

MODELIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA BUŠOTINE OPREMLJENE PLINSKIM LIFTOM PRIMJENOM PROGRAMA PROSPER

PRODUCTION SYSTEM MODELING OF THE GAS LIFTED WELL BY MEANS OF THE PROGRAM PROSPER

SONJA KOŠČAK KOLIN, ZVONIMIR KORENJAK, MARIN ČIKEŠ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: modeliranje proizvodnog sustava, analiza osjetljivosti, neprekidni plinski lift

Key words: production system modeling, sensitivity analysis, continuous gas lift

Sažetak

Analiza proizvodnog sustava napravljena je za bušotinu Šandrovac-136, opremljenu neprekidnim plinskim liftom. U analizi su korišteni podaci ispitivanja kao temelj za postavljanje proizvodnog modela bušotine u računalnom programu 'PROSPER' (Verzija 10.3, Licenca 2681). Primjena mjerenih podataka u modeliranju bušotine značajna je zbog točnosti i pouzdanosti, koju takvi modeli mogu dati u prognoziranju budućih promjena u proizvodnom sustavu. Postavljanje modela može se podijeliti u šest koraka, od kojih su najvažniji: proračun indikatorske ili IPR krivulje, proračun sustava plinskog lifta, te 'mečiranje' VLP i IPR krivulja na osnovu ispitivanja bušotina. Cilj 'mečiranja' je odabrati odgovarajuću metodu za proračun gradjenata pada tlaka primjenom metode nelinearne regresije, što rezultira radnom točkom sustava koja u odnosu na mjerene podatke protoka i tlaka ima najmanja odstupanja. Tako postavljen model temelj je pouzdane analize osjetljivosti bušotine, u kojoj se odabirom triju ključnih varijabli prognozira njihov utjecaj na buduće promjene sustava, prvenstveno promjena protoka i dinamičkog tlaka na dnu.

Abstract

A production system analysis was made for the well Šandrovac-136 equipped with a continuous gas lift. The analysis was based on the test data which served as the foundation for creating a production well model in computer program 'PROSPER' (Version 10.3, License 2681). The importance of the measured data in well modeling is accuracy and reliability in predicting future developments of the production system. The model design can be divided in six steps among which the most important are: calculation of the IPR curve, calculation of the gas lift system and matching of VLP and IPR curves based on the well testing. The aim of the VLP/IPR matching is to choose an appropriate method for calculating the pressure drop gradient by applying the nonlinear regression method, which results in the system working point adjusted to the measured data. This model was applied in sensitivity analysis of the well, in which three key variables are selected to predict their effect on future system changes, primarily on changes of the production and bottom dynamic pressure.

Uvod

U Republici Hrvatskoj ima ukupno 12 naftnih polja gdje plinskim liftom proizvodi oko tristo bušotina. Ostali dio proizvodnje u RH ostvaruje se na 54 eruptivne bušotine, te dubinskim crpkama ugrađenim na 411 naftnih bušotina. Godišnja proizvodnja nafte plinskim liftom u Hrvatskoj je 45% od ukupne količine, odnosno nešto više od 300 000 m³ godišnje, a na istim bušotinama istovremeno se dobiva i 1 000 000 m³ vode. Najveći broj bušotina opremljenih plinskim liftom nalazi se na polju Šandrovac, gdje ih je oko stotinu s dnevnom količinom

proizvodnje nafte približno 200 m³ (INA-Industrija nafte 2002, Zelić 2006).

U svrhu modeliranja i analize osjetljivosti bušotina koje rade neprekidnim plinskim liftom odabrana je bušotina Šandrovac-136. U postavljanju modela najvažniji su podaci ispitivanja bušotine, pri čemu računalni program PROSPER ima mogućnost unosa i više od deset mjerenja za pojedinu bušotinu. Krajnji cilj unosa većeg broja ispitivanja je postizanje što veće točnosti u podudaranju postavljenog modela sa stvarnim uvjetima proizvodnje.

Cilj modeliranja koje se može podijeliti u šest ključnih koraka je konstantno usklađivanje radne točke sustava s

mjerenim podacima. Svrha točnosti tako postavljenog modela je njegova primjena za analizu proizvodnosti u sadašnjim uvjetima, ali i za prognoziranje buduće proizvodnje ovisno o promjenama u sustavu. Krajnji korak modeliranja je 'mečiranje' krivulje gradijenata dinamičkog tlaka u uzlaznim cijevima (eng. VLP - Vertical Lift Performance) i indikatorske krivulje (eng. IPR - Inflow Performance Relationship), koja definira odnos protoka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine u određenom vremenu. Mečiranjem se za već određenu IPR krivulju i za poznate karakteristike plinskog lifta određuje najpovoljnija korelacija za proračun gradijenata tlaka u uzlaznim cijevima, pri istodobnom protjecanju kapljevine i plina (Sečen 1977, Zelić 1986).

Završni dio prognoziranja računalnim programom PROSPER je postavljanje analize osjetljivosti s obzirom na glavne varijable proizvodnog sustava, koje mogu imati značajan utjecaj na promjenu protoka i dinamičkog tlaka u budućnosti. Za odabranu bušotinu to su: ležišni tlak, udio vode u proizvodnji i protok utisnutog plina za liftiranje (Takacs 2005).

