

# Optimizacija proizvodnje plinskih bušotina s visokim udjelom slojne vode

---

**Tišljar, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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:169:401338>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**OPTIMIZACIJA PROIZVODNJE PLINSKIH BUŠOTINA  
S VISOKIM UDJELOM SLOJNE VODE**

Diplomski rad

Tomislav Tišljar

N-224

Zagreb, 2017.

OPTIMIZACIJA PROIZVODNJE PLINSKIH BUŠOTINA S VISOKIM UDJELOM  
SLOJNE VODE

TOMISLAV TIŠLJAR

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

Sažetak

Kvalitetna i stalna analiza proizvodnih parametara plinskih bušotina omogućuje predviđanje kretanja proizvodnje promjenom pojedinih faktora u proizvodnom vijeku samih bušotina. Za modeliranje i predviđanje proizvodnje bušotina za različite zadane slojne tlakove i količine slojne vode u proizvedenom fluidu korišten je programski paket IPM-Prosper. Na temelju analize dobivenih rezultata razmatrana su i ponuđena neka od rješenja optimizacije rada bušotina s visokim sadržajem vode. U konačnici opisana je završna faza proizvodnje plinskih bušotina s niskim dinamičkim tlakom na ušću bušotine korištenjem kompresora.

Ključne riječi: plinske bušotine, visok sadržaj vode, IPM-Prosper programski paket, kompresorska proizvodnja

Diplomski rad sadrži: 44 stranice, 8 tablica, 27 slika i 14 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF  
Dr. sc. Katarina Simon, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Lidia Hrnčević, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 7. srpanj 2017. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

OPTIMIZATION OF PRODUCTION IN GAS WELLS WITH LARGE PROPORTION  
OF FORMATION WATER

TOMISLAV TIŠLJAR

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

Abstract

Quality and constant analysis of gas well production parameters facilitates the prediction of production trends through the change of individual factors in production wells. An IPM-Prosper software package was used for modelling and prediction of the well production at different default layer pressures as well as the amount of salt water in the produced fluid. On the basis of the analysis of the obtained results, some of the optimization solutions for the wells with high water content were considered and offered. Finally, the final production phase of gas wells with low dynamic pressure at the nozzle using compressors was described.

Keywords: Gas wells, High production water content, IPM-Prosper software package, Compression production

Thesis contains: 44 pages, 8 tables, 27 figures and 14 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD  
Full Professor Katarina Simon, PhD  
Associate Professor Lidija Hrnčević, PhD

Date of defense: July 7<sup>th</sup>, 2017. University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and  
Petroleum Engineering

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA.....	III
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROIZVODNJA PRIRODNOG PLINA IZ PLINSKO-KONDEZATNIH POLJA “DUBOKE PODRAVINE.....</b>	<b>2</b>
2.1. Centralna plinska stanica Molve.....	4
<b>3. PROIZVODNI SUSTAV PLINSKIH I NAFTNIH BUŠOTINA.....</b>	<b>6</b>
<b>4. NODAL ANALIZA.....</b>	<b>8</b>
<b>5. PODJELA BUŠOTINA POLJA MOLVE.....</b>	<b>11</b>
5.1. Bušotine s visokim dinamičkim tlakom i s velikom proizvodnjom plina.....	11
5.2. Bušotine sa srednjim dinamičkim tlakom i sa srednjom proizvodnjom plina.....	11
5.3. Bušotine s niskim dinamičkim tlakom i s niskom proizvodnjom plina.....	12
5.4. Bušotine s niskim dinamičkim tlakom u povremenom radu.....	12
<b>6. ODREĐIVANJE RADNIH TOČAKA BUŠOTINA KORIŠTENJEM IPM- PROSPER PROGRAMSKOG PAKETA.....</b>	<b>13</b>
6.1. Bušotina Mol-27.....	13
6.2. Bušotina Mol-37.....	18
6.3. Bušotina Mol-42.....	22
<b>7. IPM-PROSPER ANALIZA ZA BUDUĆE STANJE PADA SLOJNOG TLAKA I POVEĆANJA WGR-A.....</b>	<b>26</b>
7.1. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-27.....	27
7.2. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-27.....	28
7.3. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-37.....	29
7.4. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-37.....	30
7.5. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-42.....	31
7.6. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-42.....	32
<b>8. MOGUĆA UGRADNJA PROIZVODNOG NIZA MANJEG PROMJERA.....</b>	<b>33</b>
8.1. Primjer ugradnje proizvodnog niza malog promjera u bušotinu Mol-37.....	34
<b>9. KOMPRESORSKA PROIZVODNJA.....</b>	<b>38</b>
9.1. Ugradnja kompresora na ušće bušotine Mol-20R.....	39

10. ZAKLJUČAK.....	42
11. LITERATURA.....	43

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> „Duboka Podravina” – ležišta polja Molve, Kalinovac, Stari Gradac i Gola Duboka.....	2
<b>Slika 2-2.</b> Kronološki prikaz proizvodnje plina, kondenzata i slojne vode na polju Molve....	4
<b>Slika 3-1.</b> Mogući gubitci taka u proizvodnom sustavu bušotine.....	6
<b>Slika 4-1.</b> Smještaj najčešćih čvorišta proizvodnog sustava.....	8
<b>Slika 4-2.</b> Određivanje protočnog kapaciteta proizvodnog sustava.....	10
<b>Slika 6-1.</b> Ugrađena oprema na bušotini Mol-27.....	14
<b>Slika 6-2.</b> Ulazni podaci IPM-Prosper analize.....	15
<b>Slika 6-3.</b> Podaci potrebni za izračun IPR krivulje.....	16
<b>Slika 6-4.</b> Trenutna radna točka bušotine Mol-27.....	17
<b>Slika 6-5.</b> Ugrađena oprema na bušotini Mol-37.....	18
<b>Slika 6-6.</b> Ulazni podaci IPM-Prosper analize.....	19
<b>Slika 6-7.</b> Podaci potrebni za izračun IPR krivulje.....	20
<b>Slika 6-8.</b> Trenutna radna točka bušotine Mol-37.....	21
<b>Slika 6-9.</b> Ugrađena oprema na bušotini Mol-42.....	22
<b>Slika 6-10.</b> Ulazni podaci IPM-Prosper analize.....	23
<b>Slika 6-11.</b> Podaci potrebni za izračun IPR krivulje.....	24
<b>Slika 6-12.</b> Trenutna radna točka bušotine Mol-42.....	25
<b>Slika 7-1.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-27.....	27
<b>Slika 7-2.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-27.....	28
<b>Slika 7-3.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-37.....	29
<b>Slika 7-4.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-37.....	30
<b>Slika 7-5.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-42.....	31
<b>Slika 7-6.</b> IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-42.....	32
<b>Slika 8-1.</b> Shematski prikaz ugrađenog proizvodnog niza malog promjera.....	33
<b>Slika 8-2.</b> IPR i VLP krivulje kod pada ležišnog tlaka ( $P_i$ ) o proizvodnju kroz postojeći proizvodni niz te proizvodni niz malog promjera .....	37
<b>Slika 9-1.</b> Krivulje pada tlaka i kompresorska proizvodnja plina.....	39
<b>Slika 9-2.</b> Prenosivo kompresorsko postrojenje.....	41

## POPIS TABLICA

<b>Tablica 2-1.</b> Sastav ležišnog fluida iz plinskih i plinsko-kondenzatnih polja Duboke Podravine i međimurskih plinskih polja.....	3
<b>Tablica 3-1.</b> Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u tubingu.....	7
<b>Tablica 5-1.</b> Dnevna proizvodnja bušotina s visokim dinamičkim tlakom s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.....	11
<b>Tablica 5-2.</b> Dnevna proizvodnja bušotina sa srednjim dinamičkim tlakom s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.....	12
<b>Tablica 5-3.</b> Dnevna proizvodnja bušotina s niskim dinamičkim tlakom s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.....	12
<b>Tablica 8-1.</b> Trenutni radni parametri bušotine Mol-37.....	34
<b>Tablica 8-2.</b> Utjecaj promjene tlaka na ušću ( $P_t$ ) te ležišnog tlaka ( $P_i$ ) na proizvodne parametre bušotine Mol-37.....	35
<b>Tablica 8-3.</b> IPM-Prosper analiza protoka ugradnjom proizvodnog niza malog promjera....	36



## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

CO<sub>2</sub> – ugljikov dioksid

H<sub>2</sub>S – sumporovodik

WGR – omjer proizvedene slojne vode u odnosu na proizveden plin (engl. *water gas ratio*)

IPR – indikatorska krivulja (engl. *inflow performance relationship*)

VLP – krivulja istoka (engl. *vertical lift performance*)

CT – savitljivi tubing (engl. *coiled tubing*)

CPS – Centralna plinska stanica

RSH – merkaptani

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

P<sub>t</sub> – dinamički tlak na ušću (bar)

P<sub>i</sub> – ležišni tlak (bar)

P<sub>wf</sub> – dinamički tlak na dnu bušotine (bar)

Q<sub>g</sub> – proizvodnja plina (m<sup>3</sup>)

Q<sub>k</sub> – proizvodnja kondenzata (m<sup>3</sup>)

Q<sub>w</sub> – proizvodnja slojne vode (m<sup>3</sup>)

q – protok (m<sup>3</sup>/dan)

J – indeks proizvodnosti (m<sup>3</sup>/dan/bar)

WGR – omjer proizvedene slojne vode u odnosu na proizveden plin (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

V<sub>gw</sub> – minimalna brzina protoka za pokretanje slojne vode (m<sup>3</sup>/s)

ρ<sub>w</sub> – gustoća slojne vode (kg/m<sup>3</sup>)

P<sub>dr</sub> – tlak nizvodno od dubinske protočne spojnice, (bar)

P<sub>dsc</sub> – tlak nizvodno od površinske sapnice, (bar)

P<sub>dsv</sub> – tlak nizvodno od dubinskog sigurnosnog ventila, (bar)

P<sub>sep</sub> – tlak u separatoru, (bar)

P<sub>ur</sub> – tlak uzvodno od dubinske protočne spojnice, (bar)

P<sub>usv</sub> – tlak uzvodno od dubinskog sigurnosnog ventila, (bar)

P<sub>k</sub> – tlak kompresorske proizvodnje plina (bar)

P<sub>n</sub> – minimalni dinamički tlak na ušću bušotina pri napuštanju plinskog ležišta (bar)

## 1. UVOD

Diplomski rad obuhvaća analizu trenutnog stanja proizvodnih parametara plinskih bušotina na području eksploatacijskog polja plina Molve te analizu stanja bušotina zbog budućeg pada ležišnog tlaka i povećanja udjela slojne vode u proizvodnji. Opisana je postojeća Centralna plinska stanica Molve (CPS Molve) te ležišta tzv. „Duboke Podravine“ iz razloga što se sav fluid, koji se proizvede iz navedenih ležišta, transportira na daljnju preradu u Centralnu plinsku stanicu Molve. Opisan je tipski proizvodni sustav uzlaznog niza cijevi u bušotini (*engl. tubing*), ograničenja proizvodnog sustava poput udjela proizvedene slojne vode u proizvodnji prirodnog plina (*engl. water gas ratio*) te faktora trenja. Kod analize trenutnog stanja te budućeg stanja rada bušotina korišten je programski paket IPM-Prosper. IPM-Prosper paket nudi mogućnost analize trenutne proizvodnje, modeliranja dizajna bušotine (opremanje) te optimizaciju proizvodnje iz odabranih bušotina (<http://www.petex.com>).

Bušotine polja Molve podijeljene su u nekoliko grupa ovisno o vrijednosti tlaka na ušću bušotine budući da tlak na ušću uvjetuje hoće li razmatrane bušotine morati prolaziti fazu komprimiranja prirodnog plina. Iz svake grupe odabrana je po jedna bušotina koja će se dodatno analizirati u IPM-Prosper programskom paketu. Također će se analizirati mogućnost ugradnje proizvodnog niza malog promjera (*engl. velocity string*) na neku od bušotina kako bi se povećala brzina iznošenja fluida iz bušotine te na taj način smanjila proizvodnja slojne vode. U radu je opisan postupak ugradnje kompresora u krugu same bušotine te definirati njegove prednosti u radu budući da omogućuje proizvodnju plina pri niskom tlaku na ušću, veći iscrpak plina i dulji proizvodni vijek bušotine.

## 2. PROIZVODNJA PRIRODNOG PLINA IZ PLINSKO-KONDENZATNIH POLJA „DUBOKE PODRAVINE“

U ležišta tzv. „Duboke Podravine“ spadaju ležišta Molve, Kalinovac, Stari Gradac i Gola Duboka.

Na plinskom polju Molve prirodni plin se trenutno proizvodi iz 15 bušotina, na polju Kalinovac iz 12 bušotina, iz 3 bušotine na polju Stari Gradac i iz 3 bušotine na polju Gola Duboka. Na slici 2-1. prikazan je raspored polja te pripadajućih bušotina (Tehnička dokumentacija INA d.d, 2017.).



**Slika 2-1.** „Duboka Podravina” – ležišta polja Molve, Kalinovac, Stari Gradac i Gola Duboka (Tehnička dokumentacija INA d.d, 2017.)

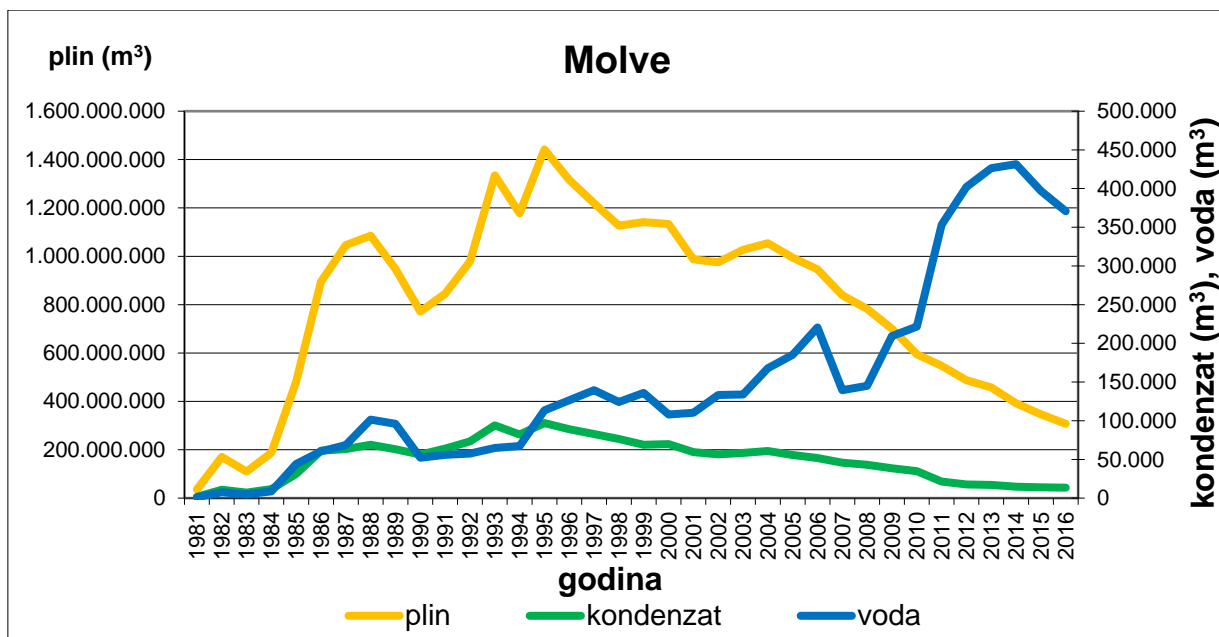
Trenutna dnevna proizvodnja na plinskom polju Molve iznosi 782 000 m<sup>3</sup> plina, 35 m<sup>3</sup> kondenzata te 895 m<sup>3</sup> slojne vode. Dnevna proizvodnja na polju Kalinovac iznosi 524 000

m<sup>3</sup> plina, 163 m<sup>3</sup> kondenzata te 404 m<sup>3</sup> slojne vode. Dnevna proizvodnja polja Stari Gradac je 62 300 m<sup>3</sup> plina, 58 m<sup>3</sup> kondenzata te 155 m<sup>3</sup> slojne vode, a polja Gola Duboka 593 000 m<sup>3</sup> plina, 66 m<sup>3</sup> kondenzata te 123 m<sup>3</sup> slojne vode (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017). Sastav ležišnog fluida na navedenim poljima prikazan je u tablici 2-1.

**Tablica 2-1.** Sastav ležišnog fluida iz plinskih i plinsko-kondenzatnih polja „Duboke Podravine“ (Simon, 2012.)

<b>„DUBOKA PODRAVINA“</b>				
<b>MOLARNI UDIO</b>	<b>MOLVE</b>	<b>KALINOVAC</b>	<b>GOLA DUBOKA</b>	<b>STARI GRADAC</b>
<b>metan (%)</b>	69,22	69,97	41,04	66,50
<b>etan (%)</b>	3,26	6,76	1,76	7,19
<b>propan (%)</b>	1,02	2,35	0,68	2,83
<b>i-butan (%)</b>	0,2	0,63	0,17	0,92
<b>n-butan (%)</b>	0,23	0,75	0,18	1,21
<b>i-pentan (%)</b>	0,09	0,39	0,05	0,67
<b>n-pentan (%)</b>	0,06	0,34	0,08	0,63
<b>heksan + (%)</b>	0,53	5,26	0,02	9,09
<b>dušik (%)</b>	1,64	1,37	2,38	0,94
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	23,75	12,17	53,64	9,02
<b>H<sub>2</sub>S (mg/m<sup>3</sup>)</b>	170	137	1130	517

Na slici 2-2. prikazano je kretanje proizvodnje plina, kondenzata i slojne vode na polju Molve u proteklih 35 godina proizašlo iz vlastitog istraživanja na temelju izvješća godišnje proizvodnje prirodnog plina, kondenzata te slojne vode. Vidljivo je da je maksimalna proizvodnja prirodnog plina bila 1995. godine te da se od 2007. godine znatno povećala proizvodnja slojne vode.



