

Evaluacija svojstava stijena za izbor kandidata bušotina za hidrauličko frakturiranje

Vučina, Ivan

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:169:649017>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Diplomski studij naftnog rudarstva

**EVALUACIJA SVOJSTAVA STIJENA ZA IZBOR KANDIDATA
BUŠOTINA ZA HIDRAULIČKO FRAKTURIRANJE**

Diplomski rad

Ivan Vučina

N-149

Zagreb, 2017.

**EVALUACIJA SVOJSTAVA STIJENA ZA IZBOR KANDIDATA BUŠOTINA ZA
HIDRAULIČKO FRAKTURIRANJE
IVAN VUČINA**

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

U ovom radu je dan pregled parametara koji utječu na optimalan izbor bušotina za frakturiranje. Uspoređene su vrijednosti parametara prethodno frakturiranih bušotina s vrijednostima koje preporučuju određeni autori. Primjenom neuronske mreže i optimalnih parametara se pokušala predvidjeti buduća proizvodnja bušotine nakon frakturiranja.

Ključne riječi: hidrauličko frakturiranje bušotina, svojstva stijena, odabir bušotina

Završni rad sadrži: 43 stranice, 14 tablica, 15 slika i 17 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Pomoć pri izradi: Lucija Jukić, mag. ing. RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, izvanredna profesorica RGNF

Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF

Datum obrane: 23. veljače 2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

**EVALUATION OF ROCK PROPERTIES FOR SELECTION OF CANDIDATE
WELLS FOR HYDRAULIC FRACTURING**

IVAN VUČINA

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

This thesis presents a review of parameters that affect the selection of wells for hydraulic fracturing. Values of parameters of previously fractured wells are compared with the recommended values provided by various authors. By using neural network and optimal well parameters efforts were made to predict future well production after fracturing.

Keywords: hydraulic fracturing, rock properties, candidate selection

Thesis contains: 43 pages, 14 tables, 15 figures and 17 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Technical supervisor: Lucija Jukić, MS Pet. Eng.

Reviewers: Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Associate Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: February 23, 2017., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem svome mentoru dr. sc. Domagoju Vulinu koji je oblikovao ideju rada i pomogao mi stručnim savjetima u njegovoj izradi.

Hvala dragim prijateljima i kolegama s kojima sam dijelio iskustvo studiranja i koji su ga učinili najljepšim dijelom mog života.

Hvala mojoj djevojci Ani koja mi je bila veliki oslonac i hvala mojoj obitelji bez koje ovo ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| POPIS SLIKA: | I |
| POPIS TABLICA: | II |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA: | III |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PARAMETRI ZA ODABIR BUŠOTINA ZA FRAKTURIRANJE | 3 |
| 2.1. Propusnost ležišta | 3 |
| 2.2. Skin faktor | 4 |
| 2.3. Rezerve nafte/plina u ležištu, zasićenje ugljikovodicima i ležišni tlak | 4 |
| 2.4. Zadržavanje frakture | 5 |
| 2.5. In-situ profil naprezanja | 5 |
| 2.6. Praktična ograničenja kod odabira bušotina za frakturiranje | 6 |
| 3. PREGLED LITERATURE | 8 |
| 4. ODABIR OPTIMALNIH BUŠOTINA ZA FRAKTURIRANJE | 18 |
| 4.1. Prikupljanje podataka | 18 |
| 4.2. Usporedba podataka i preporučenih vrijednosti iz literature | 21 |
| 4.3. Primjena neuronske mreže za odabir kandidata | 23 |
| 4.3.1. Umjetna neuronska mreža | 23 |
| 4.3.2. Primjena neuronske mreže | 26 |
| 8. ZAKLJUČAK | 36 |
| 9. LITERATURA | 37 |

