračunatih podataka potrebno je odabrati pumpu. Kako bi se odabrala dobra pumpa potrebno je pregledati bazu podataka mlaznih crpki i odabrati onu koja omogućuje dovoljno velik protok. Nakon toga potrebno se vratiti u prozor za unos podataka za dizajniranje mlazne crpke i u gornjem desnom kutu prozora odabrati pumpu. Kako bi se crpka ubacila u model potrebno se vratiti na početni prozor i u odjeljku „Jet Pump“ potvrditi podatke koji su automatski preneseni iz prozora za unos podataka potrebnih za dimenzioniranje mlazne crpke. Tada je unos podataka završen, a rezultati su detaljno prikazani na donjem desnom dijelu prozora.



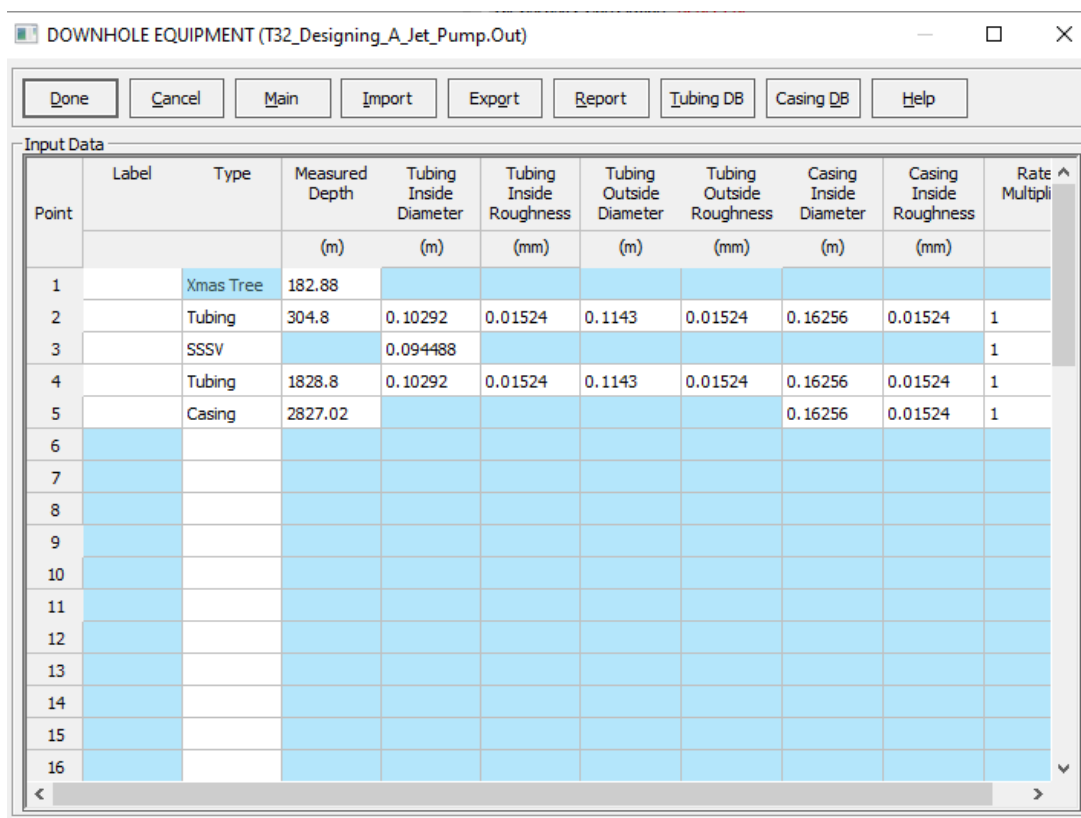
#### 4. PROJEKTIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA S MLAZNOM CRPKOM U BUŠOTINI X

U projektiranju (engl. Design) se pretpostavlja da naftno polje s bušotinom X, koja je odabrana za analizu povećanja proizvodnih mogućnosti, proizvodi već dugi niz godina. Tlak ležišta se smanjio, a udio vode u kapljevini popeo se na 80%. U ovom poglavlju projektira se sustav proizvodnje s dubinskom mlaznom crpkom, kako bi se povećao protok bušotine X. Za dizajniranje dubinske mlazne crpke koriste se koraci opisani u poglavlju 3.

##### 4.1. Ulazni podaci za bušotinu X

###### 4.1.1. Podaci o opremi bušotine X

Bušotina X odobalna je bušotina stvarne dubine 2743,2 metra. Bušotina je zacijevljena, a uz zaštitne cijevi i tubing ugrađen je i sigurnosni ventil. Slika 4-1. prikazuje ugrađenu podzemnu opremu. Ušće bušotine nalazi se na dubini od 182,88 metara jer se nalazi na dnu mora.



Point	Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside Diameter (m)	Tubing Inside Roughness (mm)	Tubing Outside Diameter (m)	Tubing Outside Roughness (mm)	Casing Inside Diameter (m)	Casing Inside Roughness (mm)	Rate Multiplier
1		Xmas Tree	182.88							
2		Tubing	304.8	0.10292	0.01524	0.1143	0.01524	0.16256	0.01524	1
3		SSSV		0.094488						1
4		Tubing	1828.8	0.10292	0.01524	0.1143	0.01524	0.16256	0.01524	1
5		Casing	2827.02					0.16256	0.01524	1
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										

Slika 4-1. Podzemna oprema ugrađena u bušotinu X

U prozor za unos podataka o podzemnoj opremi bitno je unijeti vanjske i unutarnje promjere tubinga i zaštitnih cijevi kako bi se prstenasti prostor točno definirao. U ovom slučaju koriste se zaštitne cijevi unutarnjeg promjera 0,163 m te tubing vanjskog promjera 0,1143 m i unutarnjeg promjera 0,103 m. Ugrađeni sigurnosni ventil ima unutarnji promjer 0,01 m koji je unesen u stupcu za unos unutarnjeg promjera tubinga (engl. Tubing inside diameter). Bušotina ima određeni otklon, a podaci o njemu prikazani su na Slici 4-2. Kao što je objašnjeno, unose se mjerena dubina i stvarna vertikalna dubina, a program izračunava horizontalni otklon i kut otklona.

Point	Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)
1	0	0	0	0
2	182.88	182.88	0	0
3	306.324	304.8	19.3374	9.01245
4	1242.06	1219.2	218.019	12.2587
5	2346.96	2286	505.668	15.0902
6	2827.02	2743.2	652.043	17.7528
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

**Slika 4-2.** Podaci o otklonu bušotine X

Uz ugrađenu opremu i poznate podatke o otklonu potrebno je unijeti i mjerene podatke o geotermalnom gradijentu (Slika 4-3.) te specifične topline vode, nafte i plina koji su prikazani u Tablici 4-1.

**Tablica 4-1.** Specifične topline nafte, plina i vode

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

GEOTHERMAL GRADIENT (T32\_Designing...)

Done Cancel Main Import Export Plot Help

Overall Heat Transfer Coefficient: 49.0755 W/m2/K

Formation Gradient  
 Depth Reference: RKB Enter Measured Depth

Point	Formation TVD (m)	Formation Measured Depth (m)	Formation Temperature (deg C)
1	0	0	15.5556
2	182.88	182.88	4.44444
3	2743.2	2827.02	98.8889
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

**Slika 4-3.** Poznati podaci potrebni za izračunavanje geotermalnog gradijenta

#### 4.1.2. PVT podaci

Poznati podaci o proizvodnom fluidu znani su iz prethodnih laboratorijskih testiranja i prikazani u Tablici 4-2.

**Tablica 4-2.** PVT podaci o ležišnom fluidu

GOR	141,76 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Gustoća nafte	839,76 kg/m <sup>3</sup>
Relativna gustoća plina	0,76
Salinitet vode	23 000 ppm

Prilikom unosa PVT potrebnih PVT podataka biti će potrebno unijeti i podatke o pogonskom fluidu. U ovom slučaju pogonski fluid je voda saliniteta 75 000 ppm.

#### 4.1.3. Podaci za izračun IPR krivulje

U Tablici 4-3. prikazani su osnovni podaci za izračun krivulje. Uz njih potrebno je unijeti i podatke o svemu ostalome što utječe na utok fluida iz ležišta, a to su u ovom slučaju podaci o skinu i pješčanom zasipu.

