

# Primjena Nodal analize na odabranoj proizvodnoj bušotini

---

**Sabljak, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:169:248548>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**PRIMJENA NODAL ANALIZE NA ODABRANOJ PROIZVODNOJ  
BUŠOTINI**

Završni rad

Filip Sabljak

N 4320

Zagreb, 2021.

PRIMJENA NODAL ANALIZE NA ODABRANOJ PROIZVODNOJ BUŠOTINI

FILIP SABLJAK

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

**Sažetak**

Određivanje radne točke (kapaciteta rada) proizvodne bušotine jedna je od bitnijih stavki kod ocjenjivanja efikasnosti crpljenja ležišta odnosno rentabilnosti rada bušotine. U ovom radu opisan je postupak određivanja proizvodnog kapaciteta na odabranoj bušotini pomoću tzv. NODAL™ analize. Objasnjeno je sam koncept analize, kako se provodi, te utjecaj raznih proizvodnih parametara na rezultat. Također, prikazan je računski primjer primjene NODAL™ analize na jednoj plinskoj bušotini.

Ključne riječi: NODAL™ analiza, pad tlaka u bušotini, proizvodni kapacitet, IPR krivulja, VLP krivulja

Završni rad sadrži: 19 stranica, 1 tablicu, 13 slika i 5 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

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

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

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

Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 17.9.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA .....	I
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....	II
POPIS KORIŠTENIH KRATICA.....	IV
1. UVOD .....	1
2. KONCEPT ANALIZE PROIZVODNOG SUSTAVA.....	2
3. PRIMJENA ANALIZE PROIZVODNOG SUSTAVA .....	6
4. PRIMJER PRIMJENE NODAL ANALIZE NA PLINSKOJ BUŠOTINI.....	13
5. ZAKLJUČAK.....	18
6. LITERATURA .....	19

## **POPIS SLIKA**

<b>Slika 2-1.</b> Smještaj najčešće korištenih čvorišta proizvodnog sustava .....	2
<b>Slika 2-2.</b> Određivanje protočnog kapaciteta sustava .....	4
<b>Slika 2-3.</b> Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga .....	5
<b>Slika 2-4.</b> Učinak promjene unutarnjeg promjera cjevovoda.....	5
<b>Slika 3-1.</b> Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga .....	7
<b>Slika 3-2.</b> Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama istoka .....	8
<b>Slika 3-3.</b> Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama utoka .....	8
<b>Slika 3-4.</b> Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga .....	9
<b>Slika 3-5.</b> Određivanje optimalnog promjera tubinga.....	9
<b>Slika 3-6.</b> Utjecaj broja perforacija na utok u čvorište.....	10
<b>Slika 3-7.</b> Utjecaj ukupnog broja perforacija na protok fluida.....	11
<b>Slika 4-1.</b> Indikatorske krivulje (krivulje utoka).....	14
<b>Slika 4-2.</b> Krivulje utoka u čvorište i istoka iz čvorišta .....	17

## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 4-1.</b> Prikaz izračunatih padova tlaka i tlakova u čvorištu .....	17
--	----

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$C_d$		Bezdimenzionalni koeficijent istjecanja fluida
$D$	$s/m^3$	Koeficijent turbulentnog protoka
$D_{dp}$	$s/m^3$	Koeficijent turbulentnog protoka u zbijenoj zoni
$d$	m	Promjer sapnice
$d_t$	m	Promjer tubinga
$f$		Faktor trenja
$g$	$m/s^2$	Akceleracija sile teže
$H_p$	m	Dubina sredine perforacija
$J$	$(m^3/dan)/bar$	Indeks proizvodnosti naftne bušotine
$\kappa$	-	Eksponent adijabate za plinovite ugljikovodike
$M_a$	kg/mol	Molarna masa zraka
$\bar{p}$	bar	Srednji ležišni tlak
$p_{\text{čvorišta}}$	bar	Pad tlaka u čvorištu
$p_i$	bar	Početni ležišni tlak
$p_{sc}$	bar	Tlak u standardnim uvjetima
$p_{sep}$	bar	Tlak separatora
$p_{wf}$	bar	Dinamički tlak na dnu bušotine
$p_{wh}$	bar	Dinamički tlak na ušću bušotine
$p_1$	bar	Tlak ispred sapnice
$p_2$	bar	Tlak na ulazu u površinski cjevovod
$\Delta p_{\text{cjevovoda}}$	bar	Pad tlaka u cjevovodu
$\Delta p_{\text{ležišta}}$	bar	Pad tlaka u ležištu
$\Delta p_{\text{nizv}}$	bar	Pad tlaka u nizvodnim komponentama
$\Delta p_{\text{perforacija}}$	bar	Pad tlaka na perforacijama
$\Delta p_{\text{sapnice}}$	bar	Pad tlaka na sapnici
$\Delta p_{\text{tubinga}}$	bar	Pad tlaka u tubingu
$\Delta p_{\text{uzv}}$	bar	Pad tlaka u uzvodnim komponentama
$\Delta p_{\Sigma_s}$	bar	Pad tlaka zbog sume skin faktora
$q$	$m^3/s$	Protok plina
$q_{\text{max}}$	$m^3/s$	Protok u frakturiranoj bušotini

$q_{\min}$	$m^3/s$	Protok u nefrakturiranoj bušotini
R	$J/(K \times mol)$	Opća plinska konstanta
s	-	Skin faktor prouzročen promjenom propusnosti u pribušotinskoj zoni
$s_{dp}$	-	Skin faktor prouzročen smanjenjem propusnosti u zbijenoj zoni oko perforacija
$s_p$	-	Skin faktor prouzročen geometrijom perforacija
$T_{sc}$	K	Standardna temperatura
$\bar{T}$	K	Srednja temperatura
$T_1$	K	Temperatura ispred sapnice
t	s	Vrijeme
$\gamma_g$	-	Relativna gustoća plina
Z	-	Faktor kompresibilnosti

## POPIS KORIŠTENIH SKRAĆENICA

IPR	Indikatorska krivulja (engl. <i>inflow performance relationship</i> )
VLP	Krivulja vertikalnog podizanja (engl. <i>vertical lift performance</i> )



## 1. UVOD

Svaka proizvodna bušotina je opremljena na način da se nafta i plin pridobije iz ležišta do površine i dalje do sabirno-transportnog sustava uz što manji gubitak tlaka. Protjecanje fluida zahtijeva određenu energiju kako bi se omogućilo njihovo podizanje te savladavanje svih otpora protjecanju zbog trenja, akceleracije i visine dizanja. Fluidi protječu kroz ležište, proizvodni niz ugrađen u bušotini te na kraju priključnim cjevovodom do mjerne ili sabirne stanice u separator kako bi se razdvojile faze priteklog fluida (nafta, voda, plin). Proizvodni sustav sadržava brojne komponente u kojima dolazi do pada tlaka odnosno gubitka energije.

Pad tlaka u cjelokupnom sustavu uvijek će biti jednak razlici tlakova na početku i na kraju sustava. Ukupni pad tlaka bit će zbroj padova tlaka u svim komponentama sustava. Vrlo je bitan odabir samih komponenata u sustavu, kao i njihovo dimenzioniranje, jer zbog međusobne interakcije komponenata promjena pada tlaka u jednoj može dovesti do promjene ponašanja pada tlaka u svim drugim komponentama (Čikeš, 2015).