POPIS SLIKA:

| | |
|---|----|
| Slika 3-1. Odnos predviđene i stvarne proizvodnje nafte nakon frakturiranja na Gandhar polju | 8 |
| Slika 3-2. Proizvodnja nafte s polja Tanjung Raya | 9 |
| Slika 4-1. Prikaz biološkog neurona..... | 24 |
| Slika 4-2. Shematski prikaz jednostavnog modela neurona | 25 |
| Slika 4-3. Aciklička struktura neuronske mreže | 26 |
| Slika 4-3. Prikaz sučelja programa PROSPER..... | 27 |
| Slika 4-4. Učenje neuronske mreže u programu JustNN..... | 29 |
| Slika 4-5. Relativna važnost parametara u neuronskoj mreži za predviđanje vrijednosti indeksa proizvodnosti | 29 |
| Slika 4-6. Utjecaj propusnosti na krivulju indeksa proizvodnosti..... | 30 |
| Slika 4-7. Utjecaj temperature na krivulju indeksa proizvodnosti | 31 |
| Slika 4-8. Utjecaj debljine ležišta na krivulju indeksa proizvodnosti | 31 |
| Slika 4-9. Utjecaj udjela proizvedene vode na krivulju indeksa proizvodnosti | 32 |
| Slika 4-10. Utjecaj ležišnog tlaka na krivulju indeksa proizvodnosti | 32 |
| Slika 4-11. Usporedba izračunatog i stvarnog povećanja proizvodnje nafte | 34 |
| Slika 4-12. Usporedba izračunatog i stvarnog povećanja proizvodnje nafte | 35 |

POPIS TABLICA:

| | |
|--|----|
| Tablica 2-1. Vrijednosti određenih parametara za odabir kandidata za hidrauličko frakturiranje | 5 |
| Tablica 3-1. Procjena bušotina A i B kao kandidata za hidrauličko frakturiranje s obzirom na parametre navedene u radu | 10 |
| Tablica 3-2. Skin faktor prije frakturiranja određenog intervala i udio bušotina | 12 |
| Tablica 3-3. Propusnost prije frakturiranja određenog intervala i udio bušotina | 12 |
| Tablica 3-4. Promatrani parametri različitih proizvodnih bušotina..... | 12 |
| Tablica 3-5. Raspon vrijednosti parametara koji utječu na odabir kandidata za frakturiranje | 14 |
| Tablica 3-6. Proizvodnja nafte prije i nakon stimuliranja na Kelemayi polju..... | 15 |
| Tablica 3-7. Podaci o proizvodnji iz bušotine prije i poslije procesa frakturiranja na naftnom polju Abqaiia | 16 |
| Tablica 4-1. Podaci za analizu odabira optimalnih bušotina za frakturiranje | 19 |
| Tablica 4-2. Podaci za analizu odabira optimalnih bušotina za frakturiranje | 20 |
| Tablica 4-3. Presjek parametara za odabir bušotina iz prikupljenih podataka i autora Yang | 22 |
| Tablica 4-4. Raspon vrijednosti parametara za izradu ulaznog seta podataka neuronske mreže | 28 |
| Tablica 4-5. Konstantne vrijednosti prilikom proračuna u programu Prosper i njihove vrijednosti | 28 |
| Tablica 4-6. Usporedba vrijednosti omjera indeksa proizvodnosti i omjera proizvodnje nafte | 33 |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA:

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------|---------------|---|
| $\sigma_{h,min}$ | bar | minimalno in-situ horizontalno naprezanje |
| ν | - | Poissonov omjer |
| P_{ob} | bar | tlak pokrovnih naslaga |
| P_p | bar | slojni tlak |
| α | - | Biotova konstanta |
| C_{ma} | bar^{-1} | stlačivost stijene |
| C_b | bar^{-1} | ukupna stlačivost |
| k | μm^2 | propusnost ležišta |
| h | m | debljina ležišta |
| Φ | dio cijelog | poroznost |
| J | $m^3/dan/bar$ | indeks proizvodnosti |
| q | m^3/dan | proizvodnja nafte |
| p_e | bar | tlak na granici crpljenja ležišta |
| p_{wf} | bar | dinamički tlak na dnu bušotine |