**Tablica 4-3.** Osnovni podaci za izračun IPR krivulje

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

#### 4.1.4. Kriteriji za dizajniranje mlazne crpke

U sljedećoj tablici (4-4.) nalaze se glavni kriteriji za ugradnju dubinske mlazne crpke

**Tablica 4-4.** Kriteriji za dizajniranje mlazne crpke

Mjerena dubina ugradnje crpke (engl. <i>Pump Depth (Measured)</i> )	1828,8 m
Najveći dozvoljeni vanjski promjer crpke (engl. <i>Maximum OD</i> )	0,16256 m
Dizajnirani protok crpke (engl. <i>Design rate</i> )	636 m <sup>3</sup> /dan
Udio vode (engl. <i>Water Cut</i> )	80%
GOR	141 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Tlak na ušću bušotine (engl. <i>Top Node Pressure</i> )	7,9 bar
Protok pogonskog fluida (engl. <i>Surface Injection Rate</i> )	1590 m <sup>3</sup> /dan
Tlak pogonskog fluida (engl. <i>Surface injection pressure</i> )	139 bar
Koeficijent gubitka na mlaznici (engl. <i>Nozzle Loss Coefficient</i> )	0,15
Koeficijent gubitka u grlu (engl. <i>Throat Loss Coefficient</i> )	0
Koeficijent gubitka u difuzoru (engl. <i>Diffuser Loss Coefficient</i> )	0,28
Korelacija za gradijente tlakova (engl. <i>Vertical Lift Correlation</i> )	Petroleum Experts 2

## 4.2. Postavljanje modela proizvodne bušotine X

Ovo poglavlje prikazuje dimenzioniranje mlazne crpke prema koracima opisanima u poglavlju 3. Dimenzioniranje počinje početnim zaslonom (Slika 3-1.). Prvo je potrebno popuniti prozor „System Summary“. Slika 4-4. prikazuje prozor s ulaznim podacima vezanim uz bušotinu X.

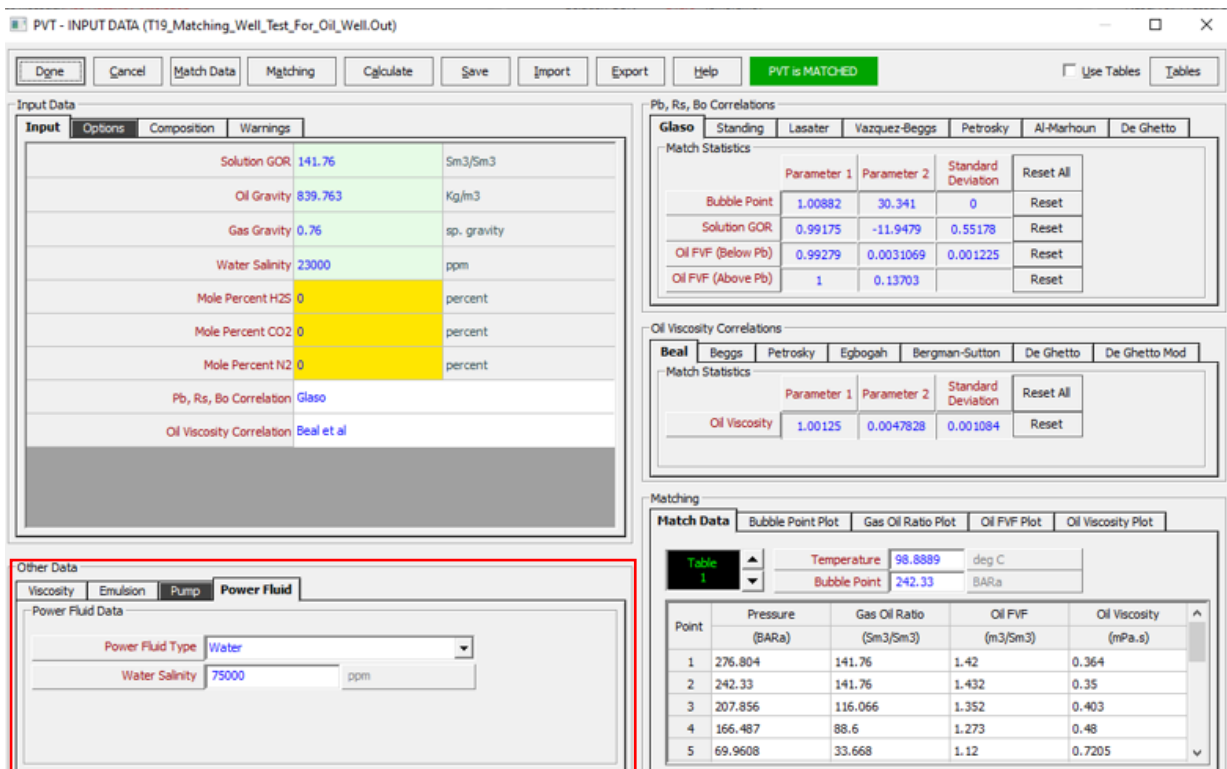
The screenshot shows the 'System Summary' dialog box for well 'T19\_Matching\_Well\_Test\_For\_Oil\_Well.Out'. The dialog is organized into several sections:

- Fluid Description:** Fluid (Oil and Water), Method (Black Oil), Separator (Single-Stage Separator), Emulsions (No), PVT Warnings (Disable Warning), Water Viscosity (Use Default Correlation), Viscosity Model (Newtonian Fluid).
- Calculation Type:** Predict (Pressure and Temperature (offshore)), Model (Rough Approximation), Range (Full System).
- Brine Modelling:** Brine Properties Correlation (Default).
- Well:** Flow Type (Tubing Flow), Well Type (Producer).
- Well Completion:** Type (Cased Hole), Sand Control (Gravel Pack).
- Artificial Lift:** Method (Jet Pump), Type (Annular Injection - Tubing Production).
- Reservoir:** Inflow Type (Single Branch), Gas Coning (No).
- User information:** Company, Field, Location, Well, Platform, Analyst, Date (15. travnja 2023.).
- Comments:** A text area for additional notes.

Slika 4-4. Prozor System Summary s ulaznim podacima o bušotini X

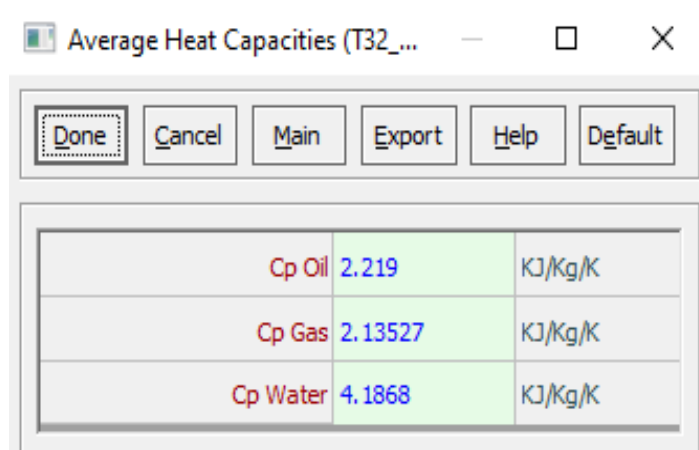
Na slici je vidljivo kako se proizvode nafta i voda, a odabrana metoda za buduće proračune je Black Oil. Na površini je jednofazni separator i nema emulzija. Odabrana je standardna korelacija za viskoznost vode i model viskoznosti. Bušotina je proizvodna, a za metodu umjetnog podizanja odabrana je dubinska mlazna crpka. Pogonski fluid se utiskuje u prstenasti prostor, a na površinu dolazi zajedno s proizvodnim kroz tubing. U modelu se predviđaju i temperatura i tlak po modelu grube aproksimacije. Bušotina je jednokanalna, nema konusiranja plina i ugrađen je pješčani zasip.

Nakon unosa osnovnih podatka o bušotini potrebno je unijeti podatke o fluidima. U PVT prozoru unose se podaci iz Tablice 4-2. Također, kao što je već rečeno potrebno je definirati i pogonski fluid. Pogonski fluid definira se u odjeljku prozora označenim crvenim kvadratom na Slici 4-5.



Slika 4-5. PVT - INPUT DATA prozor s unesenim podacima o bušotini X

Za pogonski fluid odabrana je obrađena morska voda saliniteta 75000 ppm. Na desnoj strani prozora moguće je odabrati korelacije za određene parametre. Glaso korelacija je odabrana za  $P_b$ , GOR,  $R_s$  i  $B_o$ , a za viskoznost je odabrana Beal korelacija. Nakon unosa svih podataka potrebno je odabrati „Match Data“ kako bi se svi podaci uskladili. Zeleni kvadratić u kojem piše „PVT is MATCHED“ znači da je sve dobro usklađeno i prozor se može zatvoriti pritiskom na tipku Done. Nakon definiranja svojstava fluida, potrebno je unijeti podatke o opremi. S početnog zaslona pritiskom na „Equipment data“ otvara se prozor kao na Slici 3-4. Podaci o otklonu, podzemnoj opremi i geotermalnom gradijentu prikazani su na Slikama 4-1., 4-2. i 4.3. Podaci o površinskoj opremi ne unose se jer ne utječu na dizajniranje dubinske mlazne crpke. Slika 4-6. prikazuje prozor s unesenim vrijednostima specifičnih toplina nafte, plina i vode.



**Slika 4-6.** Specifične topline nafte, plina i vode

S unosom specifičnih toplina završen je unos podataka u opremi i odabirom tipke Done podaci se spremaju i prikazuje se početni prozor.

