

Mogućnosti dizajniranja dubinskih crpki s klipnim šipkama u programu Prosper

Vedriš, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:308572>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



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 CRPKI S
KLIPNIM ŠIPKAMA U PROGRAMU PROSPER**

Diplomski rad

Karlo Vedriš

N - 394

Zagreb, 2023.

MOGUĆNOSTI DIZAJNIRANJA DUBINSKIH CRPKI S KLIPNIM ŠIPKAMA U PROGRAMU PROSPER

Karlo Vedriš

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

Sažetak

S obzirom na činjenicu da u Hrvatskoj ima ukupno oko 762 naftne bušotine od kojih 47% proizvodi dubinskim crpkama s klipnim šipkama, u radu je odabrana fiktivna bušotina X, za koju su detaljno opisane mogućnosti dizajniranja crpki u programu Prosper (Sveučilišna licenca za edukativne svrhe: #4186). Prosper je računalni program tvrtke Petroleum Experts, koji služi za analizu poboljšanja proizvodnih mogućnosti 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 relativno nizak indeks proizvodnosti, pa je pri postavljanju proizvodnog modela bušotine potrebno odrediti optimalan sustav proizvodnje dubinskom crpkom s klipnim šipkama za zadane uvjete u bušotini i ležištu. Proizvodno modeliranje se može podijeliti u nekoliko koraka, od unosa osnovnih ulaznih podataka za novu bušotinu s dubinskom crpkom s klipnim šipkama, PVT karakteristika proizvodnog fluida, njihovog usklađivanja s mjerenim podacima, unosa podataka o opremi, kreiranja IPR i VLP krivulja, te konačnog odabira i dizajna dubinske crpke s klipnim šipkama. Na kraju je provedena analiza osjetljivosti kako bi se vidjela mogućnost prognoziranja rada bušotine u programu Prosper, ukoliko bi došlo do povećanja udjela vode u proizvodnji, odnosno u protoku kapljevine.

Ključne riječi: dubinska crpka, proizvodni model bušotine, analiza osjetljivosti.

Diplomski rad sadrži: 51 stranica, 29 slika, 10 tablica i 21 referenca.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: 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. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a
3. Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 17.2.2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

POSSIBILITIES OF SUCKER ROD PUMP DESIGN IN PROSPER SOFTWARE

Karlo Vedriš

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

Abstract

Considering the fact that there are a total of 762 oil wells in Croatia, 47% of which produce using sucker rod pumps (SRP), the fictitious well X was chosen in the work, for which the possibilities of designing pumps are described in detail in the Prosper program (University license for educational purposes: #4186). Prosper is a computer program from the Petroleum Experts, which is used for analyzing the improvement of the well's pumping capabilities and for designing and optimizing various pumping systems. The advantage of this computer program is high accuracy and fast data processing, as well as the possibility of wide application in practice. Well X is characterized by a relative low production index, so when creating the production model of the well, it is necessary to determine the optimal production system using an SRP for the given conditions in the well and in the reservoir. The production modelling can be divided into several steps, from the input of the basic data for a new well with a SRP, the PVT properties of the production fluid, its matching with measured data, the input of the equipment data, the generation of IPR and VLP curves, to the final selection and design of the SRP. Finally, a sensitivity analysis was performed to see if it is possible to predict the operation of the well in the Prosper program when the water cut is increased.

Key words: sucker rod pumps, well production model, sensitivity analysis

Thesis contains: 51 pages, 29 figures, 10 tables and 21 references.

Original in: Croatian

Final work is deposited at: Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Sonja Koščak Kolin, Assistant Professor

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

Date of defense: February 17, 2023, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KRATICA	III
POPIS OZNAKA I PRIPADAJUĆIH JEDINICA	IV
1. UVOD	1
2. PROIZVODNI SUSTAV DUBINSKE CRPKE S KLIPNIM ŠIPKAMA	2
2.1 Dijelovi dubinske crpke s klipnim šipkama.....	4
2.2 Klasifikacija dubinskih crpki s klipnim šipkama.....	5
2.3 Princip rada dubinske crpke.....	6
2.4 Volumetrijski protok dubinske crpke	7
2.5 Dimenzioniranje i odabir dubinske crpke.....	9
3. UVOD U PRIMJENU PROGRAMA PROSPER	12
3.1 Dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama u programu Prosper	12
4. PRIMJER DIZAJNIRANJA DUBINSKE CRPKE S KLIPNIM ŠIPKAMA NA BUŠOTINI X	26
4.1 Uvod u primjer za bušotinu X	26
4.2 Ulazni podaci za bušotinu X.....	26
4.2.1 <i>PVT podaci</i>	27
4.2.2 <i>Podaci o opremi</i>	27
4.3 Postavljanje proizvodnog modela bušotine X	31
5. ZAKLJUČAK	49
6. LITERATURA	50

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Proizvodni sustav bušotine opremljene dubinskom crpkom s klipnim šipkama..	2
Slika 2-2. Dijelovi crpke s klipnim šipkama.....	5
Slika 2-3. Karakteristične faze ciklusa crpljenja dubinske crpke s klipnim šipkama	6
Slika 3-1. Sučelje programa Prosper za unos podataka o proizvodnom sustavu	13
Slika 3-2. Sučelje programa Prosper za unos podataka o PVT svojstvima fluida	16
Slika 3-3. Sučelje programa Prosper za unos podataka o opremi bušotine	17
Slika 3-4. Sučelje programa Prosper za unos podataka o otklonu bušotine.....	18
Slika 3-5. Sučelje programa Prosper za unos podataka o površinskoj opremi	19
Slika 3-6. Sučelje programa Prosper za unos podataka o podzemnoj opremi	20
Slika 3-7. Sučelje programa Prosper za unos podataka o temperaturnom gradijentu.....	21
Slika 3-8. Sučelje programa Prosper za određivanje IPR krivulje.....	22
Slika 3-9. Sučelje programa Prosper za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama...	24
Slika 4-1. Glavno sučelje programa Prosper.....	32
Slika 4-2. Uvodni podaci za proizvodni sustav bušotine X	33
Slika 4-3. Glavno sučelje programa prema definiranim podacima za bušotinu X.....	34
Slika 4-4. PVT svojstva fluida u bušotini X	35
Slika 4-5. Odabir PVT korelacija za bušotinu X	36
Slika 4-6. Otklon bušotine X.....	38
Slika 4-7. Ugrađena oprema u bušotinu X.....	39
Slika 4-8. Geotermalni gradijent u bušotini X	40
Slika 4-9. Specifične topline fluida u bušotini X	40
Slika 4-10. Određivanje IPR krivulje u bušotini X	41
Slika 4-11. Grafički prikaz IPR krivulje u bušotini X	42
Slika 4-12. Glavno sučelje programa nakon definiranja IPR krivulje	43
Slika 4-13. Ulazni podaci za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama u bušotini X	44
Slika 4-14. Radna točka proizvodnog sustava bušotine X.....	46
Slika 4-15. Varijable za analizu osjetljivosti.....	47
Slika 4-16. Analiza osjetljivosti za povećanje udjela vode u protoku bušotine X.....	47
Slika 4-17. Prognoziranje rada bušotine X prema analizi osjetljivosti	48

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Klasifikacija dubinskih crpki s klipnim šipkama	5
Tablica 4-1. PVT podaci o ležišnom fluidu u bušotini X	27
Tablica 4-2. Mjereni podaci pri izotermi 54,44 °C.....	27
Tablica 4-3. Podaci o otklonu bušotine X	27
Tablica 4-4. Podaci o podzemnoj opremi u bušotini X	28
Tablica 4-5. Podaci o geotermalnom gradijentu za bušotinu X.....	28
Tablica 4-6. Prosječne specifične topline	29
Tablica 4-7. Podaci za izračun IPR krivulje	29
Tablica 4-8. Podaci za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama.....	30
Tablica 4-9. Podaci za dizajniranje dubinske crpke na engleskom jeziku (iz ablice 4-8)..	31

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AOF (engl. <i>Absolute Open Flow</i>)	maksimalni teoretski protok
API (engl. <i>American Petroleum Institute</i>)	američki naftni institut
CBM (engl. <i>Coal Bed Methane</i>)	metan iz ležišta ugljena
GOR (engl. <i>Gas-Oil Ratio</i>)	omjer otopljenog plina i nafte
IPM (engl. <i>Integrated Production Modelling</i>)	integrirano proizvodno modeliranje
IPR (engl. <i>Inflow Performance Relation</i>)	IPR ili indikatorska krivulja
PI (engl. <i>Productivity Index</i>)	indeks proizvodnosti, m ³ /dan/Pa
PVT (engl. <i>Pressure Volume Temperature</i>)	termodinamička svojstva fluida
VLP (engl. <i>Vertical Lift Performance</i>)	krivulja gradijenata tlaka u tubingu

POPIS OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

A_p – površina poprečnog presjeka klipa, m^2

B_o – obujamski koeficijent nafte, m^3/m^3

B_w – obujamski koeficijent vode, m^3/m^3

c_p – specifična toplina, $J/kg/^\circ C$

d – unutarnji promjer, m

dp – razlika tlaka, Pa

J – indeks proizvodnosti, $m^3/dan/Pa$

N – broj hodova klipa u minuti, hod/min

p – tlak, Pa

p_b – tlak zasićenja, Pa

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

S_p – duljina hoda klipa, m

T – temperatura, $^\circ C$

q_o – protok nafte, m^3/d

q_t – teoretski kapacitet sisaljke, m^3/d

q_w – protok vode, m^3/d

W_{rf} – težina uronjenih šipki, N

Z – faktor odstupanja realnog plina od idealnog, -

η – koeficijent korisnog učinka/volumetrijska djelotvornost crpke, %

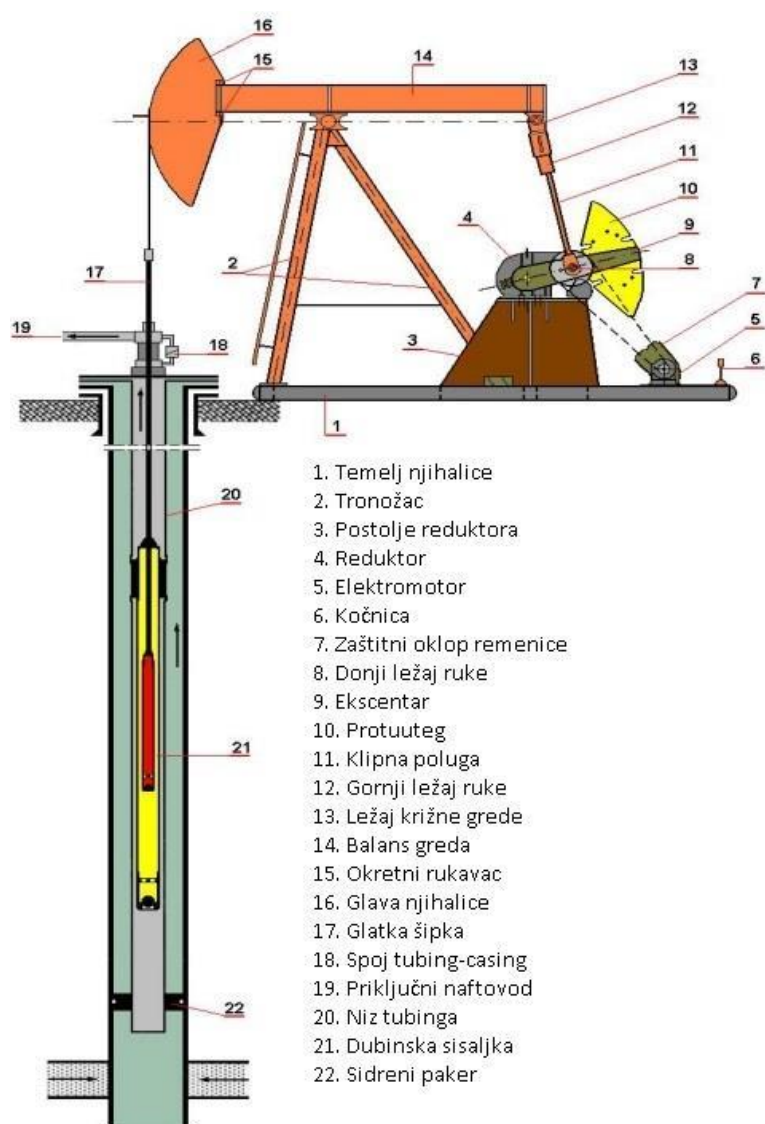
1. UVOD

Proizvodnja ugljikovodika odvija se još od sredine 19. stoljeća. Do današnjeg dana tehnologije i tehnike samog pridobivanja ugljikovodika na površinu razvile su se do nezamislivih razmjera. Unatoč tome, većina njih se temelji na poznatim i prije korištenim fizikalnim principima. Primarno se ugljikovodici na površinu pridobivaju eruptivnim načinom. Ugljikovodici se u ležištima nalaze pod tlakom uzrokovanim naslagama stijena iznad samog ležišta te se zbog energije ležišta i energije akumulirane u stlačenom plinu kapljevina podiže do ušća bušotine. Kada ta energija nije dostatna i ne dolazi do eruptivnog načina proizvodnje ili je proizvodnja manja od tražene, koriste se mehaničke metode podizanja ugljikovodika do površine. One se dijele na plinsko podizanje ili podizanje dubinskim crpkama. Odabran način prinudnog podizanja kapljevine ovisi o uvjetima u bušotini, svojstvima proizvodnog fluida te troškovima i isplativosti podizanja.

Postoji više vrsti dubinskih crpki koje se mogu koristiti za podizanje kapljevine do ušća bušotine, npr. vijčane crpke, centrifugalne crpke, klipne crpke. Zadnje spomenute, dubinske crpke s klipnim šipkama najzastupljenija su mehanička metoda podizanja kapljevine. U Hrvatskoj se nalaze 762 naftne bušotine od kojih 47% bušotina proizvodi dubinskim crpkama s klipnim šipkama. Mogu se koristiti u plitkim i srednje dubokim bušotinama, na dubinama od 500 metara pa sve do 2 500 metara (Zelić i Čikeš, 2006). Postoje tri različite izvedbe crpki, a to su usadne crpke, tubing crpke i casing crpke. Oprema za provođenje takvog načina pridobivanja sastoji se od njihalice i pogonskog sklopa na površini, glatke šipke i niza klipnih šipki, dubinske klipne crpke te sidrenog pakera i dubinskog odvajča plina. Postoje različite inačice, ali opisana oprema je bazična. Efikasnost takvog sustava uvelike ovisi o karakteristikama i mogućnostima klipne crpke, ali i ispravnom odabiru sustava s obzirom na termodinamička svojstva fluida (engl. *Pressure Volume Temperature – PVT*). O PVT svojstvima ovise i proizvodni potencijal bušotine kao i gubici tlaka pri proizvodnji. Potrebno je odabrati zadovoljavajuće dimenzije sustava koje bi omogućile najveću efikasnost za određene proizvodne uvjete u bušotini. U ovom radu naglasak je na dubinskim crpkama s klipnim šipkama, odnosno na dimenzioniranju istih u programu Prosper. Za dizajniranje dubinske crpke korišten je program IPM – Prosper, verzije 14.0 (Sveučilišna licenca za edukativne svrhe: #4186). Opisane su mogućnosti samog programa s obzirom na odabir odgovarajuće klipne crpke te je dan primjer dimenzioniranja ovakvog proizvodnog sustava u zadanim uvjetima bušotine i ležišta.

2. PROIZVODNI SUSTAV DUBINSKE CRPKE S KLIPNIM ŠIPKAMA

Kako bi se lakše razumio odabir i pravilno dimenzioniranje jedne dubinske crpke s klipnim šipkama, potrebno je pojasniti njene dijelove i princip rada. Dubinske crpke s klipnim šipkama zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti najraširenija su mehanička metoda u svijetu, a koriste se u preko 80% slučajeva (Zelić i Čikeš, 2006). Pogonjene su površinskim motorom čije je rotacijsko gibanje preko složene konstrukcije koja se zove njihalica pretvoreno u linearno gibanje klipnih šipki, pa tako i samog klipa crpke. Cijelokupni sustav sastoji se od pogonskog motora, njihalice, glatke šipke, klipnih šipki, dubinske crpke i sidrenog pakera i prikazan je Slikom 2-1.



Slika 2-1. Proizvodni sustav bušotine opremljene dubinskom crpkom s klipnim šipkama (Brkić, 2018.)

Njihalica je struktura koja podnosi i uravnotežuje opterećenja, te prenosi gibanje s pogonskog motora na glatku šipku. Ona se kao i ostatak površinskog dijela sustava nalazi na betonskom postolju, odnosno temelju. Postoji nekoliko vrsta njihalica s obzirom na način uravnoteženja. Konvencionalne njihalice s uravnoteženjem preko ručica i utega, njihalice s uravnoteženjem preko ručica i utega ispred postolja, njihalice sa zračnim uravnoteženjem te njihalice s uravnoteženjem na balansnoj gredi (Zelić i Čikeš, 2006). Količina potrebnog uravnoteženja ovisi o minimalnom i maksimalnom opterećenju glatke šipke. Njihalica je preko glave njihalice ("konjska glava") pomoću fleksibilnih kablova spojena s glatkom šipkom koja služi kao veza površinske i podzemne opreme.

Glatka ili polirana šipka vrlo je važan segment opreme. Podnosi najveća opterećenja zato što je najgornja šipka u nizu i prenosi ih na njihalicu. Opterećenja na glatkoj šipci rezultat su težine fluida, klipa, klipnih šipki, uzgona, trenja te ubrzanja klipnih šipki. Okrugla je i glatkog oplošja kako bi se minimiziralo trenje u brtvenom sustavu. Najčešće se izrađuju od čelika, ali postoje i glatke šipke od kompozitnih materijala za rad u veoma korozivnom okruženju. Najčešći uzroci oštećenja glatkih šipki su ciklička opterećenja. Također je potrebno da glava bušotine, brtveni sustav i ostali segmenti budu u vertikalnoj ravnini kako bi se izbjeglo savijanje glatke šipke.