Slika 2-2. Kretanje proizvodnje prirodnog plina, kondenzata i slojne vode na polju Molve

### 2.1. Centralna plinska stanica Molve

Otkrićem prirodnog plina u ležištima “Duboke Podravine”, bile su nužne složene i rizične aktivnosti u okolišu (istraživanje, pridobivanje, transport, obrada plina) zbog sastava ležišnog fluida. Primjenom najsuvremenijih tehnologija, materijala i poštujući stroge ekološke zahtjeve, ovi rizici su smanjeni na minimum.

Plinsko polje Molve otkriveno je 1973. godine, a privedeno je u proizvodnju 1981. godine preko Centralne plinske stanice Molve I, radnog kapaciteta  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/dan plina. Daljnjim otkrićem rezervi na polju Molve javila se potreba za izgradnjom CPS Molve II, kapaciteta  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/dan plina, a ista je puštena u rad 1984. godine. Nakon novih otkrivenih rezervi plina i kondenzata na poljima Molve, Kalinovac i Stari Gradac izgrađeno je postrojenje CPS Molve III i 5 plinskih stanica s pripadajućim bušotinama. Postrojenje CPS Molve III je kapaciteta  $5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/dan plina, a cijeli sustav dobave prirodnog plina (tzv. Projekt Podravina) je pušten u rad 1993. godine (Tehnička dokumentacija INA d.d, 1993.).

CPS Molve I, CPS Molve II i CPS Molve III danas imaju zajednički naziv Objekti prerade plina Molve.

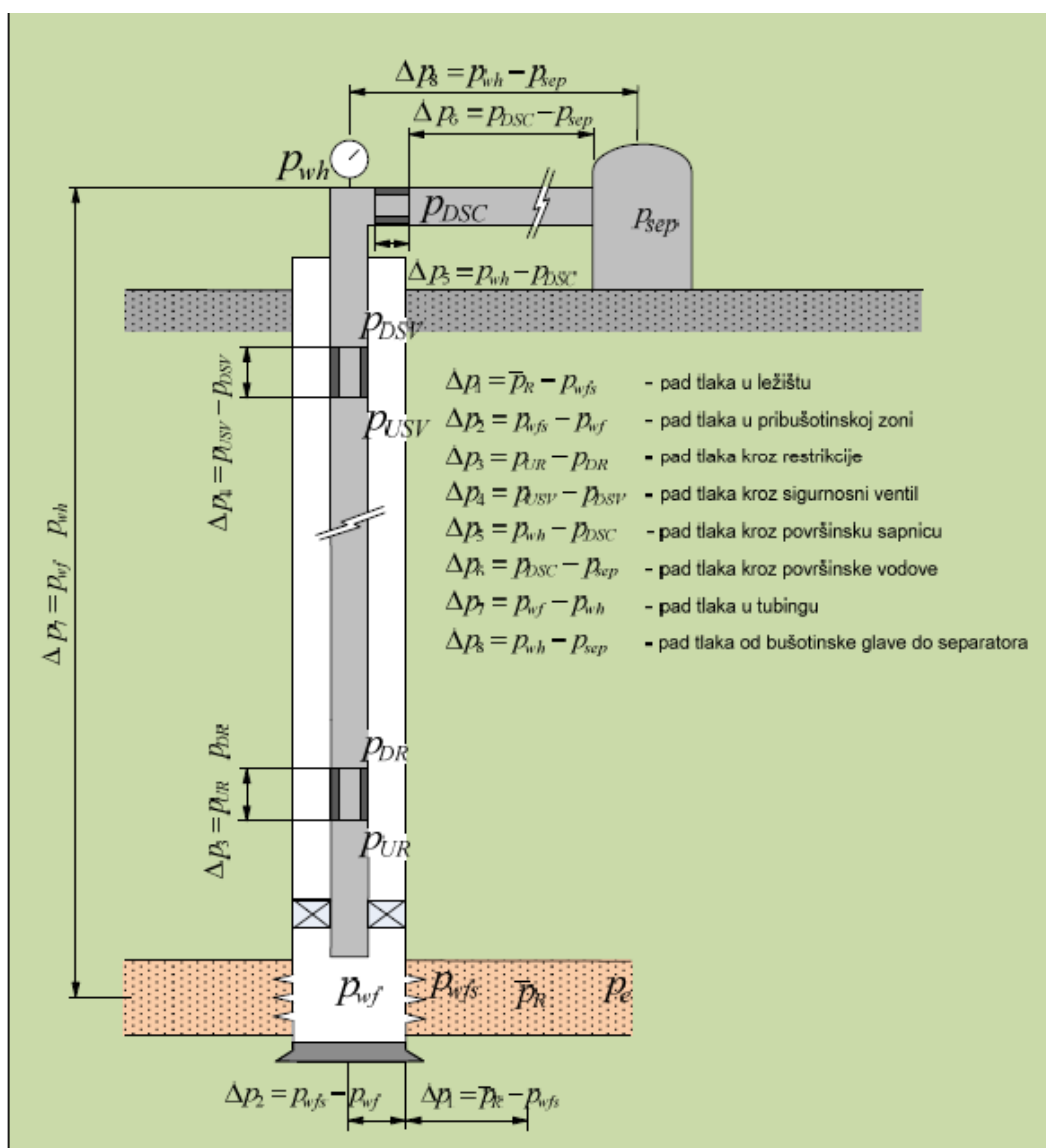
Centralne plinske stanice izgrađene su iz razloga što prirodni plin iz ležišta “Duboke Podravine”, pored ugljikovodika sadrži i niz štetnih primjesa - ugljični - dioksid (ugljik (IV)-oksid, CO<sub>2</sub>), sumporovodik (H<sub>2</sub>S,) merkaptane (RSH), živu (Hg) i slojnu vodu, koje se, radi zadovoljenja kvalitete izlaznog proizvoda tj. prirodnog plina i sigurnosti rada procesnih postrojenja, izdvajaju tehnološkim postupcima i na kraju zbrinjavaju bez štetnog utjecaja na okoliš.

Slojna voda, koja se zajedno s plinom i plinskim kondenzatom pridobiva iz ležišta, izdvaja se postupkom separacije. Separirana voda, sustavom klipnih pumpi i cjevovoda se utiskuje u utisne bušotine polja Molve i Kalinovac. U tu namjenu na polju Molve opremljeno je 7 utisnih bušotina, a na polju Kalinovac i Gola duboka po jedna. Slojna se voda utiskuje u propusne slojeve na dubinu oko 1300 m, iznad kojih se nalazi barijera nepropusnih slojeva (Zavod za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije, 2013.) .

### 3. PROIZVODNI SUSTAV PLINSKIH I NAFTNIH BUŠOTINA

Dizajn proizvodnog sustava bušotina ne može se podijeliti na dva neovisna dijela, ležište i sustav cijevi, budući da količina plina koja protječe iz ležišta u bušotinu ovisi o padu tlaka u uzlaznim cijevima i priključnom plinovodu, a pad tlaka u sustavu cijevi ovisi o količini fluida. Stoga se cjelokupni proizvodni sustav mora analizirati kao jedinstvena cjelina.

Jedna od najvažnijih komponenti ukupnog proizvodnog sustava bušotine je proizvodni ili uzlazni niz cijevi (*engl. tubing*). Gotovo 80% od ukupnog pada tlaka u proizvodnome nizu može biti utrošeno na podizanje fluida s dna bušotine na površinu (Beggs, 2003.). Na slici 3-1. prikazani su mogući gubitci (padovi) tlaka u proizvodnom sustavu bušotine.



Slika 3-1. Mogući gubitci tlaka u proizvodnom sustavu bušotine (Čikeš, 2015).

Pad tlaka u uzlaznom nizu cijevi po jedinici dužine naziva se gradijent tlaka. Opća jednadžba gradijenta tlaka, primjenjiva za bilo koji fluid koji protječe u cijevi određenog nagiba prema horizontali, dana je jednadžbom (3.1.) (Čikeš, 2015):

$$\frac{dp}{dL} = \left(\frac{dp}{dL}\right)_A + \left(\frac{dp}{dL}\right)_H + \left(\frac{dp}{dL}\right)_F \quad (3-1.)$$

Komponenta  $\left(\frac{dp}{dL}\right)_A$  predstavlja gradijent tlaka uslijed kinetičke energije ili djelovanja ubrzanja, komponenta  $\left(\frac{dp}{dL}\right)_H$  predstavlja gradijent tlaka gustoće stupca smjese plina i kapljevine dok komponenta  $\left(\frac{dp}{dL}\right)_F$  predstavlja gradijent tlaka uslijed trenja. Približni udio svake od ovih komponenata u ukupnom padu tlaka u bušotini, za naftne i plinske bušotine dan je u tablici 3-1.

**Tablica 3-1.** Udio pojedinih komponenti u ukupnom gubitku tlaka u tubingu (Beggs, 2003).

Komponenta gubitka tlaka	Udio u ukupnom gubitku tlaka u tubingu (%)	
	Naftne bušotine	Plinske bušotine
<b>Hidrostaticka (H)</b>	70 do 90	20 do 50
<b>Zbog trenja (F)</b>	10 do 30	30 do 70
<b>Zbog akceleracije (A)</b>	0 do 10	0 do 10

Gustoća fluida u naftnim bušotinama je znatno veća nego u plinskim, a budući da hidrostatička komponenta ovisi o zaostajanju kapljevine, najvažniji parametar kojeg treba vrijednovati u naftnoj bušotini je koeficijent zaostajanja kapljevine. U plinskim bušotinama, gustoća fluida je manja, ali se plin obično giba relativno velikom brzinom, što generira veće gubitke zbog trenja u cijevi. To iziskuje dobro poznavanje vrijednosti hrapavosti cijevi da bi se odredio faktor trenja (Čikeš, 2015).



#### 4. NODAL ANALIZA

Koncept analize sustava, kojeg se često naziva NODAL analizom, primjenjuje se već odavno za analizu performansi različitih sustava sastavljenih od interaktivnih komponenti, a njegova primjena na proizvodne sustave nafte i plina datira od šezdesetih godina prošlog stoljeća. Postupak se sastoji od odabira razdjelne točke ili čvorišta (*engl. node*) u proizvodnom sustavu i podjele sustava u toj točki na dvije sekcije (Čikeš, 2015).

Sve komponente smještene uzvodno od odabranog čvorišta, tj. od čvorišta do ležišta, čine sekciju utoka fluida u čvorište (*engl. inflow*), dok sekciju istjecanja fluida iz čvorišta (*engl. outflow*) čine sve komponente nizvodno od čvorišta, tj. od odabranog čvorišta do separatora (Čikeš, 2015). U diplomskom radu odabrana je točka čvorišta na dnu bušotine što je na slici 4-1. označeno s brojem 6. Odabirom čvorišta u toj točki, sustav je podijeljen na komponentu u kojoj dominira ležište i komponentu u kojoj dominira cijevni sustav.



**Slika 4-1.** Smještaj najčešćih čvorišta proizvodnog sustava bušotine (Čikeš, 2015)

Primjena ovakvog sustava služi za izbor proizvodnog niza cijevi, predviđanje utjecaja crpljenja ležišta na proizvodni kapacitet bušotine, izbor površinskog cjevovoda, dimenzioniranje površinske sapnice, dimenzioniranje dubinskog sigurnosnog ventila, analizu postojećih proizvodnih sustava bušotina u svrhu otkrivanja ograničenja protoka, odabir metode umjetnog podizanja fluida, vrjednovanje stimulacijskih zahvata u bušotini, analizu utjecaja načina perforiranja bušotine itd. (Čikeš, 2015.).

Svrha Nodal analize je da se trenutačna proizvodnja ( $q$ ) grafički prikaže u funkciji dinamičkog tlaka na dnu bušotine ( $P_{wf}$ ). Takav grafički prikaz naziva se indikatorska ili IPR krivulja (*engl. inflow performance relationship*) koja definira odnos protoka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine u određenom vremenu. IPR ili indikatorska krivulja zapravo je grafički prikaz indeksa proizvodnosti  $J$  (Čikeš, 2015.).

$$J = \frac{q}{P_i - P_{wf}} \quad (4-1.)$$

gdje su :

$J$  – indeks proizvodnosti ( $m^3/dan/bar$ )

$q$  – protok fluida ( $m^3/dan$ )

$P_i$  – ležišni tlak (bar)

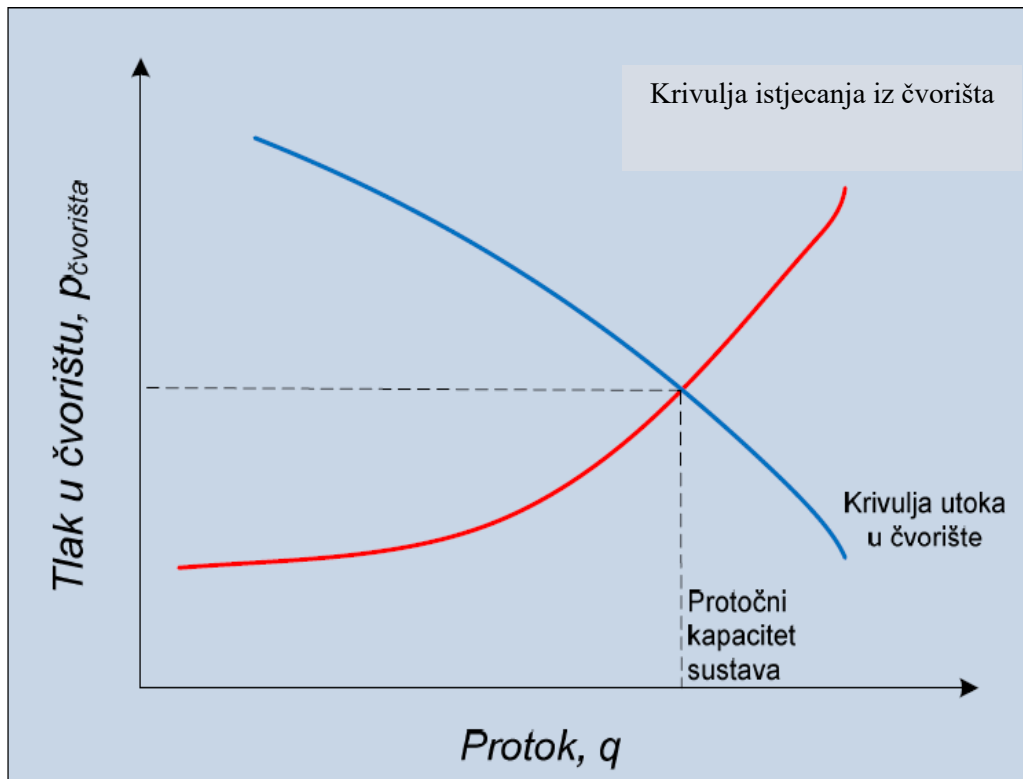
$P_{wf}$  – dinamički tlak na dnu bušotine (bar)

Indikatorska ili IPR krivulja služi također kao krivulja utoka u odabrano čvorište kod Nodal analize (krivulja ležišta), dok VLP krivulja (*engl. vertical lift performance*) ili tubing krivulja služi kao krivulja istjecanja iz odabranog čvorišta.

VLP krivulja ovisi o odabiru vanjskog promjera proizvodnog niza, debljini stjenke proizvodnog niza, gustoći, viskoznosti i brzini protjecanja fluida, duljini proizvodnog niza cijevi, tlaku na ušću bušotine, omjeru proizvedene slojne vode i proizvedenog fluida, količini otopljenog plina u nafti te količini protoka proizvodnog fluida. Promjenom nekih od navedenih parametara mijenja se VLP krivulja te se tako dimenzionira i optimizira proizvodni sustav bušotine (Brkić, 2016.).

Sjecište IPR i VLP krivulja daje protočni kapacitet sustava proizvodnih bušotina.

Na slici 4-2. prikazan je grafički način određivanja protočnog kapaciteta proizvodnog sustava.



**Slika 4-2.** Određivanje protočnog kapaciteta proizvodnog sustava bušotine (Čikeš, 2015)

## 5. PODJELA BUŠOTINA NA EKSPLOATACIJSKOM POLJU MOLVE

Bušotine na eksploatacijskom polju Molve mogu se, s obzirom na dinamički tlak na ušću, podijeliti u četiri grupe (Tehnička dokumentacija INA d.d 2017.):

1. bušotine s visokim dinamičkim tlakom i s velikom proizvodnjom plina,
2. bušotine sa srednjim dinamičkim tlakom i sa srednjom proizvodnjom plina,
3. bušotine s niskim dinamičkim tlakom i s niskom proizvodnjom plina, te
4. bušotine s niskim dinamičkim tlakom u povremenom radu.

Bušotine su podijeljene na ovaj način s obzirom na broj stupnjeva komprimiranja plina korištenjem instaliranih kompresora. Radni tlak Centralne plinske stanice Molve iznosi 48 bar.

### 5.1. Bušotine s visokim dinamičkim tlakom i s velikom proizvodnjom plina

U ovu skupinu spadaju bušotine Mol-11, Mol-27, Mol-34, Mol-40 i Mol-19 koje imaju tlak na ušću veći od 50 bar. Navedene bušotine spadaju u skupinu bušotina kod kojih ne treba komprimirati plin na ušću. U tablici 5-1. prikazana je dnevna proizvodnja navedenih bušotina s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.

**Tablica 5-1.** Dnevna proizvodnja iz bušotina s visokim dinamičkim tlakom i pripadajućim WGR-om (Tehnička dokumentacija INA d.d 2017.)

Bušotina	$P_t$ (bar)	$Q_g$ (m <sup>3</sup> )	$Q_k$ (m <sup>3</sup> )	$Q_w$ (m <sup>3</sup> )	WGR (cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mol-11	66	27 300	2	43	1569
Mol-27	68	103 574	6	91	870
Mol-34	60	99 990	2	219	2190
Mol-40	50	76 700	3	79	1027
Mol-19	55	62 000	2	54	870

### 5.2. Bušotine sa srednjim dinamičkim tlakom i sa srednjom proizvodnjom plina

U ovu skupinu spadaju bušotine Mol-9, Mol-29, Mol-31R, Mol-33R, Mol-37, Mol-41, i Mol-1i s tlakom na ušću između 25-50 bar. Plin proizveden iz ovih bušotina mora proći barem jedan stupanj kompresije kako bi se mogao transportirati na Centralnu plinsku stanicu Molve. U tablici 5-2. prikazana je dnevna proizvodnja bušotina s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.