Posljednji unos podataka prije dizajniranja dubinske mlazne crpke je unos podataka za dobivanje IPR krivulje. Odabirom sekcije IPR data iz početnog zaslona prikazuje se prozor kao na Slici 3-9. Nakon unosa poznatih podataka o bušotini X prozor izgleda kao na Slici 4-7. Odabran je Darcy kao model ležišta, korelacije za skin te pješčani zasip kao metoda zaštite od utoka pijeska.

Done Help Cancel Export Calculate Yieldable Plot Re-set

Test Data Sensitivity Sand Failure

Trigger Data

Model Data

Reservoir Model: **Darcy Reservoir Model**

Rel Perms: Viscosity: Composition:

Reservoir Permeability	50	md
Reservoir Thickness	30.48	m
Drainage Area	2023450	m.2
Dictz Shape Factor	31.6	
Wellbore Radius	0.1079	m

Calculate Dictz

Reservoir Data

Reservoir Pressure	242.33	BARa
Reservoir Temperature	100	deg C
Water Cut	80	percent
Total GOR	141.76	Sm3/Sm3

Compaction Permeability Model: No  
Relative Permeability: No

Reservoir Model

PT Entry Vogel

Composite

Falkovich

Muir-Kreft

Jones-Lake Jones

Transient

Hydraulically Fractured Well

Horizontal Well - No Flow Boundaries

Horizontal Well - Constant Pressure Upper Boundary

Multi-Layer Reservoir

External Entry

Horizontal Well - GP Friction Loss In Wellbore

SkinAids (ELF) Loss In Wellbore

Dual Porosity

Horizontal Well - Transverse Vertical Fractures

SFOI

Mechanical/Geometric Skin

Enter Skin By Hand

Loose

Gravel Pack

Karakas7 Jarq

Deviation/Partial Penetration Skin

Cinco / Marting-Brons

Cinco (2) / Marting-Brons

Cinco (2) / Marting-Brons

Sand Control

None

Gravel Pack

Pre-Installed Screen

Flow Screen

Slotted Liner

Formation PI (No Skin): 26.1073 (Sm3/day/bar)

Skin: 1.58579

**INFLOW PERFORMANCE DATA (OIL WELL)**

Inflow Type: Single Branch  
Completion: Cased Hole  
Sand Control: Gravel Pack  
Gas Coning: No  
Reservoir Permeability: No  
M&G Skin Model: Karakas7 Jarq  
D&PP Skin Model: Cinco (2) / Marting-Brons

Perm(k) Reduction Model No: 242.33 (BARa)  
Relative Permeability No: 100 (deg C)  
Reservoir Temperature: 80 (percent)  
Water Cut: 141.76 (Sm3/Sm3)  
Total GOR: 141.76 (Sm3/Sm3)

**CALCULATED DATA**

ADP: 2413.15 (Sm3/day)  
Formation PI (No Skin): 26.1073 (Sm3/day/bar)  
Skin: 1.58579

**Plot**

**Results**

Point	Rate (Sm3/day)	Pressure (BARa)	Temperature (deg C)	Temperature @ Total Skin (deg C)
1	0.00015899	242.33	100	0
2	137.008	234.316	100.154	1.68295
3	254.016	226.021	100.313	3.61385
4	381.023	217.44	100.478	5.7979
5	508.031	208.563	100.648	8.24099
6	635.039	199.381	100.823	10.9497
7	762.046	189.881	101.005	13.9321
8	889.054	180.049	101.192	17.1976
9	1016.06	169.87	101.385	20.7358
10	1143.07	159.321	101.585	24.63
11	1270.08	148.375	101.791	28.8323

Slika 4-7. Prozor IPR DATA s unesenim podacima o bušotini X



Uz osnovne podatke o ležištu potrebno je unijeti i podatke koji određuju utok fluida u bušotinu vezane uz skin i pješčani zasip. Slika 4-8. pokazuje podatke vezane u skin koji se unose u odjeljku model data u kartici „Mech-Geo Skin“.

Model Data

Reservoir Model | **Mech-Geo Skin** | Dev+PP Skin | Sand Control | Rel Perms | Viscosity | Compaction

Karakas+Tariq Mechanical Skin Model

Calculate Perforation Details - ΔPI RP43      Calculate Perforation Details - SPOT

Reservoir Permeability	50	md
Shot Density	26.2467	1/m
Perforation Diameter	0.010922	m
Perforation Length	0.23368	m
Perforation Efficiency	0.9	fraction
Damaged Zone Thickness	0.2032	m
Damaged Zone Permeability	25	md
Crushed Zone Thickness	0.00508	m
Crushed Zone Permeability	12.5	md
Shot Phasing	120	degrees
Wellbore Radius	0.1079	m
Vertical Permeability	5	md

Slika 4-8. Podaci za izračun skina

Na sljedećoj slici prikazani su ulazni podaci za postavljanje pješčanog zasipa.

Model Data

Reservoir Model | Mech-Geo Skin | Dev+PP Skin | **Sand Control** | Rel Perms | Viscosity | Compaction

Gravel Pack Sand Control Model

Typical Values		
Gravel Type	Mesh Size	Lab Permeability
		mDarcy
Ottawa Sand	12/20	500000
	20/40	150000
	30/50	90000
	40/60	60000
Carbolite	50/70	30000
	20/40	350000
Isopac	16/20	500000
	20/40	110000

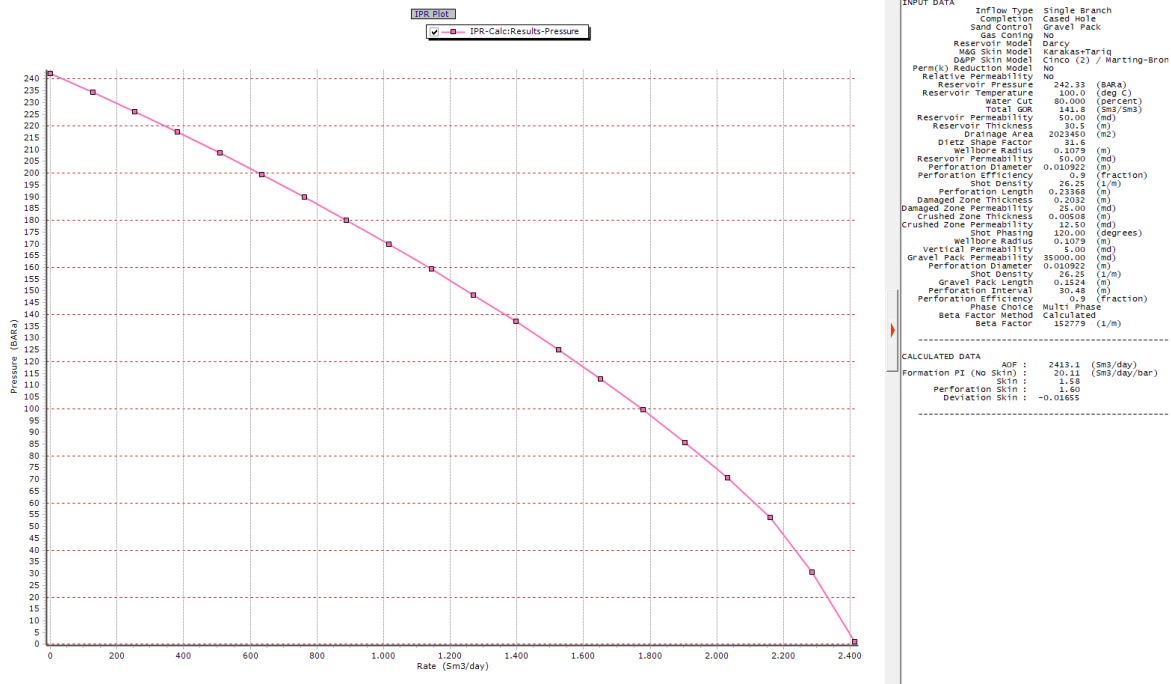
  

Gravel Pack Permeability	35000	md
Perforation Diameter	0.010922	m
Shot Density	26.2467	1/m
Gravel Pack Length	0.1524	m
Perforation Interval	30.48	m
Deviation	13	degrees
Perforation Efficiency	0.9	fraction
Beta Factor Method	Calculated	
Beta Factor	152779	1/m
Phase Choice	Multi Phase	

Slika 4-9. Podaci za pješčani zasip

Nakon unosa svih podataka potrebno je odabrati „Calculate“ kako bi program mogao izračunao podatke za IPR krivulju, maksimalnu teoretsku proizvodnju (engl. *Absolute Open Flow*) te indeks proizvodnosti. U ovom slučaju program je izračunao da je maksimalna

teoretska proizvodnja 2413 m<sup>3</sup>/dan. Odabirom tipke „Plot“ moguće je prikazati IPR krivulju (Slika 4-10.).



Slika 4-10. IPR krivulja

Sada kada su uneseni svi podaci vezani uz ležište i bušotinu moguće je dizajnirati dubinsku mlaznu crpku. Prozor za dizajniranje mlazne crpke otvara se s početnog prozora na kartici „Design“ u kojoj se odabere „Jet pump“. Slika 4-11. prikazuje prozor za dizajniranje mlazne crpke ispunjen podacima iz Tablice 4-4.