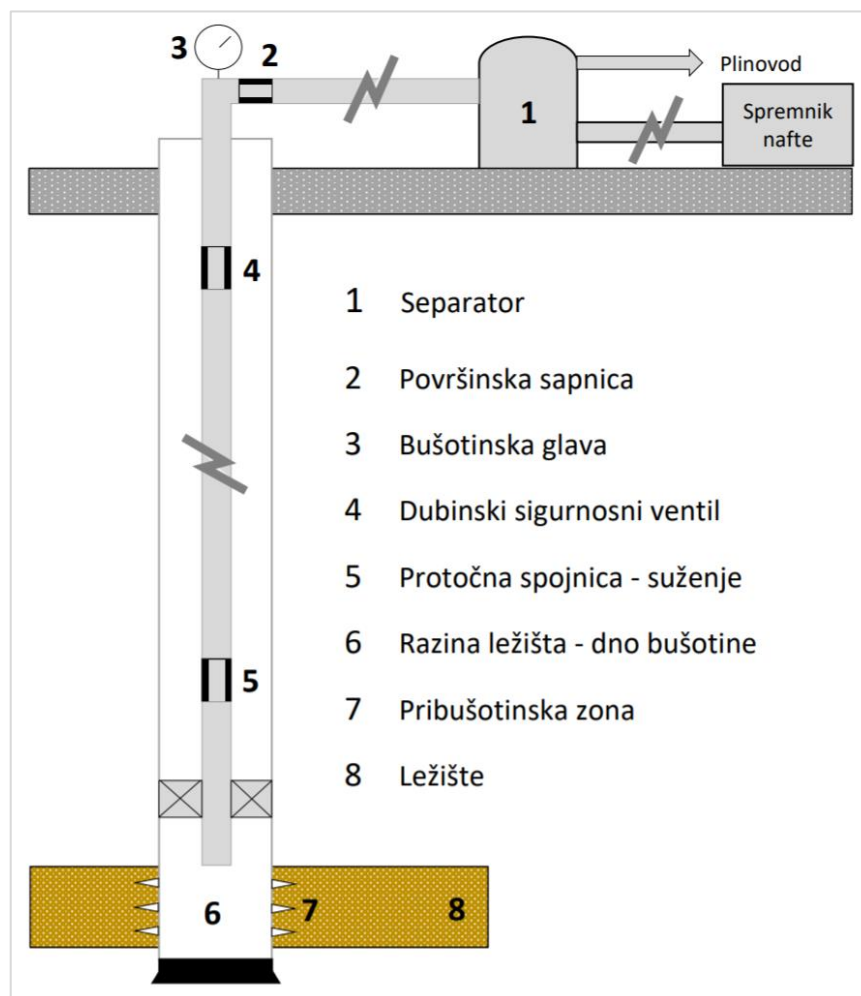
Finalni dizajn sustava se promatra i analizira kao cjelina, jer su količina fluida koja utječe u bušotinu i protječe kroz nju i pad tlaka u samom sustavu cijevi međusobno zavisni.

Budući da karakteristika samo jedne komponente može značajno ograničavati proizvodnju, bitno je poznavati utjecaj svake zasebne komponente na djelotvornost sustava. Tada je moguće optimizirati rad sustava. U brojnim slučajevima u prošlosti može se vidjeti kako su se velike količine novaca trošile za stimulaciju ležišta, a zapravo je proizvodni sustav bio ograničen premalim ili prevelikim promjerom tubinga. Ovaj drugi slučaj je čest kod bušotina kod kojih se očekivala velika proizvodnja. No, kasnije se pokazalo da, osim što je bespotrebni trošak ugrađene opreme, preveliki promjer tubinga ustvari smanjuje brzinu protjecanja fluida te dovodi do preranog korištenja umjetnih tj. mehaničkih metoda podizanja (Dale Beggs, 2003).

U završnom radu bit će opisana metoda analize bušotine, odnosno proizvodnog sustava, pomoću koje se može odrediti kapacitet proizvodnje za bilo koju kombinaciju komponenti te utjecaj promjene neke komponente na kompletnu efikasnost sustava.

## 2. KONCEPT ANALIZE PROIZVODNOG SUSTAVA

NODAL™ analiza koja je u primjeni još od 60-ih godina prošlog stoljeća primjenjuje se za analizu performansi proizvodnih sustava koji se sastoje od međusobno zavisnih komponenata. Ime je dobila po pristupu u kojem se odabire razdjelna točka odnosno čvorište (engl. *node*) koje proizvodni sustav dijeli na dva dijela; komponente koje su postavljene uzvodno, odnosno od čvorišta do ležišta i čine sekciju utoka (engl. *inflow*), te komponente koje se nalaze nizvodno, odnosno od čvorišta do separatora i čine sekciju istoka (engl. *outflow*). Obično su čvorišta postavljena na određenim mjestima prikazanim na slici 2-1. i označena su brojevima 1-8 (Čikeš, 2015).



Slika 2-1. Smještaj najčešće korištenih čvorišta proizvodnog sustava (Čikeš, 2015)

Određena su dva uvjeta koja se moraju zadovoljiti kako bi se mogao odrediti protok kroz proizvodni sustav:

1. Utok u čvorište jednak je istoku iz istog;
2. Pri određenom protoku u čvorištu postoji samo jedan tlak.

Srednji ležišni tlak  $\bar{p}$  i izlazni tlak sustava su određeni i ne ovise o protoku. Izlazni tlak je obično separatorski tlak ( $p_{sep}$ ) ili ako se kontrola bušotine uspostavlja sapnicom onda je izlazni tlak jednak tlaku na ušću bušotine ( $p_{wh}$ ). Nakon što se odabere čvorište računa se tlak u oba smjera počevši od dva poznata tlaka:

- Utok u čvorište:

$$\bar{p} - \Delta p_{uzv} = p_{\text{čvorišta}} \quad (2-1)$$

- Istok iz čvorišta:

$$p_{sep} + \Delta p_{nizv} = p_{\text{čvorišta}} \quad (2-2)$$

Gdje su:

$\bar{p}$  – srednji ležišni tlak, bar;

$\Delta p_{uzv}$  – pad tlaka u uzvodnim komponentama, bar;

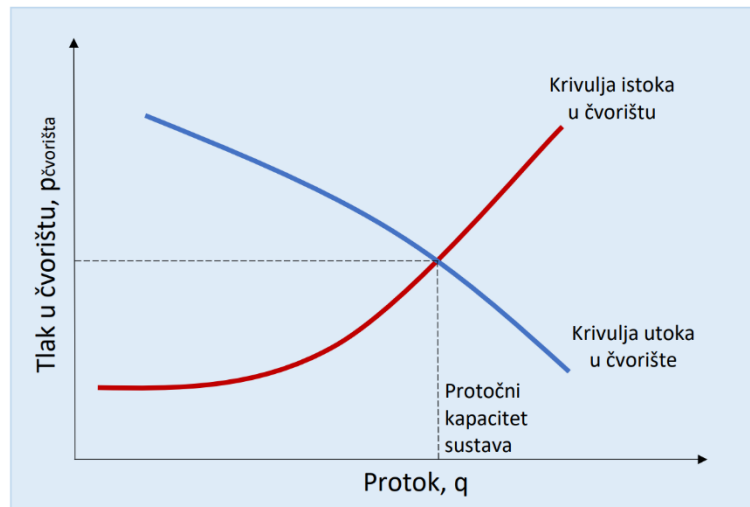
$p_{\text{čvorišta}}$  – tlak u čvorištu, bar;

$p_{sep}$  – tlak separatora, bar;

$\Delta p_{nizv}$  – pad tlaka u nizvodnim komponentama, bar.