1. UVOD

Hidrauličko frakturiranje se počelo koristiti u naftnoj industriji 1947. godine kao metoda stimulacije ležišta. Koristi se kod ležišta slabe propusnosti i za ponovnu proizvodnju začepljenih bušotina te je pogodno za širok spektar ležišta (pješčenačka, vapnenačka) do dubine od 8000 metara. Trenutno se u svijetu nalazi oko milijun i pol naftnih, plinskih i vodoutisnih bušotina koje su stimulirane procesom hidrauličkog frakturiranja (Nauroy, 2011).

Frakturiranje se može povezati s drugim metodama stimulacije, poput kiselinskog frakturiranja karbonatnih stijena ili frakturiranja nakon kojeg slijedi *in situ* zapaljenje naftnih pijesaka ili naftnih šejlova.

Osim različitih varijanti stimulacije ležišta, frakturiranje nalazi brojne industrijske primjene:

- frakturiranje solnih slojeva kako bi voda mogla protjecati između dvije bušotine radi iscrpka soli ili stvaranje skladišnih kapaciteta,
- tehnologije eksploatacije geotermalne energije,
- skladištenje industrijskih zagađivača u izolirane geološke formacije,
- tretiranje zagađenih površinskih slojeva tla.

Procesom hidrauličkog frakturiranja stijena želi se postići izrada visokopropusnih kanala unutar stijene. U dio bušotine koji se izolira pakerima, kroz utisni niz (eng. *tubing*) se utiskuje viskozan fluid određenom brzinom u proizvodnu formaciju do svladavanja tlaka loma stijena i početka širenja pukotine. Iz ograničenog broja aktivnih perforacija se, u idealnom slučaju, šire jednostrane, vertikalne frakture koje se razvijaju u dva "krila" koja su međusobno pod kutom od 180° te su jednake veličine i oblika. Kod prirodno frakturiranih stijena, moguće je stvaranje višestrukih fraktura i/ili razvijanje dvaju krila u oblik drveta s povećanjem broja grana dalje od točke utiskivanja.

Tehnologija frakturiranja se uspješno primjenjuje u naftnoj industriji već desetljećima. Osim konvencionalnih, frakturiraju se i nekonvencionalna ležišta ugljikovodika (slabopropusni pješčenjaci, naftni škriljavci), bušotine kod kojih je došlo do oštećenja pribušotinske zone prilikom izrade, kao i bušotine kod kojih je tijekom duge proizvodnje ugljikovodika došlo do promjene močivosti, površinske napetosti ili relativne propusnosti za naftu pa njihova proizvodnja više nije zadovoljavajuća.

Odabir bušotina koje će se stimulirati predstavlja problem koji ovisi od ležišta do ležišta. Ispravnim odabirom kandidata za frakturiranje se postiže povećanje proizvodnje ugljikovodika uz manja ulaganja što povećava ekonomičnost samog projekta. Mnogi su autori naveli parametre koje smatraju najvažnijima prilikom odabira kandidata, kao i njihove rasponne vrijednosti, ali do danas ne postoji jedinstven raspon parametara koji je primjenjiv na sva ležišta. Najvažnijim parametrima smatraju se propusnost ležišta, skin faktor, rezerve nafte u ležištu, zasićenje ugljikovodicima, proizvodni udio vode, ležišni tlak i debljina ležišta. Ne smatra se svaka bušotina dobrim kandidatom za frakturiranje. Uspješnost frakturiranja uvelike ovisi o odabiru optimalnih bušotina i slojeva koji će ostvariti najbolje rezultate. Zanemarivanje procesa odabira optimalnih kandidata može dovesti do znatno lošijih rezultata od predviđenih.