Na glatku šipku dalje se spaja niz klipnih šipki. One su punog profila, izrađene od čelika. Duljine su od 7,62 m do 9,1 m. Na krajevima se nalaze muški navojni spojevi tako da se šipke međusobno spajaju ženskim spojnicama. Također na njima postoji kvadratni dio kako bi se lakše obuhvatile ključevima prilikom navrtanja i odvrtanja. Po API standardu razlikujemo tri klase klipnih šipki koje se razlikuju po vrijednostima naprezanja. To su klasa C, K i D. Najčešće se koriste klipne šipke klase D jer podnose najveća naprezanja. Kako bi se smanjila opterećenja i povećala moguća dubina ugradnje crpke, najčešće se kombinira niz klipnih šipki različitog promjera. Osim što prenose gibanje do klipa dubinske crpke, pomoću njih se spušta i vadi klipna crpka, koja odsjeda u prijelaz za odsjedanje. To je slučaj ako je crpka usadna. Klipna crpka može biti i tubing crpka spojena na petu uzlaznih cijevi, zajedno s protupovratnim ventilom, dok se tlačni ventil kreće zajedno s klipnim šipkama. Postoje i casing crpke koje omogućuju ugradnju crpke izravno na zaštitne cijevi bez uzlaznih cijevi uz pomoć pakera ili sidra, što omogućuje veliku dobavu. Sidreni paker ugrađuje se na kraj niza tubinga kako bi spriječio njegovo izvijanje prilikom rada dubinske crpke.

Navedeni sustav dubinske crpke s klipnim šipkama pokreće se pogonskim motorima koji mogu biti motori s unutrašnjim izgaranjem, plin ili dizel, ili elektromotori. Radi automatizacije samog procesa gdje god je moguće koriste se elektromotori. Snaga

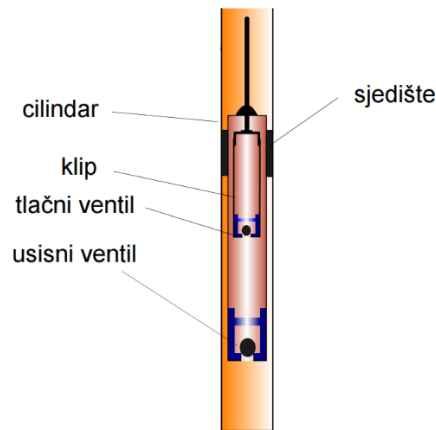
pogonskog motora mora biti dovoljna za svladavanje trenja u sustavu te za podizanje fluida na površinu uz sigurnosni faktor koji iznosi 1,25 – 1,50 (Guo et al., 2017)

2.1 Dijelovi dubinske crpke s klipnim šipkama

Dubinska crpka sastoji se od cilindra, protupovratnog ventila na donjem dijelu cilindra, klipa i tlačnog ventila na donjem dijelu klipa. Dijelovi se mogu vidjeti na Slici 2-2.

Cilindar crpke izrađen je iz jednog komada cijevi ili od više sekcija (košuljica) s navojnim spojevima na oba kraja. On služi kao kućište i unutar njega nalaze se svi dijelovi crpke. Hrapavost oplošja mu se minimizira na vrijednost od 0,2 – 0,4 μm , što je slučaj i za klip (Zelić i Čikeš, 2006). Klip je čelična cijev duga otprilike 1,2 m koja se smješta u prostor cilindra. Uloga klipa je da brtvi prostor iznad i ispod tlačnog ventila, i tako omogući podizanje kapljevine. Između klipa i cilindra postoji zazor. Oni su za klipove s metalnim brtvljenjem standardizirani od strane API, a iznose 0,0254 mm (0,001"), 0,0508 mm (0,002"), 0,0762 mm (0,003") i 0,127 mm (0,005"). Veličina spomenutog zazora bitna je karakteristika koja utječe na djelotvornost klipne crpke iz razloga što se kroz zazor odvija gubitak kapljevine. Poželjno je gubitke svesti na minimum tako da se odabere optimalan zazor s obzirom na fizikalne i reološke karakteristike proizvodne kapljevine. U uvjetima gdje su prisutni pijesak i nečistoće koriste se klipovi koji nemaju ravno oplošje, već su u njega urezani kanali. Osim metalnog brtvljenja, postoji i gumeno brtvljenje pomoću manžeta te kombinacija manžeta i "O" prstena. Klip se spaja na kraj niza klipnih šipki.

Na kraju klipa nalazi se tlačni ventil. Naziva se još i putujući ventil jer se giba linearno zajedno s klipnim šipkama. Tlačni ventil dopušta prolaz fluida u klip, prema tubing, kada se klip kreće prema dolje, te spriječava povrat fluida kada se klip kreće prema gore. Protupovratni ventil ugrađuje se na donji kraj cilindra. Još se naziva i usisni ventil ili nepomični ventil. Protupovratni ventil omogućuje punjenje cilindra prilikom kretanja klipa prema gore, te onemogućuje povratak fluida iz cilindra prilikom kretanja klipa prema dolje. I tlačni i protupovratni ventil rade na principu kuglice i sjedišta. Duljina hoda i broj hodova utječu na životni vijek ventila. Važno je da se niti kuglica niti sjedište ne oštete prilikom rada dubinske crpke. Njihovo oštećenje ili promjena oblika rezultiralo bi propuštanjem kapljevine, što opet dovodi do smanjene djelotvornosti crpke. Zato se izrađuju od kvalitetnog visokolegirano čelika sa specijalnom obradom površina (Zelić i Čikeš, 2006).



Slika 2-2. Dijelovi crpke s klipnim šipkama (Brkić, 2018)

2.2 Klasifikacija dubinskih crpki s klipnim šipkama

U Tablici 2-1 dana je klasifikacija dubinskih crpki s klipnim šipkama prema API.

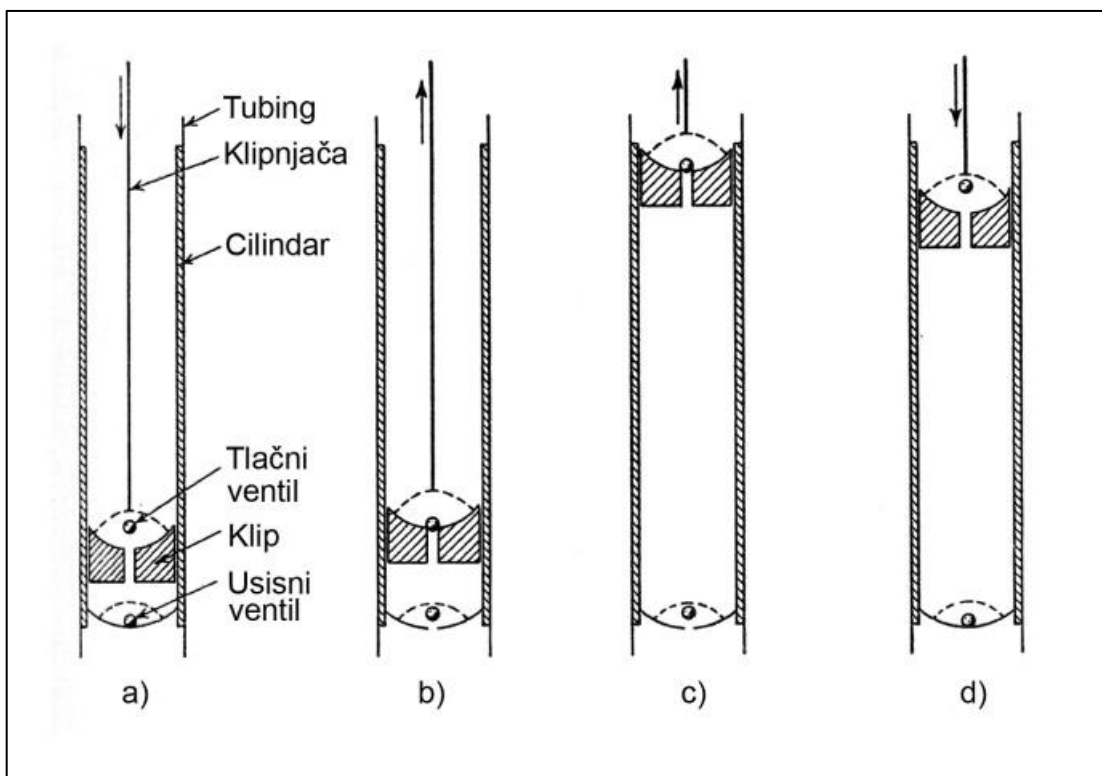
Tablica 2-1. Klasifikacija dubinskih crpki s klipnim šipkama (American Petroleum Institute, [API], 2006)

Tip crpke	Crpka s metalnim klipom (plunđerom)		Crpka koja ima mekana brtvila	
	Radna komora s debelom stijenkom	Radna komora s tankom stijenkom	Radna komora s debelom stijenkom	Radna komora s tankom stijenkom
Na klipnim šipkama				
Stacionarna radna komora, sidrenje na vrhu	RHA	RWA	-	RSA
Stacionarna radna komora, sidrenje na dnu	RHB	RWB	-	RSB
Stacionarna radna komora sidrenje na dnu	RXB	-	-	-
Putujuća radna komora, sidrenje na dnu	RHT	RWT	-	RST
Tubing crpke	TH	-	TP	-

Prvo slovo označava način ugradnje (T – ugradnja na tubing, R - ugradnja na klipnim šipkama), drugo slovo označava radnu komoru (W - cjelovita radna komora s tankom stijenkom, H - komora s debelom stijenkom, P ili S - meka brtvila na klipu) i treće slovo označava vrstu radne komore (A - stacionarna radna komora s gornjim učvršćenjem, B - stacionarna radnu komoru s donjim učvršćenjem, T - pokretno kućište) (API, 2006).

2.3 Princip rada dubinske crpke

Dubinske crpke s klipnim šipkama baziraju se na linearnom gibanju klipa pri čemu se fluid dovodi do površine pomoću klipa kada se on kreće prema gore. Rad dubinske crpke s klipnim šipkama najjednostavnije je podijeliti u četiri faze crpljenja prikazanih Slikom 2-3.



Slika 2-3. Karakteristične faze ciklusa crpljenja dubinske crpke s klipnim šipkama (Zelić i Čikeš, 2006)

U prvoj fazi (a) klip se kreće prema dolje. Tlačni je ventil otvoren, usisni ventil zatvoren. Težina cijelog hidrostatskog stupca je na usisnom ventilu što ga i drži zatvorenim. Fluid se kreće prema gore, puni se prostor iznad tlačnog ventila. Klip je došao do kraja hoda, brzina klipa je 0 i počinje druga faza (b). Započinje kretanje klipa prema gore. Tlačni ventil

se zatvara i preuzima težinu stupca fluida na sebe. Zbog jednostavnosti uzimamo da kuglica tlačnog ventila momentalno upada u svoje sjedište, što nije slučaj u realnom vremenu. Usisni ventil se u isto vrijeme otvara zbog razlike tlakova te se cilindar počinje puniti fluidom. Treća faza (c) obuhvaća kretanje klipa prema gore do vrha hoda. Ventili su još uvijek u istom položaju kao u drugoj fazi te se cilindar i dalje puni fluidom. U zadnjoj, četvrtoj fazi (d), klip započinje kretanje prema dolje. Usisni ventil se zatvara čime se sprječava povratni tok fluida iz crpke u bušotinu, dok se tlačni ventil otvara i omogućuje fluidu da puni prostor tubinga iznad klipa. Četiri opisane faze predstavljaju operativni način podizanja kapljevine na površinu pomoću dubinske crpke s klipnim šipkama.

Rad crpke može se pratiti pomoću dinamometra. On se postavlja na glatku šipku i prati opterećenja na glatkoj šipci i zapisuje ih u obliku zatvorenog toka krivulje. Kako je niz klipnih šipki elastičan sustav, ta se opterećenja preko modela valne jednadžbe transliraju na dubinu crpke kako bi se dobili podaci o njenom radu (Oilfield Dynamometer Surveys, 2020). Zato je potrebno precizno odrediti sile trenja koje se javljaju između fluida i klipnih šipki, klipa i cilindra crpke te tubinga i spojnice klipnih šipki (Takacs, 2015). Najvažniji podatak koji se direktno dobije je odnos opterećenja i položaja samog klipa. Dinamometar ustvari mjeri tlačne i vlačne sile (Oilfield Dynamometer Surveys, 2020), a zapis takvih mjerenja naziva se dinamogram. On u svakoj fazi kretanja klipa omogućava određivanje statičkog i dinamičkog opterećenja, odnosa dotoka, oštećenja ventila, propuštanja između klipa i cilindra, količine proizvodnje itd. Pravilnom interpretacijom dinamograma identificiraju se nepovoljni uvjeti kao što su nedovoljno punjenje klipa što dovodi do hidrauličkog udara, ispunjenje klipa plinom, curenje fluida, preveliko trenje u crpki ili klipnim šipkama te udaranje klipa o dno crpke (Fakher et al., 2021). Pomoću njega može se pravilno dimenzionirati pogonski mehanizam njihalice, uravnoteženje, utvrditi kvar sisaljke, lom klipnih šipki, odlaganje parafina i ostalo (Takacs, 2015).

2.4 Volumetrijski protok dubinske crpke

Teoretski kapacitet i stvarni kapacitet dubinske crpke s klipnim šipkama razlikuju se u vrijednostima. To je posljedica smanjene volumetrijske djelotvornosti crpke zbog udjela slobodnog plina koji protječe kroz crpku te klizanja fluida (Guo et al., 2007).

Teoretski kapacitet ovisi o promjeru klipa, stvarnoj duljini hoda klipa te broju hodova klipa u minuti. Iskazuje se sljedećim izrazom:

$$q_t = 1440 \cdot A_p \cdot S_p \cdot N \quad (2-1)$$

gdje su:

q_t – teoretski kapacitet sisaljke, m^3/d

A_p – površina poprečnog presjeka klipa, m^2

S_p – duljina hoda klipa, m

N – broj hodova klipa u minuti, hod/min

Napisana jednadžba ne vrijedi za stvarne uvjete, jer kao što je već spomenuto u obzir se prilikom računanja uzima i djelotvornost crpke. Gornji izraz se množi s volumetrijskim koeficijentom korisnog učinka crpke (η). Tada se izraz zapisuje kao:

$$q_t = 1440 \cdot A_p \cdot S_p \cdot N \cdot \eta \quad (2-2)$$

gdje je:

η – koeficijent korisnog učinka/volumetrijska djelotvornost crpke

Vrijednost koeficijenta korisnog učinka crpke varira u širokom rasponu vrijednosti, te veoma ovisi o količini slobodnog plina koji prolazi kroz crpku i tako joj smanjuje djelotvornost. Najčešće se nalazi u rasponu od 70% do 80%. Slobodni plin utječe na djelotvornost na dva načina. Prvi je da zauzima prostor u crpki, odnosno cilindru nauštrb kapljevini kada se klip kreće prema gore. Drugi način je da uzrokuje kašnjenje otvaranja usisnog ventila prilikom kretanja klipa gore. Kako bi se smanjio opisan negativan učinak slobodnog plina na djelotvornost crpke, poželjno je primjeniti neku od metoda odvajanja plina i njegovo preusmjeravanje mimo dubinske crpke u prstenasti prostor do površine gdje se ponovno spaja s naftom u priključnom naftovodu. Za to se najčešće koriste plinska sidra, odnosno dubinski separatori plina.

Volumetrijski koeficijent korisnog učinka crpke u odsustvu slobodnog plina, kada kroz crpku prolazi isključivo kapljevina, je u funkciji obujamskog koeficijenta nafte, B_o , i obujamskog koeficijenta vode, B_w :

$$\eta = q_o + q_w + q_o B_o + q_w B_w \quad (2-3)$$

gdje su:

q_o – protok nafte, m^3/d

q_w – protok vode, m^3/d

B_o – objamski koeficijent nafte, m^3/m^3

B_w – objamski koeficijent vode, m^3/m^3

2.5 Dimenzioniranje i odabir dubinske crpke

Pravilan odabir dubinske crpke važan je kako bi cjelokupan sustav postigao željene rezultate i performanse. Za dimenzioniranje dubinske crpke, potrebno je poznavati karakteristike ležišta, uvjete u bušotini te tražene vrijednosti parametara koje crpka treba ostvariti. Poznavanje karakteristika ležišta važno je za određivanje IPR krivulje (engl. *Inflow Performance Relationship*), odnosno indikatorske krivulje (Čikeš, 2015). Ona je odnos protoka i dinamičkog tlaka neke bušotine u određenom vremenu i pokazuje izdašnost ležišta. Uvjeti u bušotini kao i oprema potrebni su za određivanje VLP krivulje (engl. *Vertical Lift Performance*) tj. krivulje gradijenata tlaka u uzlaznim cijevima. Kada se IPR i VLP krivulju grafički prikaže na zajedničkom dijagramu, dobije se presjecište krivulja koje se naziva radnom točkom sustava. Ona pokazuje moguću proizvodnju kroz ugrađenu opremu pri određenom dinamičkom tlaku na dnu bušotine, odnosno pri odgovarajućoj depresiji. Mjenjanjem radnih uvjeta u bušotini može se povećati, ili pak smanjiti proizvodnju što se očitava u promjeni položaja presjecišta ovih dviju krivulja. To uvelike pomaže prilikom određivanja mogućih budućih stanja u bušotini, tj. pri prognoziranju njenih proizvodnih mogućnosti, što je važno za dizajniranje sustava mehaničkog podizanja kapljevine uz što manje troškove.

Kako bi dubinska crpka bila optimalno odabrana, te kasnije i postavljena u bušotinu sa što manje popratnih održavanja bušotine i vezanih troškova, potrebno je poznavati niz parametara (Farhan et al., 2015; Fakher et al, 2021):

- a) Traženi protok kapljevine, odnosno kapacitet crpke;
- b) Dubina ugradnje dubinske crpke;
- c) Visina stupca fluida u bušotini;
- d) Volumetrijska djelotvornost crpke;
- e) Specifična gustoća fluida;
- f) Temperatura u bušotini;
- g) Tlak usisa s obzirom na tlak zasićenja fluida;
- h) Promjer zaštitnih cijevi i/ili tubinga;
- i) Viskoznost i gustoća fluida;
- j) Omjer plina i kapljevine.