Indikatorske ili IPR krivulje

U naftom inženjerstvu su indikatorske ili IPR krivulje temelj za postavljanje optimalnih radnih uvjeta crpljenja fluida iz ležišta. Zavisno o graničnim efektima drenažnog područja moguća su tri stanja protoka: prijelazno, polustacionarno i stacionarno (Sečen 1977; Čikeš 1995; Zelić 2006).

Najčešći i najjednostavniji oblik IPR krivulje je onaj koji proizlazi iz indeksa proizvodnosti naftne bušotine u polustacionarnom stanju, temeljenom na srednjem ležišnom tlaku:

$$J = \frac{q}{p_R(t) - p_{wf}(t)} = \frac{2\pi kh}{B_o \mu_o \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + s \right)} \quad (1)$$

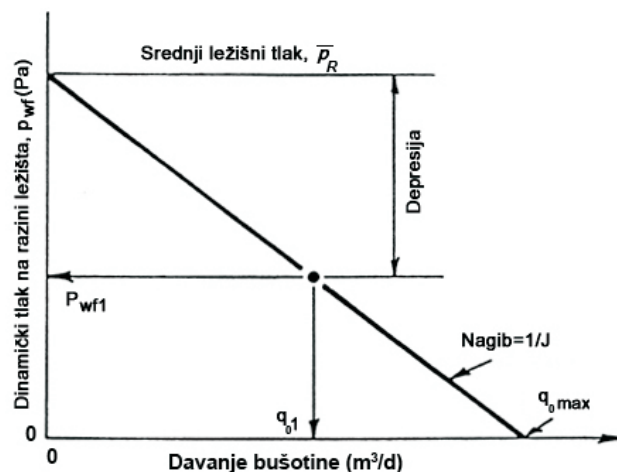
Za vrijeme polustacionarnog protoka indeks proizvodnosti je konstantan, a budući da je protok po definiciji konstantan, izlazi da je razlika između srednjeg ležišnog i dinamičkog tlaka u svakom trenutku jednaka. Stoga se njihovim preuređenjem dobiva jednadžba indikatorske krivulje za polustacionarni protok u naftnoj bušotini:

$$p_{wf}(t) = \bar{p}_R(t) - \frac{q}{J} \quad (2)$$

koja zapravo čini pravac nagiba $1/J$. Njen grafički prikaz

dan je na slici 1., gdje je $q_{o,max}$ maksimalni mogući protok, dakle protok kad je dinamički tlak jednak ničtici. Krivulja vrijedi samo za jednofazni protok neznatno stlačivog

fluida, dakle za slučaj nezasićenog naftnog ležišta. U stvarnosti su takvi slučajevi rijetki, pa su indikatorske krivulje uistinu krivulje, a ne pravci. Premda i za takva odstupanja postoje približna analitička rješenja, u široj uporabi su empirijska rješenja poput Vogelove korelacije, te Standingovih proširenja te korelacije (Zelić 2006).