Calculate Pump Duty		Done	Cancel	Report	Export	Help
<b>Input Data</b>						
Pump Depth (Measured)	1828.8	m				
Maximum CD	0.16256	m				
Design (Liquid) Rate	635.949	Sm <sup>3</sup> /day				
Water Cut	30	percent				
Total GOR	141.76	Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup>				
Top Node Pressure	7.90801	BARa				
Surface Injection Rate	1589.87	Sm <sup>3</sup> /day				
Surface Injection Pressure	138.908	BARa				
Nozzle Loss Coefficient	0.15					
Suction Loss Coefficient	0					
Throat Loss Coefficient	0.28					
Diffuser Loss Coefficient	0.1					
Surface Equipment Correlation	Beggs and Brill					
Vertical Lift Correlation	Petroleum Experts 2 1.03 1.01					
<b>Pump Duty</b>						
Well Head Pressure	7.90801	(BARa)				
Flowing BH Pressure	199.834	(BARa)				
Pump Intake Pressure	112.324	(BARa)				
Pump Intake Rate	775.649	(m <sup>3</sup> /day)				
Free GOR Entering Pump	84.4019	(Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )				
Pump Discharge Pressure	169.672	(BARa)				
Pump Discharge Rate	2357.12	(m <sup>3</sup> /day)				
Total GOR Above Pump	141.76	(Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )				
Mass Flow Rate	654101	(kg/day)				
Total Fluid Gravity	0.87729	(sp. gravity)				
Average Downhole Rate	745.573	(m <sup>3</sup> /day)				
Head Required	667.256	(m)				
Fluid Power required	49.3786	(kW)				
GLR @ Pump Intake(V/V)	0.039025					
Bo @ Pump Intake	1.17206	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )				
Inlet Temperature	87.0319	(deg C)				
Bg @ Pump Intake	0.009484	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )				
Power Fluid Injection Rate	1598.71	(Sm <sup>3</sup> /day)				
Power Fluid Surface Injection Pressure	138.908	(BARa)				
Nozzle Injection Pressure	293.4	(BARa)				
Dimensionless Flow Ratio (M)	0.46632					
Dimensionless Head Recovery Ratio (H)	0.4635					
Pump Efficiency (No Gas)	21.6139	(percent)				
Pump Efficiency (Gas)	21.6154	(percent)				
Surface Power Required	540.579	(kW)				
Algebraic Constant (N)	0.53561					
Area Ratio (R)	0.5					
Aj (Nozzle Area)	0.15049	(m <sup>2</sup> )				
At (Throat Area)	0.30098	(m <sup>2</sup> )				
Dj (Nozzle Diameter)	0.011118	(m)				
Dt (Throat Diameter)	0.015724	(m)				
Power Fluid Rate (Min Dj = 0.00371)	0.11421	(Sm <sup>3</sup> /day)				
Power Fluid Rate (Actual)	1598.71	(Sm <sup>3</sup> /day)				
Power Fluid Rate (Max Dj = 0.25715)	548.684	(Sm <sup>3</sup> /day)				
Mc (Ic = 0.80)	0.70689					
Mc (Ic = 1.35)	0.59984					
Mc (Ic = 1.67)	0.55625					
Power Fluid Static Gradient	165.42	(bar)				
Power Fluid Friction Gradient	-10.9282	(bar)				
No Cavitation Problems.						
<b>Select Pump</b>						
<b>Results</b>						
Parameter	Units	Desired				
Well Head Pressure	(BARa)	7.90801				
Flowing BH Pressure	(BARa)	198.834				
Pump Intake Pressure	(BARa)	112.324				
Pump Intake Rate	(m <sup>3</sup> /day)	775.649				
Free GOR Entering Pump	(Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	84.4019				
Pump Discharge Pressure	(BARa)	169.672				
Pump Discharge Rate	(m <sup>3</sup> /day)	2357.12				
Total GOR Above Pump	(Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	141.76				
Mass Flow Rate	(kg/day)	654101				
Total Fluid Gravity	(sp. gravity)	0.87729				
Average Downhole Rate	(m <sup>3</sup> /day)	745.573				
Head Required	(m)	667.256				
Fluid Power required	(kW)	49.3786				
GLR @ Pump Intake(V/V)		0.039025				
Bo @ Pump Intake	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	1.17206				
Inlet Temperature	(deg C)	87.0319				
Bg @ Pump Intake	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	0.009484				
Power Fluid Injection Rate	(Sm <sup>3</sup> /day)	1598.71				
Power Fluid Surface Injection Pressure	(BARa)	138.908				
Nozzle Injection Pressure	(BARa)	293.4				
Dimensionless Flow Ratio (M)		0.46632				
Dimensionless Head Recovery Ratio (H)		0.4635				
Pump Efficiency (No Gas)	(percent)	21.6139				
Pump Efficiency (Gas)	(percent)	21.6154				
Surface Power Required	(kW)	540.579				
Algebraic Constant (N)		0.53561				
Area Ratio (R)		0.5				
Aj (Nozzle Area)	(m <sup>2</sup> )	0.15049				
At (Throat Area)	(m <sup>2</sup> )	0.30098				
Dj (Nozzle Diameter)	(m)	0.011118				
Dt (Throat Diameter)	(m)	0.015724				
Power Fluid Rate (Min Dj = 0.00371)	(Sm <sup>3</sup> /day)	0.11421				
Power Fluid Rate (Actual)	(Sm <sup>3</sup> /day)	1598.71				
Power Fluid Rate (Max Dj = 0.25715)	(Sm <sup>3</sup> /day)	548.684				
Mc (Ic = 0.80)		0.70689				
Mc (Ic = 1.35)		0.59984				
Mc (Ic = 1.67)		0.55625				
Power Fluid Static Gradient	(bar)	165.42				
Power Fluid Friction Gradient	(bar)	-10.9282				

Slika 4-11. Ulazni podaci za proračun dubinske mlazne crpke

Odabirom tipke „Calculate Pump Duty“ program prikazuje proračunate podatke (Slika 4-12.)

Pump Duty		
Well Head Pressure	7.90801	(BARa)
Flowing BH Pressure	199.314	(BARa)
Pump Intake Pressure	112.779	(BARa)
Pump Intake Rate	774.967	(m <sup>3</sup> /day)
Free GOR Entering Pump	84.143	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Pump Discharge Pressure	169.672	(BARa)
Pump Discharge Rate	2357.11	(m <sup>3</sup> /day)
Total GOR Above Pump	141.76	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mass Flow Rate	654101	(kg/day)
Total Fluid Gravity	0.87757	(sp. gravity)
Average Downhole Rate	745.332	(m <sup>3</sup> /day)
Head Required	661.756	(m)
Fluid Power required	48.9716	(kW)
GLR @ Pump Intake(V/V)	0.038709	
Bo @ Pump Intake	1.17277	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )
Inlet Temperature	87.0319	(deg C)
Bg @ Pump Intake	0.0094417	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )
Power Fluid Injection Rate	1598.71	(m <sup>3</sup> /day)
Power Fluid Surface Injection Pressure	138.908	(BARa)
Nozzle Injection Pressure	293.4	(BARa)
Dimensionless Flow Ratio (M)	0.46617	
Dimensionless Head Recovery Ratio (H)	0.45983	
Pump Efficiency (No Gas)	21.4358	(percent)
Pump Efficiency (Gas)	21.4373	(percent)
Surface Power Required	540.577	(kW)
Algebraic Constant (N)	0.53817	
Area Ratio (R)	0.5	
Aj (Nozzle Area)	0.1507	
At (Throat Area)	0.3014	
Dj (Nozzle Diameter)	0.011126	(m)
Dt (Throat Diameter)	0.015735	(m)
Power Fluid Rate (Min Dj = 0.00371)	0.11405	(m <sup>3</sup> /day)
Power Fluid Rate (Actual)	1598.71	(m <sup>3</sup> /day)
Power Fluid Rate (Max Dj = 0.25715)	547.906	(m <sup>3</sup> /day)
Mc (Ic = 0.80)	0.70821	
Mc (Ic = 1.35)	0.6012	
Mc (Ic = 1.67)	0.55759	
Power Fluid Static Gradient	165.42	(bar)
Power Fluid Friction Gradient	-10.9282	(bar)
No Cavitation Problems.		

Slika 4-12. Proračunati podaci o mlaznoj crpki

Kako bi se odabrala prava crpka potrebno je pregledati bazu podataka dubinskih mlaznih crpki i odabrati onu koja zadovoljava uvijete protoka pogonskog fluida. S obzirom na to da je za željeni protok kapljevine od 636 m<sup>3</sup>/dan (Tablica 4-4) potreban ukupan protok pogonskog fluida od 1590 m<sup>3</sup>/dan, treba odabrati crpku kojoj je taj protok između minimalnog i maksimalnog. U ovom slučaju odabrana je crpka s omjerom tipa A. Po klasifikaciji programa Prosper odabrana je mlaznica broj 18 promjera 0,011633 m te grlo broj jedan promjera 0,018169 m (Slika 4-13).