Pad tlaka ( $\Delta p$ ) u svim komponentama ovisi o protoku ( $q$ ) pa će dijagram tlaka čvorišta ( $p_{\text{čvorišta}}$ ), kao funkcija protoka, dati dvije krivulje: krivulju istoka iz čvorišta te krivulju utoka u čvorište, a njihovo sjecište udovoljava prethodno navedenim uvjetima (slika 2-2). Ukoliko se karakteristike komponente mijenjaju, utjecaj te promjene možemo analizirati ponovnim računanjem tlaka čvorišta u ovisnosti o protoku uzimajući u obzir nove performanse komponente. Ukoliko su se promijenile karakteristike na uzvodnoj komponenti, krivulja istoka se neće mijenjati, međutim ako se promijeni bilo koja krivulja doći će do promjene sjecišta, a tako i novog protočnog kapaciteta i tlaka čvorišta. Također,

ako se promijeni jedan od fiksnih tlakova (zbog crpljenja ležišta ili promjene separatorskih uvjeta), doći će i do promjene krivulja ([https://petrowiki.spe.org/Nodal\\_analysis](https://petrowiki.spe.org/Nodal_analysis)).



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

Ako uzmemo jednostavan proizvodni sustav koji se sastoji samo od ležišta tubinga i površinskog cjevovoda i odaberemo bušotinsku glavu kao čvorište, tada će tlak u čvorištu ( $p_{wh}$ ) biti zadan kao:

- Utok u čvorište:

$$p_{wh} = \bar{p} - \Delta p_{ležišta} - \Delta p_{tubinga} \quad (2-3)$$

- Istok iz čvorišta:

$$p_{wh} = p_{sep} + \Delta p_{cjevovoda} \quad (2-4)$$

Gdje su:

$p_{wh}$  – dinamički tlak na ušću bušotine, bar;

$\Delta p_{ležišta}$  – pad tlaka u ležištu, bar;

$\Delta p_{tubinga}$  – pad tlaka u tubingu, bar;

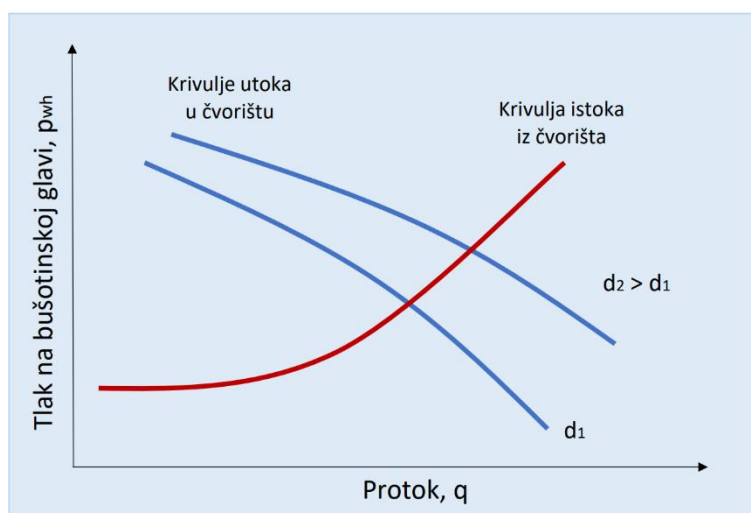
$\Delta p_{cjevovoda}$  – pad tlaka u cjevovodu, bar.

Povećanjem promjera tubinga pad tlaka u tubingu se smanjuje pa se time povećava tlak na ušću bušotine (bušotinskoj glavi) za isti protok. Krivulja utoka se tada pomiče nagore, a

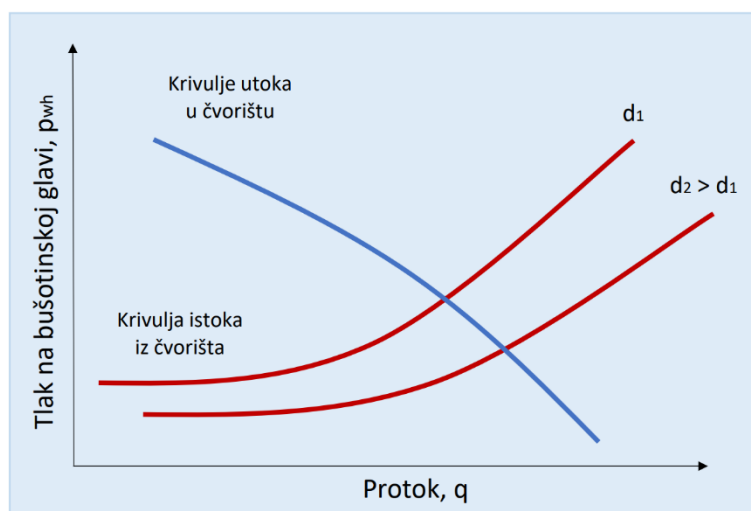
sjecište s krivuljom istoka pomiče se nadesno pa očitavamo veći protočni kapacitet te viši dinamički tlak na ušću bušotine.

Povećanjem promjera cjevovoda smanjit će se pad tlaka u samom cjevovodu te će se krivulja istoka pomaknuti nadolje, a samim time i sjecište s krivuljom utoka nadesno. To će rezultirati većim protočnim kapacitetom sustava te nižim tlakom na ušću bušotine.

Utjecaj promjene unutarnjeg promjera tubinga ( $d$ ) i promjene unutarnjeg promjera cjevovoda na protočni kapacitet sustava za ovaj slučaj prikazani su na slikama 2-3. i 2-4.



**Slika 2-3.** Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga (Čikeš, 2015)



**Slika 2-4.** Učinak promjene unutarnjeg promjera cjevovoda (Čikeš, 2015)

### 3. PRIMJENA ANALIZE PROIZVODNOG SUSTAVA

Postupak koji se najčešće koristi jest onaj u kojem se bira čvorište između ležišta i bušotine (na slici 2-1 označeno brojem 6), te tako dijelimo sustav na komponentu u kojoj prevladava ležište i komponentu u kojoj prevladava cijevni sustav. U tom slučaju, za jednostavan proizvodni sustav, jednadžbe za utok i istok su jednake:

- Utok u čvorište:

$$p_{wf} = \bar{p} - \Delta p_{ležišta} \quad (3-1)$$

- Istok iz čvorišta:

$$p_{wf} = p_{sep} + \Delta p_{cjevovoda} + \Delta p_{tubinga} \quad (3-2)$$

Gdje je:

$p_{wf}$  – dinamički tlak na dnu bušotine, bar.