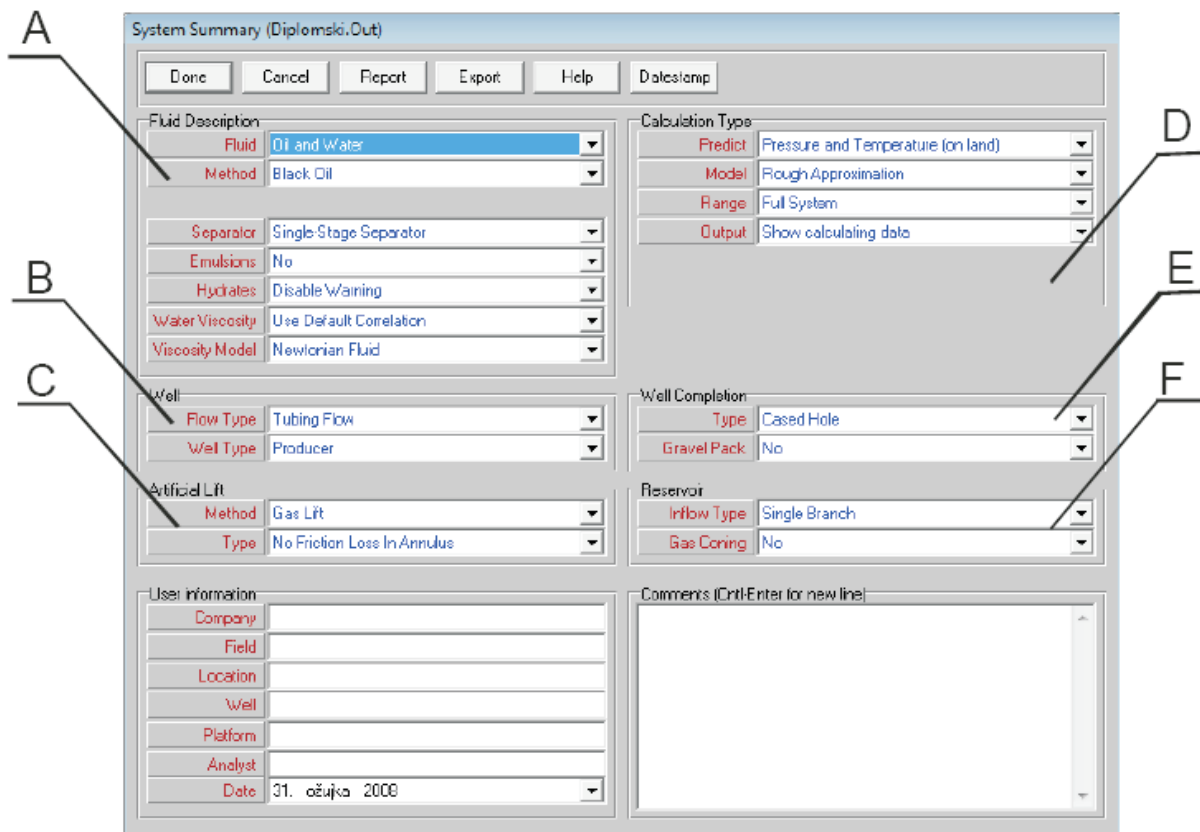


Slika 1. Indikatorska ili IPR krivulja
 Figure 1 IPR curve

Uporaba računalnog programa PROSPER

Prvi korak pri proračunima u PROSPER-u je definiranje sustava i bušotine, te prisustva fluida u ležištu (slika 2). Najprije se unosi tip proizvodnoga fluida, pri čemu je proračune moguće obaviti za naftu, plin ili kondenzat (A). Zatim slijedi određivanje tipa protoka kroz bušotinu, gdje je dana mogućnost za proračune protoka kroz uzlazne cijevi, kroz prstenasti prostor, te za istodobni protok kroz uzlazne cijevi i kroz prstenasti prostor. Potom se za bušotinu odabire da li je proizvodna ili utisna (B), pa slijedi izbor metode umjetnog podizanja fluida. U navedenom primjeru to je plinski lift (C). Nakon toga definiraju se ciljevi proračuna i model po kojem se računa tlak i temperatura, te da li se radi o bušotini na kopnu ili na moru (D). Kod unosa osnovnih podataka o opremanju bušotine odabire se da li je zacijevljena, da li je ugrađen pješčani zasip (E), te radi li se o višezonskom ležištu ili se proizvodi samo iz jednog sloja (F).

Na slici 2. vidi se sažeti prikaz osnovnih ulaznih podataka (Korenjak 2008, Petroleum Experts 2007).



Slika 2. Osnovni ulazni podaci o sustavu (Korenjak 2008)
 Figure 2 Basic system data (Korenjak 2008)

Modeliranje proizvodnog sustava

Do proizvodnog modela bušotine u programu PROSPER dolazi se kroz niz logički povezanih potprograma. Svaki od potprograma postavlja se posebno s ciljem da model vjerno opisuje ležišne i bušotinske uvjete. Model bušotine Ša-136 sastoji se od sljedećih koraka:

1. Definiranje sustava bušotine;
2. Postavljanje PVT modela fluida;
3. Proračun IPR (indikatorske) krivulje;
4. Opis ugrađene opreme (Matanović 1999);
5. Dizajniranje plinskog lifta;
6. Unos podataka ispitivanja bušotine usklađivanje s postavljenim modelom.

Završni dio proračuna (br. 6), ujedno je i najvažniji, a radi se odabirom opcije 'mečiranje' u glavnom izborniku programa PROSPER, koji se zove 'mečiranje' VLP i IPR krivulja (slika 3).

U navedenom primjeru unešeni su rezultati za četiri mjerenja na bušotini, obavljena 31.01.2008, 29.02.2008, 31.03.2008. i 30.04.2008. Podaci mjerenja koji se koriste za usklađivanje s postavljenim modelom u prvom retku su (slika 3):

- Tlak na ušću bušotine $p_{wh} = 4,17$ bar
- Temperatura ušća bušotine $T_{wh} = 30,4$ °C
- Udio vode u proizvodnji $f_w = 86,86\%$
- Protok kapljevine $q_k = 51,7$ m³/d
- Dubina mj. instrumenta $h = 870$ m
- Izmjereni tlak $p = 28,31$ bar
- Ležišni tlak $p_r = 50$ bar
- Odnos plina i kaplj. GOR = 110 m³/ m³
- Protok utisnutog plina $q_p = 2530$ m³/d
- Dubina utiskivanja $h = 832$ m

U gornjem desnom kutu slike 3. nalaze se nazivi operacija koje je potrebno obaviti da bi model opisivao ležišne uvjete. To su:

- a) usporedba korelacija;
- b) 'mečiranje' VLP-a;
- c) mečiranje' VLP i IPR krivulja.