**Tablica 5-2.** Dnevna proizvodnja bušotina sa srednjim dinamičkim tlakom i pripadajućim WGR-om (Tehnička dokumentacija INA d.d 2017.)

Bušotina	$P_t$ (bar)	$Q_g$ (m <sup>3</sup> )	$Q_k$ (m <sup>3</sup> )	$Q_w$ (m <sup>3</sup> )	WGR (cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mol-9	31	24 100	0	112	4236
Mol-29	28	32 900	1	14	424
Mol-31R	30	66 100	3	4	60
Mol-33R	26	46 000	3	7	152
Mol-37	47	63 703	2	148	2239
Mol-41	28	36 500	2	2	55
Mol-1i	30	75 100	4	23	305

### 5.3. Bušotine s niskim dinamičkim tlakom i s niskom proizvodnjom plina

U ovu skupinu spadaju bušotine Mol-20R, Mol-25 i Mol-42 koje imaju tlak na ušću od 2,5 do 25 bar. Plin proizveden iz ovih bušotina mora proći više stupnjeva kompresije kako bi se mogao transportirati na Centralnu plinsku stanicu Molve. U tablici 5-3. prikazana je dnevna proizvodnja bušotina s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om.

**Tablica 5-3.** Dnevna proizvodnja bušotina s niskim dinamičkim tlakom s pripadajućim tlakom ušća i WGR-om (Tehnička dokumentacija INA d.d 2017.)

Bušotina	$P_t$ (bar)	$Q_g$ (m <sup>3</sup> )	$Q_k$ (m <sup>3</sup> )	$Q_w$ (m <sup>3</sup> )	WGR (cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mol-20R	4	8 600	1	12	1379
Mol-25	22	31 700	2	8	252
Mol-42	29	21 026	1	56	2670

### 5.4. Bušotine s niskim dinamičkim tlakom u povremenom radu

U ovu skupinu spadaju bušotine Mol-12 $\alpha$ , Mol-15, Mol-26 $\alpha$  i Mol-35R koje rade povremeno zbog loših fizičkih karakteristika ležišta u području njihovog drenažnog radijusa i visokog udjela slojne vode u proizvodnji. Puštaju se u rad kad se akumulira dovoljna ležišna energija za pokretanje proizvodnje i rade do samo ugušenja (rad u ciklusima).

## **6. ODREĐIVANJE RADNIH TOČAKA BUŠOTINA KORIŠTENJEM IPM-PROSPER PROGRAMSKOG PAKETA**

Za određivanje radnih točaka bušotina korišten je dostupan IPM-Prosper programski paket. Ulazni podaci u IPM.Prosper programskom paketu koriste se kako bi se točno odredila promjena vrijednosti tlaka i temperature iz ležišta kroz bušotinu i proizvodni niz sve do površine. Dobiveni izlazni podaci prikazuju proizvodnju fluida, dinamičke tlakove u bušotini te IPR i VLP krivulju kojima je sjecište radna točka bušotine.

U nastavku rada napravljen je izračun radne točke (protočni kapacitet) za po jednu bušotinu iz svake grupe prema podjeli iz prethodnog poglavlja (bušotine Mol-27, Mol-37 i Mol-42), osim onih bušotina koje se povremeno puštaju u rad.

### **6.1. Bušotina Mol-27**

U bušotini Mol-27 ugrađen je proizvodni niz promjera 88,9 mm (3 ½"). Ležišni tlak ( $P_i$ ) iznosi 135,5 bar, tlak na ušću ( $P_t$ ) 68,2 bar, a trenutni WGR iznosi 870 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

Na slici 6-1. prikazana je ugrađena oprema na bušotini Mol-27

NAZIV BUŠOTINE: <b>Mol - 27</b>		REDNI BROJ	NAZIV PROIZVODNE OPREME	L m	H m	OD mm	ID mm
	1	VJEŠALICA TUBINGA " WKM " 7 1/16" x 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (nova)	0,28	0,28			
	2	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	1,99	2,27	88,9	70,5	
	3	KRATKI TUBING (2 kom.) + TUBING (3 kom. x 6,23 m) 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	23,32	25,59	88,9	70,5	
	4	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	2,31	27,90	88,9	70,5	
	5	PROTOČNA SPOJNICA 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	2,66	30,56	114,0	67,3	
	6	DSV "Wellstar" ID=2,562" 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	1,38	<b>31,94</b>	136,0	65,07	
	7	PROTOČNA SPOJNICA 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	1,12	33,06	114,0	68,5	
	8	TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (4 kom.)	47,94	81,00	88,9	70,5	
	9	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 12,95# x 3 1/2" ABTC-4S 10,3#	0,80	81,80	88,9	74,5	
	10	NIZ TUBINGA 3 1/2" ABTC-4S 10,3# (21 kom.)	244,72	326,51	88,9	74,5	
	11	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 10,3# x 3 1/2" ABTC-4S 9,3#	0,69	327,20	88,9	75,9	
	12	NIZ TUBINGA 3 1/2" ABTC-4S 9,3# (246 kom.)	2817,34	3144,54	88,9	75,9	
	13	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 9,3# x 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	0,79	3145,33	88,9	70,5	
	14	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	2,31	3147,64	88,9	70,5	
	15	KLIZNA VRATA "RDH" 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ID=2,562"	1,03	<b>3148,66</b>	120,0	65,07	
	16	TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (1 kom.)	9,93	3158,59	88,9	70,5	
	17	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 12,95# x 2 7/8" New VAM 6,4#	0,31	3158,90	101,6	60,5	
	18	LOKATOR "J"-slot 2 7/8" New VAM 6,4# + ATR-RTR brtvene jedinice i vodilica tubinga	1,06	3159,96	101,6 82,55 177,8	60,5	
	19	"TWB" PERMANENTNI PAKER ID=3,25" 4" 10,9# New VAM	0,90	<b>3160,85</b>	177,8	82,55	
	20	PRIJELAZ 4" 13,2# PIN x PIN New VAM	1,05	3161,90	101,8	82,7	
	21	PRIJELAZ 4" VAM AG 13# x 4 1/2" 13,5# VAM AG	0,20	3162,11	115,0	87,7	
	22	PRIJELAZ 4 1/2" VAM AG 12,6# x 5" 15# VAM AG	0,26	3162,37	127,0	104,0	
	23	PRIJELAZ ZA OBUŠIVANJE PAKERA 5" 15# VAM AG	2,46	3164,83	142,0	111,7	
	24	PRIJELAZ 5" 15# VAM AG x 3 1/2" 9,3# ABTC-4S	0,10	3164,92	127,0	69,8	
	25	PRIJELAZ 3 1/2" 9,3# ABTC-4S x 2 7/8" New VAM 6,4#	0,38	3165,31	100,0	60,2	
	26	TUBING 2 7/8" New VAM 6,4# (1 kom.)	9,65	3174,96	73,02	60,3	
	27	"X" PRIJELAZ ZA OGLAGANJE 2 7/8" New VAM 6,4# ID=2,313"	0,35	<b>3175,30</b>	82,5	58,75	
	28	TUBING 2 7/8" New VAM 6,4# (1 kom.)	9,64	3184,94	73,02	60,7	
	29	VODILICA ZA ALATKE NA ŽICI 2 7/8" New VAM 6,4#	0,80	3185,74	127,0	60,5	
	30						

Slika 6-1. Ugrađena oprema u bušotini Mol-27 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Na slici 6-2. prikazani su ulazni podaci potrebni za izračun radne točke bušotine Mol-27.

PVT - INPUT DATA (FFO MOL-27.Out) (Condensate - Black Oil)

Done Cancel Tables Match Data Matching Correlations Calculate Save Import Composition Help

Use Tables Export

Input Parameters			Reservoir Data		
Separator Pressure	48.8	BARg	Dewpoint at Reservoir Temp	288.987	BARg
Separator Temperature	41	deg C	Reservoir Temperature	180	deg C
Separator GOR	17020.3	Sm3/Sm3	Reservoir Pressure	135.5	BARg
Separator Gas Gravity	0.8445	sp. gravity			
Tank GOR	51	Sm3/Sm3			
Tank Gas Gravity	1.1386	sp. gravity			
Condensate Gravity	775.51	Kg/m3			
Water to Gas Ratio	0.000877	m3/m3			
Water Salinity	30000	ppm			

Correlations

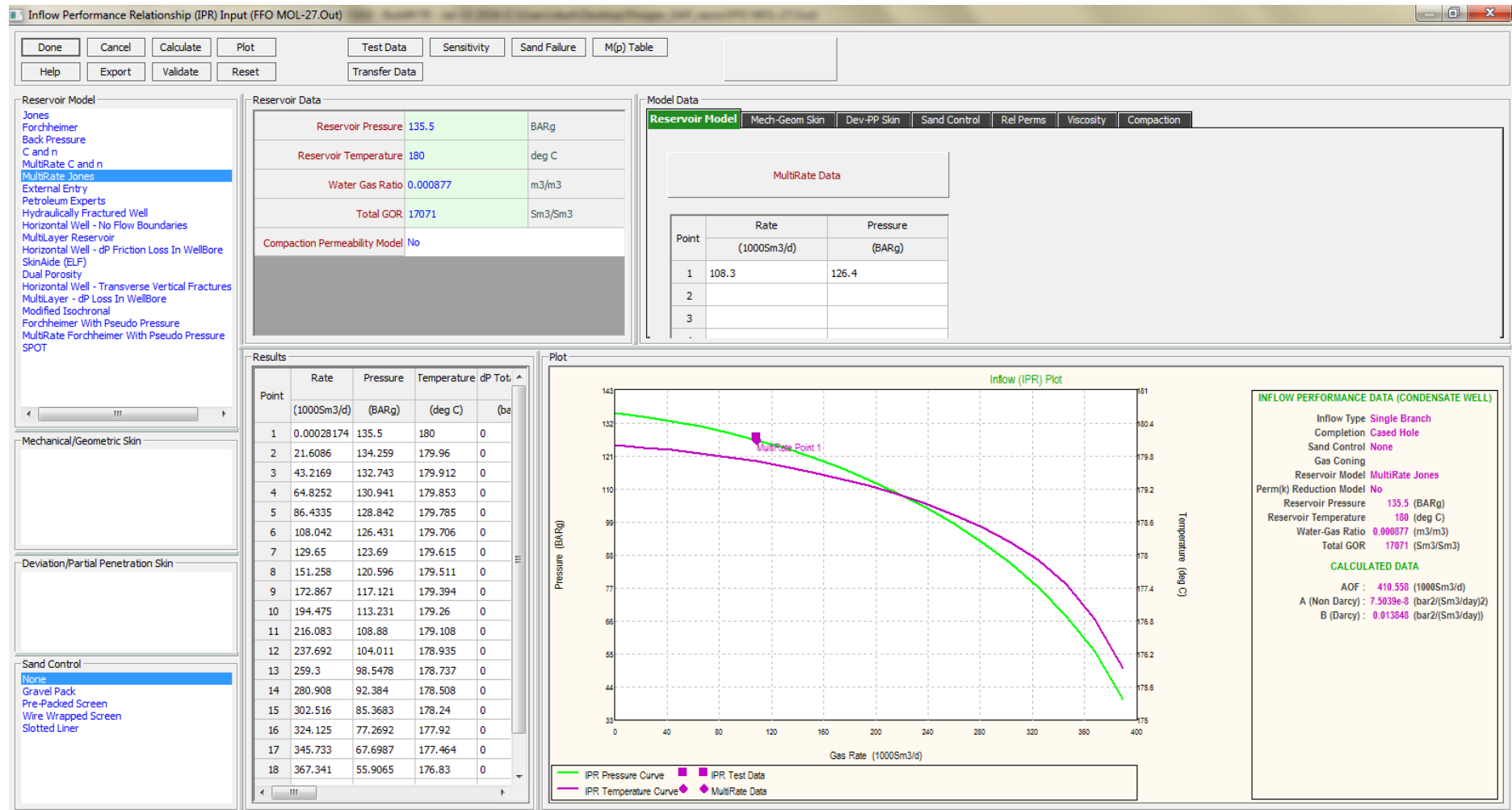
Gas Viscosity Lee et al

Impurities			Water Vapour Data	
Mole Percent H2S	0.065	percent	Minimum WGR	
Mole Percent CO2	24.972	percent	Calculate Minimum WGR	Plot
Mole Percent N2	1.61	percent		

Slika 6-2. Ulazni podaci IPM-Prosper analize



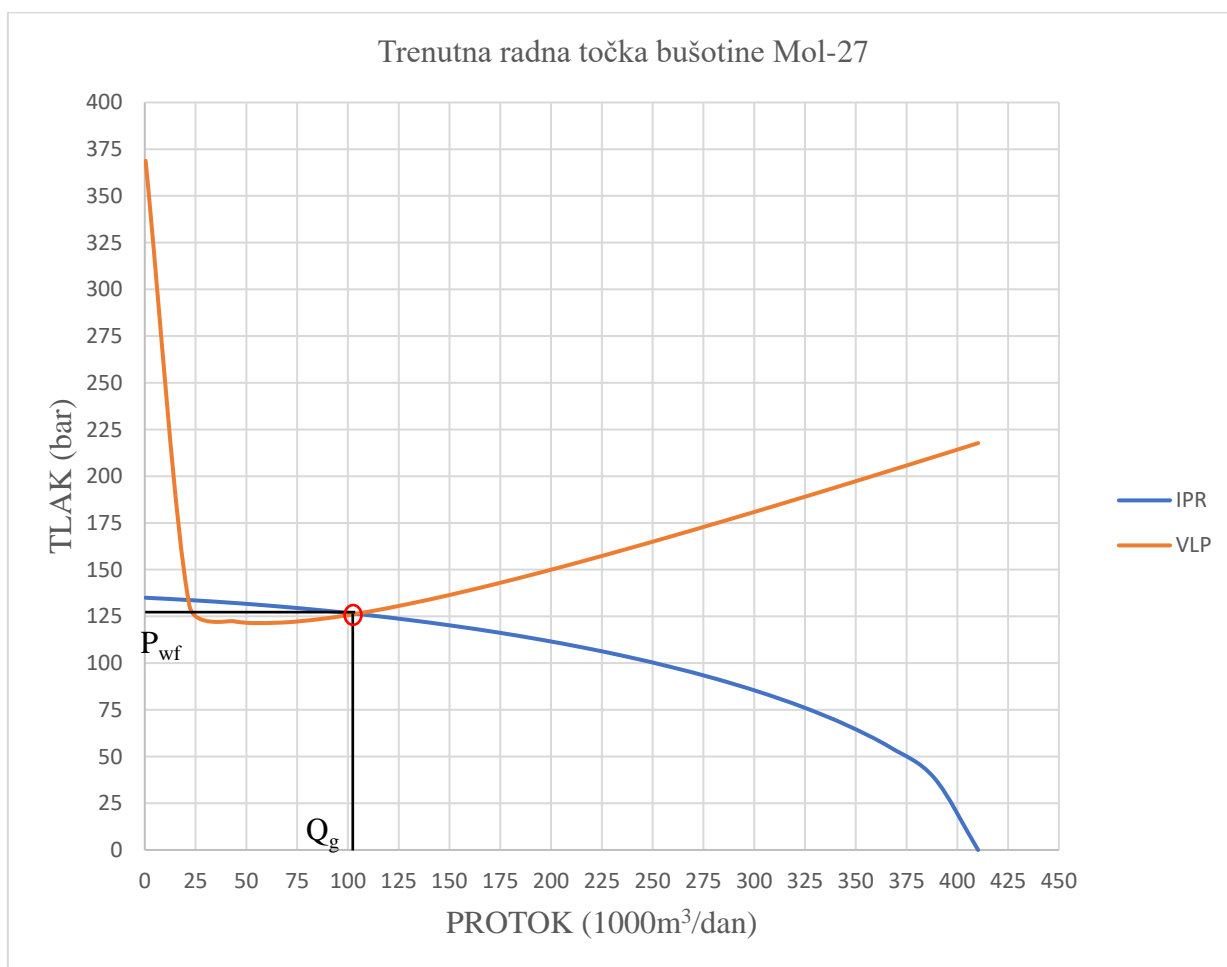
Na slici 6-3. prikazani su podaci korišteni za proračun IPR krivulje.



Slika 6-3. Podaci potrebni za izračun IPR krivulje

IPR krivulja dobivena je korištenjem metode MultiRate Jones zbog nedovoljno PVT ulaznih podataka, dok je VLP krivulja dobivena korištenjem metode Petroleum Experts 3. Sjecište IPR i VLP krivulje se najbolje podudaralo kod usporedbe s posljednjim realnim mjerenim podacima.

Metode MultiRate Jones i Petroleum Experts 3 korištene su u IPM-Prosper analizi kod sve tri razmatrane bušotine (bušotine Mol-27, Mol-37 i Mol-42). Na slici 6-4. grafički je prikaz trenutne radne točke bušotine Mol-27.



**Slika 6-4.** Trenutna radna točka bušotine Mol-27

Dinamički tlak na dnu ( $P_{wf}$ ) bušotine iznosi 127 bar, a ostvarena depresija na sloj 8,5 bar. Pri ovim uvjetima bušotina Mol-27 proizvodi 103 574 m<sup>3</sup>/dan plina ( $Q_g$ ), 6 m<sup>3</sup>/dan kondenzata ( $Q_k$ ) i 91 m<sup>3</sup>/dan slojne vode ( $Q_w$ ).