Ako se odlučimo ovako postaviti čvorište, rezultirajuća krivulja utoka će se poklapati s indikatorskom, odnosno IPR krivuljom (engl. *inflow performance relationship*). To je krivulja koja definira odnos protoka i dinamičkog tlaka na dnu bušotine u određenom vremenu. IPR krivulja predstavlja grafički prikaz indeksa proizvodnosti koji se računa prema formuli:

$$J = \frac{q}{\bar{p}(t) - p_{wf}(t)} \quad (3-3)$$

U kojoj su:

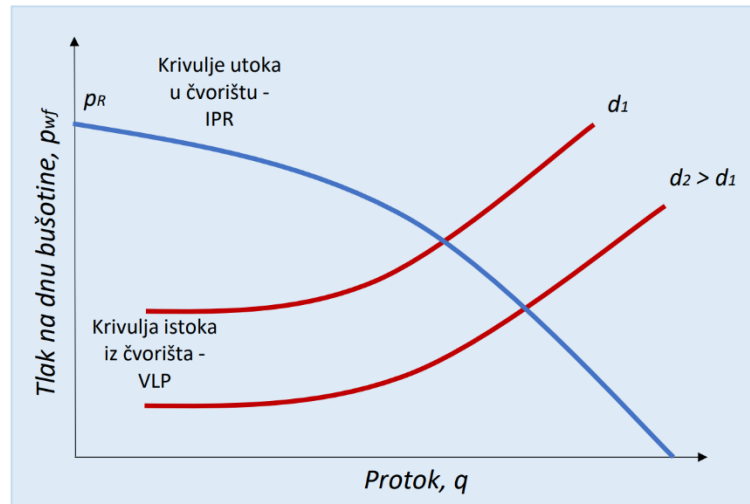
J – indeks proizvodnosti bušotine, (m<sup>3</sup>/dan)/bar;

q – protok fluida, m<sup>3</sup>/dan.

Ako umjesto separatorskog tlaka kao fiksni tlak uzmemo tlak na bušotinskoj glavi ( $p_{wh}$ ) krivulja istoka će se poklapati sa krivuljom vertikalnog podizanja odnosno VLP krivuljom (engl. *vertical lift performance*), (Brkić, 2019). Tada jednadžba za istok iz čvorišta glasi:

$$p_{wf} = p_{wh} + \Delta p_{tubinga} \quad (3-4)$$

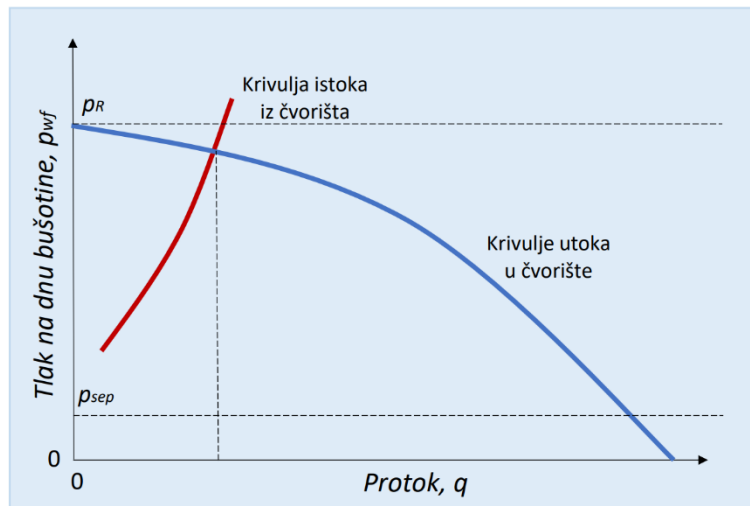
Tubing je jedna od najbitnijih komponenata u proizvodnom sustavu jer se u njemu odvija gotovo 80% ukupnog pada tlaka u proizvodnom sustavu, a ovakav postupak nam omogućava upravo izoliranje njegovog učinka (Beggs, 2003). Kako se u tom slučaju mijenja proizvodni kapacitet ovisno o promjeni unutarnjeg promjera tubinga prikazano je na slici 3-1.



**Slika 3-1.** Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga (Čikeš, 2015)

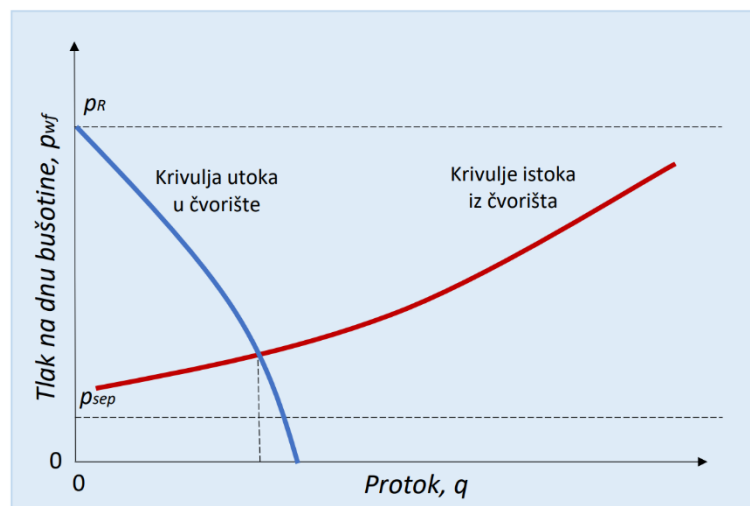
Cilj nam je optimizirati proizvodni sustav i ostvariti maksimalnu proizvodnju pri minimalnim mogućim troškovima. To ćemo ostvariti idealnim odabirom karakteristika svake od komponenata proizvodnog sustava.

Iako je ukupni pad tlaka u proizvodnom sustavu fiksiran u nekom vremenu, bitan je raspored padova tlaka kroz taj sustav jer o njemu ovisi sam proizvodni kapacitet. Ako na jednoj komponenti pad tlaka bude prevelik, postoji mogućnost da neće preostati dovoljno tlaka za ostale komponente. Proizvodni kapacitet bušotine može biti ograničen karakteristikama istoka i karakteristikama utoka. U prvom slučaju može doći do prevelikog pada tlaka zbog premalog promjera tubinga (slika 3-2).



**Slika 3-2.** Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama istoka (Čikeš, 2015)

Poboljšanje performansa ležišta stimulacijama tada bi bio samo gubitak novca i truda dok god se ne bi ugradio tubing dovoljnog promjera. Do drugog slučaja može doći ako imamo slabu propusnost u pribušotinskoj zoni ili pak neadekvatno obavljeno perforiranje pa na tim mjestima dolazi do prevelikog pada tlaka (slika 3-3). Tada bez obzira na performanse komponenta koje se nalaze u nizvodnom dijelu (istok) proizvodni kapacitet bit će smanjen dok god se ne poboljšaju performanse utoka.