Options											
Options	GasLift	ESP	HSP	PCP	JET	MultiPhase	SRP				
Manufacturer	Pump Series	Pump Model	Ratio Type	Pump Size	Minimum Rate	Maximum Rate	Nozzle Number	Nozzle Diameter	Throat Number	Throat Diameter	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	31.8	47.7	1	0.0017457	1	0.0027264	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	39.75	59.625	2	0.0019518	1	0.0030482	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	49.608	74.571	3	0.0021822	1	0.003408	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	62.01	93.174	4	0.0024397	1	0.0038102	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	77.592	116.388	5	0.0027277	1	0.0042599	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	96.99	145.485	6	0.0030497	1	0.0047628	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	121.158	181.896	7	0.0034096	1	0.0053249	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	151.368	227.37	8	0.0038121	1	0.0059535	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	189.21	284.292	9	0.004262	1	0.0066562	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	236.592	355.365	10	0.0047651	1	0.0074418	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	295.74	444.246	11	0.0053275	1	0.0083202	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	369.675	555.228	12	0.0059564	1	0.0093023	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	462.054	694.035	13	0.0066594	1	0.0104	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	577.488	867.504	14	0.0074454	1	0.011628	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	721.86	1084.38	15	0.0083243	1	0.013	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	902.325	1355.47	16	0.0093068	1	0.014535	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	1127.95	1694.3	17	0.010405	1	0.01625	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	1410.01	2117.88	18	0.011633	1	0.018169	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	1762.52	2647.35	19	0.013007	1	0.020313	
Test	Sample	Pump #1	A	0.1143	2203.1	3309.11	20	0.014542	1	0.022711	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	31.8	47.7	1	0.0017457	2	0.0030482	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	39.75	59.625	2	0.0019518	2	0.003408	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	49.608	74.571	3	0.0021822	2	0.0038102	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	62.01	93.174	4	0.0024397	2	0.0042599	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	77.592	116.388	5	0.0027277	2	0.0047628	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	96.99	145.485	6	0.0030497	2	0.0053249	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	121.158	181.896	7	0.0034096	2	0.0059535	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	151.368	227.37	8	0.0038121	2	0.0066562	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	189.21	284.292	9	0.004262	2	0.0074418	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	236.592	355.365	10	0.0047651	2	0.0083202	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	295.74	444.246	11	0.0053275	2	0.0093023	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	369.675	555.228	12	0.0059564	2	0.0104	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	462.054	694.035	13	0.0066594	2	0.011628	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	577.488	867.504	14	0.0074454	2	0.013	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	721.86	1084.38	15	0.0083243	2	0.014535	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	902.325	1355.47	16	0.0093068	2	0.01625	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	1127.95	1694.3	17	0.010405	2	0.018168	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	1410.01	2117.88	18	0.011634	2	0.020313	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	1762.52	2647.35	19	0.013007	2	0.022711	
Test	Sample	Pump #1	B	0.1143	2203.1	3309.11	20	0.014542	2	0.025391	
Test	Sample	Pump #1	C	0.1143	31.8	47.7	1	0.0017457	3	0.0034106	
Test	Sample	Pump #1	C	0.1143	39.75	59.625	2	0.0019518	3	0.0038131	
Test	Sample	Pump #1	C	0.1143	49.608	74.571	3	0.0021822	3	0.0042632	

Slika 4-13. Odabir dubinske mlazne crpke iz baze podataka programa prosper

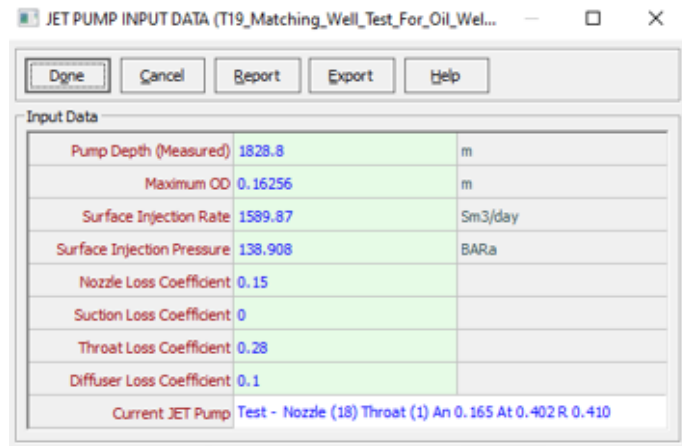
Nakon pronalazjenja pumpe koja zadovoljava protok pogonskog fluida potrebno se vratiti u prozor za dizajniranje mlazne crpke. Na desnoj strani izbornika potrebno je pronaći i odabrati željenu crpku kako bi program prikazao stvarne podatke u usporedbi sa željenima tj. projektiranima (Slika 4-14).

Select Pump			
Test - Nozzle (18) Throat (1) An 0.165 At 0.402 R 0.410			
Results			
Parameter	Units	Desired	Actual
Well Head Pressure	(BARa)	7.90801	9.11175
Flowing BH Pressure	(BARa)	199.314	199.314
Pump Intake Pressure	(BARa)	112.779	112.779
Pump Intake Rate	(m <sup>3</sup> /day)	774.967	773.946
Free GOR Entering Pump	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	84.143	67.168
Pump Discharge Pressure	(BARa)	169.672	171.524
Pump Discharge Rate	(m <sup>3</sup> /day)	2357.11	2357.11
Total GOR Above Pump	(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	141.76	141.76
Mass Flow Rate	(kg/day)	654101	654101
Total Fluid Gravity	(sp. gravity)	0.87757	0.87623
Average Downhole Rate	(m <sup>3</sup> /day)	745.332	746.478
Head Required	(m)	661.756	684.346
Fluid Power required	(kW)	48.9716	50.6433
GLR @ Pump Intake(V/V)		0.038709	0.082112
Bo @ Pump Intake	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	1.17277	1.2232
Inlet Temperature	(deg C)	87.0319	
Bg @ Pump Intake	(m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	0.0094417	0.0074769
Power Fluid Injection Rate	(m <sup>3</sup> /day)	1598.71	1598.71
Power Fluid Surface Injection Pressure	(BARa)	138.908	138.908
Nozzle Injection Pressure	(BARa)	293.4	293.4
Dimensionless Flow Ratio (M)		0.46617	0.46689
Dimensionless Head Recovery Ratio (H)		0.45983	0.48201
Pump Efficiency (No Gas)	(percent)	21.4358	22.5044
Pump Efficiency (Gas)	(percent)	21.4373	22.5053
Surface Power Required	(kW)	540.577	540.577
Algebraic Constant (N)		0.53817	0.52291
Area Ratio (R)		0.5	0.40999
Aj (Nozzle Area)		0.1507	0.16476
At (Throat Area)		0.3014	0.40185
Dj (Nozzle Diameter)	(m)	0.011126	0.011633
Dt (Throat Diameter)	(m)	0.015735	0.018169
Power Fluid Rate (Min Dj = 0.00371)	(m <sup>3</sup> /day)	0.11405	0.11413
Power Fluid Rate (Actual)	(m <sup>3</sup> /day)	1598.71	1598.71
Power Fluid Rate (Max Dj = 0.25715)	(m <sup>3</sup> /day)	547.906	548.327
Mc (Ic = 0.80)		0.70821	1.01917
Mc (Ic = 1.35)		0.6012	0.86518
Mc (Ic = 1.67)		0.55759	0.80242
Power Fluid Static Gradient	(bar)	165.42	165.42

**Slika 4-14.** Stvarne karakteristike mlazne crpke

Iz prikazanih rezultata je vidljivo da crpka pri dinamičkom tlaku na ušću bušotine od 7,9 bar ostvaruje traženi protok proizvodnog fluida uz dinamički tlak na dnu od 199,31 bar, pri čemu je tlak smjese tj. potisni tlak (engl. discharge) 169,72 bar. Prema ovim podacima modeliran je proizvodni sustav bušotine, kako bi se mogla provesti analiza osjetljivosti za buduće promjene u sustavu, pa se primjerice kod rezultata u Tablici 4-6 vidi da program kod računatih vrijednosti radnih točaka sustava postavlja one vrijednosti koje su približne navedenima, odnosno da se dinamički tlak na dnu samo neznatno razlikuje i iznosi 198,63 bar, što znači da model sustava ima visoku točnost od oko 99%.

Nakon odabira crpke i prikaza stvarnih podataka potrebno je završiti unos pritiskom na tipku Done. Da bi se crpka ubacila u model potrebno je s početnog prozora otvoriti prozor „Jet Pump Input Data“ (Slika 4-15.) u koju će biti preneseni podaci o prethodno odabranoj crpki.



**Slika 4-15.** Jet pump input data prozor

Pritiskom na tipku Done, crpka je ubačena u model i moguće je napraviti modeliranje proizvodnog sustava tj. proračun IPR i VLP krivulja te analizu osjetljivosti.