## 6.2. Bušotina Mol-37

U bušotini Mol-37 ugrađen je proizvodni niz promjera 88,9 mm (3 1/2"). Ležišni tlak (P<sub>i</sub>) iznosi 149,5 bar, tak na ušću (P<sub>i</sub>) 47 bar, a trenutni WGR 2239 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Na slici 6-5. prikazana je ugrađena oprema na bušotini Mol-37

NAZIV BUŠOTINE: <b>Mol - 37</b>		REDNI BROJ	NAZIV PROIZVODNE OPREME	L m	H m	OD mm	ID mm
	1	VJEŠALICA TUBINGA "IKS" 7 1/16" x 3 1/2" Vam AG					
	2	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (2 kom.)	4,74	4,74	88,9	69,8	
	3	NIZ TUBINGA 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (4 kom.)	24,39	29,13	88,9	69,8	
	4	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (1 kom.)	2,29	31,42	88,9	69,8	
	5	DSV "FMR" ID=2,562" 3 1/2" ABTC-4S 12,95# + PROTOČNE SPOJNICE	6,25	37,67	142,7	65,07	
	6	NIZ TUBINGA 3 1/2" ABTC-4S 10,3# (8 kom.)	99,49	130,16	88,9	74,2	
	7	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 10,3# x 3 1/2" ABTC-4S 9,3#	0,84	131,00	88,9	74,2	
	8	NIZ TUBINGA 3 1/2" ABTC-4S 9,3# (254 kom.)	2957,35	3088,35	88,9	76,0	
	9	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (1 kom.)	2,31	3090,66	88,9	69,8	
	10	"R" PRIJELAZ ZA ODLAGANJE 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ID=2,562"	0,38	3091,02	104,5	65,07	
	11	TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (1 kom.)	6,25	3097,27	88,9	69,8	
	12	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 12,95# x 2 7/8" New VAM 6,4#	0,63	3097,90	107,9	62,0	
	13	LOKATOR	0,24	3098,14	107,9	60,2	
	14	BRTVENICA S 4 SETA BRTVENIH JEDINICA	7,14	3105,28	101,0	77,0	
	15	BAKER "F-2" PERMANENTNI PAKER 7"	0,70	3101,50	144,4	101,6	
	16	BRTVENA PRODUŽNICA	6,85	3108,35	128,0	101,6	
	17	VODILICA TUBINGA	0,20	3105,48	101,0	77,0	
	18	PROIZVODNA KOLONA 7" 35# L-80					
	19						
	20						
	21						
	22						
	23						
	24						
	25						

Slika 6-5. Ugrađena oprema na bušotini Mol-37 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Na slici 6-6. prikazani su ulazni podaci potrebni za izračun radne točke bušotine Mol-37.

PVT - INPUT DATA (FFO MOL-37\_SB\_velocity\_TT\_1.Out) (Condensate - Black Oil)

Done Cancel Tables Match Data Matching Correlations Calculate Save Import Composition Help

Use Tables Export

Input Parameters		
Separator Pressure	49.7	BARg
Separator Temperature	59	deg C
Separator GOR	27301.5	Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup>
Separator Gas Gravity	0.8689	sp. gravity
Tank GOR	35.72	Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup>
Tank Gas Gravity	1.0891	sp. gravity
Condensate Gravity	786	Kg/m <sup>3</sup>
Water to Gas Ratio	0.002293	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Water Salinity	30000	ppm

Reservoir Data		
Dewpoint at Reservoir Temp	288.987	BARg
Reservoir Temperature	180	deg C
Reservoir Pressure	149.5	BARg

Correlations

Gas Viscosity Lee et al

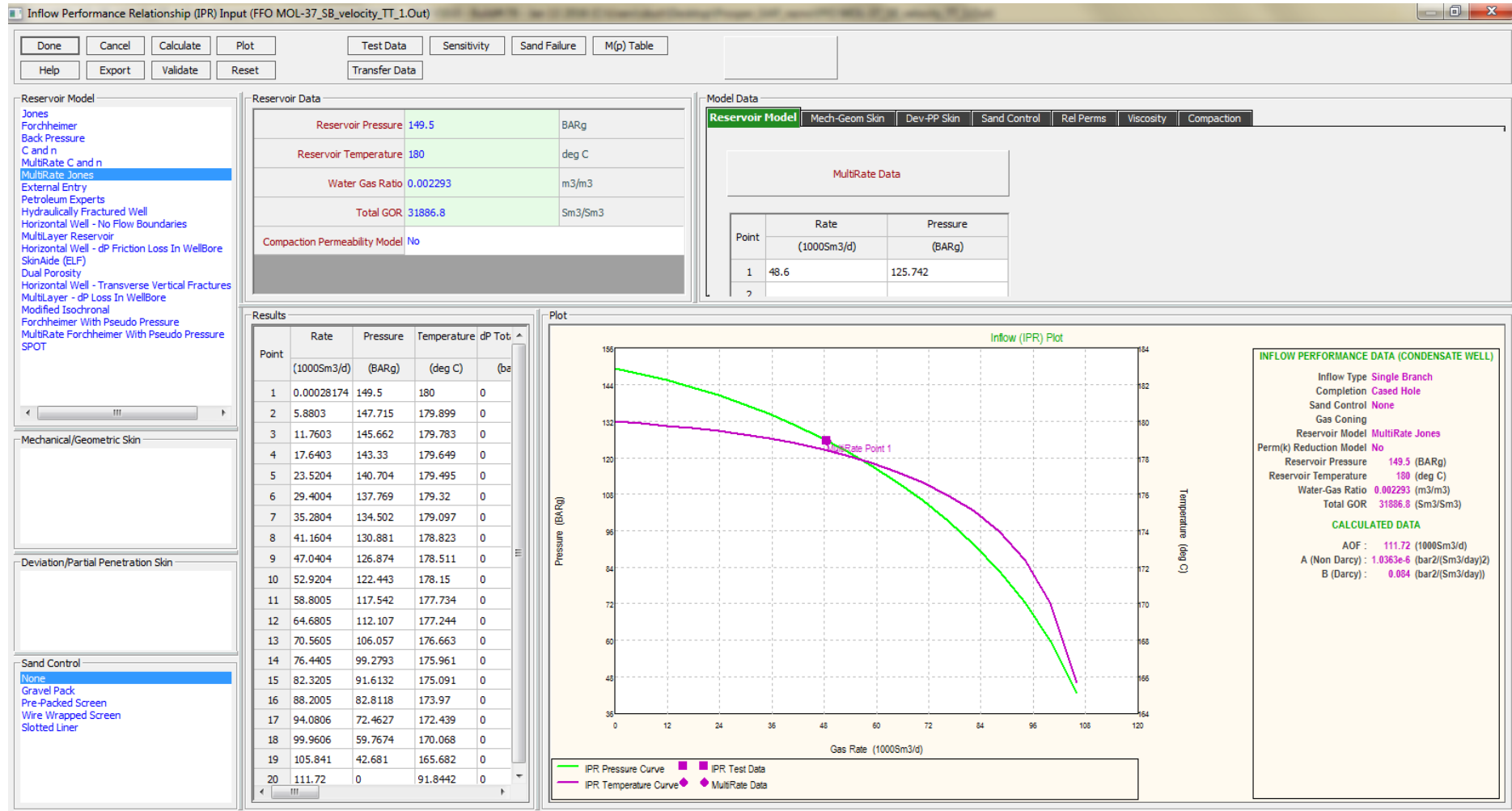
Impurities		
Mole Percent H <sub>2</sub> S	0.065	percent
Mole Percent CO <sub>2</sub>	24.885	percent
Mole Percent N <sub>2</sub>	1.496	percent

Water Vapour Data		
Minimum WGR	6.3455e-5	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Calculate Minimum WGR Plot

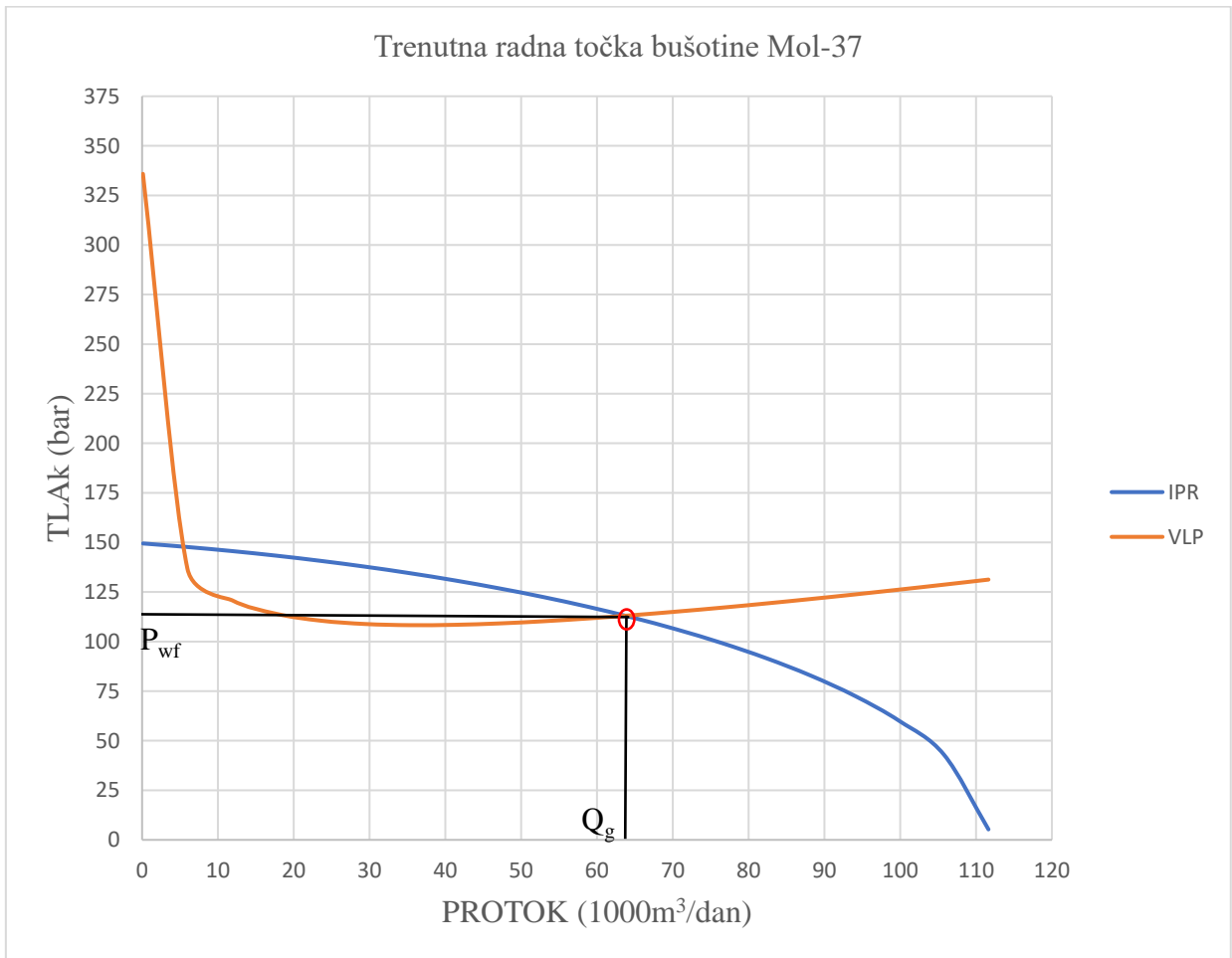
Slika 6-6. Ulazni podaci IPM-Prosper analize

Na slici 6-7. prikazani su podaci korišteni za proračun IPR krivulje.



Slika 6-7. Podaci potrebni za izračun IPR krivulje

Na slici 6-8. grafički je prikaz trenutne radne točke bušotine Mol-37.



**Slika 6-8.** Trenutna radna točka bušotine Mol-37

Dinamički tlak na dnu bušotine ( $P_{wf}$ ) iznosi 113 bar, a ostvarena depresija na sloj 36,5 bar. Pri ovim uvjetima bušotina Mol-37 proizvodi 63 703 m<sup>3</sup>/dan plina ( $Q_g$ ), 2 m<sup>3</sup>/dan kondenzata ( $Q_k$ ) i 148 m<sup>3</sup>/dan slojne vode ( $Q_w$ ).

### 6.3. Bušotina Mol-42

U bušotini Mol-42 ugrađen je proizvodni niz promjera 73,025 mm (2 7/8"). Ležišni tlak ( $P_i$ ) iznosi 133 bar, tak na ušću ( $P_t$ ) 29 bar, trenutni WGR iznosi 2670 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Na slici 6-9 prikazana je ugrađena oprema na bušotini Mol-42

NAZIV BUŠOTINE:		REDNI BROJ	PROIZVODNA OPREMA	L m	H m	OD mm	ID mm
<b>Mol - 42</b>							
	1	VJEŠALICA TUBINGA CAMERON "FMTBS" 7 1/8" x 3 1/2" New VAM 12,7#	0,518	0,518	177,5		
	2	KRATKI TUBING - PRIJELAZ 3 1/2" New VAM 12,7# x 3 1/2" ABTC-4S 12,95#	2,012	2,53	89,0	69,8	
	3	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ( 2 kom. )	6,24	8,77	89,0	69,8	
	4	TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ( 2 kom. )	23,10	29,11	89,0	69,8	
	5	KRATKI TUBING 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ( 1 kom. )	2,31	31,42	89,0	69,8	
	6	PROTOČNA SPOJNICA 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (duža)	2,656	34,07	114,5	68,2	
	7	DSV OTIS "FMR" 3 1/2" ABTC-4S 12,95# ID = 2,562"	2,407	36,48	142,0	65,07	
	8	PROTOČNA SPOJNICA 3 1/2" ABTC-4S 12,95# (kraća)	1,141	37,62	114,5	68,2	
	9	PRIJELAZ 3 1/2" ABTC-4S 9,3# (ž) x 2 7/8" New Vam 6,4# (m)	0,30	37,92	100,5	60,5	
	10	NIZ TUBINGA 2 7/8" New Vam 6,4# ( 260 kom. )	3075,84	3113,76	73,0	61,0	
	11	KRATKI TUBING 2 7/8" New Vam 6,4# ( 1 kom. )	2,12	3115,88	73,0	61,0	
	12	KLIZNA VRATA OTIS "YXD" 2 7/8" New Vam 6,4# ID = 2,313"	1,32	3118,22	98,5	58,75	
	13	TUBING 2 7/8" New Vam 6,4# ( 1 kom. )	11,84	3130,06	73,0	61,0	
	14	GRANIČNIK "J-SLOT" s "RTR" i "ATR" BRTVENOM JEDINICOM	1,29	3131,35	82,55	60,5	
	15	VODILICA TUBINGA 2 7/8" New Vam 6,4#	0,14	3131,49	81,4	60,5	
	16	PERMANENTNI PAKER "TWB" 7" 32-38# ID=3,25"	1,104	3132,59	144,6	82,55	
	17	PRIJELAZ 4" Vam AG 13# (m) x 4 1/2" Vam AG 13,5# (m)	0,16	3132,75	114,3	82,55	
	18	PRIJELAZ ZA OBUŠIVANJE PAKERA ID = 4,0"	2,446	3134,60	127,0	101,6	
	19	PRIJELAZ 4 1/2" Vam AG 13,5# (m) x 2 7/8" New Vam 6,4# (m)	0,20	3134,80	114,5	60,3	
	20	TUBING 2 7/8" New Vam 6,4# ( 1 kom. )	11,61	3146,41	73,0	61,0	
	21	"X" PRIJELAZ ZA ODLAGANJE 2 7/8" New Vam 6,4# ID = 2,313"	0,35	3146,76	82,5	58,75	
	22	TUBING 2 7/8" New Vam 6,4# ( 1 kom. )	11,85	3158,61	73,0	61,0	
	23	VODILICA ZA ALATKE NA ŽICI 2 7/8" New Vam 6,4#	0,31	3158,92	95,0	59,0	
	24	PROIZVODNA KOLONA 7"		3175,0	177,8	159,4	
	25						

CT nasjed prilikom ispiranja pješčanog čepa 12/2006.

3290,0 m  
Open hole 5 7/8"  
Talag

3330 m

Slika 6-9. Ugrađena oprema na bušotini Mol-42 (Tehnička dokumentacija INA d.d 2017.)

Na slici 6-10. prikazani su ulazni podaci potrebni za izračun radne točke bušotine Mol-42.