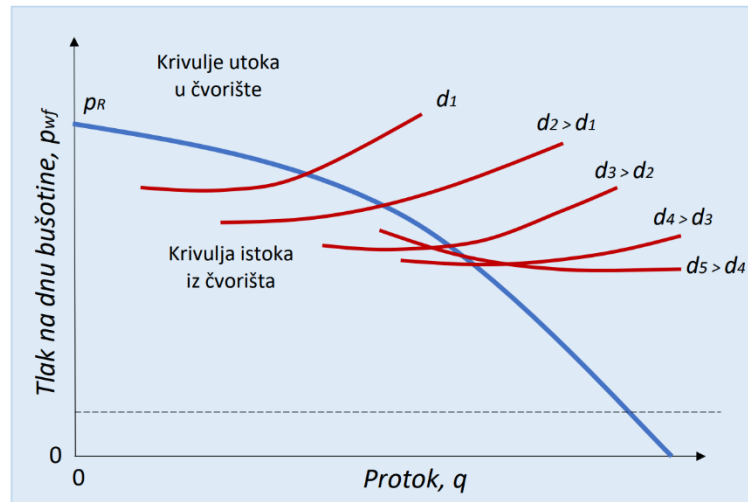


**Slika 3-3.** Proizvodni kapacitet sustava ograničen karakteristikama utoka (Čikeš, 2015)

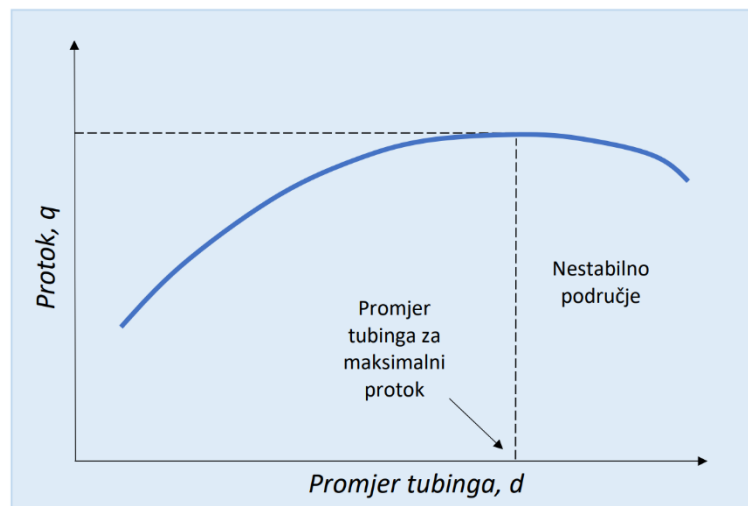
Povećanjem unutarnjeg promjera tubinga smanjuje se tlak na dnu bušotine i time povećava proizvodnja same bušotine, odnosno protok fluida, ali do neke granice. Prelaskom te granice daljnje povećanje unutarnjeg promjera tubinga rezultirat će višim tlakom na dnu bušotine, protok postaje nestabilan ili isprekidan. Brzina gibanja fluida u prevelikom tubingu može biti nedovoljna za podizanje fluida na površinu te dolazi do zaostajanja kapljevine ili gušenja



same bušotine (slika 3-4). Utjecaj veličine promjera tubinga na pad tlaka u samom tubingu kod jednofaznog protjecanja plina uglavnom je diktiran padom tlaka zbog trenja (Heriot Watt, 1999) Moguće je odrediti optimalan promjer tubinga, tj. onaj koji omogućava maksimalni protok fluida, na način da se sa slike 8 očitaju sjecišta krivulje utoka s krivuljama istoka za različite promjere tubinga (slika 3-5).



**Slika 3-4.** Učinak promjene unutarnjeg promjera tubinga (Čikeš, 2015)



**Slika 3-5.** Određivanje optimalnog promjera tubinga (Čikeš, 2015)

U slučaju opisanom u ovom poglavlju, kada se kao čvorišni tlak odabere dinamički tlak na dnu bušotine ( $p_{wf}$ ), moguće je utok u čvorište podijeliti na dvije komponente: pad tlaka kroz ležište i pad tlaka kroz perforacije. Na taj način moguće je pomoću čvorišne analize odrediti utjecaj broja perforacija,  $N$ , na proizvodni kapacitet sustava. Tada jednadžbe za utok i istok glase:

- Utok u čvorište:

$$p_{wf} = \bar{p} - \Delta p_{ležišta} - \Delta p_{perforacija} \quad (3-5)$$

- Istok iz čvorišta:

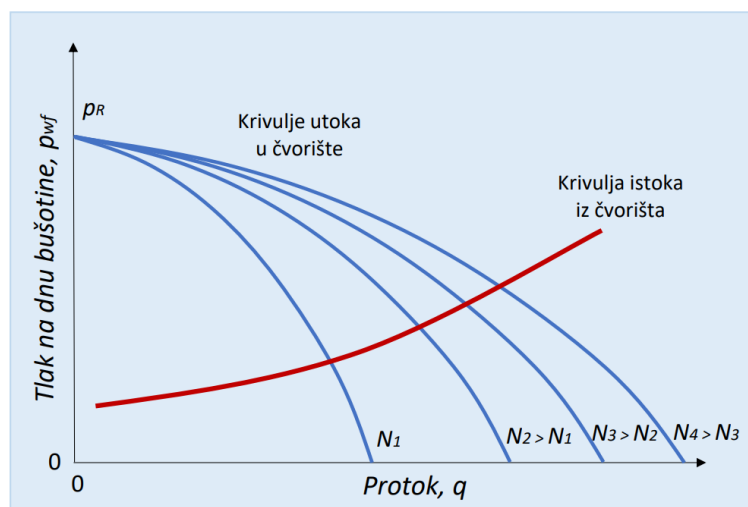
$$p_{wf} = p_{sep} + \Delta p_{cjevovoda} + \Delta p_{tubinga} \quad (3-6)$$

Gdje je:

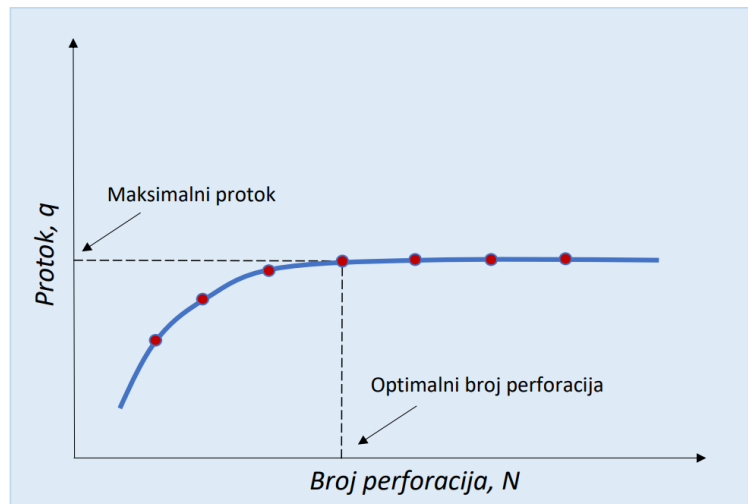
$\Delta p_{perforacija}$  – pad tlaka na perforacijama, bar.

Kako je pad tlaka u perforacijama zavisan o ukupnom broju perforacija ( $N$ ) i o protoku ( $q$ ), za svaki broj perforacija krivulja utoka izgleda drukčije kao što je prikazano na slici 3-6.

S povećanjem broja perforacija moguće je doći do točke gdje je pad tlaka u perforacijama zanemariv, što daljnje povećanje broja perforacija čini beskorisnim. Optimalan broj perforacija možemo odrediti pomoću dijagrama protoka u funkciji broja perforacija (slika 3-7) koji je konstruiran temeljem očitavanja sjecišta krivulja utoka za različite brojeve perforacija s krivuljom istoka.