Prvi korak pri dizajniranju dubinske crpke je iščitati maksimalnu očekivanu proizvodnju bušotine iz IPR krivulje. Zajedno s njome te procijenjenim koeficijentom volumetrijske djelotvornosti crpke izračuna se potreban volumetrijski protok crpke. Zatim se s obzirom na dubinu bušotine i potreban volumetrijski protok crpke odabere klasa postrojenja te duljina hoda glatke šipke koji će se koristiti. Za odabir postrojenja koriste se API standardi. To su tablice koje pokazuju klase postrojenja s njihovim operativnim dubinama i specifikacijama. Zatim se pomoću istih tablica odabire promjer uzlaznih cijevi, promjer klipa, promjer klipnih šipki te broj hodova u minuti odnosno brzina crpljenja. Promjer klipa ne smije biti prevelik niti premali. Kada je prevelik, povećava se proizvodnja, ali se povećavaju i opterećenja na klipnim šipkama. Ako je promjer pak premali, mora se povećati broj hodova u minuti čime se pojačavaju efekti ubrzanja klipnih šipki (Shedid, 2009). U već opremljenim bušotinama javlja se ograničavajući faktor već ugrađene opreme, kao što je niz uzlaznih cijevi i nemogućnost ugradnje crpke većeg promjera. Potrebno je izračunati i duljinu klipnih šipki ili duljinu svake sekcije ako se koristi kombinirani niz klipnih šipki različitog promjera.

Sljedeće se računa faktor ubrzanja klipnih šipki prilikom njihovog gibanja te se pomoću njega dobije efektivna ili stvarna duljina hoda klipa. Stvarna duljina hoda klipa razlikuje se od duljine hoda glatke šipke zbog rastezanja klipnih šipki i tubinga (ako nije usidren) te zbog djelovanja akceleracije. Zatim se zajedno s procijenjenim koeficijentom volumetrijske djelotvornosti izračuna volumetrijski protok crpke izrazom 2-1. Ako odgovara s obzirom na traženi protok crpke dalje se računa težina niza klipnih šipki te opterećenje uzrokovano fluidom. Određuje se vršno, odnosno maksimalno opterećenje na glatkoj šipci te se ono uspoređuje s dozvoljenim opterećenjem odabranog postrojenja. Također se računaju vrijednosti opterećenja na vrhovima nizova klipnih šipki različitih promjera kako bi se osiguralo da ne premašuju dopuštena opterećenja. Nakon toga proračuna se idealno uravnoteženje te se provjeri s uravnoteženjima dostupnim za odabrano postrojenje te se iz proizvođačevog priručnika odredi položaj uravnoteženja. Također je potrebno izračunati i maksimalno torzijsko opterećenje na reduktor brzina i usporediti ga s vrijednosti u tablici. Na kraju je potrebno odabrati pogonski motor. Najprije se izračunaju hidraulička snaga, snaga trenja te snaga kočnja. Na temelju toga odabere se motor te prijenosni omjer kako bi se postigla prije određena brzina crpljenja.

Navedeni parametri su ovisni jedni o drugima te kao takvi otežavaju izbor samim matematičkim pristupom bez prijašnjeg iskustva. Zato se radi jednostavnosti u dizajniranju jednog sustava dubinske crpke s klipnim šipkama koriste računalni programi poput Prospera.

3. UVOD U PRIMJENU 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 Modelling*), koji se koristi za projektiranje, analizu i optimizaciju svih sustava u proizvodnom inženjerstvu nafte i plina. Paket obuhvaća i ostale programe kao što su: 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 cijelokupnog proizvodnog sustava.

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. Ovakav proizvodni model bušotine se dalje može koristiti za analizu i povezivanje s programima Gap i Mbal. Neke od mogućnosti programa Prosper su:

- a) Određivanje modela utoka fluida za različite tipove bušotina;
- b) Dizajniranje i optimiziranje promjera tubinga i cjevovoda;
- c) Dizajniranje, dijagnosticiranje i optimiziranje eruptivnog i prinudnog podizanja fluida;
- d) Računanje pada tlaka u djelovima proizvodnog sustava;
- e) Predviđanje temperatura u bušotini i cjevovodu.

3.1 Dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama u programu Prosper

Dizajniranje sustava dubinske crpke s klipnim šipkama u programu Prosper radi se u koracima. Prvi korak prikazan je Slikom 3-1.

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

Kod opisa dizajniranja pojašnjene su uglavnom samo ključne opcije za projektiranje dubinske crpke s klipnim šipkama, ovisno o proizvodnima uvjetima u kojima se koriste. Kao što je vidljivo na Slici 3-1, najprije se u sekciji *Fluid Description* (hrv. opis fluida) pod opcijom *Fluid* (hrv. fluid) odabire vrsta fluida u bušotini. Dostupni su *Oil and Water* (hrv. nafta i voda), *Dry and Wet Gas* (hrv. suhi i mokri plin), te *Retrograde Condensate* (hrv. retrogradni kondenzat). Podopcije koje su dostupne dalje u programu za izradu proizvodnog modela ovisiti će o izabranoj vrsti fluida, zbog čega je točnost odabira ovog, kao i svakog podatka izuzetno bitna. Pod opcijom *Method* (hrv. metoda) odabire se između *Black Oil* (hrv. teška nafta) i *Equation of State* (hrv. jednadžba stanja), koje se odnose na PVT korelacije. *Black Oil* metoda sadrži sedam korelacija koje se mogu usklađivati s mjerenim podacima s pomoću ugrađene metode nelinearne regresije. Ako se odabere *Equation of State* metoda dostupne su korelacije Peng-Robinson i Soave-Redlich-Kwong, no ovisno o odabranom fluidu pod sekcijom *Fluid Description* dostupne su i druge jednadžba stanja.

Osim navedenih, na Slici 3-1 vide se i ostale opcije za unos početnih podataka o proizvodnom sustavu.

U sekciji *Well* (hrv. bušotina) odabire se vrsta protjecanja pod opcijom *Flow Type* (hrv. vrsta protoka), te vrsta bušotine pod opcijom *Well Type* (hrv. vrsta bušotine). Vrsta protjecanja odabire se s obzirom na to odvija li se protok kroz proizvodni niz (engl. *Tubing Flow*), prstenasti prostor (engl. *Annular Flow*) ili oboje, dok se vrsta bušotine odnosi na svrhu promatrane bušotine. Odabire se između proizvodne bušotine (engl. *Producer*), utisne bušotine (engl. *Injector*), vodoutisne bušotine (engl. *Water Injector*) ili bušotine koja proizvodi metan iz ležišta ugljena (engl. *CBM Producer*).

Zatim se dolazi do sekcije *Artificial Lift* (hrv. prinudno podizanje), gdje se odabire vrsta prinudnog podizanja kapljevine, ako je ugrađena. Postoji nekolicina opcija prinudnog podizanja kapljevine, a samo neke od njih su povremeni plinski lift (engl. *Gas Lift – Intermittent*) i kontinuirani plinski lift (engl. *Gas Lift – Continuous*), električna potopna crpka (engl. *Electrical Submersible Pump*), mlazna crpka (engl. *Jet Pump*), hidraulička crpka (engl. *Hydraulic Pump*), višefazna pumpa (engl. *Multiphase Pump*) i dubinska crpka s klipnim šipkama (engl. *Sucker Rod Pump*). Sekcija *User Data* (hrv. podaci o korisniku) služi kompanijama za lakše praćenje projekta i analize u realnim vremenima.

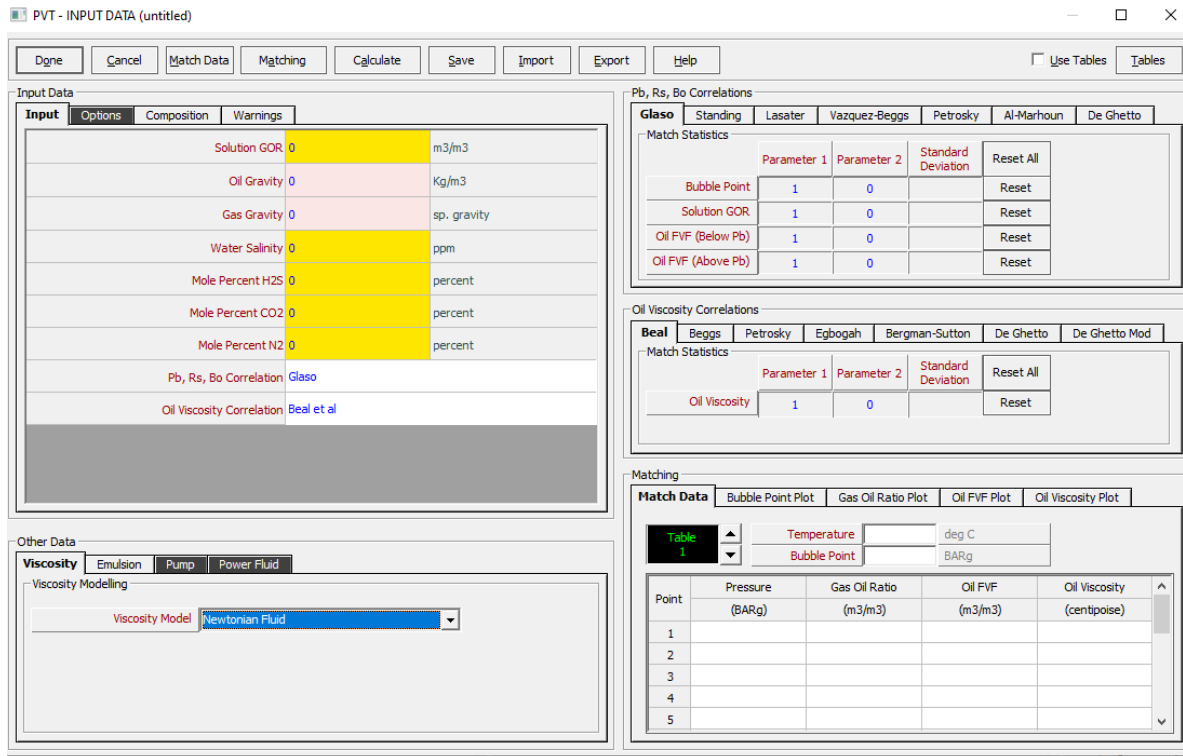
S desne strane sučelja odabire se model računanja s obzirom na tlak i temperaturu. Prosper nudi opcije proračunavanja samo tlaka (engl. *Pressure Only*) i proračunavanja i tlaka i temperature (engl. *Pressure and Temperature*). U *Pressure Only* modelu, potrebno je unijeti vrijednosti temperature, dok se u *Pressure and Temperature* modelu generiraju i tlačni i temperaturni profil. Postoje tri temperaturna modela, a to su *Rough Approximation* (hrv. gruba pretpostavka), *Enthalpy Balance* (hrv. entalpijska ravnoteža), te *Improved Approximation* (hrv. napredna procjena). U modelu grube pretpostavke korisnik ručno unosi vrijednost ukupnog koeficijenta prijelaza topline, te se preko masenih protoka nafte, vode i plina sastavlja statički temperaturni profil. Računa se gubitak topline iz bušotine u okolinu koristeći ukupni koeficijent prijelaza topline, temperaturnu razliku fluida i okolnih stijene i prosječne specifične topline bušotinskih fluida. Ovaj model se koristi ako postoje mjereni podaci o temperaturi, jer inače nije precizan. Model entalpijske ravnoteže računa koeficijente toplinskog prijelaza za svaki korak proračuna s obzirom na promjene u toplinskom toku i entalpiji. Proračuni traju duže nego u modelu grube pretpostavke, jer se modeliraju i Joule-Thompsonov efekt, provodljivost, prijelaz topline i zračenje. Ovaj model je pogodan za praćenje promjena temperature tokom vremena, te se koristi za generiranje temperaturnih profila u dugim cijevovodima s retrogradnim kondenzatom, odobalnim bušotinama, te

bušotinama s visokim tlakovima i temperaturama. Model napredne procjene jednak je modelu entalpijske ravnoteže samo što se ukupni koeficijent prijelaza topline unosi ručno u program.

Pod sekcijom *Well Completion* (hrv. opremanje bušotine) odabire se način proizvodnog opremanja bušotine i unosi se vrsta kontrole utoka pijeska ako postoji. Proizvodno opremanje može biti *Cased Hole* (hrv. zacijevljen kanal bušotine) ili *Open Hole* (hrv. otvoren proizvodni interval). U sekciji *Reservoir* (hrv. ležište) odabire se je li bušotina *Single Branch* (hrv. jedna zona) ili *Multilateral Well* (hrv. višekanalna). Ako je odabrana opcija *Black Oil* tada se u ovoj sekciji nalazi i opcija za *Gas Coning* (hrv. konusiranje plina). Kada su odabrane sve potrebne opcije u prikazanom prozoru, programiranje se nastavlja klikom na tipku *Done* (hrv. završeno).

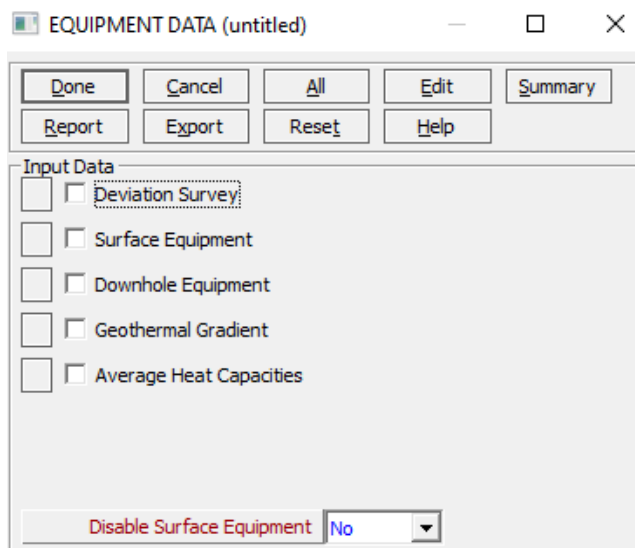
Sljedeći korak je unijeti podatke o PVT karakteristikama fluida (Slika 3-2), koji su važni u pogledu predviđanja promjena tlaka i temperature fluida od ležišta do površine. Oni se unose u sekciji *Input Data* (hrv. ulazni podaci) i odnose se na gustoću nafte (engl. *Oil Gravity*), gustoću plina (engl. *Gas Gravity*), salinitet vode (engl. *Water Salinity*), omjer otopljenog plina i nafte ili GOR (engl. *Gas-to-Oil Ratio*). Unose se i molarni udjeli nečistoća poput sumporovodika, ugljikovog dioksida i dušika, koji služe za korekciju Z faktora. U drugoj sekciji prikazanog prozora *Other Data* (hrv. ostali podaci) izabire se model viskoznosti koji će se koristiti, ovisno je li fluid njutonski ili nenjutonski.

Zatim se odabire korelacija kojom će program izračunati tlak zasićenja (p_b), obujamski koeficijent nafte (B_o), faktor otopljenog plina (R_s) i korelacija za računanje viskoznosti fluida (engl. *Oil Viscosity*). S desne strane prozora nalaze se korelacije za njihovo računanje. Ispod njih nalazi se sekcija *Matching* (hrv. usklađivanje), gdje se mjereni podaci usklađuju s metodom nelinearne regresije. Ovdje se unose temperatura i tlak zasićenja pri istoj temperaturi, te vrijednosti GOR-a, obujamskog koeficijenta nafte i viskoznosti nafte, te se podaci dobivaju tabelarno, odakle slijede i grafovi p_b , B_o i R_s u odnosu na tlak. Mogući je unos i usklađivanje do 50 tablica s mjerenim podacima pri različitim temperaturama. Potrebno je unijeti barem tlak zasićenja i GOR kako bi se provelo regresijsko usklađivanje. Klikom na tipku *Matching* dolazi se do pregleda parametara koji ukazuju na točnost korelacija što pomaže pri odabiru istih. Poželjno je da je parametar 1 što bliže vrijednosti 1, parametar 2 bliže vrijednosti 0, a standardna devijacija da je što manja. Slika 3-2 prikazuje početno sučelje programa za unos navedenih PVT podataka.



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

U trećem koraku, nakon unosa PVT podataka, u program se unose podaci koji se odnose na ugrađenu opremu u bušotini, *Equipment Data* (hrv. podaci u opremi). Njih se unosi u zasebne prozore, a svaki se odnosi na određeni dio sustava, što je prikazano na Slici 3-3. Prozori su različiti ovisno o tome koji se model odabrao u prvom koraku pod opcijom *Model* (hrv. model) u sekciji *Calculation Type* (hrv. vrsta proračuna). Neki od mogućih modela su *Pressure Only* (hrv. samo tlak) i *Predicting Pressure And Temperature* (hrv. proračun tlaka i temperature). Ako je odabran *Pressure Only*, temperaturni profil unosi se ručno u program. U drugom slučaju, potrebno je unijeti detaljne informacije o bušotinskoj okolini, zaštitnim cijevima, cementnim čepovima, litologiji stijene itd.



Slika 3-3. Sučelje programa Prosper za unos podataka o opremi bušotine

U prozoru za odstupanje putanje bušotine, *Deviation Survey* (hrv. odklon bušotine), unosi se podatke o mjerenoj i stvarnoj vertikalnoj duljinu bušotine, kao i kutu odstupanja. Podaci se unose za 20 točaka izabranih na putanji bušotine. Ako je dostupno više od 20 točaka, nakon njihovog unosa odabirom na opciju *Filter* program će odabrati 20 točaka koje će najbolje opisati putanju bušotine ovisno o kutevima odstupanja. Prozor *Deviation Survey* i pripadajuće podatke za unos vidi se na Slici 3-4 . Ako se želi da program izradi grafički profil bušotine odabire se naredbu *Plot* (hrv. nacrtaj). Na kraju se ponovno potvrdom na *Done* nastavlja na sljedeći korak.