PVT - INPUT DATA (FFO MOL-42.Out) (Condensate - Black Oil)

Done Cancel Tables Match Data Matching Correlations Calculate Save Import Composition Help

Use Tables Export

Input Parameters		
Separator Pressure	6	BARg
Separator Temperature	62	deg C
Separator GOR	69267	Sm3/Sm3
Separator Gas Gravity	0.8803	sp. gravity
Tank GOR	2.11	Sm3/Sm3
Tank Gas Gravity	0.9422	sp. gravity
Condensate Gravity	785	Kg/m3
Water to Gas Ratio	0.00267	m3/m3
Water Salinity	30000	ppm

Reservoir Data		
Dewpoint at Reservoir Temp	288.987	BARg
Reservoir Temperature	180	deg C
Reservoir Pressure	132.883	BARg

Correlations

Gas Viscosity Lee et al

Impurities		
Mole Percent H2S	0.0065	percent
Mole Percent CO2	25.148	percent
Mole Percent N2	1.585	percent

Water Vapour Data

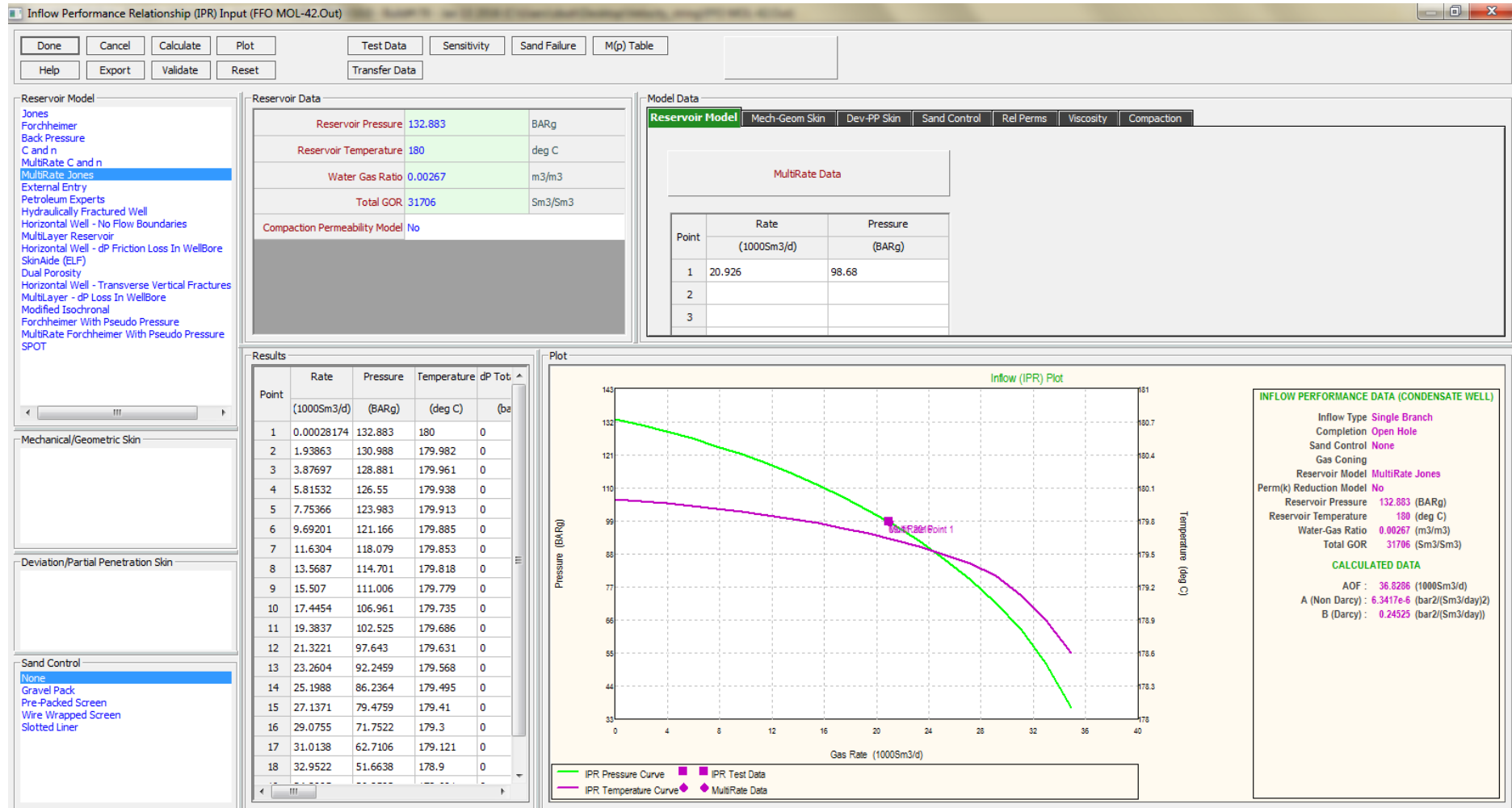
Minimum WGR

Calculate Minimum WGR Plot

Slika 6-10. Ulazni podaci IPM-Prosper analize

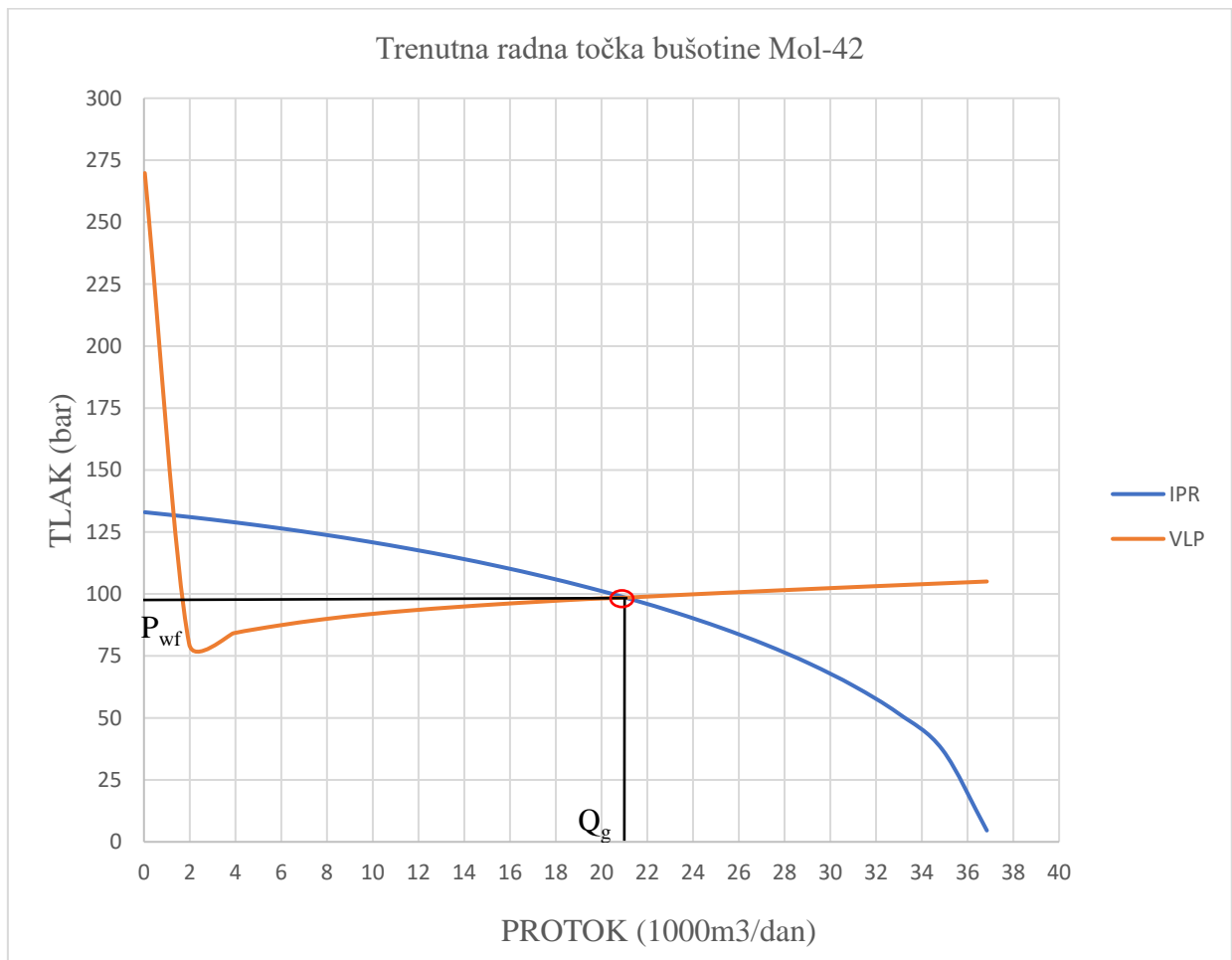


Na slici 6-11. prikazani su podaci korišteni za proračun IPR krivulje.



Slika 6-11. Podaci potrebni za izračun IPR krivulje

Na slici 6-12. grafički je prikaz trenutne radne točke bušotine Mol-42.



**Slika 6-12.** Trenutna radna točka bušotine Mol-42

Dinamički tlak na dnu bušotine ( $P_{wf}$ ) iznosi 99 bar, a ostvarena je depresija na sloj 34 bar. Pri ovim uvjetima bušotina Mol-42 proizvodi 21 026 m<sup>3</sup>/dan plina ( $Q_g$ ), 1 m<sup>3</sup>/dan kondenzata ( $Q_k$ ) i 56 m<sup>3</sup>/dan slojne vode ( $Q_w$ ).

## 7. IPM-PROSPER ANALIZA ZA BUDUĆE STANJE PADA LEŽIŠNOG TLAKA I POVEĆANJA WGR-A

Eruptivni način eksploatacije plinskog ili plinsko-kondenzatnog polja najdulji je i najvažniji period eksploatacije. Tada je izdašnost bušotine dobra, a ležišna energije dovoljna za kontinuiranu proizvodnju fluida koji se sastoji od prirodnog plina, kondenzata i vode.

Kad se proizvodnjom smanji tlak u ležištu i promijene uvjeti dotoka fluida, potrebno je promijeniti brzinu protoka fluida ili dovesti dodatnu energiju u ležište da bi se osiguralo podizanje kapljevite faze (Beggs, 1985).

Pri proizvodnji prirodnog plina uvijek se pojavljuje više ili manje kapljevine (kondenzata), koja se sastoji od viših ugljikovodika što su nastali zajedno s prirodnim plinom. Agregatno stanje tih viših ugljikovodika ovisi o slojnom tlaku i temperaturi, mijenja se tijekom protjecanja fluida od ležišta do površinskih uređaja. Kapljevina koja protječe zajedno s plinom, zbog trenja i veće gustoće, zaostaje u protjecanju, te uvjetuje čepoliko protjecanje. To otežava strujanje plina, usporava protjecanje i guši bušotinu (Beggs, 1985).

Problem podizanja kapljevine naročito je izražen u plinsko-kondenzatnim ležištima gdje je dotok kondenzata u bušotinu znatan te u ležištima s visokom proizvodnjom slojne vode u odnosu na proizvedeni prirodni plin – WGR faktor (*engl. water gas ratio*).

Da bi se spriječilo nakupljanje kondenzata, odnosno slojne vode na dnu bušotine, potrebno je odabrati promjer uzlaznih cijevi koji osigurava brzinu protoka dovoljnu za iznošenje kapljica i sloja kapljevine. Budući da se gustoće kondenzata i vode međusobno razlikuju, potrebno je postići različite brzine iznošenja za te dvije vrste kapljevine. Minimalna brzina protoka za pokretanje slojne vode iznosi (Beggs, 1985):

$$V_{gw=1,23} = \frac{\left(\frac{\rho_w}{16} - 0,0405 * P_t\right)^{0,25}}{(0,0405 * P_t)^{0,5}} \quad (7-1.)$$

gdje su

$V_{gw}$  - minimalna brzina protoka za pokretanje slojne vode ( $m^3/s$ )

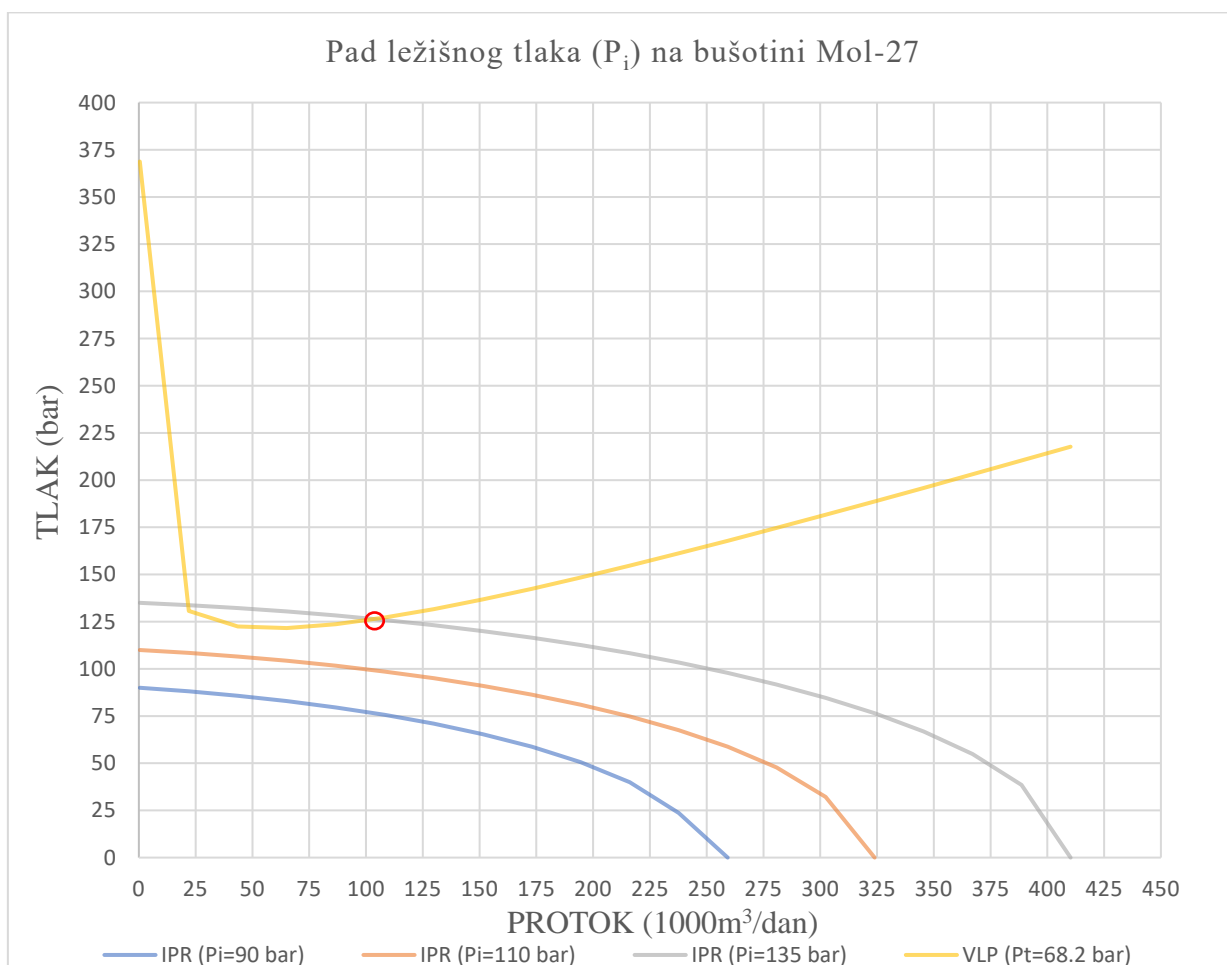
$\rho_w$  – gustoća slojne vode ( $kg/m^3$ )

$P_t$  – dinamički tlak na ušću bušotine (Pa)

U daljnjem radu korišten je IPM-Prosper programski paket za predviđanje budućeg stanja smanjenja ležišnog tlaka i povećanja WGR-a na bušotinama Mol- 27, Mol-37 i Mol-42. Kao rezultat analize modeliranja dobiva se točna vrijednost tlaka i WGR-a do koje bušotina može proizvoditi pri zadanim uvjetima.

### 7.1. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-27

Na slici 7-1. prikazano je predviđanje pada ležišnog tlaka ( $P_i$ ) uz konstantan trenutni WGR i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-27.

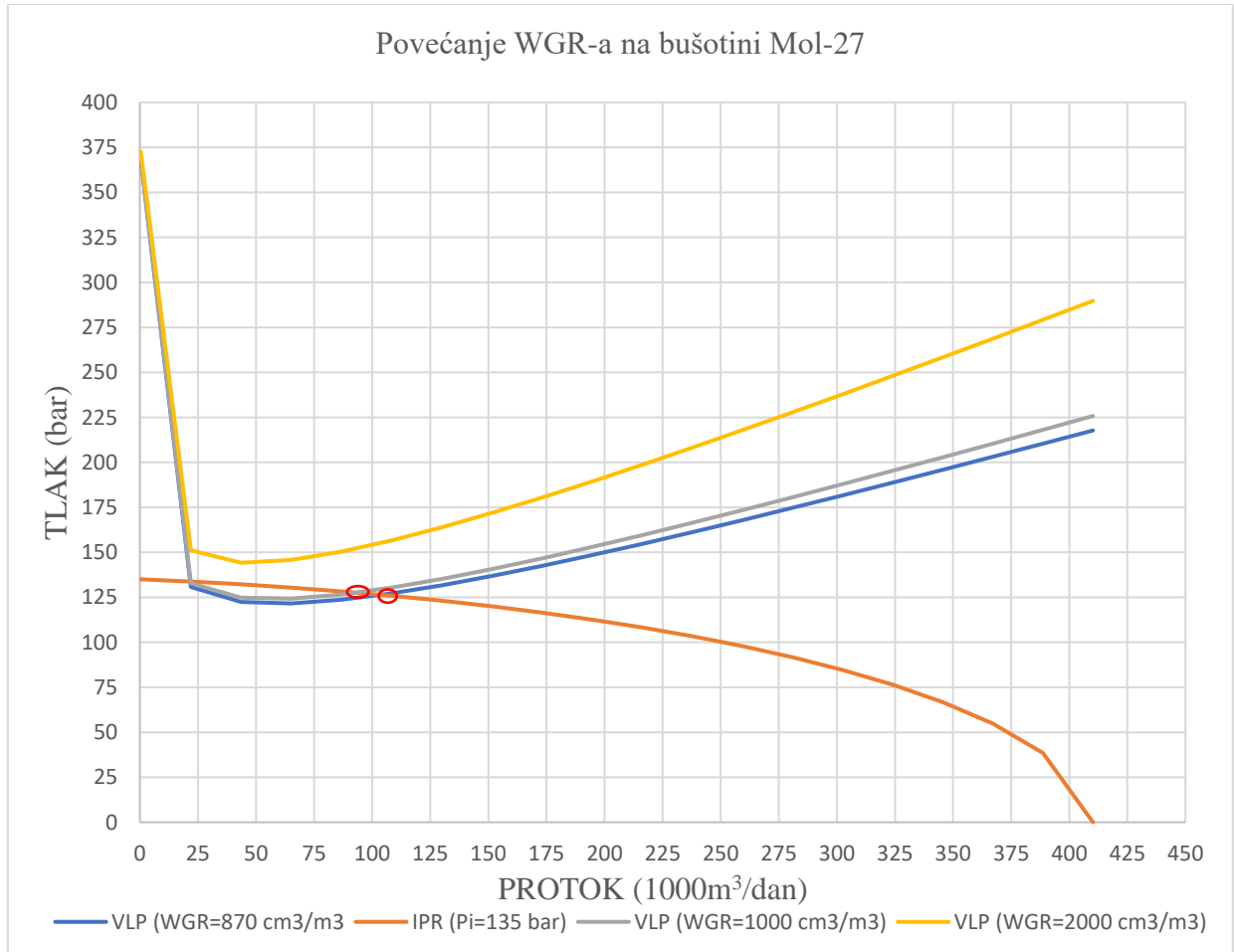


**Slika 7-1.** IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-27

Analizom dobivenih rezultata, uz pretpostavljen daljnji pad ležišnog tlaka ( $P_i$ ) na vrijednosti od 110 bar te 90 bar uz konstantni trenutni WGR i tlak na ušću bušotine ( $P_t$ ) bušotina će prestati proizvoditi, jer ležišni tlak nije dovoljan za iznošenje fluida iz bušotine (IPR i VLP krivulja se ne sijeku).