Metoda umjetnih neuronskih mreža je u zadnjih nekoliko desetljeća našla primjenu u mnogim područjima prirodnih, tehničkih i društvenih znanosti. U zadnje vrijeme se primjenjuje u naftnom inženjerstvu kao najpouzdanija metoda za odabir optimalnih bušotina kandidata za frakturiranje. Neuronska mreža pomaže pri traženju zavisnosti između podataka koji nisu isključivo u linearnoj vezi, poput bušotinskih parametara. Primjenom neuronskih veza se daju težinski koeficijenti određenim parametrima te se procjenjuje njihova važnost na konačan ishod frakturiranja. U ovom radu će se pokušati predvidjeti buduća proizvodnja nafte nakon frakturiranja primjenom neuronske mreže kako bi se odredili najbolji kandidati za frakturiranje. Usporedit će se terenski rezultati prethodno obavljenih frakturiranja s rezultatima dobivenim iz neuronske mreže kako bi se ocijenila uspješnost iste.

2. PARAMETRI ZA ODABIR BUŠOTINA ZA FRAKTURIRANJE

Odabir bušotina kandidata za frakturiranje je iznimno važan proces prije početka samog frakturiranja zbog toga što frakturiranje neće imati na sve formacije jednake pozitivne učinke. Mnogi problemi se mogu javiti zbog lošeg odabira kandidata za frakturiranje. Može doći do nepoželjnog širenja pukotine do gornjih i donjih slojeva, gubitka vodljivosti pukotine zbog jakih naprezanja na površinu pukotine, nepoželjnog gubitka tekuće faze fluida za frakturiranje itd. U ovom poglavlju diplomskog rada će se navesti i obrazložiti parametri prema kojima se odabiru optimalne formacije za frakturiranje.

2.1. Propusnost ležišta

Kao što propusnost formacije ima velik utjecaj na proizvodnju nefrakturiranih formacija, također ima utjecaj i na proizvodnju nakon stimulacije hidraulički frakturiranog intervala. Propusnost formacije utječe na veličinu i duljinu frakture koju je potrebno ostvariti kako bi se maksimiziralo povećanje proizvodnje koje je moguće ostvariti frakturiranjem. U niskopropusnim ležištima je lakše proizvesti frakturu koja je propusnija od okolne stijene. U navedenim ležištima se frakture dizajniraju kako bi bile što dulje. Frakturiranje visokopropusnih formacija je nešto drukčije. Do smanjenja proizvodnje dolazi zbog oštećenja pribušotinske zone i povećanja ograničenja toka fluida. Frakture u visokopropusnim formacijama se dizajniraju kako bi bile kratke i visoke propusnosti, što znači da im se maksimizira širina. Za svaku formaciju se treba dizajnirati specifična kombinacija duljine i širine (Economides, 1992).

Propusnost ležišta jedan je od glavnih parametara koji služe za odabir optimalnih formacija, ali se nigdje u literaturi ne može naći točan raspon vrijednosti koje se smatraju optimalnim za frakturiranje. Obično se naftna ležišta propusnosti manje od $0,001 \mu\text{m}^2$ (1 mD) razmatraju kao kandidati za hidrauličko frakturiranje, dok se ležišta propusnosti iznad $0,01 \mu\text{m}^2$ (10 mD) smatraju pogodnima za kiselinske obrade. Naftna ležišta propusnosti između $0,001 \mu\text{m}^2$ i $0,01 \mu\text{m}^2$ zahtijevaju dodatne studije o najboljem odabiru načina stimuliranja. Za plinska ležišta se najprikladnijima smatraju propusnosti manje od $0,0001 \mu\text{m}^2$ (0,1 mD) (Economides, 1992).