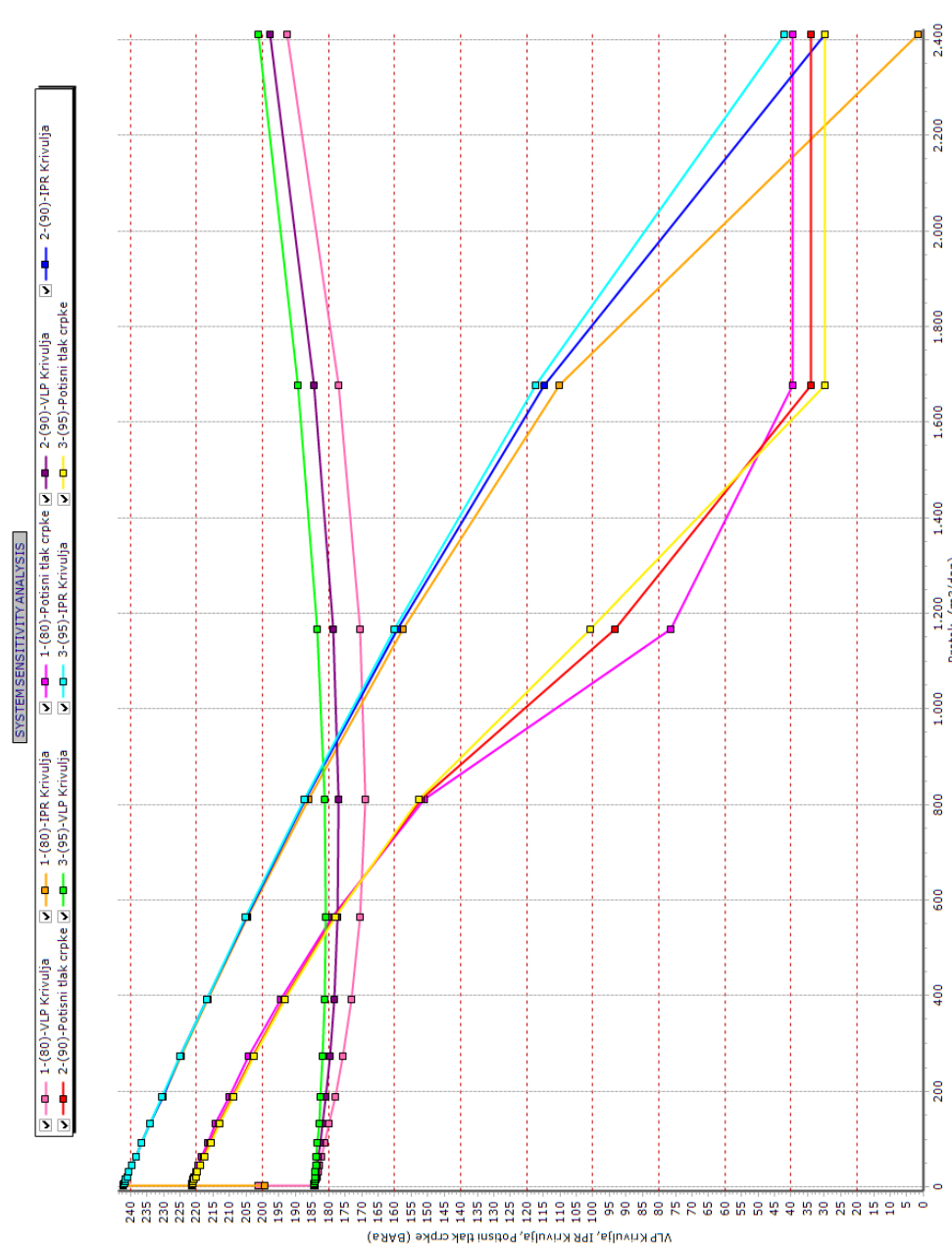
#### 4.2.1. Analiza osjetljivosti i diskusija rezultata

Izračunata IPR krivulja za sustav s ugrađenom dubinskom mlaznom crpkom prikazana je na Slici 4-10. U ovom poglavlju su prikazane radne točke proizvodnog sustava i napravljena je analiza osjetljivosti, koja se provodi u svrhu prognoziranja rada bušotine u promijenjenim ležišnim uvjetima, koji se mogu očekivati u budućnosti. Za potrebe ovog rada napravljene su analize osjetljivosti s obzirom na promjenu tj. povećanje udjela vode u proizvodnji te, odvojeno, u slučaju promjene tj. pada ležišnog tlaka. Slika 4-16. prikazuje IPR i VLP krivulje te krivulje potisnog tlaka crpki za tri različita slučaja udjela vode u nafti. Pretpostavljeno je da bi udio vode mogao rasti s trenutnih 80%, pa su uz osnovni u iznosu od 80%, prikazani i udjeli od 90% i 95%. Ova analiza osjetljivosti predviđa koliko će se ugljikovodika proizvoditi u slučaju da ležišni tlak ne pada s trenutnih 242 bara, dok bi udio vode rastao.

Fluid G1  
 Separator Single-Off  
 Emulsions No  
 Hydrolys Diesel Wearing  
 Water Vapour No  
 Viscosity Model Newtonian Fluid  
 Steam Option No  
 Well Type Producer  
 Artificial Lift Jet Pump  
 Completion Cased Hole  
 Temperature Model Full System  
 Range Rough Approximation  
 Completion Cased Hole  
 Inflow Type Single Branch  
 Gas Coning No  
 Date 15.04.2023

SYSTEM SENSITIVITY ANALYSIS - INPUT DATA  
 Top Node Pressure (bara) 80.000  
 Water Cut 80.000 (Percent)  
 Total GOR 141.8 (m3/m3)  
 Surface Equipment Correlation Beggs and Brill  
 Vertical Lift Rate Method Automatic - Geometr  
 Left-Hand Intersection DisATlow  
 PES Stability Flag No  
 Bottom Wellbore Depth 2243.2 (m)  
 Bottom True Vertical Depth 2243.2 (m)  
 Jet Pump Test - Nozzle (L8)

INFLOW PERFORMANCE DATA (OIL WELL)  
 Inflow Type Single Branch  
 Completion Gased Hole  
 Sag Gas Coning No  
 Reservoir Model Darcy  
 Perm(k) Reduction Model Carakas-Tarig  
 Reservoir Pressure No  
 Reservoir Permeability No  
 Reservoir Thickness 242.33 (bara)  
 Water Cut 80.000 (Percent)  
 Total GOR 141.8 (m3/m3)  
 Reservoir Permeability 50.00 (md)  
 Drainage Area 2003450 (m2)  
 Dietz Shape Factor 31.6 (m)  
 Wellbore Radius 0.1079 (m)  
 Reservoir Permeability 50.00 (md)  
 Perforation Diameter 0.010922 (m)  
 Perforation Efficiency 0.010922 (Fraction)  
 Shot Density 26.25 (1/m)  
 Damaged Zone Thickness 0.2092 (m)  
 Crushed Zone Permeability 0.00598 (mD)  
 Crushed Zone Thickness 25.00 (m)  
 Wellbore Radius 0.1079 (m)  
 Vertical Permeability 5.00 (md)  
 Gravel Pack Length 300.40 (m)  
 Perforation Diameter 0.010922 (m)  
 Shot Density 26.25 (1/m)  
 Gravel Pack Length 300.40 (m)  
 Perforation Efficiency 0.010922 (Fraction)  
 Phase Choice Multi Phase  
 Beta Factor Method Calculated  
 Beta Factor 152779 (1/m)



Slika 4-16. Analiza osjetljivosti za različite udjele vode

**Tablica 4-5.** Rezultati analize osjetljivosti za različite udjele vode

Slučaj	Udio vode, %	$p_3$ , bar	$p_2$ , bar	$q_3$ , m <sup>3</sup> /dan	$q_w$ , m <sup>3</sup> /dan	$q_o$ , m <sup>3</sup> /dan
1	80	198,63	169,92	643,36	514,69	128,67
2	90	204,17	177,16	574,52	517,07	57,45
3	95	207,34	180,85	531,81	505,22	26,59

Rezultati se odnose na nomenklaturu mlazne crpke i već opisane oznake uz Sliku 2-8., s time da program, osim grafičkog prikaza radnih točki na Slici 4-16., rezultate daje i preciznije tj. tabelarno. Stoga su u svrhu diskusije rezultata u Tablici 4-5. izdvojene samo ključne vrijednosti, pri čemu je u zadnje dvije kolone protok proizvodnog fluida,  $q_3$ , iskazan kao suma protočne količina vode,  $q_w$ , i proizvedene nafte,  $q_o$ . Slučaj 1 odnosi se na proizvodne mogućnosti crpke za koje je postavljen cjelokupni proizvodni model, a glavni zaključak ove analize je da bi odabrana crpka radila i kod povećanih udjela vode, ali uz znatno niže količine proizvedene nafte. U slučaju 2 proizvodnja nafte bila dva puta manja u odnosu na 1. slučaj i iznosila bi 57,45 m<sup>3</sup>/dan, a u slučaju 3 bi bila samo 26,59 m<sup>3</sup>/dan.