## 7.2. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-27

Na slici 7-2. prikazano predviđanje povećanja WGR-a uz konstantan trenutni ležišni tlak ( $P_i$ ) i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-27.

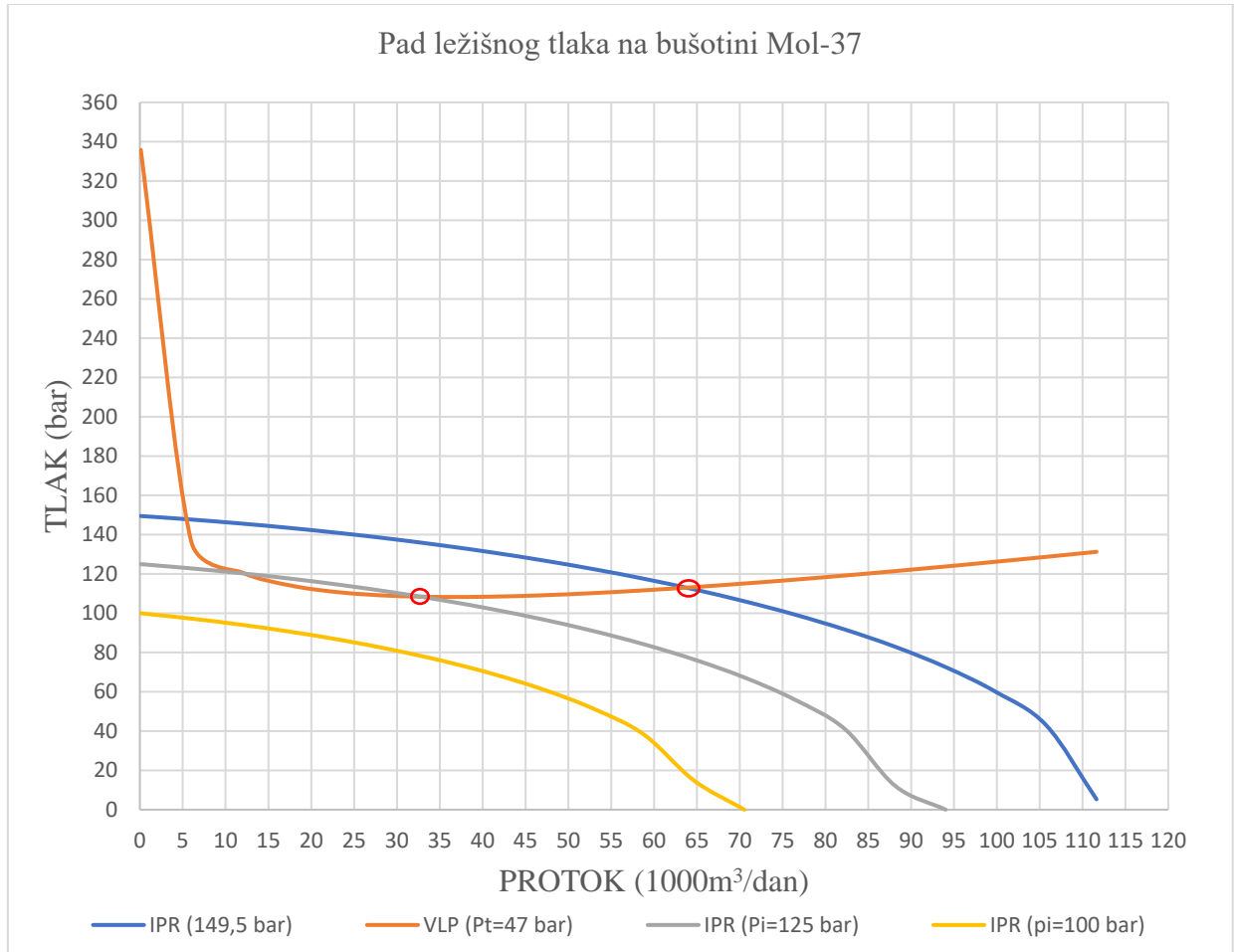


**Slika 7-2.** IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-27

Analizom dobivenih rezultata, s povećanjem WGR-a na vrijednost od  $1000 \text{ cm}^3/\text{m}^3$  smanjit će se proizvodnja plina sa  $103\,574 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $92\,697 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_g$ ), proizvodnja kondenzata sa  $6 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $5,4 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_k$ ) dok će se proizvodnja slojne vode povećati s  $91 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $93 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_w$ ). Dinamički tlak na dnu bušotine povećat će se sa  $127 \text{ bar}$  na  $128 \text{ bar}$ . Daljnjim povećanjem WGR-a do vrijednosti od  $2000 \text{ cm}^3/\text{m}^3$  neće više biti moguće proizvoditi iz bušotine Mol-27 jer neće biti moguće ostvariti minimalnu brzinu protjecanja potrebnu za iznošenje fluida iz bušotine (IPR i VLP krivulje se ne sijeku).

### 7.3. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-37

Na slici 7-3. prikazano predviđanje pada ležišnog tlaka ( $P_i$ ) uz konstantan trenutni WGR i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-37.

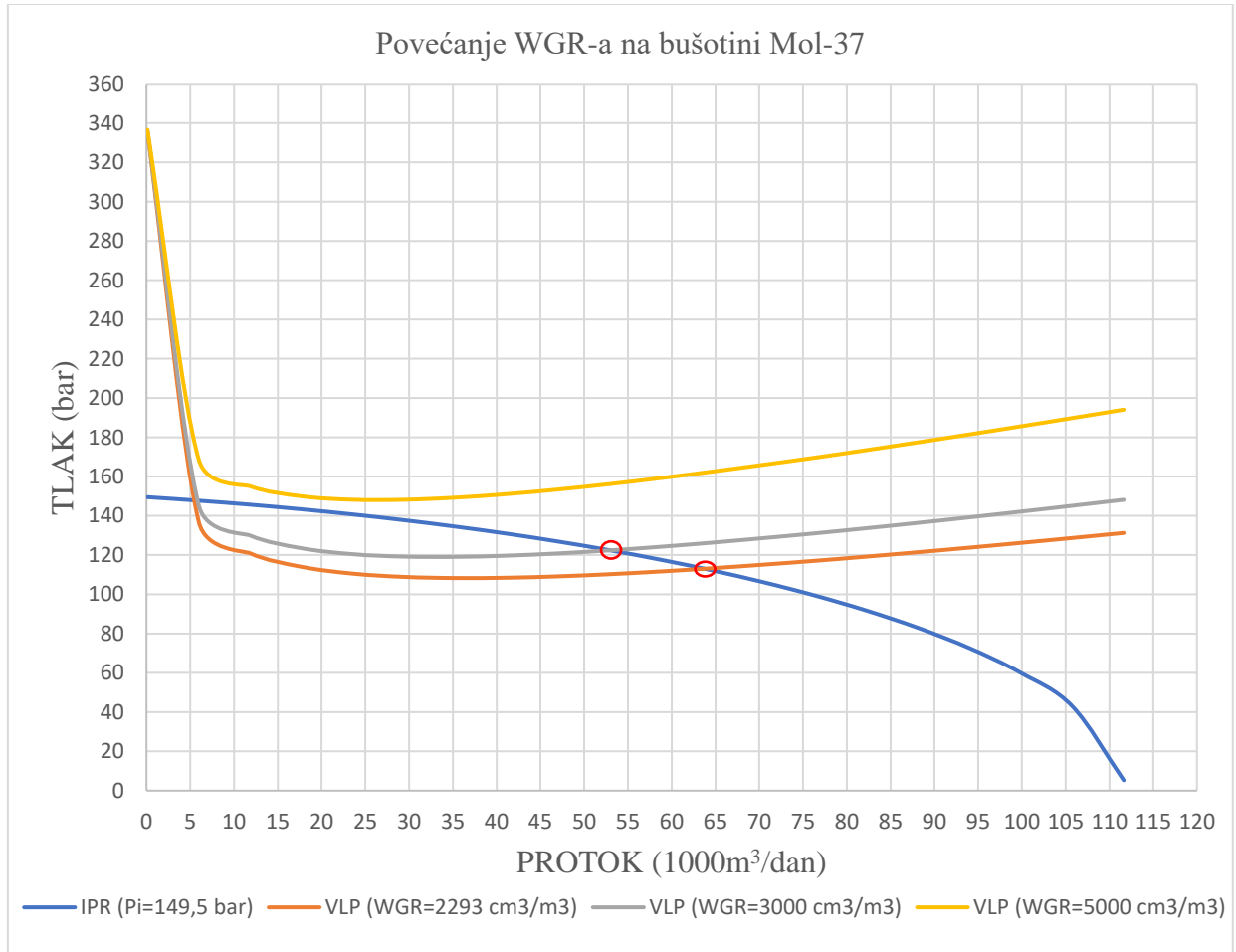


Slika 7-3. IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-37

Analizom dobivenih rezultata, uz pretpostavljeni daljnji pad ležišnog tlaka na vrijednost od 125 bar ( $P_i$ ) uz konstantni trenutni WGR i tlak na ušću bušotine ( $P_t$ ) smanjit će se proizvodnja plina sa 63 703 m<sup>3</sup>/dan na 32 501 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_g$ ), proizvodnja kondenzata s 2 m<sup>3</sup>/dan na 1 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_k$ ) te proizvodnja vode sa 148 m<sup>3</sup>/dan na 75,5 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_w$ ). Dinamički tlak na dnu bušotine smanjit će se sa 113 bar na 108 bar ( $P_{wf}$ ). Daljnjim padom ležišnog tlaka na vrijednost od 100 bar ( $P_i$ ) razmatrana bušotina Mol-37 će prestati proizvoditi jer ležišni tlak nije dovoljan za iznošenje fluida iz bušotine.

#### 7.4. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-37

Na slici 7-4. prikazano predviđanje povećanja WGR-a uz konstantan trenutni ležišni tlak ( $P_i$ ) i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-37.

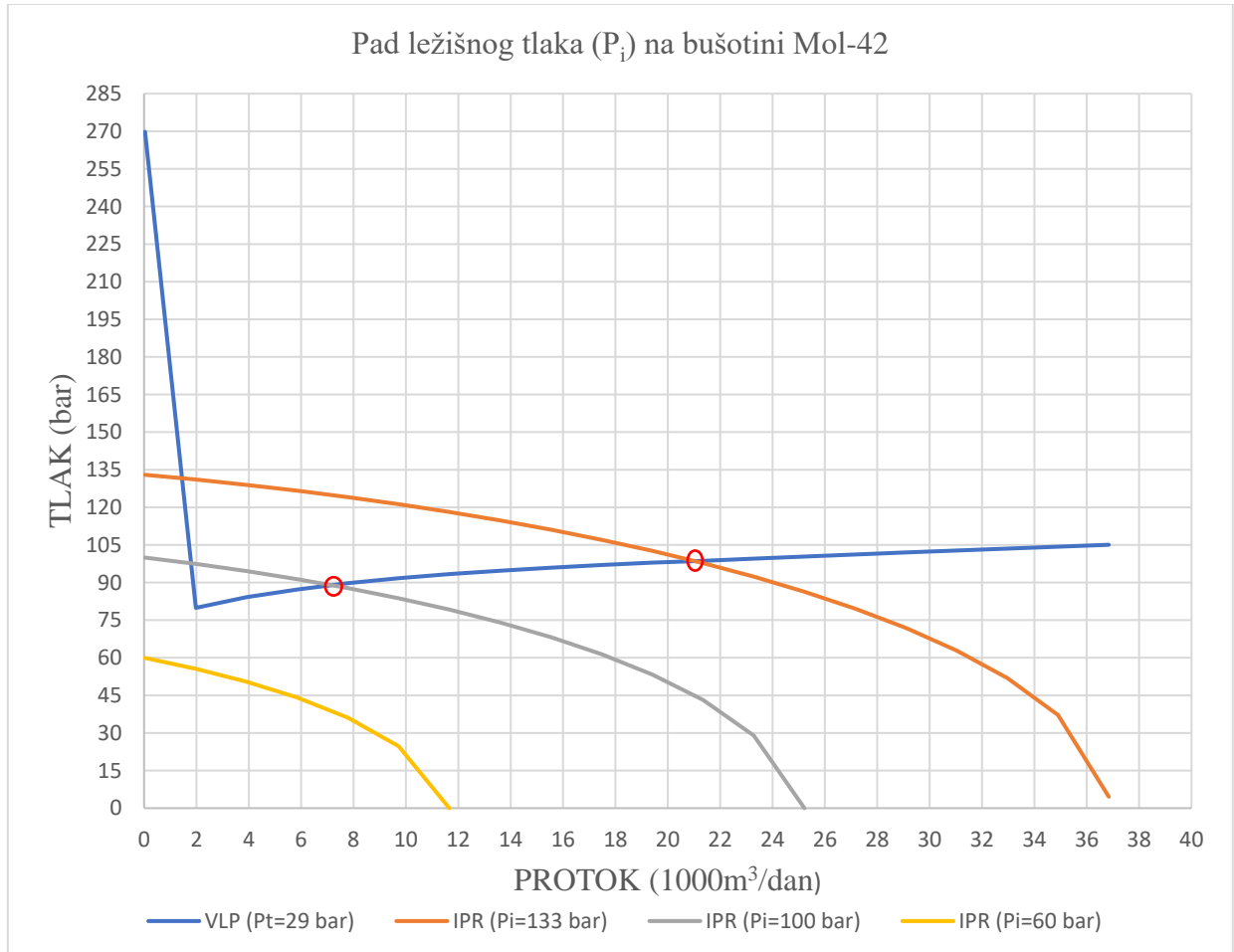


Slika 7-4. IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-37

Analizom dobivenih rezultata, s povećanjem WGR-a na vrijednost od 3000 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> smanjit će se proizvodnja plina sa 63 703 m<sup>3</sup>/dan na 52 979 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_g$ ), proizvodnja kondenzata s 2 m<sup>3</sup>/dan na 1,7 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_k$ ) dok će se proizvodnja slojne vode povećati sa 148 m<sup>3</sup>/dan na 159 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_w$ ). Dinamički tlak na dnu bušotine povećat će se sa 113 bar na 122,5 bar ( $P_{wf}$ ). Daljnjim povećanjem WGR-a do vrijednosti od 5000 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> neće više biti moguće proizvoditi iz bušotine Mol-37 jer neće biti moguće ostvariti minimalnu brzinu protjecanja potrebnu za iznošenje fluida iz bušotine.

### 7.5. Predviđanje smanjenja ležišnog tlaka na bušotini Mol-42

Na slici 7-5. prikazano predviđanje pada ležišnog tlaka ( $P_i$ ) uz konstantan trenutni WGR i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-42.



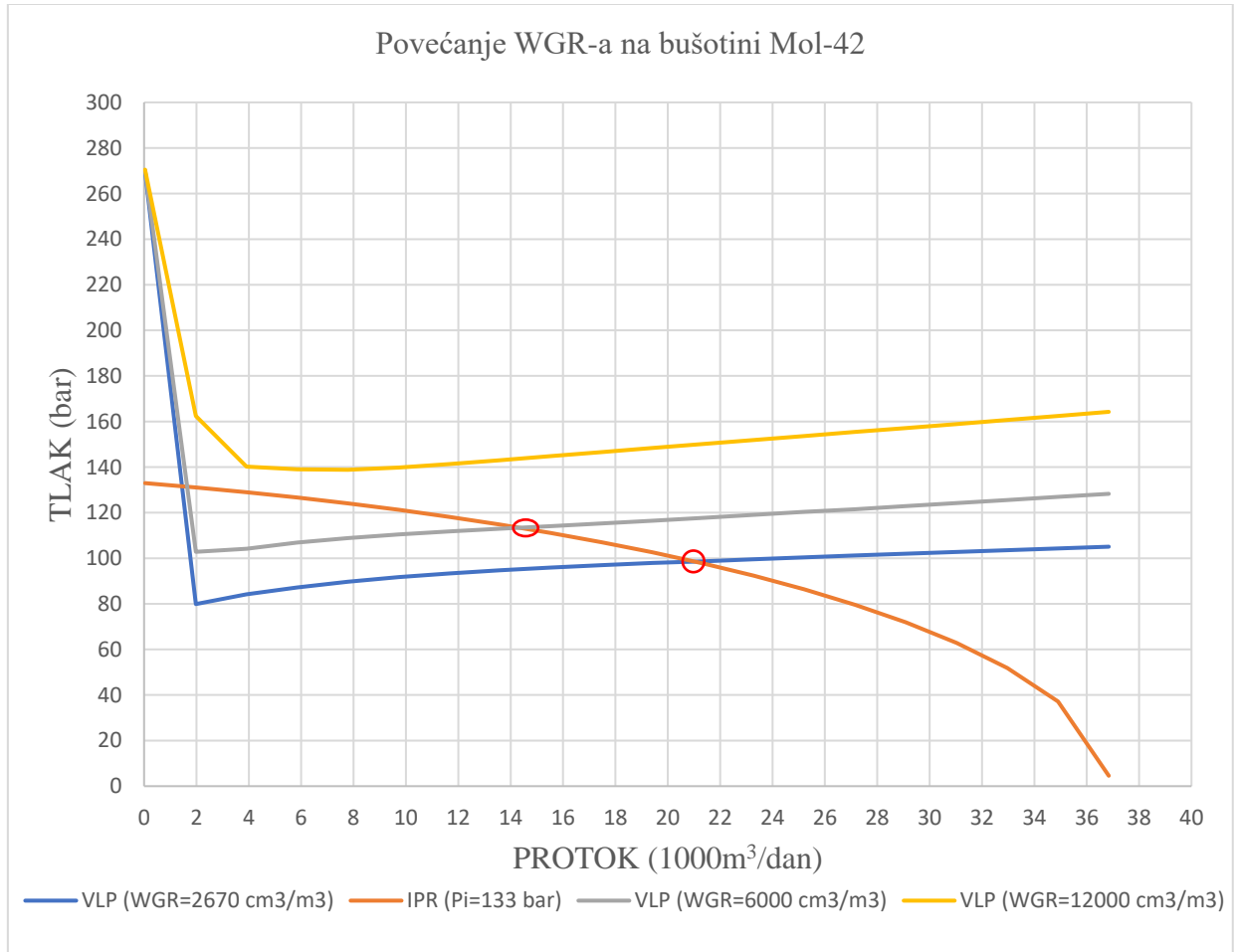
Slika 7-5. IPR i VLP krivulje predviđanja pada ležišnog tlaka na bušotini Mol-42

Analizom dobivenih rezultata, uz pretpostavljen daljnji pad ležišnog tlaka na vrijednost od 100 bar ( $P_i$ ) uz konstantne trenutne uvijete WGR-a i tlaka na ušću bušotine ( $P_t$ ) smanjiti će se proizvodnja plina s 21 026 m<sup>3</sup>/dan na 7 163 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_g$ ), proizvodnja kondenzata s 1 m<sup>3</sup>/dan na 0,2 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_k$ ) te proizvodnja vode s 56 m<sup>3</sup>/dan na 19 m<sup>3</sup>/dan ( $Q_w$ ). Dinamički tlak na dnu bušotine smanjit će se s 99 bar na 89 bar ( $P_{wf}$ ). Daljnjim padom ležišnog tlaka na vrijednost od 60 bar ( $P_i$ ) razmatrana bušotina Mol-42 će prestati proizvoditi jer ležišni tlak nije dovoljan za iznošenje fluida iz bušotine.