DEVIATION SURVEY (untitled)

Done Cancel Main Help Filter Plot

MD <> TVD

Calculate

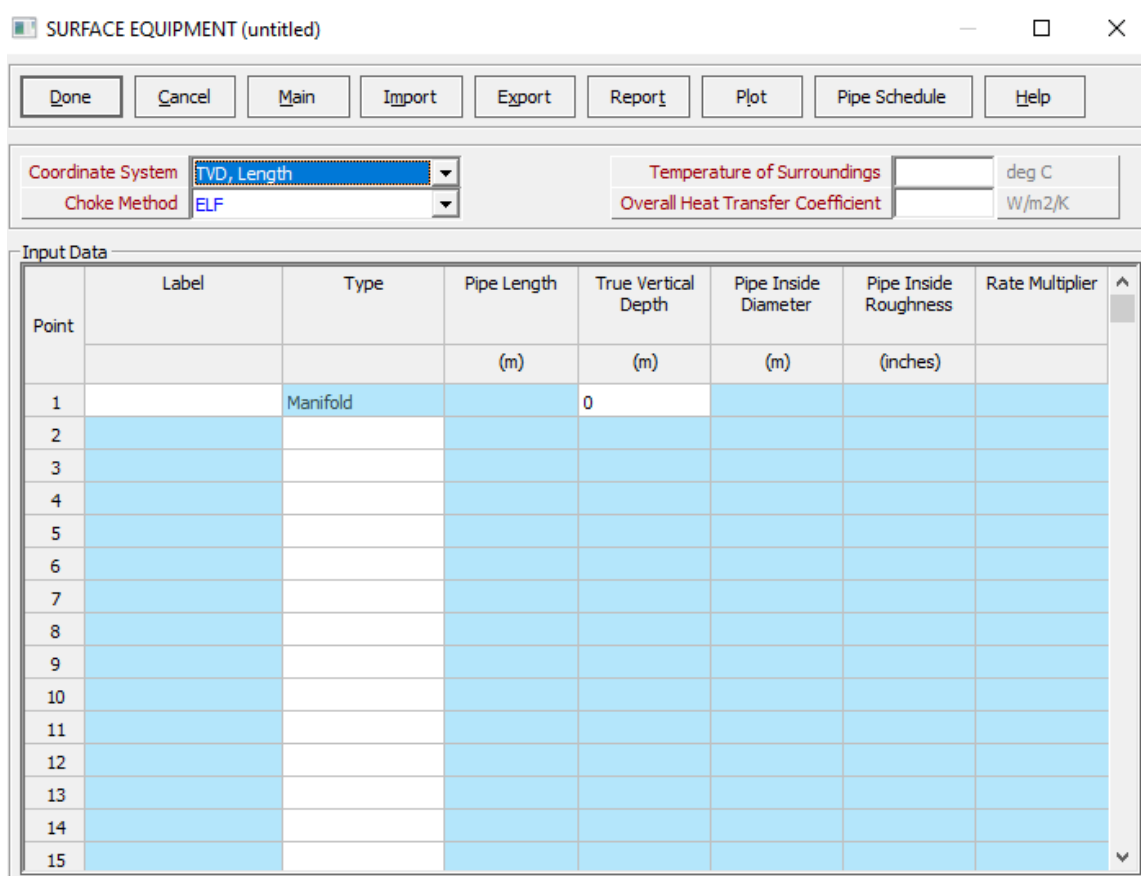
Input Data

Point	Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)
1			0	0
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Slika 3-4. Sučelje programa Prosper za unos podataka o otklonu bušotine

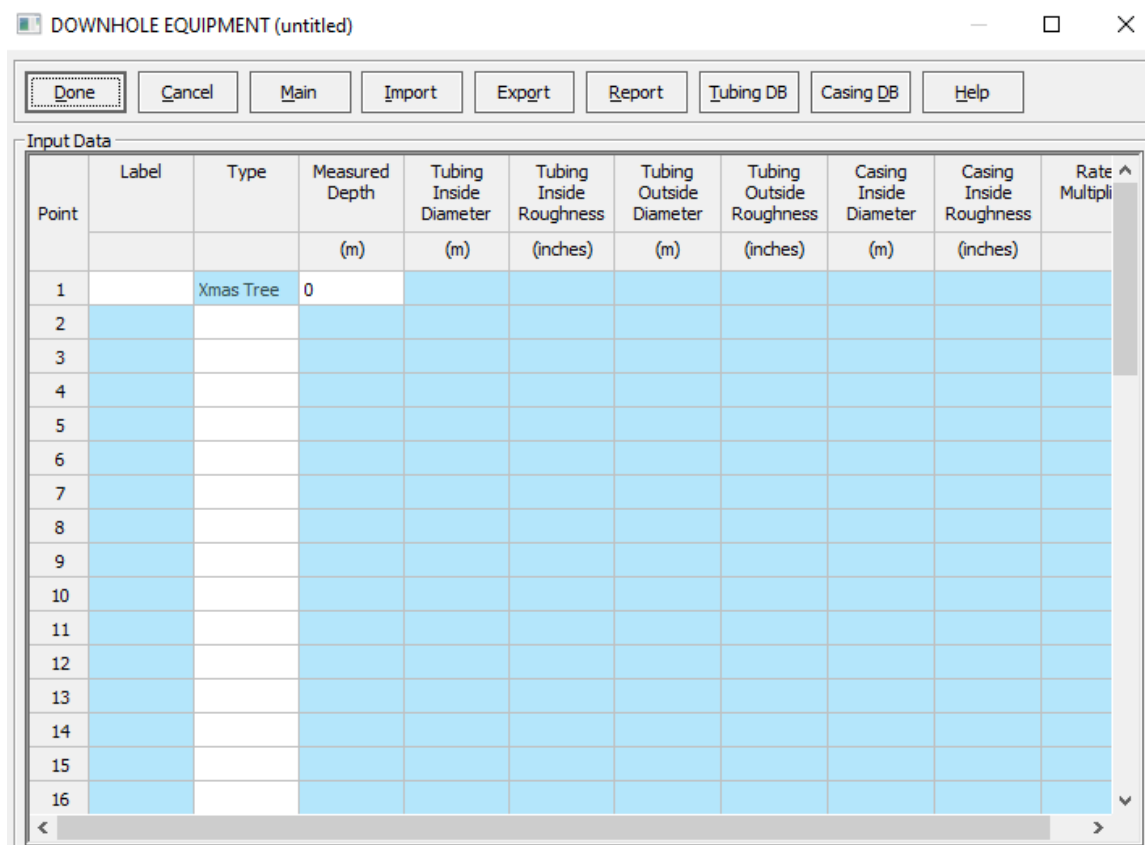
U prozoru *Surface Equipment* (hrv. površinska oprema), kojeg prikazuje Slika 3-5, unosi se podatke o površinskoj opremi sustava. Uzima se u obzir duljina površinskih cjevovoda, dubina cjevovoda, unutarnji promjer i glatkoća cjevovoda, sapnica, razne restrikcije poput ventila, koljena, naglih suženja i proširenja. Pad tlaka kroz navedene segmente Prosper računa preko metode ekvivalentnih duljina. Također je potrebno unijeti i vrijednost temperature okoline pod opciju *Temperature of Surroundings* (hrv. temperatura okoline) i koeficijent prijenosa topline pod opciju *Overall Heat Transfer Coefficient* (hrv. ukupni koeficijent prijenosa topline). Ukupni koeficijent prijenosa topline odnosi se na gubitak topline preko tubinga, prstenastog prostora i cementnog kamena u okolinu. Ako se želi isključiti površinsku opremu iz proračuna postoji opcija *Disable Surface Equipment* (hrv. isključi površinsku opremu), što je uobičajena procedura kod modeliranja proizvodnog sustava bušotine, koje urezultira određivanjem radne točke sustava, pri čemu je dovoljno

poznavati dinamički tlak na ušću, pa unos podataka u daljnjoj površinskoj opremi proizvodnog sustava u ovakvim slučajevima nije potreban.



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

Sljedeći je prozor *Downhole Equipment* (hrv. podzemna oprema) za podatke o podzemnoj opremi, odnosno tubingu, dubinskom sigurnosnom ventilu, restrikcijama i zaštitnim cijevima, ovisno o načinu opremanja bušotine. Unosi se oprema do proizvodnog intervala, odnosno sve dublje od toga se zanemaruje. Ovisno o odabranoj vrsti protjecanja u prvom koraku, unose se dubine ugrađene opreme zajedno s njihovim vanjskim i unutarnjim promjerima. Ti se podaci koriste za izračunavanje gradijenata pada tlaka pri protjecanju u bušotini. Zadnju dubinu upisanu u tablicu program uzima kao dubinu dna bušotine ili dubinu vrha ležišta. Površinska i podzemna oprema predstavljaju kontinuirani sustav te se stvarne dubine moraju podudarati. Zadnji stupac *Rate Multiplier* služi kao simulacija pada tlaka zbog dvojnog opremanja bušotine. Ovdje, kao i u prozoru *Surface Equipment*, moguće je vrijednosti unutarnjih promjera uzlaznih i zaštitnih cijevi izvaditi iz baze podataka programa Prosper. Opisan prozor prikazan je Slikom 3-6.



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

Prozor *Geothermal Gradient* (hrv. geotermalni gradijent) služi za unos vrijednosti temperature okolnih stijena bušotine, ali ovdje se unosi temperatura fluida, pa program prema ostalim dostupnim podacima generira temperaturni profil. Minimalno dvije točke moraju biti unesene, temperatura na vrhu bušotine kod bušotinske glave, te na dnu bušotine, kako bi se gradijent mogao interpolirati između tih dviju točaka. Prozor je prikazan na Slici 3-7. Podaci o specifičnim toplotinama fluida unose se u prozor *Average Heat Capacities* (hrv. prosječne specifične topline). Potrebne vrijednosti su prosječne specifične topline nafte, plina i vode. S pomoću njihovih vrijednosti i ugrađenog toplinskog modela program računa prosječni toplinski gradijent bušotine, te ga kao takvog koristi dalje u proračunima. Kada je gotov unos podataka o ukupnoj opremi i toplinskim uvjetima u bušotini, završava se klikom na *Done*.

GEOTHERMAL GRADIENT (untitled)

Done Cancel Main Import Export Plot Help

Overall Heat Transfer Coefficient W/m2/K

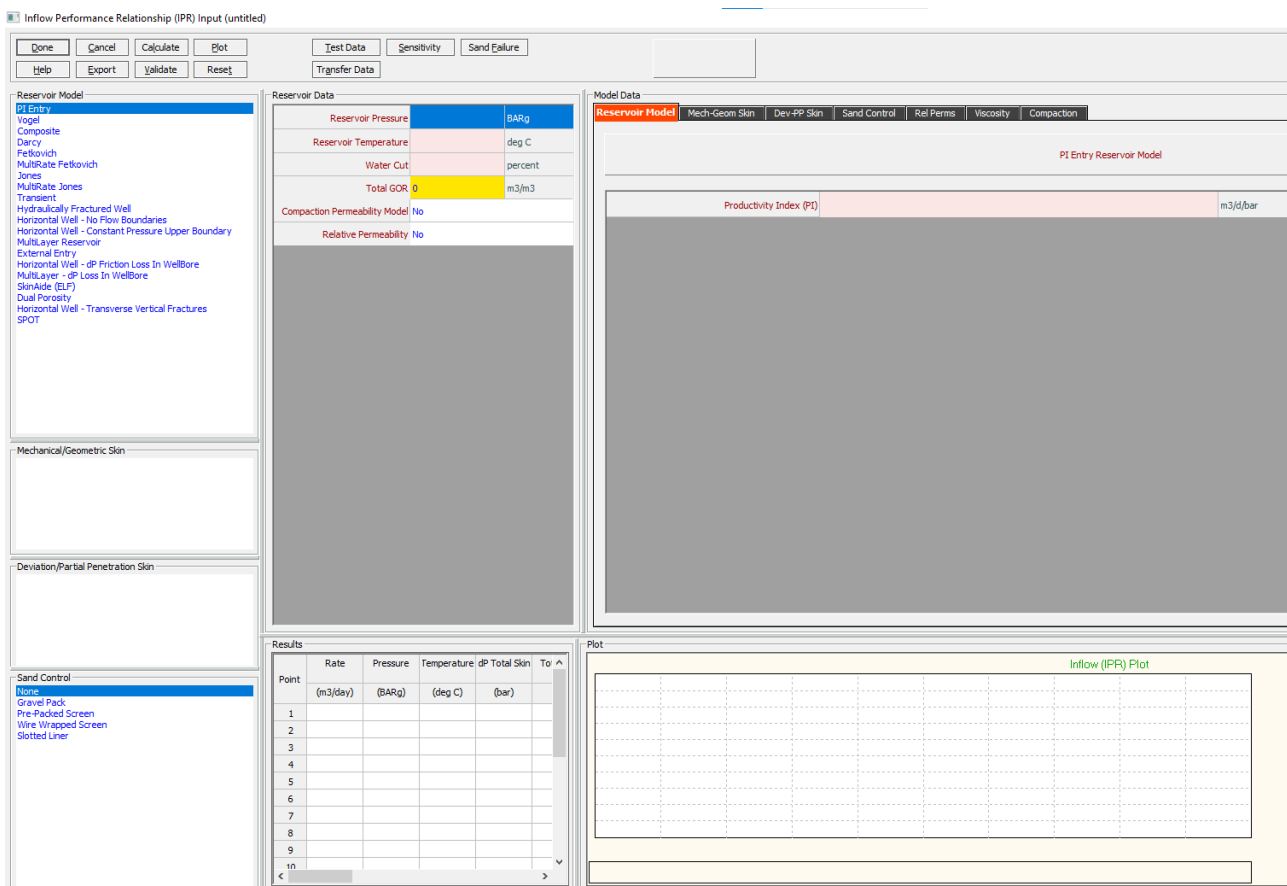
Formation Gradient

Depth Reference RKB Enter Measured Depth

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

Slika 3-7. Sučelje programa Prosper za unos podataka o temperaturnom gradijentu

Sljedeći korak je unos podataka o ležištu kako bi se dobila IPR krivulja koja pokazuje dotok iz ležišta u bušotinu. Na slici 3-8 je prikazano sučelje programa za unos podataka o modelu ležišta i ležišnim parametrima. Ono je podjeljeno u četiri sekcije, a to su *Reservoir Model* (hrv. model ležišta), *Reservoir Data* (hrv. ležišni podaci), *Model Data* (hrv. podaci o modelu), te sekcija *Results* (hrv. rezultati).



Slika 3-8. Sučelje programa Prosper za određivanje IPR krivulje

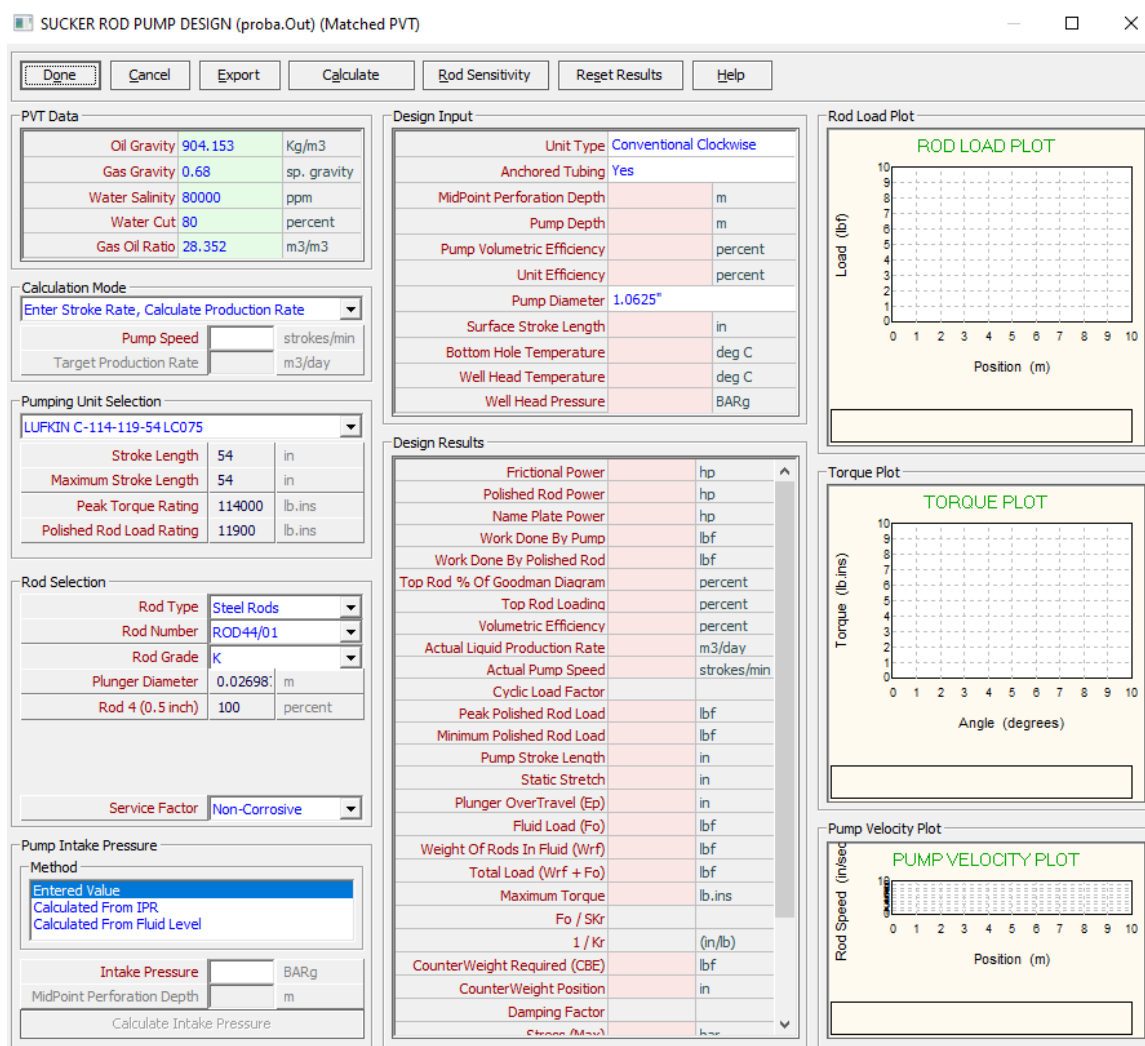
Najprije se u sekciji *Reservoir Model* definira model pomoću kojeg će se izračunavati IPR krivulja i skin faktor, te oprema za kontrolu pijeska, ako se koristi. Mogućnosti za izbor modeliranja IPR krivulje također se mogu vidjeti na Slici 3-8. Postoji više od 20 modela koji su primjenjivi u velikom rasponu bušotinskih uvjeta (Ahmed, 2010; Beggs, 2003; Economides, 2013), a neki od njih su Darcy, PI Entry, model dvojne poroznosti (engl. *Dual Porosity*), Fetkovich, Jones, multilateralni, višeslojni, Vogel itd. Odabir modela za određivanje IPR krivulje ovisi o količini i vrsti dostupnih podataka o bušotini i ležištu. Odabire se i način na koji će se modelirati utjecaj skin faktora, što je dostupno samo ako je kod proizvodnog opremanja odabrana opcija *Cased Hole*. Za slučaj kada postoje mjerenja odnosno ispitivanja bušotine (engl. *Well Testing*), vrijednost skina najbolje je unijeti ručno izravno u model. Ako to nije slučaj, može se odabrati jedan od tri analitička modela za računanje mehaničkog i geometrijskog skina, s pomoću varijabli poput vrijednosti duljine i promjera perforacija, debljine i propusnosti oštećene zone, broja perforacija itd. To su Locke, MacLeod, te Karakas i Tariq model (Houze et al, 2012). Zasebno se može izračunati

i skin uzrokovan djelomičnom penetracijom perforacija u proizvodnu zonu jednom od ugrađene dvije metode, Cinco/Martin-Bronz ili Wong-Clifford. Ako se koristi oprema za kontrolu pijeska i ona se navodi u ovom koraku modeliranja (Matanović et al, 2012). Izabere se jedna od četiri ponuđene opcije, a to su *Gravel Pack* (hrv. pješčani zasip), *Pre-Packed Screen* (hrv. predpakirani filter), *Wire Wrapped Screen* (hrv. žicom omotani filter) i *Slotted Liner* (hrv. prorezani lajner).