VLP/IPR MATCHING (5a-136.Out)

Task: Correlation Comparison Match VLP VLP / IPR QuickLook

Rate Type: **Liquid Rates**

Match Data

	Test Point Date	Test Point Comment	Tubing Head Pressure (BARa)	Tubing Head Temperature (deg.C)	Water Cut (percent)	Liquid Rate (m3/day)	Gauge Depth (m)	Gauge Pressure (BARa)	Reservoir Pressure (BARa)	Gas Oil Ratio (m3/m3)	GOR Free Gas (m3/m3)	Gas Rate (m3/day)	Injection Depth (m)
1	31/01/2008	1	4.17	30.4	86.86	51.7	870	28.31	50	110	0	2530	832
2	29/02/2008	2	4.17	30.4	88.89	49.4	870	28.31	50	105	0	2530	832
3	31/03/2008	3	4.17	30.4	90.14	49.4	870	28.31	50	118.6	0	2530	832
4	30/04/2008	4	4.17	30.4	88.46	52.1	870	28.31	50	131.86	0	2530	832
5													
6													
7													
8													
9													
10													

Buttons: Enable, Disable, Copy, Cut, Paste, Insert, Delete, All, Invert

Slika 3. Podaci mjerenja za 'mečiranje' VLP i IPR krivulja (Korenjak 2008)
Figure 3 Test data for VLP/IPR matching (Korenjak 2008)

a) Usporedba korelacija

Ovo je ključni korak kojim se kontrolira kvaliteta usporedbe mjerenih podataka, dobivenih ispitivanjem u bušotini, s ponuđenim korelacijama za izračunavanje gradijenata dinamičkog tlaka pri višefaznom protoku u uzlaznim cijevima (Bradley 1987). Sve ponuđene korelacije za usporedbu točnosti proračuna mogu se vidjeti na desnoj strani slike 4. Na lijevoj strani iste slike nalaze se ulazni podaci i dodatna mjerenja tlaka po dubini, ako postoje. Ulazni podaci o tlaku na ušću, udjelu vode, protoku kapljevine, GOR-u, protoku utisnutog plina i dubini utiskivanja preuzeti su iz tablice sa slike 3., a dodatnih deset mjerenja tlaka je preuzeto iz izvješća o mjerenju (INA-Industrija nafte 2002).

Na slici 4. se vidi da je odabrana korelacija Petroleum Experts 3, iz razloga što se najbolje poklapa s izmjenim podacima. Grafička usporedba nekoliko korelacija prikazana je na sljedećem dijagramu (slika 5).

Na apscisi dijagrama slike 5. je tlak, dok je ordinata dubina bušotine, a prikazane su četiri krivulje gradijenata tlaka od kojih se ljubičasta odnosi na Petroleum Experts 3 korelaciju i najbolje aproksimira izmjerene vrijednosti, prikazane plavim kvadratima. Najveće odstupanje dobilo bi se odabirom korelacije Beggsa i Brilla, koja je prikazana plavom bojom. Preostale dvije krivulje prikazane su zelenom i crvenom bojom, a odnose se na Fancher-Brownovu i modificiranu korelaciju Duns i Rosa. Ove dvije korelacije uvedene su u postupak modeliranja zbog kontrole točnosti, pri čemu crvena krivulja treba padati s desne strane odabrane korelacije, a zelena krivulja s lijeve strane odabrane korelacije kao što i navedeni dijagram

pokazuje. Zelena krivulja (Fancher Brown) je korelacija koja ne uzima u obzir proklizavanje zbog različitih brzina strujanja faza, pa zbog toga predstavlja donju granicu gradijenata tlaka. Sasvim suprotno tome, crvenom krivuljom, odnosno Duns-Rosovom korelacijom, pad tlaka je precijenjen, odnosno podrazumijeva čepolik režim protjecanja iz čega proizlazi da krivulja prikazuje gornju granicu pada tlaka. Iz navedenih razloga ove dvije korelacije nisu ponuđene za aproksimaciju, nego za kontrolu točnosti svih ponuđenih korelacija.

Tubing Correlation Comparison - Data Entry (5e-136.Out)

Buttons: Calculate, Done, Cancel, Export, Report, Help

Input Parameters

First Node Pressure	4.17	BARa
Water Cut	86.86	percent
Liquid Rate	51.7	m3/day
GOR	110	m3/m3
GOR Free	0	m3/m3
Gaslift Gas Rate	2530	m3/day
Depth Of Injection	832	m
Rate Type	Liquid Rates	
Pipeline Correlation	Beggs and Brill	