2.2. Skin faktor

Skin faktor je numerički prikaz promijenjene propusnosti u pribušotinskoj zoni. Oštećena pribušotinska zona predstavlja restrikciju protoka fluida što uzrokuje nepoželjan dodatan pad tlaka. Skin faktor se može javiti zbog oštećenja pribušotinske zone prilikom izrade bušotine, promjene močivosti stijene ili zbog taloženja sitnih čestica u propusne kanale unutar stijene. Pozitivna vrijednost skin faktora ukazuje da je pribušotinska zona oštećena i da se stimuliranjem može olakšati protjecanje fluida, smanjiti dodatni pad tlaka i ekonomičnije eksploatirati naftu. Negativna vrijednost skin faktora ne znači nužno da nije potrebno frakturiranje, već znači da je propusnost stijene u ležištu manja od propusnosti pribušotinske zone. To može ukazivati na prisustvo prirodnih fraktura ili na prethodno stimuliranu bušotinu. U slučaju da proizvodnost bušotine i dalje nije zadovoljavajuća, hidrauličko frakturiranje se može smatrati boljom opcijom stimuliranja bušotine.

2.3. Rezerve nafte/plina u ležištu, zasićenje ugljikovodicima i ležišni tlak

Svrha stimulacije ležišta je povećanje ekonomske vrijednosti ležišta pomoću ubrzanja proizvodnje ili povećanja iscrpka. Ekonomičnost postupka mora biti odlučujući faktor u odluci početka i vrste stimulacije. Zbog visoke cijene procesa frakturiranja, bušotine koje se razmatraju moraju imati značajne preostale količine nafte i plina u ležištu te dovoljan ležišni tlak da cijeli postupak bude ekonomski opravdan.

U literaturi ne postoje točne vrijednosti rezervi nafte i plina u ležištu, zasićenja ugljikovodicima i ležišnog tlaka koje se smatraju optimalnima za odabir kandidata za frakturiranje, no one moraju biti takve da se frakturiranje može ekonomično provesti. U tablici 2-1. dane su okvirne vrijednosti navedenih parametara.

Tablica 2-1. Vrijednosti određenih parametara za odabir kandidata za hidrauličko frakturiranje (Heydarabadi, 2010)

| | naftno ležište | plinsko ležište |
|---------------------------|--------------------------|---|
| zasićenje ugljikovodicima | >40% | >50% |
| udio vode | <30% | <1127 m ³ vode na 10 ⁶ m ³ plina |
| ležišni tlak | <70% od tlaka napuštanja | dvostruki tlak napuštanja |
| ukupna debljina formacije | >10 m | >10 m |

2.4. Zadržavanje frakture

Zadržavanje frakture (eng. *fracture containment*) odražava sposobnost sloja za određene uvjete utiskivanja, da djeluje kao prepreka i zadrži frakturu unutar ležišta. Mala sposobnost zadržavanja frakture uvijek ima negativne posljedice na proizvodnju. U najgorem slučaju fraktura može uspostaviti komunikaciju s vodonosnim slojem.

Pukotina se uvijek širi u smjeru okomice na najmanje *in-situ* naprezanje. U slučaju da se naprezanje povećava linearno s dubinom, pukotina napravljena u bušotini će se širiti prema gore, u smjeru manjeg naprezanja. Kad se dosegnu pokrovne stijene, nikakva prepreka ne može spriječiti vertikalno širenje pukotine. Ukoliko je pokrovna stijena pod većim opterećenjem u odnosu na ležišnu, fraktura će se pružiti do pokrovne stijene. Sprječavanjem širenja pukotine prema dolje i prema gore, ona će se kretati horizontalno. U navedenom promjeru može se vidjeti ključna uloga profila naprezanja: fraktura će se uvijek nastojati kretati kako bi izbjegla zone velikih naprezanja.

2.5. *In-situ* profil naprezanja

Poželjno je točno poznavanje *in-situ* naprezanja ležišta ili još preciznije *in-situ* minimalnog horizontalnog naprezanja prilikom dizajna frakture. Tri najčešće metode određivanja minimalnog horizontalnog naprezanja uključuju analizu jezgre, test mikrofraktura (eng. *micro-frac test*) i dipolnu zvučnu karotažu. Mjerenja u jezgri i test mikrofraktura se mjere na određenom mjestu, dok dipolna zvučna karotaža daje cjelokupne i kontinuirane podatke duž formacije. Druga mana mjerenja u jezgri su statički uvjeti i

nedostatak *in-situ* uvjeta. Test mikrofraktura se smatra najboljim testom za direktno mjerenje minimalnog horizontalnog naprezanja, no radi se o skupom testu koji ne mora biti kompatibilan s načinom opremanja bušotine.