Kada je definiran model, unose se podaci o ležištu u sekciji *Reservoir Data*. Oni se odnose na ležišnu temperaturu, ležišni tlak, proizvodni omjer plina i kapljevine, te udio vode. Također se može uzeti u obzir i smanjenje propusnosti u pribušotinskoj zoni i kompaktnoj zoni oko perforacija. Vezano za spomenuto smanjenje propusnosti, mogu se definirati i krivulje relativnih propusnosti koje će se koristiti za određivanje promjene produktivnosti sustava u slučajevima povećanja udjela vode. Nakon što je odabran model, program generira IPR krivulju koja se može prikazati u sekciji *Results*. Pomoću nje se izračunava dinamički tlak na dnu bušotine koji će osigurati traženi protok, odnosno pridobivanje fluida na površinu.

Zadnji korak je dizajniranje sustava dubinske crpke s klipnim šipkama koristeći parametre navedene u ovom radu, koji su uneseni ili izračunati u prethodnim koracima. Dodatni podaci koji se moraju unijeti odnose se na parametre same crpke. Prozor unosa nalazi se na Slici 3-9. Sučelje se ponovno sastoji od nekoliko sekcija. Sekcija *PVT Data* (hrv. PVT podaci) već je opisana zajedno s neophodnim podacima za unos. *Calculation Mode* (hrv. način proračuna) sekcija se odnosi na način kojim se dolazi do brzine rada crpke ili traženog protoka bušotine. Može se birati između *Enter Stroke Rate and Calculate Production Rate* (hrv. unijeti brzinu rada crpke, izračunati proizvodnju) ili *Enter Production Rate and Calculate Stroke Rate* (hrv. unijeti protok, izračunati brzinu rada crpka). U sljedećoj sekciji *Pumping Unit Selection* (hrv. odabir pumpne jedinice) odabire se površinsko postrojenje, dok se u sekciji *Rod Selection* (hrv. odabir klipnih šipki) odabire vrsta klipnih šipki i njihova kvaliteta. Ponuđene su opcije koje se nalaze u bazi podataka samog programa. Pod *Service Factor* odabire se opciju ovisno o uvjetima u bušotini, *Non-Corrosive* (hrv. nekorozivno), *Salt Water* (hrv. slana voda) ili *Hydrogen Sulphide* (hrv. sumporovodik). Zadnja sekcija s lijeve strane prozora naziva se *Pump Intake Pressure* (hrv. tlak na ulazu u crpku). Postoje tri metode za računanje tlaka usisne strane crpke. Može se direktno unijeti preko opcije *Entered Value* (hrv. unijeti vrijednost), može se izračunati iz IPR krivulje opcijom *Calculated From IPR* (hrv. izračunati iz IPR krivulje) uz korekciju na

dubinu postavljanja crpke, te pomoću razine fluida opcijom *Calculated From Fluid Level* (hrv. izračunato iz razine fluida).



Slika 3-9. Sučelje programa Prosper za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama

S desne strane nalazi se sekcija *Design Input* (hrv. ulazni podaci za dizajn). Podaci koji se ovdje unose definiraju bušotinske uvjete u kojima se nalazi crpka. Potrebno je izabrati hoće li tubing biti usidren (engl. *Anchored Tubing*), kako bi se spriječilo izvijanje prilikom rada crpke, ili neće. Sidrenjem tubinga povećava se i efektivna duljina hoda klipa, a samim time i količina fluida koju crpka iznosi na površinu. Unosi se dubina sredine perforacija (engl. *MidPoint Perforation Depth*), dubina postavljanja same crpke (engl. *Pump Depth*) i njena volumetrijska djelotvornost (engl. *Pump Volumetric Efficiency*). Promjer crpke (engl. *Pump Diameter*), duljina hoda glatke šipke (engl. *Surface Stroke Length*), temperature na

dnu bušotine (engl. *Bottom Hole Temperature*) i na ušću bušotine (engl. *Well Head Temperature*) i tlak na ušću bušotine (engl. *Well Head Pressure*) se također unose u ovoj sekciji.

Kada su svi potrebni podaci uneseni, klikom na opciju *Calculate* izračunaju se vrijednosti parametara pod sekcijom *Design Results* (hrv. rezultati dizajna). Pomoću tih parametara dobiva se uvid u radne uvjete dubinske crpke koja može biti ugrađena u bušotinu kako bi se ostvarila tražena vrijednost proizvodnje nafte, odnosno protok bušotine. Kao što se vidi na Slici 3-9, uz same rezultate mogu biti nacrtani i dijagrami opterećenja šipki (engl. *Rod Load Plot*), torzije (engl. *Torque Plot*), te brzina rada crpke (engl. *Pump Velocity Plot*).

4. PRIMJER DIZAJNIRANJA DUBINSKE CRPKE S KLIPNIM ŠIPKAMA NA BUŠOTINI X

Kako bi se dobio uvid u dizajniranje dubinske crpe s klipnim šipkama u programu Prosper, u ovom poglavlju je izrađen početni primjer proizvodnog modeliranja ovakvog sustava za odabranu tj. fiktivnu bušotinu X, čiji je indeks proizvodnosti nizak (PROSPER User Manual, 2018). S obzirom na to da on predstavlja proizvodnju tj. protok fluida pri određenoj tlačnoj depresiji, u slučaju kada je njegova vrijednost pala ili je relativno niska, poseže se za nekim od prinudnih načina podizanja kapljevine. U sljedećem primjeru to je ugradnja dubinske crpke s klipnim šipkama, pri čemu je potrebno odrediti optimalan sustav proizvodnje dubinskom crpkom s klipnim šipkama za zadane uvjete u bušotini i ležištu.

4.1 Uvod u primjer za bušotinu X

Cilj zadatka je napraviti datoteku u Prosperu, temeljenu na ulaznim podacima za bušotinu X, kroz detaljan opis ključnih koraka pri dizajniranju proizvodnog sustava dubinske crpke s klipnim šipkama, te provesti analizu osjetljivosti s obzirom na povećan udio vode u proizvodnji. Općeniti pristup rješavanju zadatka u svrhu postizanja spomenutih ciljevi sastoji se od sljedećih koraka:

- a) Unos ulaznih podataka za novu bušotinu s dubinskom crpkom s klipnim šipkama;
- b) Unijeti PVT karakteristike proizvodnog fluida i uskladiti ih s mjerenim podacima;
- c) Unijeti podatke o opremi koja će se koristiti u dizajniranju dubinske crpke;
- d) Unijeti podatke za kreiranje IPR krivulje pomoću koje se dolazi do tlaka na dnu bušotine za traženi protok;
- e) Provesti izračun kako bi se dobio konačan dizajn dubinske crpke s klipnim šipkama;
- f) Provesti analizu osjetljivosti kako bi se vidjela mogućnost prognoziranja rada bušotine u programu Prosper.

4.2 Ulazni podaci za bušotinu X

Svi ulazni podaci za unos u pojedina sučelja programa (potprograma), opisanih u prethodnom poglavlju, sistematizirano su prikazani u tablicama od 4-1 do 4-8.

4.2.1 PVT podaci

Laboratorijski PVT podaci o svojstvima proizvodnog fluida nalaze se u Tablici 4-1.

Tablica 4-1. PVT podaci o ležišnom fluidu u bušotini X

GOR	28,352 m ³ /m ³
Gustoća nafte	904,153 kg/m ³
Specifična gustoća plina	0,68
Salinitet vode	80 000 ppm
Molni udio H ₂ S	0%
Molni udio CO ₂	0%
Molni udio N ₂	0%

Izmjerene su vrijednosti GOR-a, obujamskog koeficijenta nafte i viskoznost nafte pri temperaturi od 54,44 °C. One se koriste za usklađivanje s ugrađenim korelacijama, pojašnjanim prethodno, i nalaze se u Tablici 4-2.

Tablica 4-2. Mjereni podaci pri izotermi 54,44 °C

Tlak, bar	GOR, m ³ /m ³	Obujamski koeficijent nafte, m ³ /m ³	Viskoznost nafte, μPa s
89,6318	28,352	1,06	6900

4.2.2 Podaci o opremi

U svrhu daljnjeg proizvodnog modeliranja bušotine X unose se podaci o otklonu bušotine (Tablica 4-3), podzemnoj opremi (Tablica 4-4), geotermalnom gradijentu (Tablica 4-5) i prosječnim specifičnim toplotama fluida (Tablica 4-6).

Tablica 4-3. Podaci o otklonu bušotine X

Mjereni dubina, m	Stvarna vertikalna dubina, m
0	0
1066,8	1066,8

Iz podataka u Tablici 4-3 može se zaključiti da je bušotina potpuno vertikalna, odnosno da nema nikakvog otklona od vertikalne osi. Bušotina je duboka 1066,8 m, odnosno 3500 ft.

Tablica 4-4. Podaci o podzemnoj opremi u bušotini X

Tip	Mjerena dubina, m	Unutarnji promjer tubinga, m	Unutarnja hrapavost tubinga, m	Vanjski promjer tubinga, m	Vanjska hrapavost tubinga, m	Unutarnji promjer zaštitnih cijevi, m	Unutarnja hrapavost zaštitnih cijevi, m
Erupcijski uređaj	0						
Tubing	1066,8	0,062001	0,00003	0,066675	0,00003	0,16002	0,00003

U bušotini se osim zaštitnih cijevi prema Tablici 4-4 nalazi samo niz uzlaznih cijevi. Unutarnji promjer tubinga odgovara promjeru od 0,062001 m (2,441"), vanjski promjer tubinga je 0,066675 m (2,625"), dok je unutarnji promjer zaštitnih cijevi 0,16002 m (6,3").

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

Mjerena dubina, m	Temperatura, °C
0	15,5556
1066,8	54,4444

U ovom primjeru je kod izračuna i postavljanja modela odabrana opcija tzv. gruba procjena (engl. *Rough Approximation*), pa je, prema naprijed opisanom, potreban i podatak za ukupan koeficijent prijelaza toplina, koji u prvoj aproksimaciji iznosi 45,4319 W/m²/K. On se u fizikalnom smislu odnosi na gubitak topline u jednoj sekundi na jednom metru kvadratnom površine prilikom promjene temperature od jednog stupnja.

Tablica 4-6. Prosječne specifične topline

	Specifične topline, (J/kg/°C)	
Nafta	2219,003	(0,53 BTU/lb/°F)
Plin	2135,267	(0,51 BTU/lb/°F)
Voda	4186,798	(1 BTU/lb/°F)

Za specifične topline nafte, plina i vode uzete su njihove standardne vrijednosti, ali se mogu promjeniti, ukoliko su njihove vrijednosti za fluide u pojedinim bušotinama dodatno određivane.

Tablica 4-7. Podaci za izračun IPR krivulje

Odabrani model	PI Entry
Ležišni tlak	103,421 bar
Ležišna temperatura	54,4444 °C
Udio vode	80 %
Ukupni GOR	28,352 m ³ /m ³
Indeks proizvodnosti	1,15296 m ³ /dan/bar

Tablica 4-8 sadržava podatke potrebne za dizajniranje dubinske crpke i opcije koje se odabiru u programu na hrvatskom jeziku, dok su u Tablici 4-9 prikazane iste informacije, ali na engleskom jeziku, kako bi se olakšalo praćenje popratnih slika u nastavku, preuzetih iz programa Prosper.

Tablica 4-8. Podaci za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama

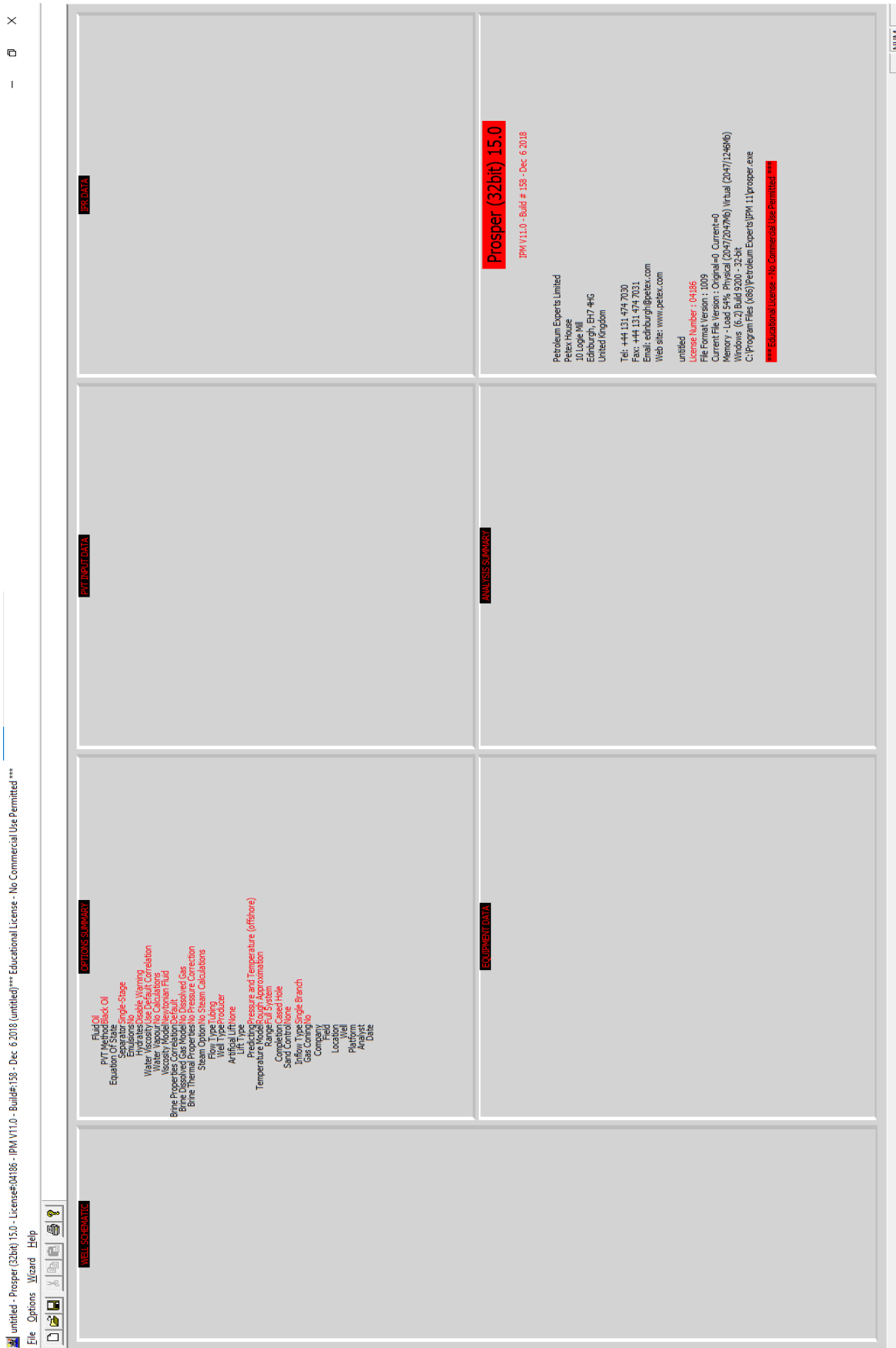
Način proračuna	Unijeti traženi protok
Očekivani protok kapljevine	75 m ³ /dan
Odabir crpke	LUFKIN C-320-305-100 LC044
Vrsta klipnih šipki	Čelične klipne šipke
Broj klipnih šipki	ROD99/05
Klasa klipnih šipki	D
Servisni faktor	Ne korozivne
Metoda dobivanja tlaka na usisu crpke	Izračunati iz IPR-a
Vrsta postrojenja	Konvencionalno
Usidreni tubing	Da
Dubina sredine perforacija	1066,8 m
Dubina postavljanja crpke	1066,8 m
Volumetrijska djelotvornost crpke	80 %
Djelotvornost postrojenja	75 %
Promjer crpke	2" (0,0508 m)
Duljina hoda glatke šipke	48" (1,2192 m)
Temperatura na dnu bušotine	54,4444 °C
Temperatura na ušću bušotine	32,2222 °C
Tlak na ušću bušotine	7,9 bar

Tablica 4-9. Podaci za dizajniranje dubinske crpke na engleskom jeziku (iz Tablice 4-8)

Calculation Mode	Enter Production Rate
Target Production Rate	75 m ³ /day
Pumping Unit Selection	LUFKIN C-320-305-100 LC044
Rod Type	Steel Rods
Rod Number	ROD99/05
Rod Grade	D
Service Factor	Non-corrosive
Pump Intake Pressure – Method	Calculate from IPR
Unit Type	Conventional Clockwise
Anchored Tubing	Yes
Midpoint Perforation Depth	1066,8 m
Pump Depth	1066,8 m
Pump Volumetric Efficiency	80 %
Unit Efficiency	75 %
Pump Diameter	2" (0,0508 m)
Surface Stroke Length	48" (1,2192 m)
Bottom Hole Temperature	54,4444 °C
Well Head Temperature	32,2222 °C
Well Head Pressure	7,9 bar

4.3 Postavljanje proizvodnog modela bušotine X

U ovom poglavlju se opisuje postavljanje proizvodnog modela korak po korak. Pokretanjem programa Prosper na zaslonu se prikaže sučelje koje se sastoji od nekoliko sekcija. Ono je pokazano Slikom 4-1. Svaka sekcija se odnosi na jedan dio postavljanja modela tj. proizvodnog modeliranja.