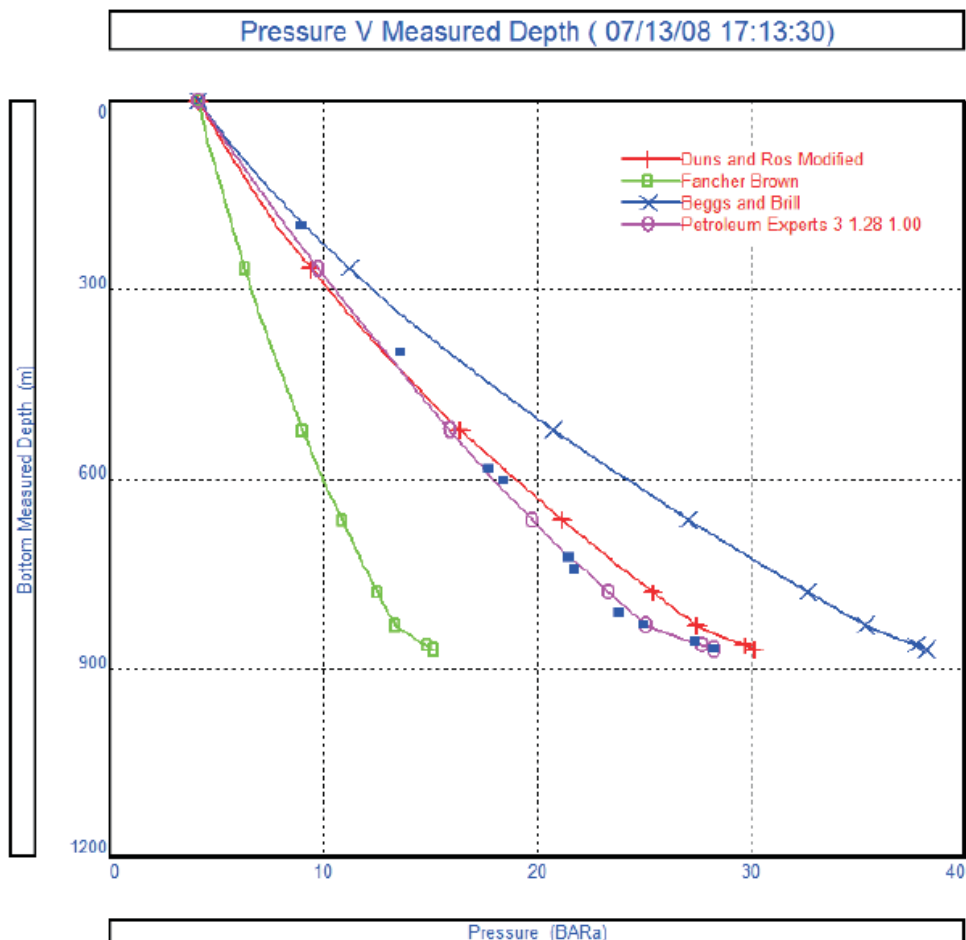
Correlations

- All
- Duns and Ros Modified
- Hagedorn Brown
- Fancher Brown
- Mukerjee Brill
- Beggs and Brill
- Petroleum Experts
- Dukiszewski
- Petroleum Experts 2 1.00 1.00
- Duns and Ros Original
- Petroleum Experts 3 1.00 1.00**
- GRE (modified by PE)
- Petroleum Experts 4
- Hydro-3P

Measured Data

Point	Depth (m)	Pressure (BARa)	Match Data
1	200	9.004	Transfer
2	400	13.640	Paste
3	594	17.779	Copy
4	604	18.406	Clear
5	725	21.531	
6	745	21.789	
7	813	23.870	
8	832	25.032	
9	858	27.388	
10	870	28.315	

Slika 4. Usporedba korelacija za gradijente tlakova u uzlaznim cijevima (Korenjak 2008)
Figure 4 Tubing correlation comparison (Korenjak 2008)



Slika 5. VLP krivulje prema navedenim korelacijama (Korenjak 2008)
 Figure 5 VLP curves according to the chosen correlations (Korenjak 2008)

Korelacija Petroleum Experts 3 razvijena je od strane proizvođača programskog paketa pa zbog toga nosi naziv tvrtke, a njena točnost proizlazi iz međusobne povezanosti primjene Fancher Brownove, Duns-Rosove i Hagedorn-Brownove korelacije (Petroleum Experts Ltd. 2007).

b) 'Mečiranje' VLP-a

U ovom koraku se pomoću nelinearne regresije odabrana korelacija prilagođava mjerenim podacima s ciljem postizanja što veće točnosti. Na slici 6 prikazani su rezultati nelinearne regresije za korelaciju Petroleum Experts 3, ali i za korelaciju koja se na prethodnom dijagramu (slika 5) pokazala kao najlošija, a to je Beggs i Brill. Idealan slučaj nelinearne regresije bio bi kada bi parametar 1 iznosio jedan, što znači da dotična korelacija treba vrlo malu korekciju da bi se uklapala u mjerene podatke. Istovremeno, vrijednost parametra 2 treba se podudarati s vrijednošću parametra 1 uz dozvoljeno

odstupanje od +/- 10%, a standardna devijacija treba konvergirati prema ničisti da bi 'mečiranje' bilo što preciznije (Petroleum Experts Ltd. 2007).

Kao što se vidi na slici 6., parametar 1 za odabranu korelaciju Petroleum Experts 3 iznosi 1,00343 što je vrlo blizu jedinici, odnosno idealnom slučaju, a isto tako parametar 2 ima vrlo malo odstupanje od parametra 1. Standardna devijacija također konvergira prema ničisti i iznosi 1,76989. Za razliku od toga, Beggs i Brill daje loše rezultate i pokazuje velika odstupanja od idealnog slučaja, jer parametar 1 iznosi 0,77038, pa samim time ostale parametre nije potrebno analizirati.