**Slika 3-6.** Utjecaj broja perforacija na utok u čvorište (Čikeš, 2015)



**Slika 3-7.** Utjecaj ukupnog broja perforacija na protok fluida (Čikeš, 2015)

Ovim načinom mogu se analizirati sve komponente bilo kojeg proizvodnog sustava.

NODAL™ analiza se može primijeniti za:

1. izbor proizvodnog tubinga,
2. izbor površinskog cjevovoda,
3. dizajn pješčanog zasipa,
4. dimenzioniranje površinske sapnice
5. dimenzioniranje dubinskog sigurnosnog ventila
6. analizu postojećeg sustava u svrhu otkrivanja abnormalnih ograničenja protoka
7. dizajn metoda umjetnog podizanja fluida
8. vrjednovanje stimulacijskih zahvata u bušotinama
9. analizu utjecaja načina perforiranja bušotine
10. predviđanje utjecaja crpljenja ležišta na proizvodni kapacitet bušotine (Čikeš, 2015)

Da bi se moglo koristiti ovakvu vrstu analize, potrebno je moći izračunati pad tlaka na svim komponentama proizvodnog sustava. Ovi padovi tlaka, osim o protoku, ovise i o dimenzijama i o drugim karakteristikama komponenti. Optimizacija proizvodnog sustava primjenom NODAL™ analize može se svesti na nekoliko koraka:

1. odrediti koje je komponente moguće mijenjati što je u nekim slučajevima određeno nekim prethodnim odlukama;
2. odabrati jednu komponentu koju se želi optimizirati;
3. odabrati čvorište koje će najbolje pokazati utjecaj promjene u odabranoj komponenti;
4. definirati izraze za utok i istok odabranog čvorišta;
5. prikupiti podatke koji su potrebni za računanje pada tlaka u ovisnosti o protoku za svaku komponentu;

6. odrediti utjecaj promijenjenih performansi odabrane komponente ucrtavanjem krivulja utoka i istoka i očitavanjem njihovog sjecišta;
7. ponoviti postupak za svaku komponentu koju se želi optimizirati (Čikeš, 2015).

#### 4. PRIMJER PRIMJENE NODAL ANALIZE NA PLINSKOJ BUŠOTINI

U ovom poglavlju analiziran je konkretan primjer jedne plinske bušotine naveden u knjizi Proizvodno inženjerstvo nafte i plina (Čikeš, 2015).

Cijeli proizvodni sustav analizira se tako da se za čvorište odabire dno bušotine (točka odvajanja ležišta i opreme u bušotini), odnosno dubina sredine perforacija,  $H_p = 2800 \text{ m}$ , a umjesto separatorskog tlaka, kao fiksni tlak se odabere tlak iza sapnice, odnosno na ulazu u površinski cjevovod,  $p_2 = 30 \text{ bar}$ . Pritom su zadani ili prethodno izračunati podaci:

- promjer sapnice:  $d = 6,8 \text{ mm}$
- početni ležišni tlak:  $p_i = 300 \text{ bar}$
- standardni tlak:  $p_{sc} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}$
- standardna temperatura:  $T_{sc} = 273,15 \text{ K}$
- rubni slučajevi protoka:  $q_{min} = 40\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$  (nefrakturirana bušotina) i  $q_{max} = 100\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$  (frakturirana bušotina)
- kritični omjer tlakova:  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0,555$
- vrijednost eksponenta adijabate za plinovite ugljikovodike:  $\kappa = 1,25$
- bezdimenzionalni koeficijent istjecanja fluida:  $C_d = 0,82$
- opća plinska konstanta:  $R = 8,3145 \text{ J}/(\text{K} \times \text{mol})$
- relativna gustoća plina:  $\gamma_g = 0,7$
- molarna masa zraka:  $M_a = 28,964 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- Z faktor za slučaj nefrakturirane bušotine:  $Z = 0,9$
- Z faktor za slučaj frakturirane bušotine:  $Z = 0,868$
- temperatura ispred sapnice:  $T_1 = 323,15 \text{ K}$
- srednja temperatura:  $\bar{T} = 363,15 \text{ K}$
- faktor trenja:  $f = 0,0261$
- parametar s za nefrakturirane bušotine:  $s = 0,171$
- parametar s za frakturirane bušotine:  $s = 0,177$
- promjer tubinga:  $d_t = 62 \text{ mm}$

## RJEŠENJE

Za zadani proizvodni sustav jednadžbe za utok i istok glase:

- Utok u čvorište:

$$p_{wf} = p_i - \Delta p_{ležišta} - \Delta p_{\Sigma s} \quad (4-1)$$

- Istok iz čvorišta:

$$p_{wf} = p_2 + \Delta p_{sapnice} + \Delta p_{tubinga} \quad (4-2)$$

Gdje su:

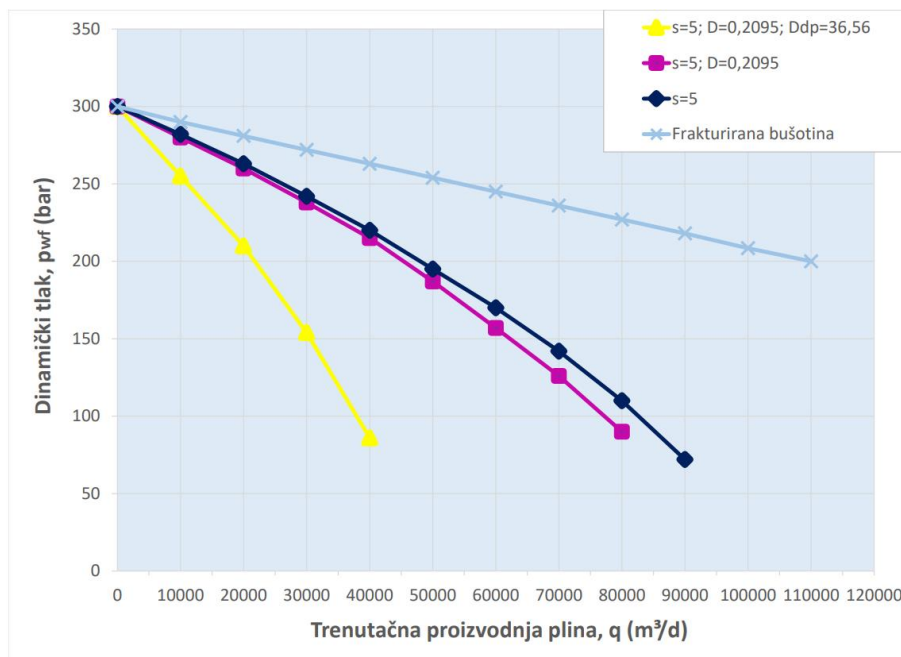
$p_i$  – početni ležišni tlak, bar;

$\Delta p_{\Sigma s}$  – pad tlaka zbog skina, bar;

$p_2$  – tlak na ulazu u površinski cjevovod, bar;

$\Delta p_{sapnice}$  – pad tlaka na sapnici, bar.