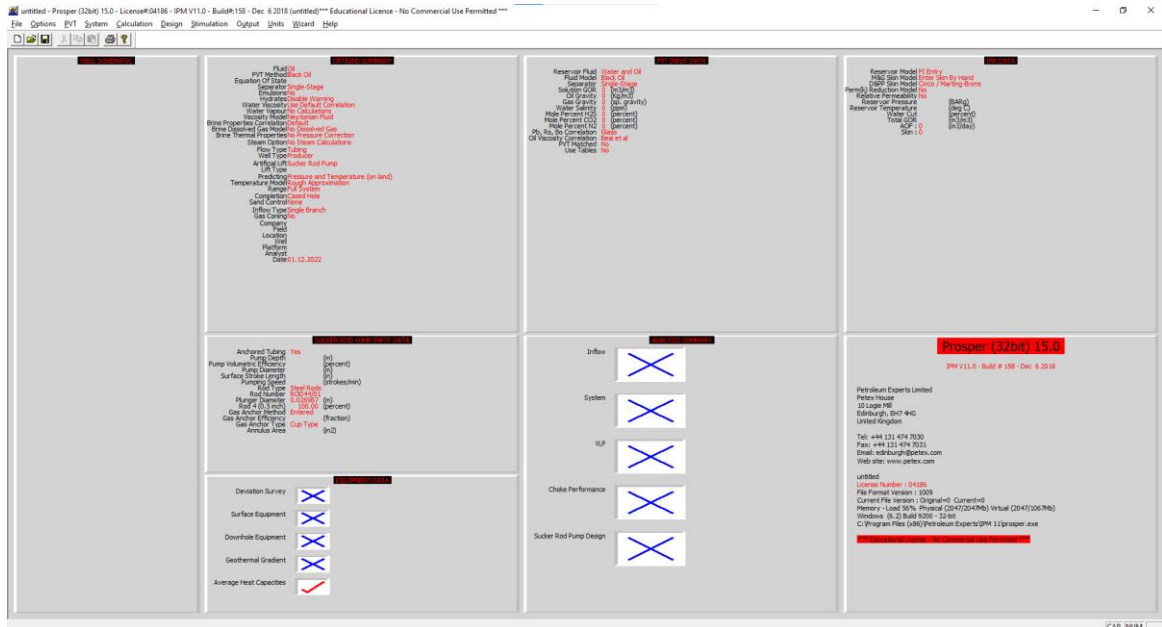
Slika 4-1. Glavno sučelje programa Prosper

Prvi korak nakon otvaranja programa je unos općenitih podataka kao što je opisano u trećem poglavlju ovog rada. Upisuju se i odabiru opcije sukladno s danim podacima u priručniku. Sa unosom se započinje klikom na *Options Summary*, koja otvara prozor *System Summary*, kao na Slici 4-2.

Slika 4-2. Uvodni podaci za proizvodni sustav bušotine X

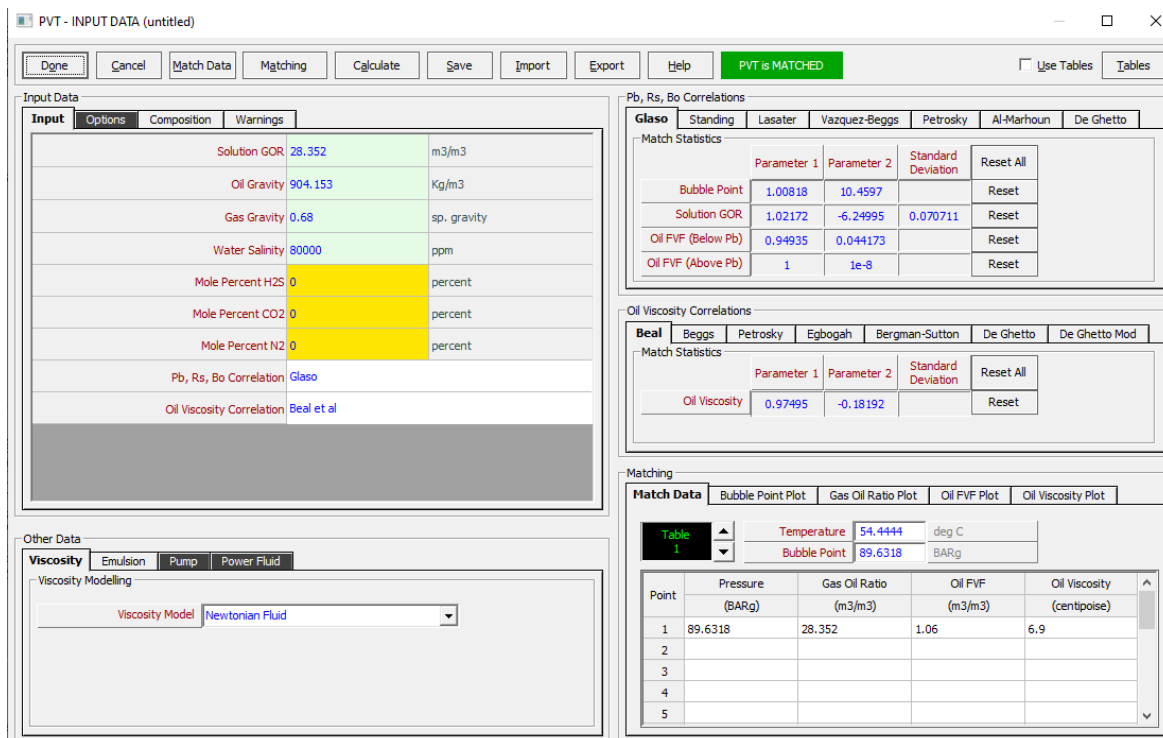
Kao što se vidi pod opcijom *Fluid* odabrano je *Oil and Water*, što znači da kroz bušotinu protječu nafta i voda. Opcija *Well Type* omogućuje izbor proizvodne bušotine (engl. *Producer*). Buduće metode proračuna temeljit će se na modelu *Black Oil* ili teške nafte. Pod sekcijom prinudnog podizanja odabrana je opcija *Sucker Rod Pump* ili dubinska crpka s klipnim šipkama. Ne dolazi do stvaranja emulzija i nema kontrole dotoka pijeska, pa su sukladno tome odabrane i pripadajuće opcije. Što se proračuna tiče, predviđaju se i tlak i temperatura preko opcije *Predict Pressure and Temperature*, a kako se bušotina nalazi na kopnu, odabire se *on land* (hrv. na kopnu) opcija. Model proračuna je gruba procjena ili *Rough Approximation*. Bušotina je zacijevljena i odabrana je opcija *Cased Hole*. Nakon

završetka odabira navedenih opcija, klikom na *Done* program se vraća na početni prozor sa Slike 4-1, koji sada izgleda kao na Slici 4-3. Program je preko odabranih opcija odredio koji će podaci biti potrebni za daljnje postavljanje traženog proizvodnog modela.



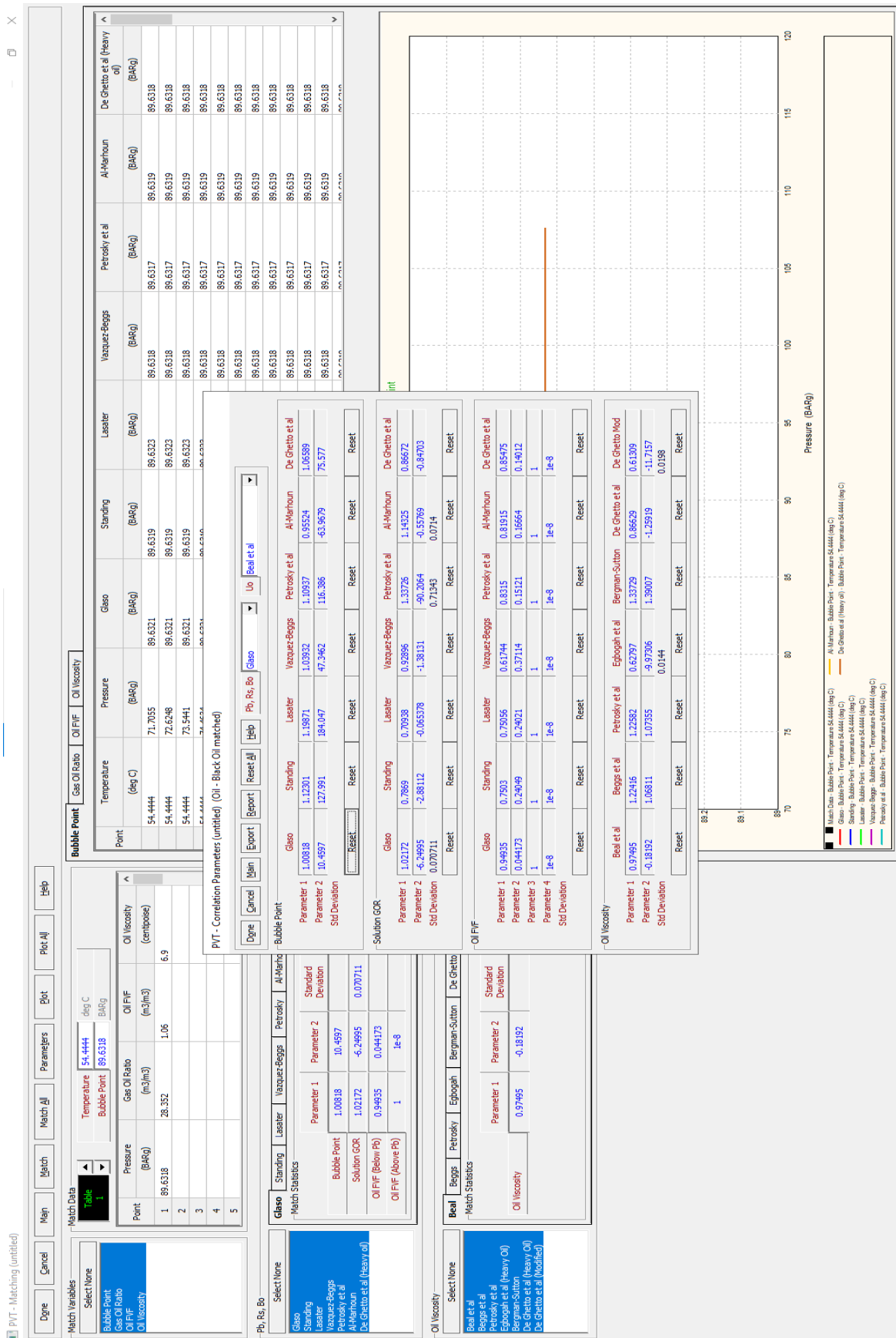
Slika 4-3. Glavno sučelje programa prema definiranim podacima za bušotinu X

Drugi korak je unos PVT karakteristika fluida. Najprije se klikom na sekciju *PVT Input Data* otvara prozor pokazan na Slici 4-4. U sekciju *Input Data* se unose podaci iz Tablice 4-1.



Slika 4-4. PVT svojstva fluida u bušotini X

Također, odabiru se korelacije koje su prikazane na desnoj strani prozora i koje će program koristiti u proračunu PVT podataka. Pri odabiru korelacija pomažu parametri koji govore o preciznosti pojedine korelacije. Kako bi bili sigurni u korelacije koje su odabrane, u sekciji *Matching* one se usklađuju s mjerenim podacima. Unosi se iznos temperature pri kojoj su izvedena mjerenja, tlak zasićenja pri toj istoj temperaturi te izmjerene vrijednosti GOR-a, obujamskog koeficijenta nafte i viskoznosti nafte. Odabirom opcije *Matching* otvorit će se novi prozor za usklađivanje podataka. Prikazan je na Slici 4-5. U njemu se mogu birati koje korelacije će biti korištene za usklađivanje s mjerenim podacima.

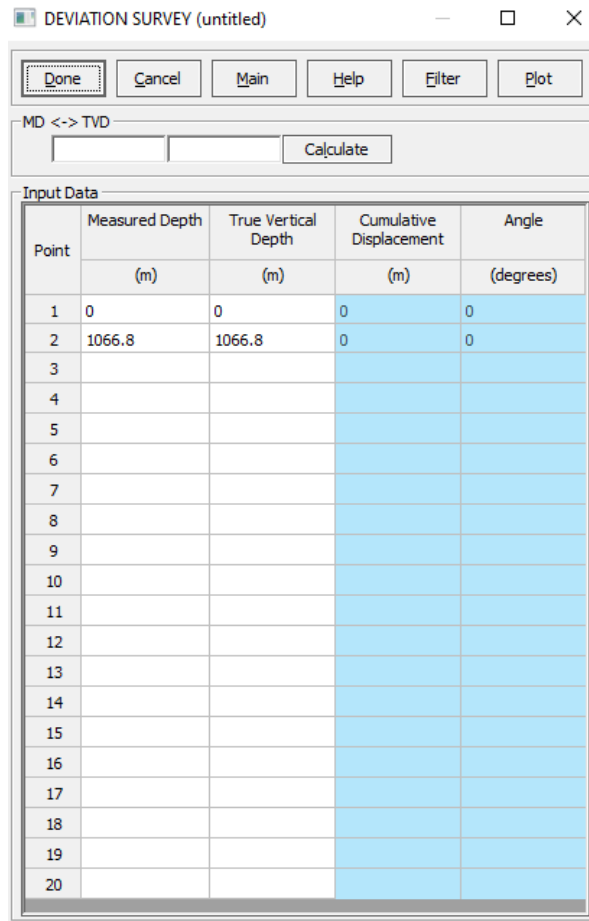


Slika 4-5. Odabir PVT korelacija za bušotinu X

Odabirom opcije *Match All* sve korelacije se usklađuju. Nakon što je program „mečirao“ podatke, mogu se vidjeti parametri za svaku od njih, kao i grafovi koji pokazuju odstupanja od mjerenih podataka. Kao što je već pojašnjeno u poglavlju 3, iz slike se vidi kako je najpreciznija korelacija za računanje p_b , R_s i B_o Glaso, a za viskoznost nafte Beal et al. korelacija. Zato su iste i odabrane u sekciji *Input Data*. Nakon što je završeno usklađivanje i unos PVT podataka u zelenom okviru pojavit će se natpis *PVT is Matched* što znači da su PVT podaci uspješno usklađeni. Time je ujedno omogućeno da se daljnjim modeliranjem dobiveni rezultati PVT vrijednosti fluida pri promijenjenim uvjetima u bušotini mogu smatrati precizno određenim. Ponovno se klikom na *Done* dolazi do početnog zaslona programa.

Treći korak je unos podataka o opremi. Prozor za unos otvara se klikom na *Equipment Data*. Identičan je prozoru sa Slike 3-3. Za jednostavnije kretanje kroz nabrojane sekcije, označe se kvačice ispred naziva svake sekcije i klikne se tipku *Edit* (hrv. uredi).

Najprije se otvori prozor o putanji bušotine. U njega se unosi dubinu bušotine, te stvarnu vertikalnu dubinu, ako postoji otklon. U ovom primjeru unosi se dubina od 1066,8 m, kao što je prikazano na Slici 4-6.



Slika 4-6. Otklon bušotine X

Nakon unosa dubine klikom na *Done* automatski nam se otvori prozor sljedeći po redu u sekciji *Equipment Data*, a to je *Surface Equipment*. Ovdje se unosi površinska oprema koje u primjeru nema, tako da se prozor ostavi prazan i klikom na *Done* dolazi se do prozora *Downhole Equipment*. Ovdje uneseni podaci predstavljaju put koji fluid prolazi od ležišta do površine. Podaci iz Tablice 4-4 se upisuju u prozor, kao što prikazuje Slika 4-7.

DOWNHOLE EQUIPMENT (untitled)

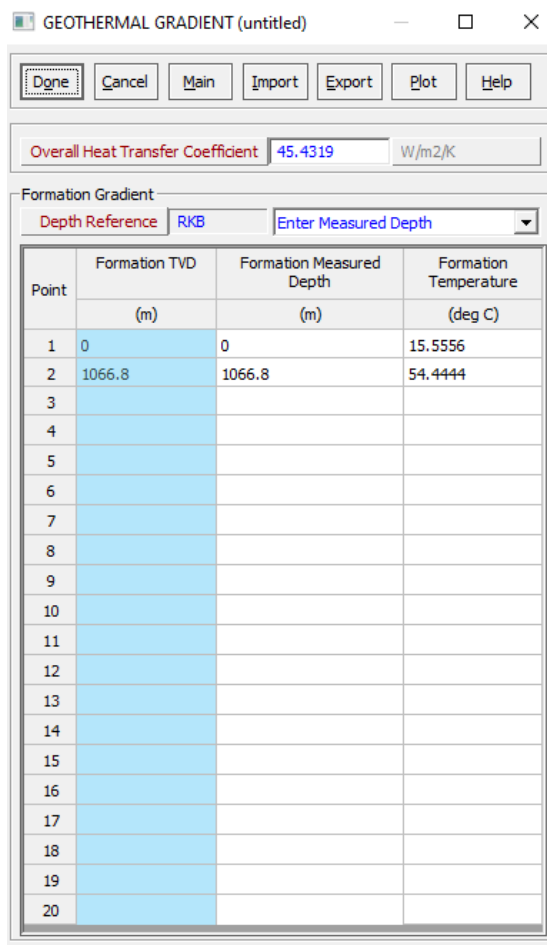
Done Cancel Main Import Export Report Tubing DB Casing DB Help

Input Data

Point	Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside Diameter (m)	Tubing Inside Roughness (inches)	Tubing Outside Diameter (m)	Tubing Outside Roughness (inches)	Casing Inside Diameter (m)	Casing Inside Roughness (inches)	Rate Multipli
1		Xmas Tree	0							
2	Mid-Perf	Tubing	1066.8	0.062001	0.0012	0.066675	0.0012	0.16002	0.0012	1
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										

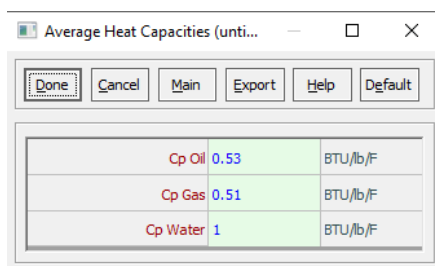
Slika 4-7. Ugrađena oprema u bušotinu X

Pri dizajniranju dubinske crpke s klipnim šipkama, zadnja unesena dubina u tablicu podzemne opreme treba biti okarakterizirana kao dubina sredine perforacija. Klikom na *Done* prelazi se na prozor *Geothermal Gradient*, Slika 4-8 (Anand et al, 1973). Unosi se geotermalni gradijent stijene koja okružuje bušotinu. On se koristi u izračunavanju temperaturnih razlika koje proizvodni fluid prenosi protječući bušotinom, te za računanje ukupnog koeficijenta prijelaza topline. Podaci za unos u ovom djelu programa nalaze se u Tablici 4-5. Klikom na *Done* prelazi se na prozor *Average Heat Capacities*, Slika 4-9.