Ono što se ne vidi na slici, a važno je istaknuti da se računata vrijednost tlaka po korelaciji Petroleum Experts 3 i mjerena vrijednost dinamičkog tlaka na dnu bušotine podudaraju s visokom točnošću:

$$p_{wfmjerenog} = 28,22 \text{ bar} \approx p_{wfračunato} = 28,31 \text{ bar}$$

		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1	1	
2	Reset	Hagedorn Brown	1.08333	1	1.71137
3	Reset	Fancher Brown	1	1	
4	Reset	Mukerjee Brill	1	1	
5	Reset	Beggs and Brill	0.77038	1	3.30558
6	Reset	Petroleum Experts	1	1	
7	Reset	Orkiszewski	1	1	
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.27724	1	0.93026
9	Reset	Duns and Ros Original	1	1	
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.00343	1	1.76388
11	Reset	GRE (modified by FE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1	1	
13	Reset	Hydro-3P	1	1	

Slika 6. Usporedba točnosti 'mečiranja' (Korenjak 2008)

Figure 6 Tubing correlation match parameters (Korenjak 2008)

c) 'Mečiranje' VLP i IPR krivulja

U ovom dijelu proračuna provjerava se da li su gradijenti tlakova dobiveni u prethodnom VLP 'mečiranju' usklađeni s IPR krivuljom, odnosno da li se protok i tlak na dnu bušotine dobiveni ispitivanjem poklapaju s tlakom VLP krivulje. Nakon 'mečiranja' VLP i IPR krivulja dobiva se rješenje prikazano dijagramom na slici 7.

Na desnoj strani slike 7. pokazano je odstupanje modela od mjerenih vrijednosti za protok i za dinamički tlak za sva 4 mjerenja. U slučaju protoka, odstupanja su do 2,51%, a kod dinamičkih tlakova do 1,25% pa se i na samom dijagramu može vidjeti da se presjecište poklapa s točkama mjerenja uz vrlo visoku točnost. Time je završeno svih šest koraka u modeliranju proizvodnog sustava bušotine Ša-136, koji se zbog svoje točnosti u slaganju s ležišnim uvjetima u svim odabranim korelacijama koje se koriste u proračunima, može s vrlo visokom pouzdanošću koristiti za analizu osjetljivosti iste bušotine. Cilj postavljanja modela je upravo u pretpostavljanju utjecaja kojeg bi buduće promjene u proizvodnji mogle izazvati na cijeli sustav što se u PROSPER-u može računati putem analize osjetljivosti (Economides 2000).

Analiza osjetljivosti za bušotinu Ša-136

S obzirom da promijenjenih uvjeta u proizvodnom sustavu može biti puno, analiza osjetljivosti postavljena je na osnovu tri ključne varijable, a to su u ovom primjeru protok utisnutog plina, ležišni tlak i udio vode

u proizvodnji (Komlen 2008). Od ulaznih podataka najvažnije je odrediti početnu i krajnju točku proračuna, a to su tlak na ušću i tlak na dnu, a ostali podaci su preuzeti iz modela (slika 8).

U sljedećem koraku odabiru se tri varijable za koje se pretpostavlja da bi u budućnosti mogle imati najveći utjecaj na promjenu protoka, ali i na cijeli sustav proizvodnje. S obzirom da se radi o bušotini s plinskim liftom prva odabrana varijabla je protok utisnutog plina, a njene vrijednosti za analizu su:

- $q_{p0} = 2\,530 \text{ m}^3/\text{d}$
- $q_{p1} = 5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$
- $q_{p2} = 10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$

Prva vrijednost od $2\,530 \text{ m}^3/\text{d}$ jednaka je kao u postavljenoj modelu, da bi se ovaj protok utisnutog plina mogao usporediti s promijenjenim vrijednostima varijabli 2 i 3. Kao treća vrijednost varijable 1, pretpostavljeno je $10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, jer kompresorska stanica na naftnom polju Šandrovac može dnevno maksimalno utisnuti do $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ plina. Za varijablu 2 u analizi osjetljivosti uzet je ležišni tlak s pretpostavkom da bi se u budućnosti mogao smanjiti sa sadašnjih 50 bara na 20 bara, pa su odabrane sljedeće tri vrijednosti:

- $p_{r0} = 20 \text{ bar}$
- $p_{r1} = 30 \text{ bar}$
- $p_{r2} = 40 \text{ bar}$



Slika 7. Dijagram presjecišta VLP i IPR krivulja (Korenjak 2008)
 Figure 7 Diagram of VLP/IPR matching (Korenjak 2008)

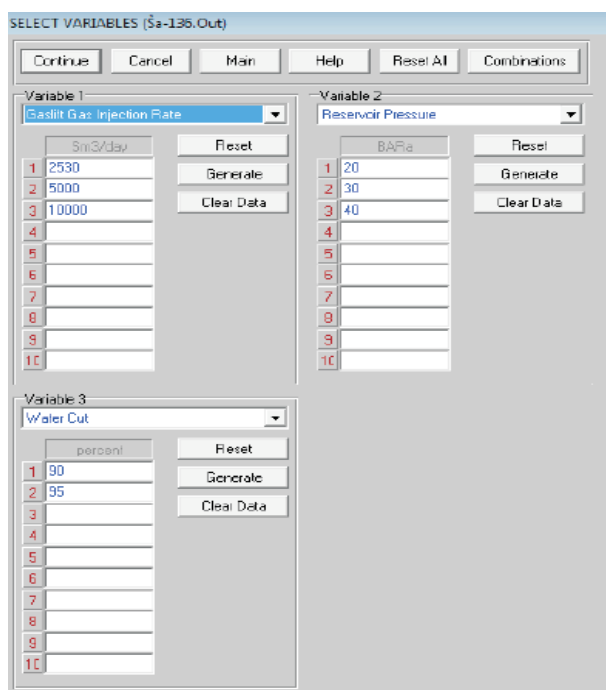
The screenshot shows the 'SYSTEM 3 VARIABLES (Ša-136.Out)' window. It contains several input fields and dropdown menus for configuring the simulation. Buttons for 'Continue', 'Cancel', 'Report', 'Export', and 'Help' are visible at the top.