## 7.6. Predviđanje povećanja WGR-a na bušotini Mol-42

Na slici 7-6. prikazano predviđanje povećanja WGR-a uz konstantan trenutni ležišni tlak ( $P_i$ ) i tlak na ušću ( $P_t$ ) za bušotinu Mol-42.

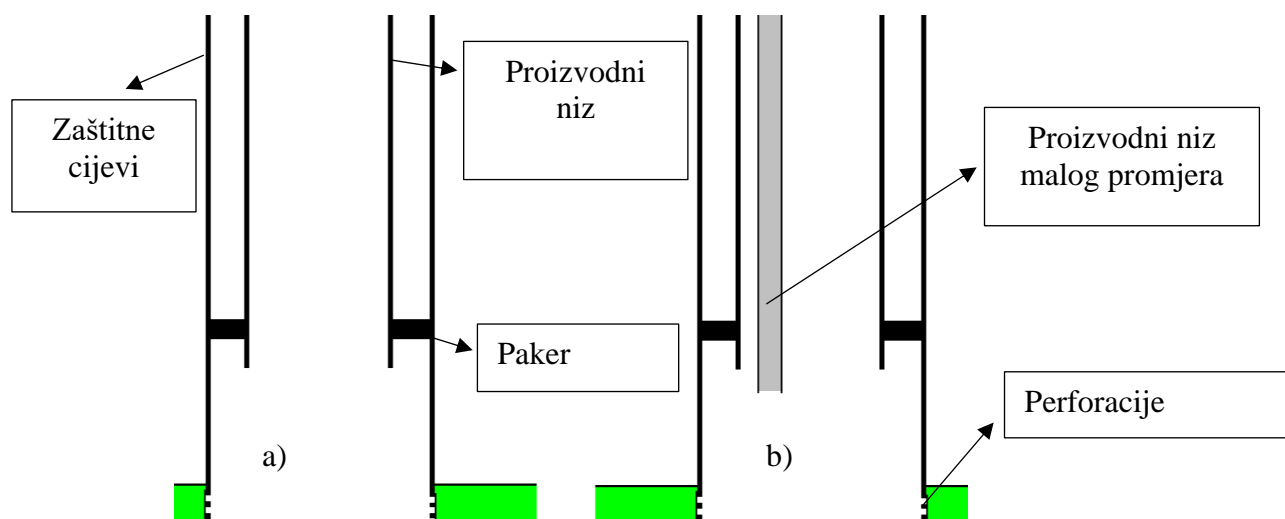


Slika 7-6. IPR i VLP krivulje predviđanja povećanja WGR-a na bušotini Mol-42

Analizom dobivenih rezultata, s povećanjem WGR-a na vrijednost od  $6000 \text{ cm}^3/\text{m}^3$  smanjit će se proizvodnja plina s  $21\,026 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $14\,315 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_g$ ), proizvodnja kondenzata s  $1 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $0,45 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_k$ ), dok će se proizvodnja slojne vode povećati s  $56 \text{ m}^3/\text{dan}$  na  $86 \text{ m}^3/\text{dan}$  ( $Q_w$ ). Dinamički tlak na dnu bušotine povećat će se s  $99 \text{ bar}$  na  $113 \text{ bar}$  ( $P_{wf}$ ). Daljnjim povećanjem WGR-a do vrijednosti od  $12000 \text{ cm}^3/\text{m}^3$  neće više biti moguće proizvoditi iz bušotine Mol-42 jer neće biti moguće ostvariti minimalnu brzinu protjecanja koja je potrebna za iznošenje fluida iz bušotine.

## 8. MOGUĆA UGRADNJA PROIZVODNOG NIZA CIJEVI MANJEG PROMJERA

Proizvodni niz cijevi malog promjera (*engl. velocity string*) obično podrazumijeva cijevi vanjskog promjera od 0,254 mm (1") do 0,889 mm (3<sup>1</sup>/<sub>2</sub>"). Ugrađuje se u postojeći proizvodni niz kako bi se povećala brzina protjecanja plina iznad kritične brzine potrebne za iznošenje fluida u kojem je osim plina prisutna i velika količina slojne vode. Protok fluida u tom slučaju može biti kroz prstenasti prostor između proizvodnog niza malog promjera i postojećeg proizvodnog niza, samo kroz proizvodni niz malog promjera ili kombinacija oba načina. Ako u bušotini iz nekog razloga nakon remontnih radova ili nekog dužeg zastoja nema dotoka iz ležišta u tom slučaju neće pomoći ni ugradnja proizvodnog niza malog promjera. Proizvodni niz malog promjera pomaže bušotini kod stabiliziranja protoka, ali za dotok u bušotini potrebno je koristiti druge metode pridobivanja poput snižavanja dinamičkog tlaka na dno bušotine ili kiselinjskih obrada. Veliki problem kod primjene proizvodnog niza cijevi malog promjera je pad tlaka uslijed trenja. Potrebno je dobro odrediti koji će se promjer koristiti, jer bi u suprotnome moglo doći do velikog povećanja trenja u proizvodnom nizu i do smanjenja proizvodnje fluida. Također, jedan od čestih problema proizvodnog niza malog promjera je korozija uzrokovana kiselim plinovima poput CO<sub>2</sub>. Životni vijek proizvodnog niza malog promjera kod bušotina s parcijalnim tlakom CO<sub>2</sub> od 20684.2 Pa (0,206842 bar) do 48263.2 (0,482632 bar) iznosi dvije do četiri godine (izvor podataka?). Iz navedenih razloga potrebno je prije ugrađivanja proizvodnog niza malog promjera napraviti analizu isplativosti. Na slici 8-1. nalazi se shematski prikaz konvencionalnog proizvodnog niza cijevi (a) te ugrađenog proizvodnog niza cijevi malog promjera (b).



**Slika 8-1.** Shematski prikaz ugrađenog proizvodnog niza malog promjera (<http://gekengineering.com>)

### 8.1. Primjer ugradnje proizvodnog niza malog promjera u bušotinu Mol-37

U tablici 8-1. u posljednjem retku prikazani su trenutni proizvodni parametri bušotine Mol-37 u koju je ugrađen proizvodni niz 88,9 mm (3 ½") s trenutnim WGR-om 2293 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Također su prikazani i pretpostavljeni budući uvjeti smanjenja vrijednosti ležišnog tlaka i njihov utjecaj na proizvodnju prirodnog plin, kondenzata i slojne vode.

**Tablica 8-1.** Trenutni radni parametri bušotine Mol-37

proizvodni niz 88,9 mm (3 ½'') , Pt=47 bar, WGR =2293 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> - trenutni parametri							
Pi	Proizvodnja				Pwf	dP	dP
	plina	kondenzata	vode	tekućine			
(barg)	(1000Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(barg)	(bar)	(bar)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
60							
100							
110							
120							
130	40,677	1,3	93,3	94,5	108,43	7,718	53,711
140	53,271	1,7	122,1	123,8	110,32	11,045	52,275
<b>149,5</b>	<b>63,703</b>	<b>2</b>	<b>146,1</b>	<b>148,1</b>	<b>113,01</b>	<b>14,057</b>	<b>51,953</b>

Očito je da će smanjenje ležišnog tlaka (Pi) uzrokovati smanjenje proizvodnje prirodnog plina i kondenzata.

U tablici 8-2. prikazana je analiza ponašanja bušotine s konstantnim WGR-om u vrijednosti 2293 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> te sa promjenom tlaka na ušću bušotine i ležišnog tlaka kroz proizvodni niz promjera 88,9 mm (3 ½").

**Tablica 8-2.** Utjecaj promjene tlaka na ušću ( $P_t$ ) te ležišnog tlaka ( $P_i$ ) na proizvodne parametre bušotine Mol-37

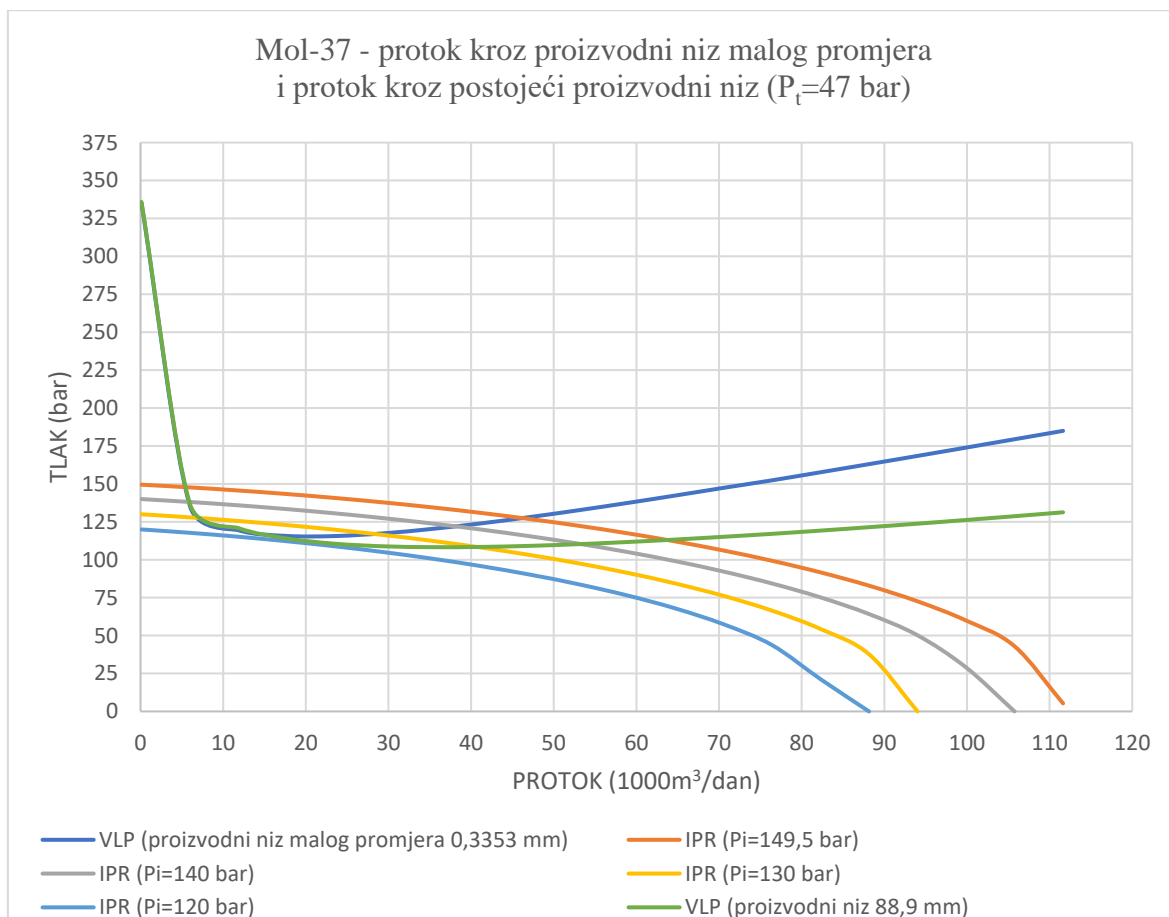
proizvodni niz 88,9 mm (3 ½") uz konstantni WGR = 2293 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>								
Pt	Pi	plin	kondenzat	voda	tekućina	Pwf	dP	dP
(barg)	(barg)	(1000Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(barg)	(bar)	gustoća (bar)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
21	60							
21	100	43,466	1,4	99,7	101	66,03	13,561	31,468
21	110	52,134	1,6	119,5	121,2	69,88	17,091	31,787
21	120	60,496	1,9	138,7	140,6	74,1	20,58	32,519
21	130	68,875	2,2	157,9	160,1	78,5	24,004	33,497
21	140	77,2	2,4	177	179,4	83,11	27,483	34,627
21	149,5	85,01	2,7	194,9	197,6	87,59	30,796	35,792
26	60							
26	100	38,386	1,2	88	89,2	72,26	10,243	36,022
26	110	47,956	1,5	110	111,5	75,28	13,699	35,584
26	120	56,891	1,8	130,4	132,2	78,97	17,096	35,872
26	130	65,647	2,1	150,5	152,6	83,01	20,496	36,518
26	140	74,266	2,3	170,3	172,6	87,22	23,8	37,415
26	149,5	82,418	2,6	189	191,6	91,46	27,074	38,389
31	60							
31	100	31	0,97213	71,1	72,1	79,89	6,989	41,898
31	110	42,442	1,3	97,3	98,6	81,53	10,535	39,998
31	120	52,358	1,6	120,1	121,7	84,52	13,899	39,625
31	130	61,595	1,9	141,2	143,2	88,09	17,207	39,885
31	140	70,718	2,2	162,1	164,4	91,97	20,467	40,503
31	149,5	79,072	2,5	181,3	183,8	95,85	23,584	41,264
36	60							
36	100							
36	110	34,856	1,1	79,9	81	88,9	7,428	45,47
36	120	46,514	1,5	106,7	108,1	90,75	10,865	43,89
36	130	56,664	1,8	129,9	131,7	93,72	14,134	43,59
36	140	66,281	2,1	152	154,1	97,21	17,382	43,823
36	149,5	75,155	2,4	172,3	174,7	100,76	20,39	44,373
41	60							
41	100							
41	110							
41	120	38,582	1,2	88,5	89,7	97,95	7,842	49,112
41	130	50,518	1,6	115,8	117,4	99,93	11,205	47,726
41	140	61,03	1,9	139,9	141,8	102,88	14,43	47,447
41	149,5	70,491	2,2	161,6	163,8	106,13	17,489	47,64
46	60							
46	100							
46	110							
46	120	23,957	0,75126	54,9	55,7	108,56	4,045	58,52
46	130	42,569	1,3	97,6	98,9	106,9	8,307	52,594
46	140	54,662	1,7	125,3	127	109,03	11,594	51,437
46	149,5	64,958	2	148,9	151	111,82	14,621	51,2

Tablica 8-3. prikazuje analizu protoka kroz proizvodni niz malog promjera i to kroz prstenasti prostor proizvodnog niza 88,9 mm (3 ½") / CT 0,3353 mm (1,32").

**Tablica 8-3. IPM-Prospers analiza protoka ugradnjom proizvodnog niza malog promjera**

proizvodni niz malog promjera - prsten proizvodnog niza 88,9 mm (3 ½")' / CT 0,3353 mm (1,32")						
Pt	Pi	plin	kondenzat	voda	tekućina	Pwf
(barg)	(barg)	(1000Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(Sm <sup>3</sup> /d)	(barg)
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
21	60					
21	100	<b>31,112</b>	0,97566	<b>71,3</b>	72,3	79,78
21	110	<b>37,677</b>	1,2	<b>86,4</b>	87,6	86,26
21	120	<b>44,105</b>	1,4	<b>101,1</b>	102,5	93,03
21	130	<b>50,487</b>	1,6	<b>115,8</b>	117,3	99,96
21	140	<b>56,865</b>	1,8	<b>130,4</b>	132,2	106,99
21	149,5	<b>62,937</b>	2	<b>144,3</b>	146,3	113,72
26	60					
26	100	<b>27,038</b>	0,84789	<b>62</b>	62,8	83,38
26	110	<b>34,418</b>	1,1	<b>78,9</b>	80	89,26
26	120	<b>41,319</b>	1,3	<b>94,7</b>	96	95,66
26	130	<b>47,979</b>	1,5	<b>110</b>	111,5	102,31
26	140	<b>54,576</b>	1,7	<b>125,1</b>	126,8	109,11
26	149,5	<b>60,824</b>	1,9	<b>139,5</b>	141,4	115,67
31	60					
31	100	<b>20,802</b>	0,65233	<b>47,7</b>	48,3	88,25
31	110	<b>30,094</b>	0,94372	<b>69</b>	69,9	92,86
31	120	<b>37,645</b>	1,2	<b>86,3</b>	87,5	98,73
31	130	<b>44,799</b>	1,4	<b>102,7</b>	104,1	105,05
31	140	<b>51,754</b>	1,6	<b>118,7</b>	120,3	111,61
31	149,5	<b>58,258</b>	1,8	<b>133,6</b>	135,4	117,99
36	60					
36	100					
36	110	<b>23,956</b>	0,75124	<b>54,9</b>	55,7	97,4
36	120	<b>33,022</b>	1	<b>75,7</b>	76,8	102,36
36	130	<b>40,972</b>	1,3	<b>93,9</b>	95,2	108,21
36	140	<b>48,332</b>	1,5	<b>110,8</b>	112,3	114,46
36	149,5	<b>55,13</b>	1,7	<b>126,4</b>	128,1	120,6
41	60					
41	100					
41	110					
41	120	<b>26,704</b>	0,83742	<b>61,2</b>	62,1	106,78
41	130	<b>36,129</b>	1,1	<b>82,8</b>	84	111,8
41	140	<b>44,194</b>	1,4	<b>101,3</b>	102,7	117,65
41	149,5	<b>51,466</b>	1,6	<b>118</b>	119,6	123,54
46	60					
46	100					
46	110					
46	120					
46	130	<b>29,852</b>	0,93614	<b>68,4</b>	69,4	116,02
46	140	<b>39,188</b>	1,2	<b>89,9</b>	91,1	121,24
46	149,5	<b>47,169</b>	1,5	<b>108,2</b>	109,6	126,78
47	60					
47	100					
47	110					
47	120					
47	130	<b>28,185</b>	0,88386	<b>64,6</b>	65,5	117,03
47	140	<b>38,039</b>	1,2	<b>87,2</b>	88,4	122,01
47	149,5	<b>46,177</b>	1,4	<b>105,9</b>	107,3	127,46

Na slici 8-2. prikazane su IPR krivulje za različite ležišne tlakove ( $P_i$ ) te VLP krivulje pada tlaka u slučaju proizvodnje kroz proizvodni niz 88,9 mm (3 ½") odnosno proizvodni niz malog promjera 0,3353 mm (1,32") i to kroz prstenasti prostor proizvodnog niza 3 ½" / CT 0,3353 mm (1,32") uz konstantni WGR od 2293 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.