Slika 4-8. Geotermalni gradijent u bušotini X

Zadnji prozor u sekciji *Equipment Data* odnosi se na specifične topline nafte, plina i vode, čije se vrijednosti nalaze u Tablici 4-6. Kako je za temperaturni model u primjeru odabran model grube aproksimacije, ove prosječne vrijednosti se koriste kako bi se u proizvodnom modelu odredile razne proizvodne karakteristike, ovisne o stalnim promjenama temperature i tlaka proizvodnog fluida. Klikom na *Done* završava unos podataka u sekciji *Equipment Data* i kreće se na četvrti korak koji se odnosi na IPR model (Slika 4-10).



Slika 4-9. Specifične topline fluida u bušotini X

Inflow Performance Relationship (IPR) Input (untitled) (Matched PVT)

PI Entry
 Vogel
 Composite
 Darcy
 Fetkovich
 Multirate Fetkovich
 Jones
 Multirate Jones
 Transient
 Hydraulic Fracture Well
 Horizontal Well - Fractures
 Horizontal Well - Constant Pressure Upper Boundary
 Multilayer Reservoir
 External Entry
 Horizontal Well - DP Friction Loss In Wellbore
 Multilayer - DP Loss In Wellbore
 SkinAide (EIF)
 Dual Porosity
 Horizontal Well - Transverse Vertical Fractures
 SPOT

Reservoir Data
 Reservoir Pressure 103.421 BARg
 Reservoir Temperature 54.4444 deg C
 Water Cut 80 percent
 Total GOR 28.352 m3/m3
 Compaction Permeability Model No
 Relative Permeability No

Model Data
 Reservoir Model
 PI Entry Reservoir Model
 Productivity Index (PI) 1.15296 m3/d/bar

Results

Point	Rate (m3/day)	Pressure (BARg)	Temperature (deg C)	Temperature dP Total Skin (bar)
1	0.00015899	103.421	54.4444	0
2	4.61537	99.42	54.5276	0
3	9.22638	95.4188	54.6083	0
4	13.8398	91.4176	54.6881	0
5	18.453	87.4114	54.7675	0
6	23.0662	83.3743	54.847	0
7	27.6794	79.2985	54.9272	0
8	32.2926	75.1778	55.0083	0
9	36.9058	71.0048	55.0904	0
10	41.5191	66.7897	55.1771	0

Sand Control
 None
 Gravel Pack
 Pre-Packed Screen
 Wire Wrapped Screen
 Slotted Liner

Deviation/Partial Penetration Skin

Plot
 Inflow (IPR) Plot
 Temperature (deg C)
 Pressure (BARg)
 Liquid Rate (m3/day)
 IPR Pressure Curve (green line)
 IPR Temperature Curve (red line)

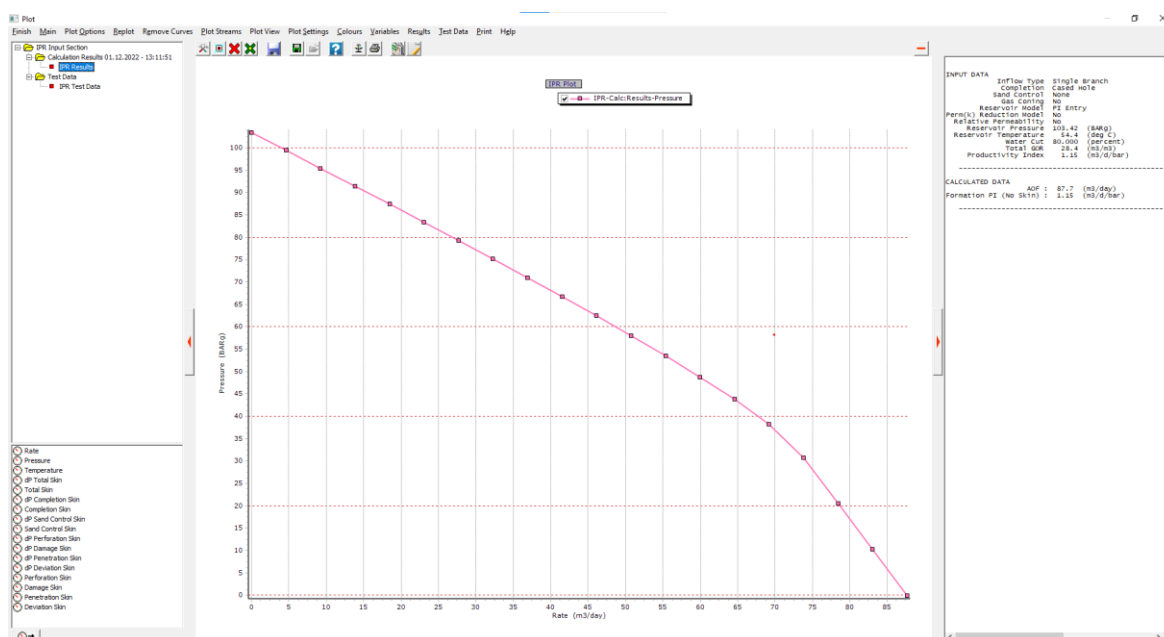
INFLOW PERFORMANCE DATA (OIL WELL)
 Inflow Type Single Branch
 Completion Cased Hole
 Sand Control None
 Gas Coning No
 Reservoir Model PI Entry
 Perm(k) Reduction Model No
 Relative Permeability No
 Reservoir Pressure 103.421 (BARg)
 Reservoir Temperature 54.4444 (deg C)
 Water Cut 80 (percent)
 Total GOR 28.352 (m3/m3)

CALCULATED DATA
 AOF : 87.651 (m3/day)
 Formation PI (No Skin) : 1.15296 (m3/d/bar)

Slika 4-10. Određivanje IPR krivulje u bušotini X

IPR sekcija određuje utok fluida u bušotinu, odnosno indeks proizvodnosti. U programu Prosper je ugrađeno više od 20 IPR modela koji se mogu odabrati i primijeniti u različitim uvjetima cjelokupnog proizvodnog sustava. IPR prozor se otvara klikom na sekciju *IPR Data*, odabire se model, unose podaci iz Tablice 4-7, te se dobiva IPR krivulja (Slika 4-11).

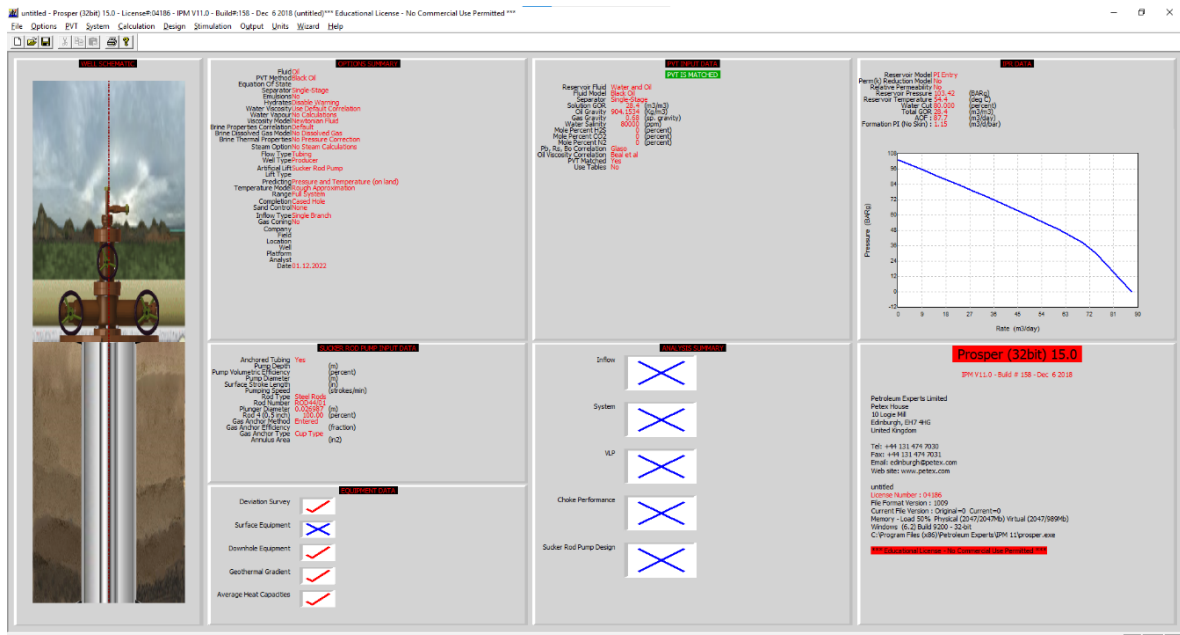
Kao što je vidljivo na Slici 4-10, na lijevoj strani prozora pod sekcijom *Reservoir Model* odabran je *PI Entry* što znači da je potrebno unijeti vrijednost procijenjenog ili ranije računatog indeksa proizvodnosti. Ispod sekcije se nalaze podaci o skinu, kojeg se u ovom primjeru zanemaruje, te podaci o kontroli pijeska koja u ovom slučaju nije potrebna. Desno se nalazi sekcija *Reservoir Data* gdje se vide unesene vrijednosti ležišnog tlaka od 103,421 bar, ležišna temperatura od 54,44 °C, udio vode 80%, te ukupni GOR 28,352 m³/m³. Kada su podaci uneseni, klikom na *Calculate* proračuna se IPR krivulja, te klikom na *Plot* ista se krivulja grafički prikaže u novom prozoru, Slika 4-11. Pod sekcijom *Results* dobiju se međusobno ovisne vrijednosti protoka, tlaka, temperature i skina.



Slika 4-11. Grafički prikaz IPR krivulje u bušotini X

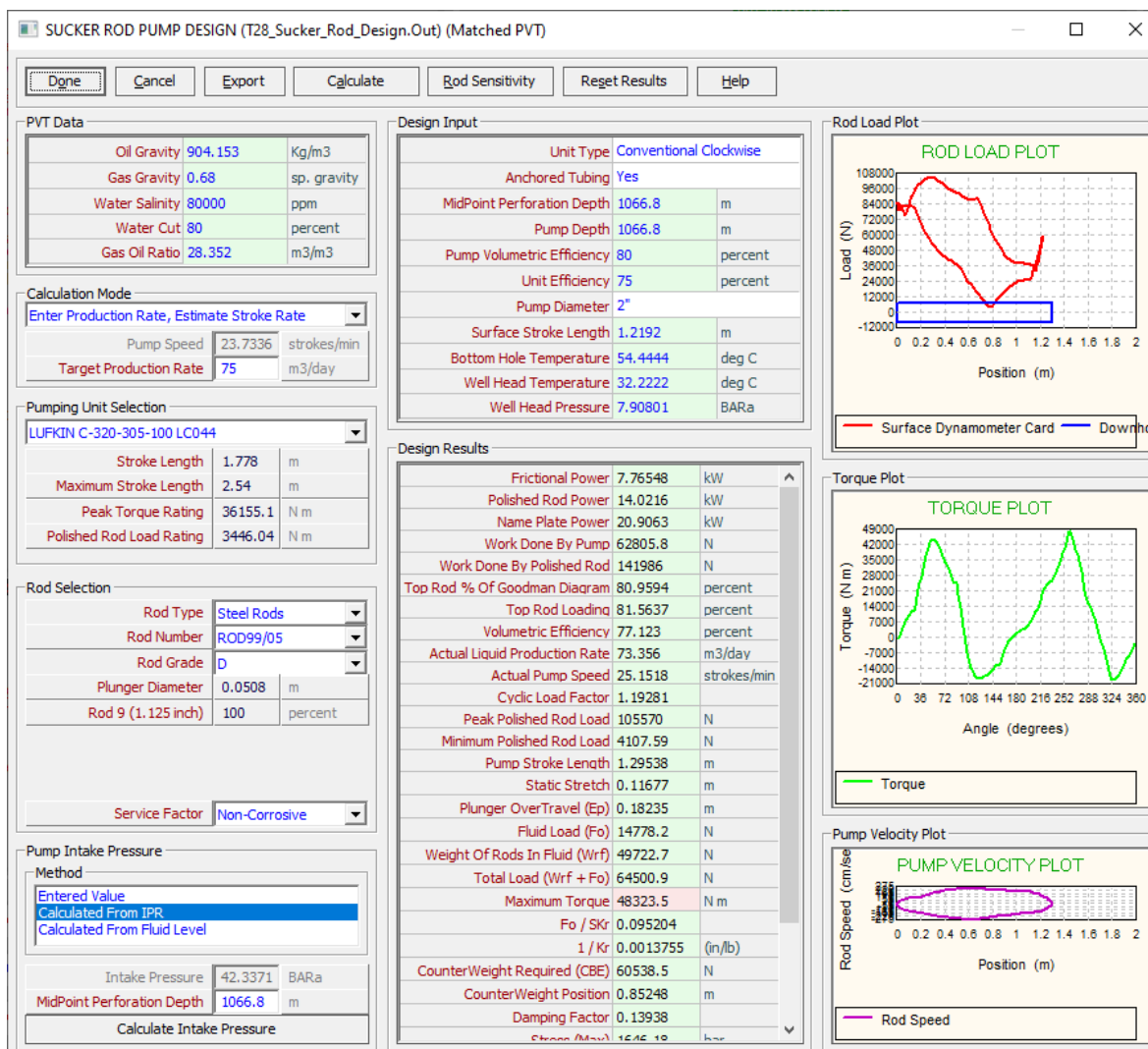
Na IPR grafu mogu se birati podaci koji će biti prikazani. Na Slici 4-11 je izabran dinamički tlak u odnosu na protok. IPR je potrebno određivati iznova za svaku promjenu uvjeta, jer se izračunata maksimalna teoretska proizvodnja (engl. *Absolute Open Flow*) koristi u prognoziranju rada bušotine, odnosno u određivanju njenih proizvodnih

karakteristika pri budućim promjenama u proizvodnom sustavu. Iz grafa se može očitati da maksimalna teoretska proizvodnja u primjeru iznosi 87,7 m³/dan. Prozor s IPR krivuljom se zatvara klikom na X u gornjem desnom kutu, te se u prozoru s IPR podacima odabere *Done*. Nakon uspješnog unosa i određivanja IPR krivulje glavno sučelje programa Prosper izgleda kao na Slici 4-12. Na lijevoj strani sučelja može se vidjeti i shematski prikaz bušotine s obzirom na podatke unesene u sekciji *Equipment Data*.



Slika 4-12. Glavno sučelje programa nakon definiranja IPR krivulje

Sljedeći, peti korak je dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama. Do toga se dolazi klikom na opciju *Design* koja se nalazi na alatnoj traci programa, te se odabire *Sucker Rod Pump*. Time se otvara prozor kao na Slici 4-13.



Slika 4-13. Ulazni podaci za dizajniranje dubinske crpke s klipnim šipkama u bušotini X

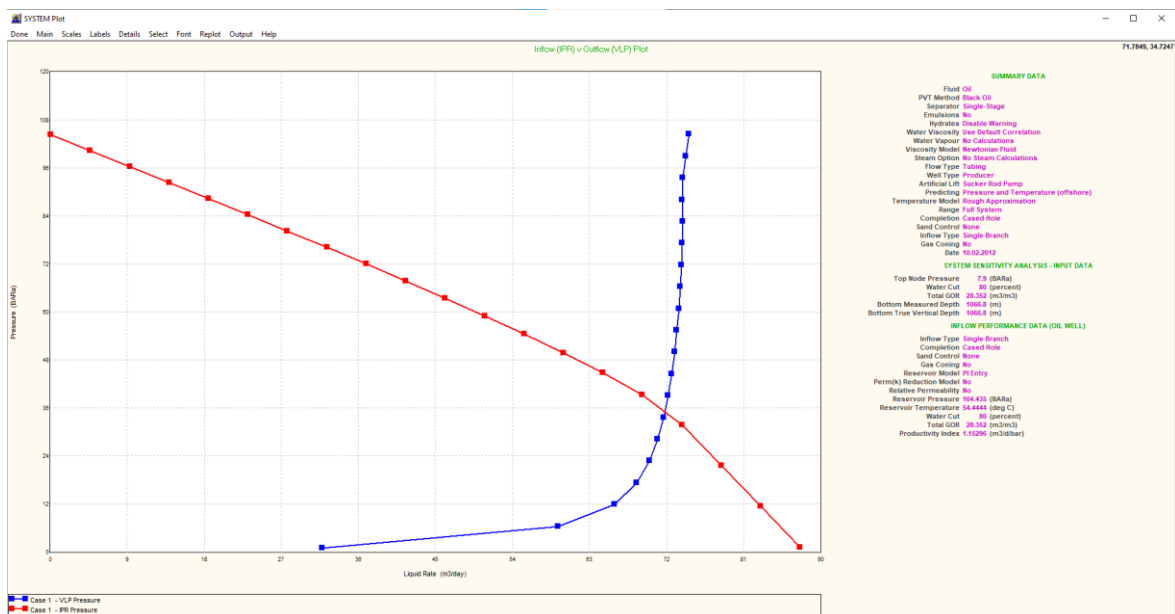
Prozor je podjeljen na više sekcija koje se odnose na dizajniranje dubinske crpke, a u nastavku su pojašnjeni samo glavni pojmovi vezani za dizajniranje, dok se svi podaci potrebni za unos u prikazanom prozoru nalaze u Tablici 4-8. PVT podaci unešeni su ranije i automatski su prenešeni u ovaj prozor. U sekciji *Calculation Mode* odabere se mogućnost unosa vrijednosti tražene proizvodnje od 75 m³/dan, koja se očekuje vezano na mogućnosti utoka fluida u bušotinu, kao i na početni projekt, odnosno ugrađenu opremu u bušotini. Iz ove vrijednosti program postavlja brzinu rada crpke. U sljedećoj sekciji se iz kataloga u programu odabire se vrsta crpke za zadane uvjete. To je LUFKIN C-320-305-100 LC044, čime su određeni i podaci o duljini hoda, maksimalnoj duljini hoda, torziji te opterećenju glatke šipke (Gibbs, 1963; Jennings, 1989). Zatim se odabiru klipne šipke. To su čelične klipne šipke ROD99/05 klase D. Tim odabirom određen je i promjer klipa, te debljina šipki.