Input Data		
Top Node Pressure	4.17	BARa
Water Cut	86.86	percent
Total GOR	110	m3/m/m3
Surface Equipment Correlation	Beggs and Brill	
Vertical Lift Correlation	Petroleum Experts 3 1.28 1.00	
Solution Node	Bottom Node	
Rate Method	Automatic - Linear	
Left-Hand Intersection	Disallow	

Slika 8. Ulazni podaci za analizu osjetljivosti (Korenjak 2008)
 Figure 8 Input parameters for sensitivity analysis (Korenjak 2008)

Kao što se vidi na **slici 9.**, za varijablu 3 odabran je udio vode u proizvodnji. Kako je već sada udio vrlo visok i iznosi preko 80%, za analizu su uzete samo dvije vrijednosti:

- $f_{w0} = 90\%$
- $f_{w1} = 95\%$



Slika 9. Odabir varijabli za analizu osjetljivosti (Korenjak 2008)
Figure 9. Selected variables for sensitivity analysis (Korenjak 2008)

Nakon što su unesene sve vrijednosti varijabli koje se prognoziraju, za svaku pojedinu kombinaciju dobiveni su rezultati presjecišta VLP i IPR krivulja koji su prikazani na sljedećem dijagramu (**slika 10**) i označeni sa „x“. Na desnoj strani slike ponovo su istaknute sve vrijednosti svih varijabli, a s obzirom da su odabrane ukupno 3 vrijednosti prve varijable, 3 vrijednosti druge varijable i 2 vrijednosti treće varijable, to ukupno daje 18 mogućih kombinacija a sukladno tome i 18 presjecišta.

Prva kombinacija varijabli (A) odnosi se na vrijednosti označene indeksima 0. Rješenje sustava za presjecište A je:

- Protok kapljevine: $q_k = 8,6 \text{ m}^3/\text{d}$
- Dinamički tlak na dnu: $p_{wf} = 16,51 \text{ bar}$

U svrhu prikaza cijelog tijeka proračuna koji se obavlja u analizi osjetljivosti za svih 18 rješenja, ovdje su izdvojeni opisi za kombinacije varijabli A, B i C (**slika 10**).

Analizom rezultata za presjecište A, može se zaključiti da uz isti protok utisnutog plina od $2\,530 \text{ m}^3/\text{d}$, te uz pad ležišnog tlaka na 20 bara i uz povećanje udjela vode na 90% dolazi do značajnog smanjenja protoka sa sadašnjih $51,6 \text{ m}^3/\text{d}$ na $8,6 \text{ m}^3/\text{d}$. U tom slučaju proizvodnja nafte pala bi na približno $1 \text{ m}^3/\text{d}$, što je 6 puta manje od sadašnjih uvjeta ($q_o = 6,3 \text{ m}^3/\text{d}$), ali dinamički tlak na dnu je oko 16 bara, pa se može prognozirati da bušotina i pri ovim uvjetima može proizvoditi.

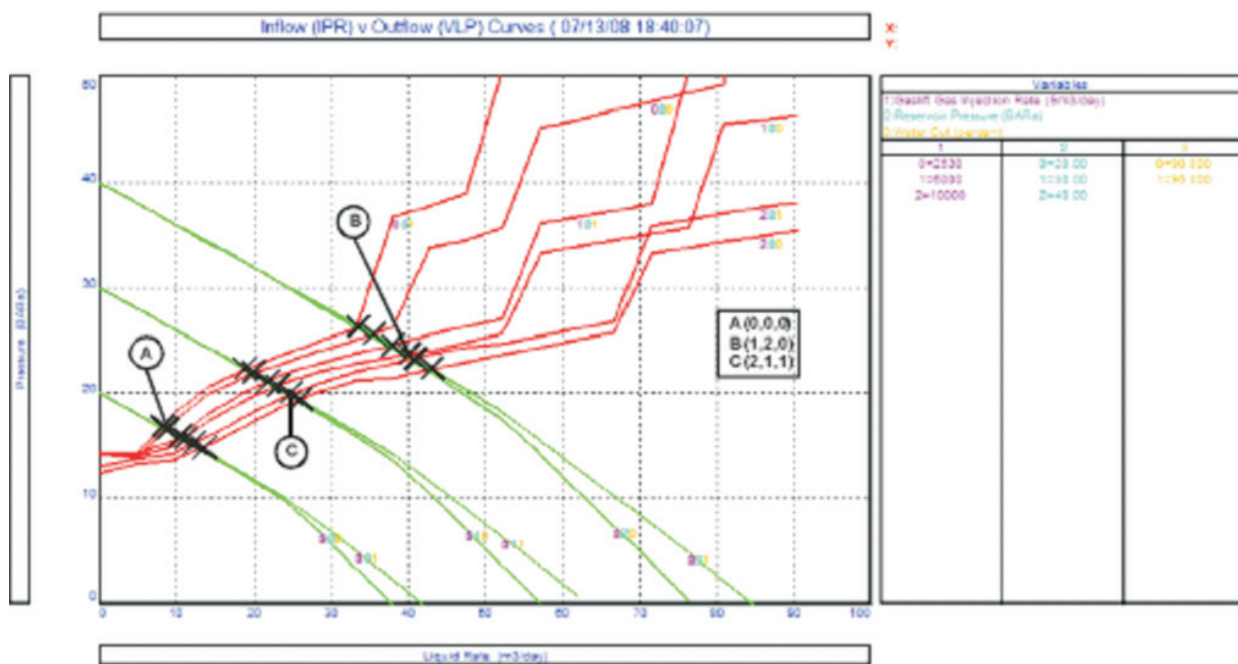
Presjecišta B i C odabrana su za analizu najvjerojatnijeg tijeka proizvodnje u budućnosti, prvenstveno zbog praćenja pada ležišnog tlaka i povećanja udjela vode, pri čemu će biti potrebno povećavati količinu utisnutog plina.