Radna točka proizvodnog sustava bušotine s dubinskom mlaznom crpkom odnosi se na protok i dinamički tlak bušotine ( $q_3$ ,  $p_3$ ). Pri tome je  $p_3$  tlak na IPR krivulji, ali se ova točka na Slikama 4-16 i 4-17 ne očitava kao kod eruptivnog rada bušotine na presjecištu VLP i IPR krivulja, već na presjecištu VLP-a i krivulje potisnog tlaka crpke ( $q_3$ ,  $p_2$ ), jer proizvodne uvjete bušotine ( $q_3$ ,  $p_3$ ) ostvaruje crpka i to uz tlak i protok pogonskog fluida ( $q_1$ ,  $p_1$ ) iz Tablice 4-4 te uz projektirane karakteristike crpke na Slici 4-14.

Sljedećom analizom osjetljivosti određuje se koliko bi crpka proizvodila ukoliko bi se ležišni tlak tijekom vremena rada bušotine smanjivao, a udio vode bi ostao na 80% (Slika 4-17). Za potrebe rada odabrani su ležišni tlakovi u iznosima od 200 bar i 230 bar (slučajevi 1 i 2 u Tablici 4-6) u odnosu na trenutni tlak od 242 bar (slučaj 3), koji je isti kao i slučaj 1 u Tablici 4-5, ali se navodi i ovdje radi usporedbe rezultata.



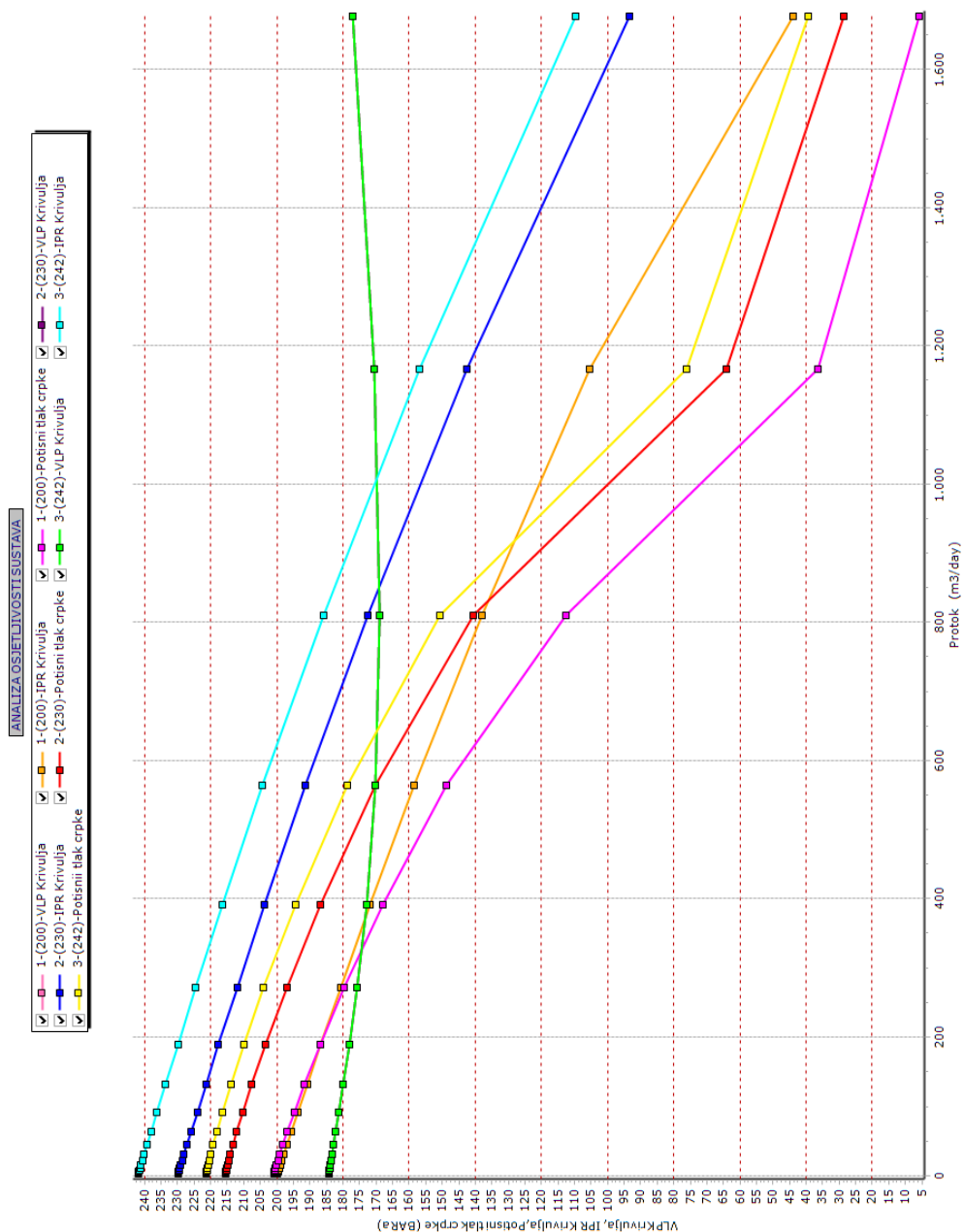
SUMMARY DATA	
Fluid	Oil
PVT Method	Black Oil
Separator	Single-Stage
Emulsions	No
Water Viscosity	Use Default
Water Viscosity Model	No Calculations
Viscosity Model	Newtonian Fluid
Steam option	No Steam Calculations
Well Type	Producer
Artificial Lift	Jet Pump
Lift Type	Annular Injection - Tubing Production
Temperature Model	Rough Approximation
Completion Range	Full System
Completion	Cased Hole
Sand Control	Gravel Pack
Gas Conting	No
Date	15.04.2023

SYSTEM SENSITIVITY ANALYSIS - INPUT DATA	
Top Node Pressure	7.91 (BARa)
Water Cut	80.000 (percent)
Total GOR	144.8 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ST)
Surface Equipment	Correlation Beggs and Brill
Vertical Lift Correlation	Petroleum Experts 2
Left-Hand Reservoir	Automatic - Geometric
PEIS Stability Flag	No
Bottom Measured Depth	2827.0 (m)
Bottom True Vertical Depth	2743.2 (m)
JET Pump	Test - Nozzle (LB)

INFLOW PERFORMANCE DATA (OTL WELL)	
Inflow Type	Single Branch
Completion	Cased Hole
Sand Control	Gravel Pack
Gas Conting	Darcy
M&G Skin Model	Karakas+Tariq
Perm(s) Reduction Model	Cinco (2) / Marting-Bron
Reservoir Pressure	242.33 (BARa)
Water Cut	100.0 (deg C)
Reservoir Permeability	50.00 (md)
Reservoir Thickness	30.5 (m)
Drainage Area	2023450 (m <sup>2</sup> )
Shape Factor	0.1076 (m)
Perforation Diameter	50.00 (mm)
Perforation Efficiency	0.9 (fraction)
Damaged Zone Thickness	0.2032 (m)
Crushed Zone Permeability	0.1250 (md)
Wellbore Radius	0.1079 (m)
Gravel Pack Permeability	35000.00 (md)
Gravel Pack Length	0.010922 (m)
Shot Density	26.25 (L/m)
Perforation Efficiency	0.9 (fraction)
Phase Choice	Multi Phase
Beta Factor Method	Calculated
Beta Factor	152779 (L/m)