**Slika 8-2.** IPR i VLP krivulje kod pada ležišnog tlaka ( $P_i$ ) i proizvodnju kroz postojeći proizvodni niz te proizvodni niz malog promjera

Na temelju provedene analize i usporedbe podataka u tablici 8-2. i tablici 8-3. te grafičkim prikazom IPR i VLP krivulja može se vidjeti da u slučaju ugradnje proizvodnog niza cijevi malog promjera dolazi do znatnog smanjenja proizvodnje prirodnog plina te do određenog smanjenja proizvodnje slojne vode. Gledajući ekonomske parametre ugradnje proizvodnog niza cijevi malog promjera, zamjenu istog te cijenu održavanja uz dobivenu količinu prirodnog plina te slojne vode potrebno je voditi računa i o ekonomskoj isplativosti kompletnog rudarskog zahvata što nije predmet razmatranja ovog diplomskog rada.

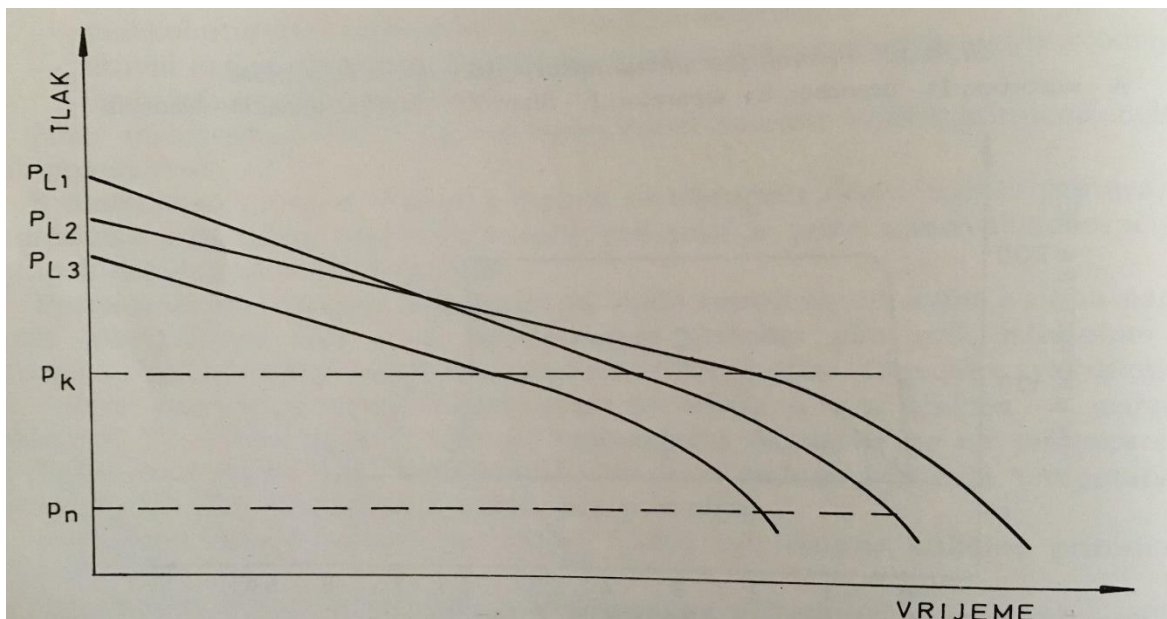
## 9. KOMPRESORSKA PROIZVODNJA

Kompresorska proizvodnja posljednja je faza eksploatacije prirodnog plina. Zbog crpljenja fluida u ležištu ugljikovodika tlak pada. U određenom trenutku u ležištu više nema dovoljno energije (tlaka) koja treba savladati otpor pri protjecanju fluida kroz ležišne stijene do kanala bušotine, hidrostatski tlak u bušotini, otpor pri protjecanju u uzlaznom nizu, otpor pri protjecanju u priključnom plinovodu te tlak ulaza u postrojenje. Tada protok iz bušotine prestaje te ga je potrebno ponovo pokrenuti umjetnim dodavanjem energije u sustav (kompresorima kad se radi o plinu). Zbog određenog udjela tekuće faze u pridobivenim količinama, uslijed male brzine protjecanja, dolazi do zaostajanja kapljevine u protoku i do njenog slijeganja na dno bušotine. Tako nakupljena kapljevina povećava otpor protjecanju plina i na kraju uzrokuje samo ugušenje bušotine. Povećanje vertikalne brzine protjecanja smjese plina i kapljevine poboljšava iznošenje kapljevine te smanjuje mogućnost samo ugušenja bušotine.

U pridobivanju prirodnog plina kompresorima na kopnu postoje tri koncepcije koje se nadopunjuju, a to su (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2010.):

1. Kompresorsko pridobivanje s centralnom kompresornicom na plinskoj stanici gdje je priključen određeni broj bušotina. To je početna faza, a u nekim slučajevima i završna faza kompresorskog pridobivanja;
2. Ugradnja kompresora na početku priključnog plinovoda, u bušotinskom krugu, tj. što bliže samoj bušotini;
3. Ugradnja kompresora na ušću bušotine predstavlja završnu fazu u kompresorskom pridobivanju.

Često se plinsko polje sastoji od više hidrodinamičkih cjelina, pa će krivulja pada tlaka tijekom proizvodnog života tih ležišta izgledati kao na slici 9-1., gdje je  $P_k$  tlak ispod kojeg počinje kompresorska proizvodnja, a uvjetovan je tlakom transportnog sustava;  $P_n$  je minimalan tlak na ušću plinske bušotine pri kojem se napušta ležište dok su  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  i  $P_{13}$  dinamički tlakovi na ušću bušotine. Ako se razmatra područje tlakova između  $P_k$  i  $P_n$ , potrebno je znati promjenu količine proizvodnje po vremenu kako bi se mogli odrediti broj i vrsta kompresorskih jedinica (INA – NAFTAPLIN; 1989.).



**Slika 9-1.** Krivulje pada tlaka i kompresorska proizvodnja plina (INA – NAFTAPLIN; 1989.)

Zbog različitog ponašanja pojedinih bušotina unutar istog plinskog polja, od  $P_n$  do  $P_k$ , pri odabiru tlačnih razina od  $P_n$  do  $P_k$  moraju se odabrati ovi bitni elementi (INA – NAFTAPLIN; 1989.):

1. Najpovoljniji tip kompresora prema količinama i tlakovima plinskih bušotina;
2. Najpovoljniji kompresorski omjer;
3. Optimalan broj stupnjeva komprimiranja ( što će ujedno i definirati tlačne razine).

### 9.1. Ugradnja kompresora na ušće bušotine Mol-20R

Bušotina Mol-20R spada u grupu bušotina s niskim dinamičkim tlakom i visokim WGR-om. Osnova komprimiranja plina na samom ušću bušotine je u tome da se omogući unos energije u sustav čim bliže ležištu plina ili plinskog kondenzata. S obzirom da je bušotina Mol-20R u radu više od trideset godina, došlo je do smanjenja ležišnog tlaka. Posljedica toga je nemogućnost otpreme plina na usis kompresora na CPS Molve, čiji tlak iznosi 18 bar. Da bi se omogućilo daljnje pridobivanje smjese prirodnog plina, kondenzata i slojne vode iz bušotine Mol-20R, potrebno je sniziti usisni tlak na ušću bušotine na 2 bar. S takvim sniženim tlakom, smjesa ne može biti otpremljena na CPS Molve (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015.).

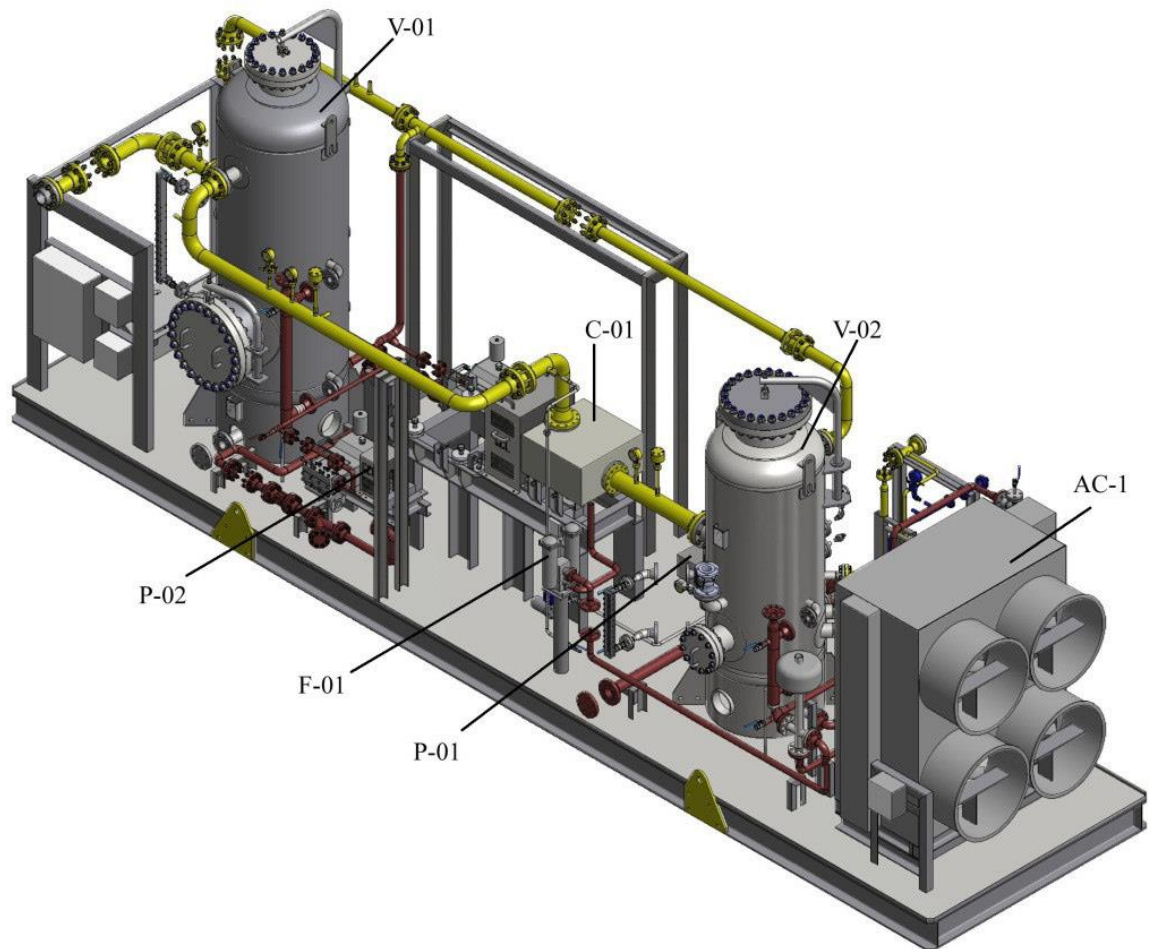


Zahtijevani tlak na koji se tlak smjese mora povećati iznosi 24 bar, jer hidraulički gubitak tlaka od prenosivog kompresorskog postrojenja na bušotini Mol-20R do usisa kompresora na CPS Molve iznosi oko 6 bar ( $\Delta p = 24 - 18 = 6$  bar). Zbog toga će se ugraditi novo prenosivo kompresorsko postrojenje (jednovijčani kompresor). Uvjeti koje novo prenosivo kompresorsko postrojenje, ugrađeno na bušotinskom radnom prostoru Mol-20R, treba zadovoljiti su (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015.):

- usisni (ulazni) tlak u kompresor (dinamički tlak bušotine) = 2 bar
- izlazni (otpremni) tlak iz kompresora = 24 bar
- ulazna temperatura plina = 45 °C
- minimalna količina plina = 25 000 m<sup>3</sup>/dan
- ulazna količina slojne vode = 40 m<sup>3</sup>/dan
- ulazna količina kondenzata = 1,7 m<sup>3</sup>/dan

Zbog nepovoljno visokog kompresijskog omjera i sastava smjese plina, kondenzata i slojne vode ograničena je mogućnost odabira kompresorske jedinice. Ovakve zahtjeve za visoki kompresijski omjer mogu osigurati vijčani i stapni kompresori. Jednovijčani kompresori pripadaju u skupinu obujamskih (volumnih) kompresora i konstruirani su za sve rashladne kompresore za industriju. Ovi kompresori imaju samo tri pomična dijela, glavni rotor koji međusobno zahvaća zupce s dva dijametralno suprotna zvjezdasta kola, geometrija koja rezultira u ujednačenom djelovanju bez gubitaka snage između rotora i zvjezdastih kola, a s minimalnim opterećenjem rotora. Najvažnija značajka jednovijčanog kompresora je mogućnost postizanja velikih kompresijskih omjera u jednom stupnju. Da bi se postigao visoki kompresijski omjer, vijčani kompresor mora biti hlađen uljem. Maksimalno je moguće postići omjer kompresije čak i iznad 20, a mogući su veliki promjenjivi omjeri obujamskog protoka (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015.).

Na slici 9-2. prikazano je prenosivo kompresorsko postrojenje ugrađeno na bušotini Mol-20R.



**Slika 9-2.** Prenosivo kompresorsko postrojenje (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015.)

Kazalo:

AC-1 zračni hladnjak ulja

C-01 jednovijčani kompresor

F-01 filtri ulja (F-01A, F-01B)

P-01 centrifugalna sisaljka za recirkulaciju ulja

P-02 centrifugalna sisaljka za otpremu smjese kondenzata i slojne vode (P-02A, P-02B)

V-01 usisni separator

V-02 uljni separator

## 10. ZAKLJUČAK

U izradi diplomskog rada koristio se IPM-Prosper programski paket pomoću kojeg su se odredile radne točke razmatranih bušotina Mol-27, Mol-37 i Mol-42. Korištenjem trenutnih radnih točaka razmatranih bušotina predviđalo se smanjenje ležišnog tlaka i povećanja WGR-a te su analizirani rezultati takvih promjena na proizvodnju prirodnog plina, kondenzata i slojne vode.

Analizom rezultata dobivenih IPM-Prosper programskim paketom moguće je zaključiti sljedeće:

- Analizom predviđanja pada ležišnog tlaka dolazi do smanjenja proizvodnje razmatranih bušotina te u konačnici uz dovoljno veliki pad tlaka i do prestanka rada bušotina zbog nedovoljne energije koja je potrebna za svladavanje pada tlaka kroz proizvodni niz;
- Analizom predviđanja povećanja WGR-a također dolazi do smanjenja proizvodnje razmatranih bušotina te u konačnici do prestanka rada bušotina zbog nedovoljne brzine iznošenja fluida u proizvodnome nizu;
- IPM-Prosper programskim paketom analitički i grafički se dobivaju točni rezultati kojima se određuje do koje razine smije doći do pada tlaka te do povećanja WGR-a, a da bušotine nastave s radom;
- Ugradnjom proizvodnog niza malog promjera povećava se brzina iznošenja fluida iz bušotine u slučaju velike količine slojne vode u proizvodnome fluidu;

Završna faza proizvodnje plinske bušotine je kompresorska proizvodnja, kod kompresorske proizvodnje tlak na ušću bušotine smanjuje se korištenjem pokretnih kompresora kako bi se što duže nastavila proizvodnja i postigao što veći konačni iscrpak plina.

## 11. LITERATURA

1. BEGGS, H. D., 1985. Gas Production Operations, Tulsa: OGCI Publications
2. BEGGS, H. D., 2003. Production Optimization using Nodal Analysis. Tulsa, Oklahoma: OGCI and Petroskills Publications
3. BRKIĆ, V., 2016. Indikatorske ili IPR krivulje + NODAL analiza sustava proizvodnje. Bilješke s predavanja. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb (neobjavljeno)
4. ČIKEŠ, M., 2015. Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
5. PERIĆ, M., 2007. Englesko – hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: Ina Industrija nafte d.d.
6. SIMON, K., 2012. Sušenje (dehidracija) plina. Bilješke s predavanja. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb (neobjavljeno)
7. INA – NAFTAPLIN: Prirodni plin; 1989.
8. INA – Industrija nafte, 1993. Dopunski rudarski projekt polja Molve
9. INA – Industrija nafte, 2010. Rudarski projekt za eksploataciju ugljikovodika na eksploatacijskom polju Kalinovac
10. INA – Industrija nafte, 2015. Pojednostavljeni rudarski projekt za komprimiranje plina iz eksploatacijske bušotine Mol-20R
11. INA – Industrija nafte, 2017. Dnevni parametri rada bušotina na pogonu Molve
12. ZAVOD ZA JAVNO ZDRAVSTVO KOPRIVNIČKO-KRIŽEVAČKE ŽUPANIJE, 2013. Monitoring okoliša na pogonu Molve 2012/2013. godina. Koprivnica.

Internetski izvori:

1. PETROLEUM EXPERTS, PROSPER,

URL: <http://www.petex.com/products/?ssi=3> (05.05.06.2017.)

## 2. VELOCITY STRINGS,

URL: [http://gekengineering.com/Downloads/Free\\_Downloads/Velocity\\_Strings.pdf](http://gekengineering.com/Downloads/Free_Downloads/Velocity_Strings.pdf)

(15.05.2017.)

## IZJAVA

Ovom izjavom 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.

---

Tomislav Tišljar