Rješenja navedenih slučajeva su:

- Presjecište B: $q_k = 38,7 \text{ m}^3/\text{d}$
 $p_{wf} = 23,93 \text{ bar}$
- Presjecište C: $q_k = 25,6 \text{ m}^3/\text{d}$
 $p_{wf} = 19,56 \text{ bar}$

Može se pretpostaviti da će ležišni tlak padati sa sadašnjih 50 bara na 40 bara (B), zatim na 30 bara (C), a da će se udio vode povećavati na 90% (B), pa na 95% (C). Sukladno tome, protok utisnutog plina trebati će povećavati na $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (B), a zatim na $10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (C).

Analizom rješenja može se zaključiti da bi pri smanjenju ležišnog tlaka na 40 bara (B) protok pao s 50 na $38 \text{ m}^3/\text{d}$, dok bi se dinamički tlak na dnu spustio za 4 bara, odnosno iznosio bi 24 bara. Daljnjim smanjenjem ležišnog tlaka na 30 bara protok bi bio dva puta manji od sadašnje vrijednosti tj. oko $25 \text{ m}^3/\text{d}$, a dinamički tlak bi nastavio padati do 20 bara.



Slika 10. Radne točke sustava (Korenjak 2008)
 Figure 10 IPR & VLP curves (Korenjak 2008)

Zaključak

Najvažniji rezultat modeliranja su radne točke sustava, prikazane kao presjecišta VLP i IPR krivulja koje se precizno poklapaju s mjerenim podacima, kao što je potvrđeno u izvedenom modelu za bušotinu Ša-136. Točnost postavljenog modela je nužan uvjet za analizu sadašnjih i budućih proračuna proizvodnog sustava čime je postignut glavni cilj modeliranja. U slučaju da su dobiveni rezultati pokazivali veća odstupanja, prognozirani proizvodni bušotina ne bi bila pouzdana. IPR krivulja bušotine Ša-136 pokazuje da je sadašnji indeks proizvodnosti 2,38 m³/d/bar, s proizvodnjom kapljevine od oko 50 m³/d i dinamičkim tlakom na dnu od 28 bara.

Doprinos modela očituje se i u prognozi buduće proizvodnosti, pri čemu je u analizi osjetljivosti prikazano nekoliko mogućnosti. Glavni zaključak je da bi pri smanjenju ležišnog tlaka na dnu i do 20 bara bušotina i dalje proizvodila, ali sa znatno smanjenim protokom, pri čemu bi tlak ušća iznosio 4 bara. U navedenoj procjeni nije još uzet u obzir utjecaj oštećenja pribušotinske zone, odnosno skin faktor, kojeg se u opširnijoj analizi osjetljivosti može uvrstiti kao 4. varijablu.

Literatura

- Bradley, H. B. et al. (1987): Petroleum Engineering Handbook. Society of Petroleum Engineers, 59 chapters, Richardson, TX.
- Čikeš, M. (1995): Mogućnost povećanja pridobivih zaliha ugljikovodika primjenom postupka hidrauličkog frakturiranja. Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 196 pp, Zagreb.
- Economides, M. J., Nolte, K.G. (2000): Reservoir Stimulation. Schlumberger, 20 chapters, Chichester, England.
- INA-Industrija nafte d.d. (2002): Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Šandrovac. INA-sektor za razadu, Zagreb.
- Komlen, N., Martan, Z. (2008): Gas Lift System at Oilfield Šandrovac. PESS, June 02-06, Dubrovnik.
- Matanović, D. (1999): Cijevne alatke pri opremanju i održavanju bušotina. RGN fakultet, Zagreb.
- Petroleum Experts LTD. (2007): Prosper User Manual. (Version 10.3, License 2681). IPM 6.3, Edinburgh, Scotland. Sečen, J. (1977): Pridobivanje nafte eruptivnim putem. RGN fakultet, 167 pp, Zagreb.
- Takacs, G. (2005): Gas Lift Manual. PennWell Books, Tulsa, USA.
- Zelić, M. (1986): Priručnik za plinski lift. INA-Naftaplin, 160 pp, Zagreb.
- Zelić, M., Čikeš, M. (2006): Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama. 329 pp, INA-Naftaplin, Zagreb.