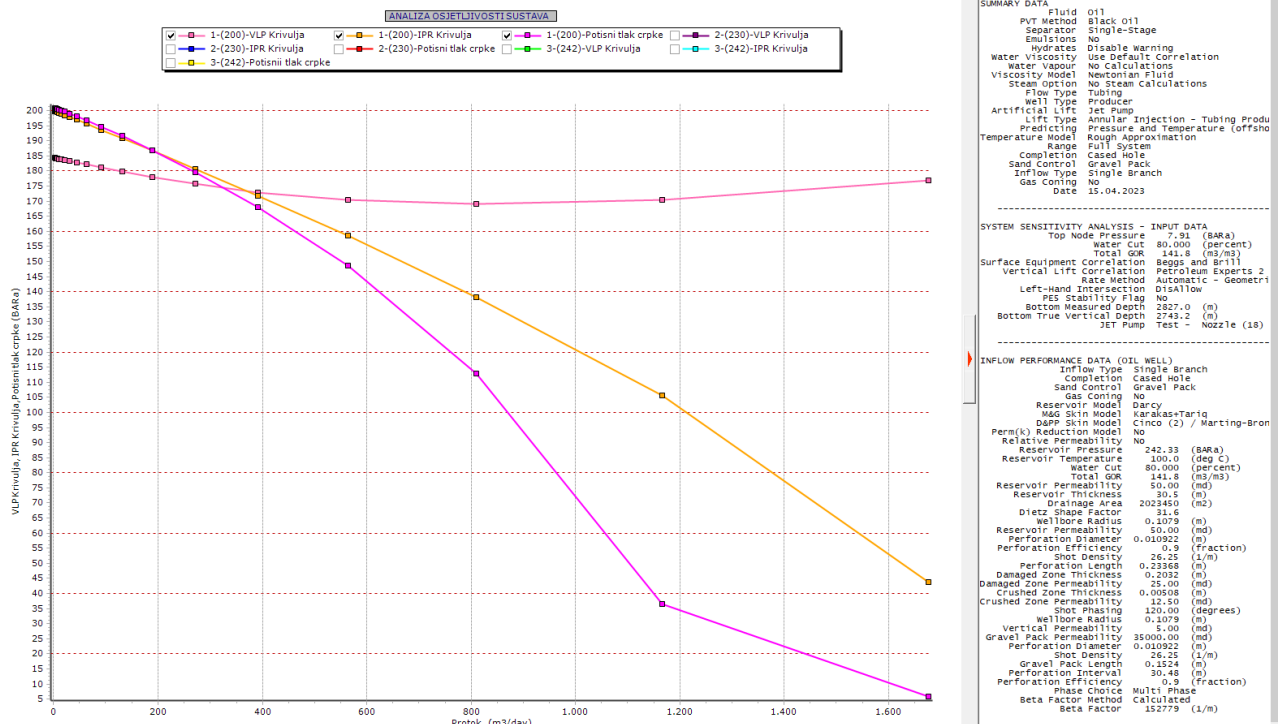


Slika 4-17. Analiza osjetljivosti za različite ležišne tlakove

**Tablica 4-6.** Rezultati analize osjetljivosti za različite ležišne tlakove

Slučaj	Ležišni tlak, bar	p <sub>3</sub> , bar	p <sub>2</sub> , bar	q <sub>3</sub> , m <sup>3</sup> /dan	q <sub>w</sub> , m <sup>3</sup> /dan	q <sub>0</sub> , m <sup>3</sup> /dan
3	242	198,63	169,92	643,36	514,69	128,67
2	230	191,36	170,4	562,39	449,91	112,48
1	200	176,94	174,56	323,37	258,69	64,67

Iz rezultata u Tablici 4-6. je slučajem 3 najprije prikazano trenutno stanje proizvodnih mogućnosti bušotine za koje je postavljen proizvodni model u programu Prosper, a slučaj 1 predstavlja najnepovoljniji prognostički model iz kojeg slijedi da bi crpka pri padu ležišnog tlaka na 200 bar i dalje mogla proizvoditi, ali bi protok nafte bio dva puta manji i iznosio bi 64,67 m<sup>3</sup>/dan. Ovaj dijagram izdvojeno je prikazan i na Slici 4-18., a iz presjecišta krivulja koje definiraju radnu točku, kao što je objašnjeno kod prethodne analize osjetljivosti, slijedi da su ovo ujedno i krajnji uvjeti rada odabrane crpke, u kojima ujedno dolazi i do smanjene efikasnosti.



**Slika 4-18.** VLP, IPR i krivulja potisnog tlaka crpke za slučaj 1 u Tablici 4-7

U svih šest slučajeva crpka ima efikasnost između 19,5% i 22% (Slika 4-14) izuzev najnepovoljnijeg u kojemu je efikasnost 17%. Dubinske mlazne crpke omjera A (Tablica 2-5) mogu imati maksimalnu djelotvornost od 22,6%, pa se ovakve vrijednosti smatraju zadovoljavajućima.

## 5. ZAKLJUČAK

Dubinske mlazne crpke se koriste u visokoproduktivnim, zaplinskim bušotinama, a za razliku od ostalih dubinskih crpki nemaju ni pokretnih niti brtvećih dijelova koji su sklони trošenju. Zbog toga su povoljne za proizvodnju „nečistih“ fluida koji u sastavu imaju plinove koji uzrokuju koroziju, onečišćeni su pijeskom ili su previskozni za druge vrste crpki. Primjenu im ograničava potreba za relativno visokim usisnim tlakom kako bi se izbjegla kavitacija, te njihova niska mehanička djelotvornost, što iziskuje višu pogonsku snagu nego u slučaju konvencionalne hidrauličke crpke. Iz tog razloga je pri projektiranju mlazne crpke potrebno dobro ispitati ležište, kako bi proizvodnja nafte bila i ekonomski isplativa.

Opisani koraci dizajniranja sustava dubinske mlazne crpke teško se provode ručno, pa je primjena program Prospera najčešća u praksi. Iteracijom je potrebno doći do optimalnog dizajna koji će omogućiti ostvarenje tražene proizvodnje tj. protoka fluida kroz duži period. Potrebno je pretpostaviti početne parametre u projektiranju, a podaci koji su neophodni za dizajniranje ovisni su jedni o drugima, te je cijeli proces složen i nepraktičan bez upotrebe specijaliziranih programa. U radu je pokazan primjer dizajniranja jednog takvog fiktivnog sustava. Program ima ugrađene modele i korelacije, kao i mogućnost njihovog usklađivanja s mjerenim podacima, što povećava točnost modeliranja i konačnih rezultata dizajna dubinske crpke. U dizajniranju pomažu i baze podataka tj. katalozi za odabir dostupnih mlaznih crpki na tržištu, koje su pri radu u programu lako pristupačne. Povezivanjem svih unesenih informacija, poput IPR krivulja, VLP krivulja i svih ostalih potrebnih parametara za dizajniranje dubinske crpke, Prosper stvara precizan model koji se dalje može koristiti za prognoziranje rada bušotine, odnosno za analizu osjetljivosti.

Proizvodne mogućnosti bušotine X analizirane su kroz šest slučajeva osjetljivosti u kojima je određeno do kojeg povećanja udjela vode u proizvodnji se odabrana crpka može efikasno koristiti, odnosno do kojeg pada ležišnog tlaka se može očekivati da će crpka biti djelotvorna.

## 6. LITERATURA

1. APSLEY, D., 2005. Hydraulics 1, University of Manchester
2. COPPES, J. L. R., GRUPPING, A. W., GROOT, J. G., 1988. Fundamentals of oilwell jet pumping. SPE Production Engineering, 3(01), 9-14.
3. BATOOL, A., ARHAMNA, H., 2010., JEMS Made Easy, Application Engineer-Artificial Lift Systems Weatherford
4. BROWN, B., 1965., Water power fluid for hydraulic oil wells pumping, Journal of petroleum technology SPE.
5. EL-SAWAF, I. A., HALAWA, M. A., YOUNES, M. A., & TEAMIA, I. R., 2011., Study of the different parameters that influence on the performance of water jet pump. In Fifteenth international water technology conference, IWTC (Vol. 15).
6. GOSLINE, J.E., O'BRIEN, M.P., 1934. The water jet pump, volume 3 University of California Press
7. JIA, X., LIAO, H., HU, Q., HE, Y., WANG, Y., NIU, W., 2023. Optimization Method of Jet Pump Process Parameters and Experimental Study on Optimal Parameter Combinations. Processes, 11(10), 2841.
8. KENETH, E., 2007. Petroleum engineering handbook volume 3\_Facilities and construction, Society of Petroleum Engineers
9. KHAMMASSI, C. 2021. Jet pump performance analysis and optimization plan, Doktorska disertacija, Sveučilište Leoben
10. LAKE, L., W., 2007., Petroleum Handbook, volume IV, Society of Petroleum Engineers
11. LORENZ, H. (1910). Technische hydromechanik, Volume 3, Oldenburg
12. PUGH, T., 2005. First ever sub-sea hydraulic jet pump system used to optimize single well development offshore Tunisia. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition
13. PUGH, T., 2014. Hydraulic Lift Systems, WEATHERFORD
14. PROSPER USER MANUAL, 2018. Petroleum Experts, Version 15. Edinburgh.
15. TEAMIA, I. R., YOUNES, M. A., EL SAWAF, I. A., HALAWA, M. A., 2012. Experimental Study of the Effect of Mixing Chamber Length and Diffuser Angle on the Performance of Dredging Jet Pump. In Sixteenth international water technology conference (No. 16).

16. VEDRIŠ, K., 2023., Mogućnosti dizajniranja dubinskih crpki s klipnim šipkama u programu prosper, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, str. 12.-25., Zagreb
17. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Internet izvori:

18. Fetoui, I., 2017. How does a Jet pump work?. URL: <https://production-technology.org/jet-pump-work/> (15.11.2023.)
19. Prabkeao, C., AOKI, K., 2005., Study on the optimum mixing throat length for drive nozzle position of the central jet pump. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03181554> (15.11.2023.)
20. Prime Tech, 2019. URL: [https://primetechejectors.com/downhole\\_jetpump.htm](https://primetechejectors.com/downhole_jetpump.htm)

## **IZJAVA:**

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

Handwritten signature of Marin Liović in black ink, written in a cursive style. The signature is underlined.

Marin Liović



KLASA: 602-01/23-01/205

URBROJ: 251-70-12-23-2

U Zagrebu, 17.01.2024.

**Marin Liović, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/205, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 23.11.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### MOGUĆNOSTI DIZAJNIRANJA DUBINSKIH MLAZNIH CRPKI U PROGRAMU PROSPER

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

Mentorica:

(potpis)

doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

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)