Nakon toga unose se podaci u sekciju *Design Input*. Vrsta postrojenja je konvencionalno. Tubing je usidren, što rezultira većim efektivnim hodom klipa, a samim time i većom istisninom crpke. Također, time će i opterećenje na niz klipnih šipki biti manje. Unosi se dubina sredine perforacija, te dubina postavljanja dubinske crpke koje su u ovom slučaju jednake, tj. 1066,8 m. Promjer crpke koji se unosi u ovoj sekciji ne smije iznositi manje od promjera klipa koji je određen u sekciji prije. Odabran je promjer crpke 0,0508 m (2"). Duljina hoda glatke šipke iznosi 1,2192 m (48").

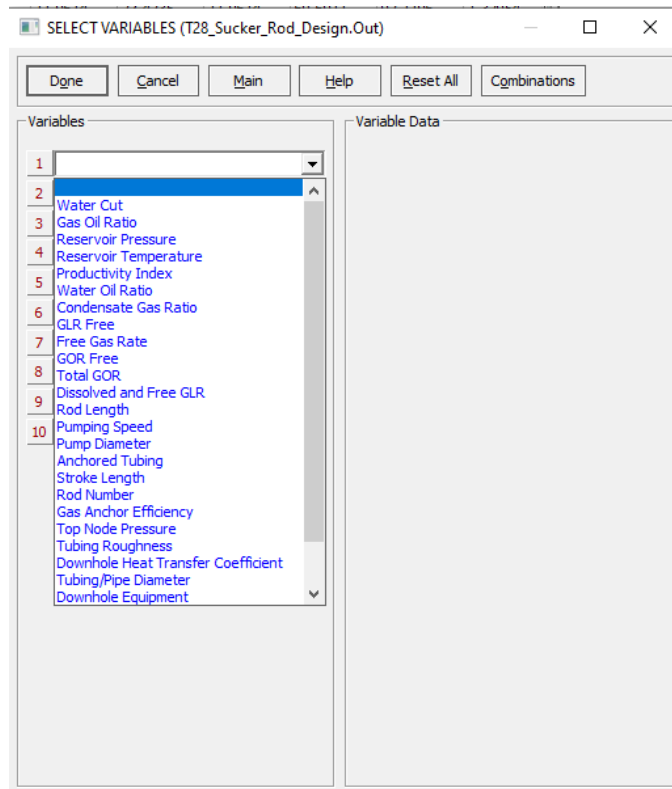
Zadnji korak je određivanje tlaka na usisnoj strani crpke. Kako je dubina postavljanja crpke jednaka dubini sredine perforacija može se iskoristiti iznos očekivane proizvodnje, te podaci s IPR krivulje kako bi se potvrdio tlak potreban za tu količinu protoka. Za takav proračun odabere se opcija izračunavanja tlaka na usisnoj strani crpke iz IPR krivulje, te se ponovo unese dubina sredine perforacija i klikom na tipku *Calculate Intake Pressure* (hrv. izračunaj tlak na usisnoj strani crpke) dobije se vrijednost tlaka od 42,33 bar. Kada je pronađen tlak može se klikom na *Calculate* provesti konačno dizajniranje crpke u kojem program provjerava i uspoređuje sve dosadašnje vrijednosti s proizvodnim mogućnostima sustava, pri čemu rezultati u prvoj iteraciji mogu biti adekvatni ili se može cijela procedura dizajniranja ponavljati s drugom odabranom vrijednošću očekivanog protoka, a time i same crpke, dok se ne dođe do odgovarajućih rezultata.

Rezultati dizajna prikazuju se pod sekcijom *Design Results*. Dizajnom je zaključeno da će stvarni protok kapljevine biti $73 \text{ m}^3/\text{dan}$ što je nešto manje od traženog. Brzina crpljenja biti će 25 hod/min. Volumetrijska efikasnost crpke iznosi 77%. Dobije se snaga trenja (engl. *Frictional Power*), snaga na glatkoj šipci (engl. *Polished Rod Power*), vršno opterećenje glatke šipke (engl. *Peak Polished Rod Loading*) i minimalno opterećenje glatke šipke (engl. *Minimum Polished Rod Loading*). Snaga na glatkoj šipci jednaka je sumi hidrauličke snage i snage trenja. Hidraulička snaga je energija apsorbirana u fluidu na izlazu iz crpke (Zelić i Čikeš, 2006), dok je snaga trenja potrebna snaga za svladavanje trenja. Glatka šipka opterećena je 81,56% (engl. *Top Rod Loading*). Duljina hoda klipa (engl. *Pump Stroke Length*) iznosi 1,29 m. Povećanje hoda klipa uzrokovano momentom gibanja niza klipnih šipki preko njihalice (engl. *Plunger OverTravel*) će biti 0,18 m, a produljenje klipnih šipki uzrokovano opterećenjem u statičkim uvjetima (engl. *Static Stretch*) 0,117 m. Potrebno uravnoteženje (engl. *CounterWeight Required*) iznosi 60,5 kN. Indeks torzijske djelotvornosti (engl. *Index of Torsional Effectiveness*) je 11%. On predstavlja sposobnost geometrije postrojenja da opterećenje na glatkoj šipci glatko pretvori u torzijsko opterećenje.

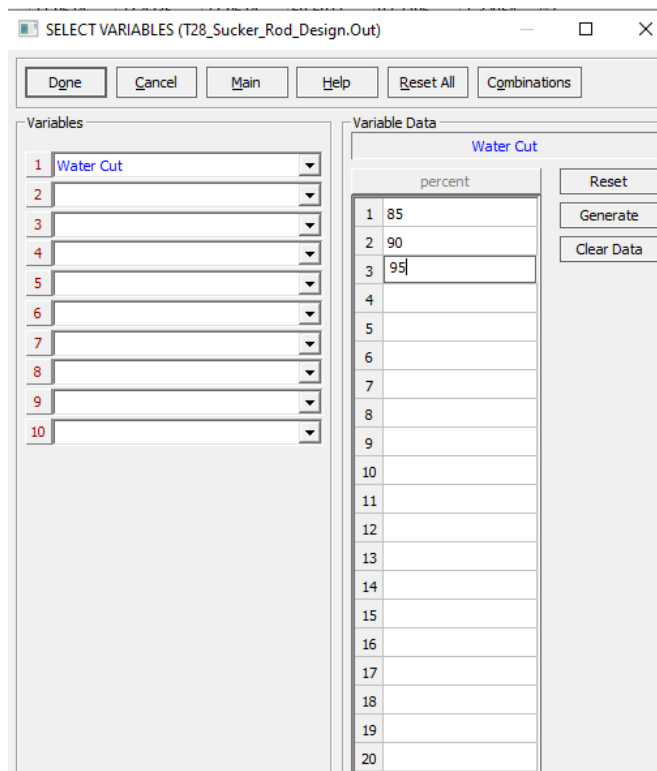
Nakon što je dizajn sustava gotov, jer se izračunata vrijednost protoka od oko 73 m³/dan u prvoj iteraciji prihvaća kao približna očekivanoj vrijednosti proizvodnje od oko 75 m³/dan, program omogućuje primjenu tzv. analize osjetljivosti (engl. *Sensitivity Analysis*). S pomoću ove opcije može se provjeriti koje proizvodne mogućnosti bi bušotina imala u budućnosti ovisno o tome do kojih promjena bi u proizvodnom sustavu najvjerojatnije moglo doći. U tu svrhu se najprije za fiktivnu bušotinu X postojeći proizvodni model dizajniranog sustava crpke mora upotpuniti određivanjem radne točke proizvodnog sustava, koja je prikazana na Slici 4-14. Cjelokupna procedura njenog određivanja nije detaljno opisivana, jer je preuzeta iz literature (Korenjak, 2008), s obzirom na činjenicu da je glavna svrha rada detaljno objasniti dizajniranje tj. odabir crpke i njenih proizvodnih mogućnosti. Iz slike se vidi da presjecište IPR i VLP krivulje tj. radna točka sustava, objašnjena ranije, odgovara odabranom protoku crpke, što omogućuje daljnje prognoziranje cjelokupnog proizvodnog sustava, prema odabiru varijabli prikazanih na Slici 4-15. U svrhu ilustracije ove opcije programa, pretpostavit će se samo da se u bušotini tijekom vremena očekuje postepeno povećanje udjela vode u proizvodnji, pa se želi provjeriti može li isti sustav osigurati takve radne uvjete, što se očituje određivanjem radnih točaka proizvodnog sustava. Kako je trenutni udio vode u proizvodnji 80%, u analizi su dodatno postavljene vrijednosti ovog udjela na 85%, 90% i 95% (Slika 4-16), te se radne točke sustava mogu vidjeti na Slici 4-17.



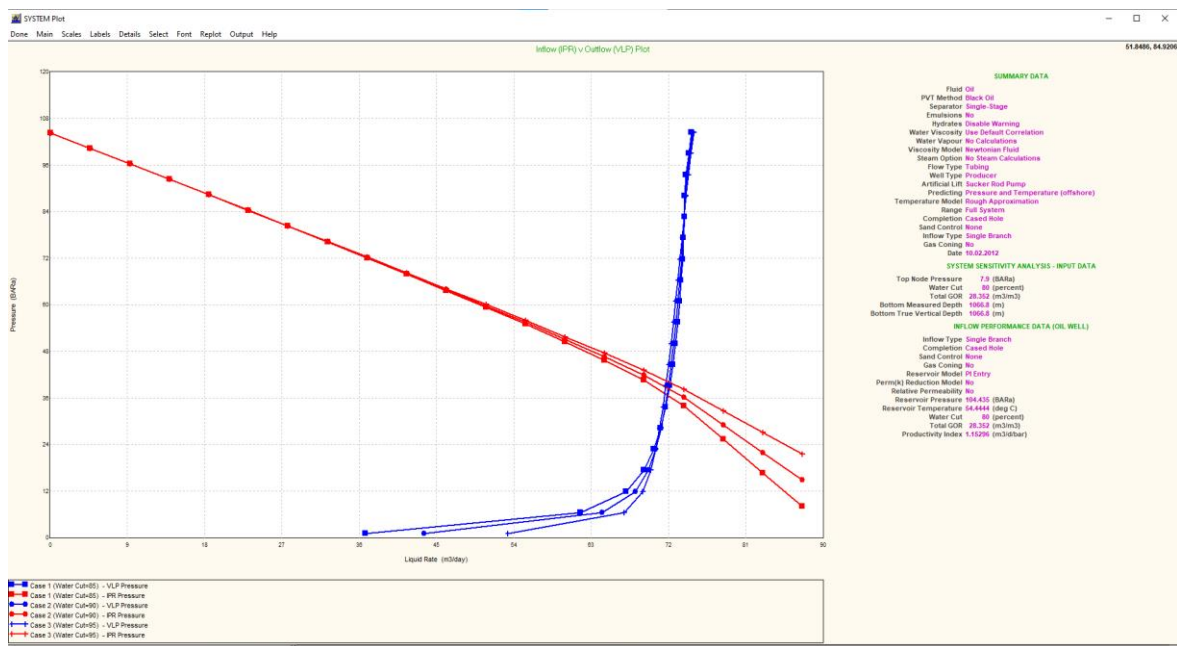
Slika 4-14. Radna točka proizvodnog sustava bušotine X



Slika 4-15. Varijable za analizu osjetljivosti



Slika 4-16. Analiza osjetljivosti za povećanje udjela vode u protoku bušotine X



Slika 4-17. Prognoziranje rada bušotine X prema analizi osjetljivosti

Iz Slike 4-17 je vidljivo da bi bušotina X mogla ostvariti prikazane protoke pri navedenim dinamičkim tlakovima u sva 3 dodatna slučaja u odnosu na trenutno stanje utoka vode od 80%. Međutim, za njen optimalan rad svaki od analiziranih slučajeva trebalo bi dodatno provjeriti, ovisno o tome u kojem periodu nakon ugradnje crpke bi do ovakvih promjena došlo, kakvo je stanje oštećenja pribušotinske zone, odnosno je li se skin faktor s vremenom povećao iz eventualnih, dodatnih razloga smanjenja propusnosti u pribušotinskoj zoni, što je vrlo čest slučaj u praksi, i slično.

5. ZAKLJUČAK

Dubinske crpke s klipnim šipkama jedna su od jednostavnijih i isplativijih metoda pridobivanja nafte kada tlak ležišta nije dostatan za eruptivno pridobivanje fluida od ležišta do površinskog sustava bušotine. Ovaj sustav je lako upravljiv, primjenjiv na velikom rasponu uvjeta, od bušotina malog promjera do višezonsko opremljenih bušotina, moguće je iscrpiti ležište do niskih tlakova, ovisno o dubini i brzini crpljenja, pogodan je za podizanje viskozne nafte te lagan za održavanje. Rad sustava moguće je analizirati i pratiti u svakom trenu te automatizirati cijeli sustav. Sve navedene prednosti prisutne su samo ako je cjelokupni proizvodni sustav pravilno dizajniran.

Opisani koraci dizajniranja sustava dubinske crpke s klipnim šipkama 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 kapljevine kroz duži period. Potrebno je pretpostaviti početne parametre u dizajnu, a parametri 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. Pri tome, korisnik i sam utječe na preciznost proračuna, odabirom opcija i karakterizacijom modela prilikom kretanja kroz program. U dizajniranju pomažu i baze podataka, koje su pri radu u programu lako pristupačne. Ako je potrebno mogu se uvesti i vlastiti podaci u obliku baze podataka preko opcije *Import*. Istom opcijom se mogu uvesti i PVT i ostali podaci ako ih korisnik posjeduje i želi na temelju njih graditi zaseban model. Povezivanjem svih unešenih informacija, poput IPR krivulja, VLP krivulja i svih ostalih potrebnih parametara za dizajniranje dubinske crpke, Prosper stvara precizan model koji se dalje koristi za analizu osjetljivosti ili se može povezati s drugim programima u svrhu razumijevanja i integriranja cjelokupnog sustava, te predviđanja njegovog ponašanja u budućnosti.

6. LITERATURA

1. AHMED, T., 2010. *Reservoir Engineering Handbook*, 4. izd. Burlington, Massachusetts, Gulf Professional Publishing.
2. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), 2006. Specifications 11AX, *Specification for Subsurface Sucker Rod Pumps and Fittings*. 12. izd., dopuna 2, listopad 2012.
3. ANAND, J., SOMERTON, W. H., GOMAA, E., 1973. Predicting Thermal Conductivities of Formations From Other Known Properties. *SPE Journal*, 13(05), 267–273., Sveučilište u Kaliforniji.
4. BEGGS, D., 2003. *Production Optimization Using NODAL Analysis*. 2. izd., OGCI and Petroskills Publications, Tulsa, Oklahoma.
5. BRKIĆ, V., 2018. Bilješke s kolegija Proizvodnja nafte i plina 2. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
6. ČIKEŠ, M., 2015. *Proizvodno inženjerstvo nafte i plina*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
7. ECONOMIDES, M. J., 2013. *Petroleum Production Systems*. 2. izd., Pearson Education Inc.
8. FAKHER S., KHLAIFAT, A., HOSSAIN, M. E., NAMEER, H., 2021., A Comprehensive Review of Sucker Rod Pumps' Components, Diagnostics, Mathematical Models, and Common Failures and Mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 3815–3839.
9. FARHAN, M. K., NANDI, S., JADHAV, P. B., 2015. Design and Optimization of Sucker Rod Pump Using Prosper. *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*, Vol. 3, 108-122.
10. GIBBS, S. G., 1963. Predicting the Behaviour of Sucker-Rod Pumping Systems. *SPE Journal*, 588, 27.-28. svibanj 1963., 769-788., Denver, Colorado.
11. GUO, B., LIU, X., TAN, X., 2017. *Petroleum Production Engineering – Second Edition*, Gulf Professional Publishing.
12. GUO, B., LYONS, W. C., GHALAMBOR, A., 2007. *Petroleum Production Engineering*. Gulf Professional Publishing.
13. HOUZE, O., VITURAT, D., FJAERE, O. S., 2012. *Dynamic Data Analysis*. KAPPA, [http://www.pe.tamu.edu/blasingame/data/z_zCourse_Archive/P648_15A/P648_15A_zReference/PTA_Kappa_DFA_Book_\[Houze_2013\].pdf](http://www.pe.tamu.edu/blasingame/data/z_zCourse_Archive/P648_15A/P648_15A_zReference/PTA_Kappa_DFA_Book_[Houze_2013].pdf) , 557 str.

14. JENNINGS, J. W., 1989. *Design of Sucker-Rod Pumping Systems*. SPE 20152, Petroleum Technology in the Second Century, 16-19. listopad 1989., 77-87., New Mexico.
15. KORENJAK, Z., 2008. Proizvodnost bušotina opremljenih plinskim liftom. Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 72 str., Zagreb
16. MATANOVIĆ, D., ČIKEŠ, M., MOSLAVAC, B., 2012. *Sand Control in Well Construction and Operation*. Springer-Verlag GmbH, Berlin/ Heidelberg.
17. PROSPER USER MANUAL, 2018. *Petroleum Experts, Version 15*. Edinburgh.
18. SHEDID, A., 2009., *Effects of Subsurface Pump Size and Setting Depth on Performance of Sucker Rod Artificial Lift—A Simulation Approach*. SPE 120681, 4.-8. travanj 2009., Oklahoma.
19. TAKACS, G., 2015. *Sucker-Rod Pumping Handbook*. Gulf Professional Publishing.
20. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. *Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Internetski izvori:

21. Oilfield Dynamometer Surveys: Pump Card Interpretation & How They Work, URL: <https://www.downholediagnostic.com/dynamometer> (7.10.2022.)

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.



Karlo Vedriš



KLASA: 602-01/23-01/22
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 10.2.2023.

Karlo Vedriš, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/22, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 10.02.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

MOGUĆNOSTI DIZAJNIRANJA DUBINSKIH CRPKI S KLIPNIM ŠIPKAMA U PROGRAMU PROSPER

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

Mentorica:

(potpis)

doc. dr. sc. Sonja Koščak Kolin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)