Prethodnim analizama i proračunima izračunati su indeksi proizvodnosti i kreirane indikatorske krivulje za četiri slučaja dodatnog pada tlaka koji su opisani u nastavku (slika 4-1.). Na temelju indikatorskih krivulja za pojedine slučajeve određen je tlak u čvorištu u funkciji protoka,  $p_{wf}$ , računat iz smjera utoka.



Slika 4-1. Indikatorske krivulje (krivulje utoka), (Čikeš, 2015)

U prvom je slučaju ukupni skin faktor  $s = 5$  (crna krivulja). U drugom slučaju, uz skin faktor  $s = 5$  postoji i utjecaj turbulentnog protoka s koeficijentom turbulentnog protoka  $D = 0,2095 \text{ s/m}^3$  (ljubičasta krivulja). U trećem slučaju (žuta krivulja), uz skin faktor  $s = 5$  i koeficijent turbulentnog protoka  $D = 0,2095 \text{ s/m}^3$ , uključen je i utjecaj perforacija sa skin faktorima  $s_p = 2,27$  i  $s_{dp} = 4,69$ , te koeficijentom turbulentnog protoka u zbijenoj zoni  $D_{dp} = 36,56 \text{ s/m}^3$ . Zadnji je slučaj frakturirane bušotine (plava krivulja).

Iz kritičnog omjera tlakova  $\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0,555$  vidljivo je da će za zadani  $p_2 = 30 \text{ bar}$  protok kroz sapnicu biti u kritičnom području sve dok je tlak ispred sapnice,  $p_1$ , veći od 54 bar, pa je u tim uvjetima primjenjiva jednadžba koja, riješena za tlak ispred sapnice, glasi:

$$p_1 = \frac{4q_{max}p_{sc}}{\pi d^2 C_d T_{sc} \sqrt{\frac{\kappa R}{\gamma_g M_a Z_1 T_1} \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (4-3)$$

Budući da tlak ispred sapnice nije poznat, Z faktor za jedan srednji slučaj protoka,  $q = 70\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$ , se mora pretpostaviti te naknadno korigirati.

Iz prethodne jednadžbe izračunat je tlak ispred sapnice za dva rubna slučaja, tj. za protoke plina  $q_{min} = 40\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$  i  $q_{max} = 100\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$ , a za srednji slučaj  $q = 70\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$  uzet je i srednji Z faktor,  $Z_1 = 0,884$ .

$$p_1 = \frac{4 \cdot \frac{100000}{86400} \cdot 1,01325 \times 10^5}{\pi \cdot 0,0068^2 \cdot 0,82 \cdot 273,15 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot 8,3145}{0,7 \cdot 28,964 \times 10^{-3} \cdot 0,868 \cdot 323,15} \cdot \left(\frac{2}{1,25 + 1}\right)^{\frac{1,25+1}{1,25-1}}}}$$

$$p_1 = 18119301,15 \text{ Pa} = 181,2 \text{ bar}$$

$$p_1 = \frac{4 \cdot \frac{40000}{86400} \cdot 1,01325 \times 10^5}{\pi \cdot 0,0068^2 \cdot 0,82 \cdot 273,15 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot 8,3145}{0,7 \cdot 28,964 \times 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 323,15} \cdot \left(\frac{2}{1,25 + 1}\right)^{\frac{1,25+1}{1,25-1}}}}$$

$$p_1 = 7380075,85 \text{ Pa} = 73,8 \text{ bar}$$

$$p_1 = \frac{4 \cdot \frac{70000}{86400} \cdot 1,01325 \times 10^5}{\pi \cdot 0,0068^2 \cdot 0,82 \cdot 273,15 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot 8,3145}{0,7 \cdot 28,964 \times 10^{-3} \cdot 0,884 \cdot 323,15} \cdot \left(\frac{2}{1,25 + 1}\right)^{\frac{1,25+1}{1,25-1}}}}$$

$$p_1 = 12799799,82 \text{ Pa} = 128,0 \text{ bar}$$

Dinamički tlak na dnu bušotine,  $p_{wf}$ , polazeći od dinamičkog tlaka na ušću,  $p_{wh}$ , računa se prema sljedećoj formuli:

$$p_{wf} = \sqrt{p_{wh}^2 e^s + \frac{8f}{gd^5} \left( \frac{qp_{sc} \bar{T} Z}{\pi T_{sc}} \right)^2 (e^s - 1)} \quad (4-4)$$

Obzirom na to da je tlak na dnu bušotine nepoznat, kao srednji tlak u bušotini, pri kojem se određuju svojstva plina, uzima se tlak na ušću,  $p_{wh}$ , koji je jednak tlaku ispred sapnice, tj.  $\bar{p} = p_{wh} = p_1$ . Uzevši to u obzir, prema gornjoj jednadžbi izračunat je tlak na dnu bušotine za protoke plina  $q_{min} = 40\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$ ,  $q = 70\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$ , i  $q_{max} = 100\,000 \text{ m}^3/\text{dan}$ .

$$p_{wf} = \sqrt{18119301,15^2 \cdot e^{0,177} + \frac{8 \cdot 0,0261}{9,81 \cdot (62 \times 10^{-3})^5} \cdot \left( \frac{\frac{100000}{86400} \cdot 101325 \cdot 363,15 \cdot 0,868}{\pi \cdot 273,15} \right)^2 \cdot (e^{0,177} - 1)}$$

$$p_{wf} = 208,5 \times 10^5 \text{ Pa} = 208,5 \text{ bar}$$

$$p_{wf} = \sqrt{7380075,85^2 \cdot e^{0,171} + \frac{8 \cdot 0,0261}{9,81 \cdot (62 \times 10^{-3})^5} \cdot \left( \frac{\frac{40000}{86400} \cdot 101325 \cdot 363,15 \cdot 0,9}{\pi \cdot 273,15} \right)^2 \cdot (e^{0,171} - 1)}$$

$$p_{wf} = 85,2 \times 10^5 \text{ Pa} = 85,2 \text{ bar}$$

$$p_{wf} = \sqrt{12799799,82^2 \cdot e^{0,171} + \frac{8 \cdot 0,0261}{9,81 \cdot (62 \times 10^{-3})^5} \cdot \left( \frac{\frac{70000}{86400} \cdot 101325 \cdot 363,15 \cdot 0,884}{\pi \cdot 273,15} \right)^2 \cdot (e^{0,171} - 1)}$$

$$p_{wf} = 140,7 \times 10^5 \text{ Pa} = 140,7 \text{ bar}$$

Rezultati, kao i rezultati tlakova ispred sapnica,  $p_1$ , za sva tri slučaja dani su u sljedećoj tablici:



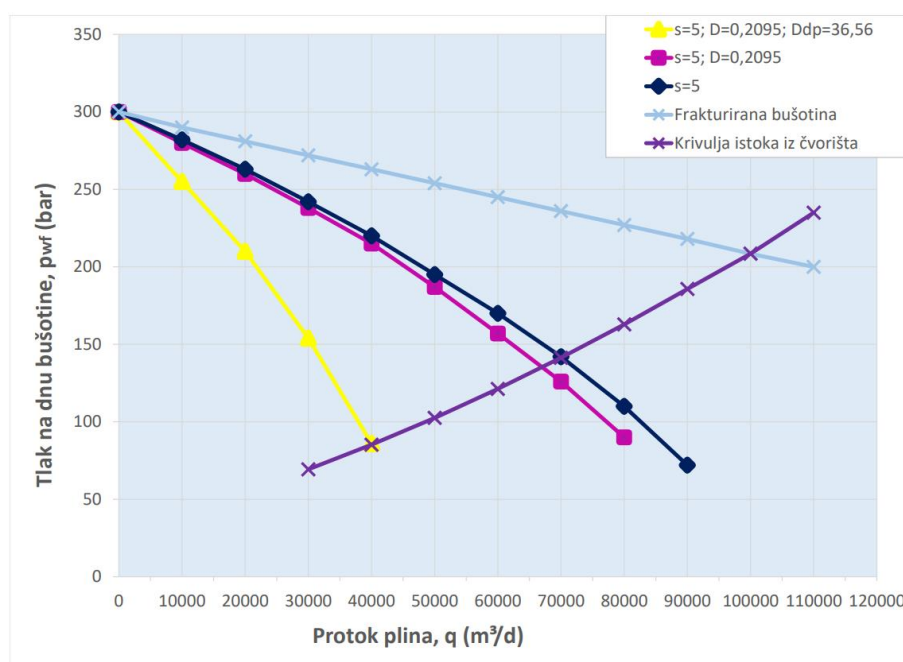
**Tablica 4-1.** Prikaz izračunatih padova tlaka i tlakova u čvorištu

Protok plina, $q \left(\frac{m^3}{dan}\right)$	Tlak ispred sapnice, $p_1 (bar)$	Pad tlaka kroz sapnicu, $\Delta p_{sapnice} (bar)$	Tlak na dnu bušotine, $p_{wf} (bar)$	Pad tlaka u tubingu, $\Delta p_{tubinga} (bar)$	Tlak u čvorištu, $p_{wf} (bar)$
40 000	73,8	43,8	85,2	11,4	85,2
70 000	128,0	98,0	140,7	12,7	140,7
100 000	181,2	151,2	208,5	27,3	208,5

Temeljem izračunatog tlaka u čvorištu za tri različita protoka plina, polinomskom regresijom je određena jednadžba krivulje istoka iz čvorišta:

$$p_{wf} = 7 \times 10^{-9}q^2 + 0.0011q + 30,031 \quad (4-5)$$

Pomoću te jednadžbe određen je tlak u čvorištu u funkciji protoka,  $p_{wf}$ , računat iz smjera istoka te je prikazan na sljedećem dijagramu, kao krivulja istoka, zajedno s indikatorskim krivuljama za četiri analizirana slučaja, kao krivuljama utoka (slika 4-2).



**Slika 4-2.** Krivulje utoka u čvorište i istoka iz čvorišta (Čikeš, 2015)

Sjecišta krivulje istoka s krivuljama utoka daju protočni kapacitet proizvodnog sustava za tri slučaja nefrakturirane bušotine, te za slučaj frakturirane bušotine. Kao što je vidljivo iz dijagrama, proizvodni kapacitet uvelike ovisi o komponentama skina tj. padu tlaka (turbolentni protok, utjecaj perforacija). Najveći proizvodni kapacitet od navedenih slučajeva ima frakturirana bušotina što je i cilj istoga kao metode stimulacije ležišta.

## 5. ZAKLJUČAK

Za optimizaciju rada bušotine potreban je adekvatan odabir svih komponenata proizvodnog sustava. Cilj je ostvariti najveću proizvodnju fluida uz minimalan trošak i što manji gubitak ležišne energije. Često djelovanje samo jedne komponente mogu ograničavati proizvodnju same bušotine. Kako bi se izdvojio utjecaj svake komponente na performanse cjelokupnog proizvodnog sustava, česta je primjena NODAL™ analize koja omogućava određivanje proizvodnog kapaciteta za bilo koju kombinaciju komponenti.

Pad tlaka vrlo je bitna veličina u sustavu analize rada bušotine. Iako je ukupni pad tlaka raspoloživ za određeni sustav fiksiran u određenom vremenu, vrlo je bitno znati na kojim komponentama se odvijaju pojedini padovi tlaka i koliki su. Poznavajući njih mogu se registrirati određeni potencijalni problemi u bušotini. NODAL™ analiza omogućava jednostavnu primjenu poznatih padova tlakova na svim komponentama u svrhu određivanja kapaciteta proizvodnosti same bušotine. Koristi se kod odabira tubinga, površinskog cjevovoda, sapnice te mnogih drugih komponenata sustava. Njenom primjenom vrlo lako se može analizirati utjecaj promjena u svakoj komponenti sustava, kao i utjecaj smanjenja ležišnog tlaka ili promjene separatorskog tlaka. To je iznimno bitno kod određivanja efikasnosti rada same bušotine.

U prikazanom primjeru primjene NODAL™ analize na plinskoj bušotini kao tlak čvorišta uzet je tlak na dnu bušotine. Samim time krivulje utoka u čvorište poklapaju se sa indikatorskim (IPR) krivuljama za četiri slučaja plinske bušotine ovisno o padovima tlaka i uvjetima protjecanja. Proračunat je tlak na dnu bušotine računat iz smjera istoka te je dobivena krivulja istoka koja se poklapa sa krivuljom vertikalnog podizanja (VLP krivuljom). Na primjeru je prikazan dijagram s krivuljama utoka za četiri različita slučaja plinske bušotine; tri slučaja nefrakturirane bušotine s različitim komponentama skin faktora i jedan u kojem je ležište frakturirano, te dobivenom krivuljom istoka. Na njihovim sjecištima može se očitati proizvodni kapacitet za svaki od navedenih slučajeva.

Prikazani primjer rada plinske proizvodne bušotine pokazuje značajan utjecaj turbulentnog protoka plina na proizvodni kapacitet bušotine kao i utjecaj perforacija kao dodatni uzrok gubitka tlaka tj. dodatne komponente skina.

## 6. LITERATURA

1. BRKIĆ, V., 2019. Indikatorske ili IPR krivulje + NODAL analiza sustava proizvodnje. Bilješke s predavanja. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb (neobjavljeno)
2. ČIKEŠ, M., 2015. Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
3. DALE BEGGS, H., 2003. Production optimization using NODAL™ analysis. Tulsa, Oklahoma: OGCI and Petroskills Publications
4. HERIOT-WATT, 1999. Examination for the Degree of MEng in Petroleum Engineering, Heriot-Watt University Department Of Petroleum Engineering

### Internet izvori

5. Nodal analysis – Petro wiki; URL: [https://petrowiki.spe.org/Nodal\\_analysis](https://petrowiki.spe.org/Nodal_analysis)

## IZJAVA

*Izjavljujem da sam ovaj završni rad pod naslovom " Primjena nodal analize na odabranoj proizvodnoj bušotini " izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Filip Sabljak



KLASA: 602-04/21-01/183  
URBROJ: 251-70-12-21-2  
U Zagrebu, 15.9.2021.

Filip Sabljak, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/183, URBROJ: 251-70-12-21-1 od 7.5.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### PRIMJENA NADAL ANALIZE NA ODABRANOJ PROIZVODNOJ BUŠOTINI

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)