Programi za analizu mehanike stijena obično primjenjuju linearno-elastičan, homogen i izotropan model naprezanja i određene kriterije loma kako bi se odredilo područje naprezanja oko bušotine, tj. uzdužna, tangencijalna i radijalna naprezanja. Standardna jednadžba za računanje minimalnog horizontalnog naprezanja se bazira na sljedećoj jednadžbi:

$$\sigma_{h,\min} = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (P_{ob} - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (2.1)$$

pri čemu je koeficijent α jednak:

$$\alpha = 1 - \frac{C_{ma}}{C_b} \quad (2.2)$$

$\sigma_{h,\min}$ – minimalno in-situ horizontalno naprezanje, bar

ν – Poissonov omjer, -

P_{ob} – tlak pokrovnih naslaga, bar

P_p – slojni tlak, bar

α – Biotova konstanta, -

C_{ma} – stlačivost stijene, bar⁻¹

C_b – ukupna stlačivost, bar⁻¹

2.6. Praktična ograničenja kod odabira bušotina za frakturiranje

Glavna ograničenja prilikom odabira kandidata ne moraju nužno biti tehnički razlozi zbog svojstava ležišta ili fraktura. Umjesto toga, postoje i drugi razlozi koji mogu odbaciti određeni interval ili cijelu bušotinu kao kandidate za frakturiranje.

Blizina kontakta nafte/plina i vode može značajno utjecati na odabir kandidata za frakturiranje. Prodiranjem frakture unutar vodene zone se pojavljuju štetni utjecaji, poput postepenog povećanja udjela vode u proizvodnji na štetu plina ili nafte. Blizina vodene zone često je razlog za potpuno odbacivanje kandidata ili za smanjenje obujma procesa frakturiranja. Prodiranje frakture u vodenu zonu može smanjiti predviđene performanse nakon obrade i dovesti do odbacivanja kandidata. Kod kompanija s slabijim iskustvom izvođenja frakturiranja javlja se mogući problem utoka vode, čak i onda kad će se ona

proizvoditi u malim količinama pa to može biti ključan faktor za odbacivanje dobrog kandidata za frakturiranje. Također je važno imati na umu da se vodena površina može značajno pomicati tijekom radnog vijeka bušotine; ne može se vjerovati starim karotažnim mjerenjima (Economides i Martin, 1992).

Blizina kontakta nafta-plin također može imati velik utjecaj na odabir kandidata. Kod naftnih ležišta, frakture mogu jednako prodirati prema gore u kontakt nafta-plin, kao što mogu penetrirati prema dolje u kontakt nafta-voda. Glavna razlika je ta što postoji nekoliko metoda kojima se može umanjiti štetan utjecaj plina u navedenim okolnostima. Kao i kod slučaja s vodom, blizina kontakta nafta-plin kod naftnih ležišta može dovesti do odbacivanja kandidata ili do značajnog smanjenja obujma obrade (Economides i Martin, 1992).

Frakturiranje zahtijeva znatno veće tlakove od svih procesa koje se mogu javiti u redovnom radu bušotine. To može biti velik problem ako takvi tlakovi nisu predviđeni prilikom opremanja bušotine pa ona nema prikladnu opremu koja može podnijeti te tlakove. Osim što je potrebno provjeriti mogu li kolone uzlaznih cijevi (eng. *tubing*) i zaštitna kolona (eng. *casing*) izdržati tlak potreban za frakturiranje, posebna pozornost se treba obratiti na plinske ventile, klizne rukavce (klizna "vrata"), dubinske sigurnosne ventile i regulatore protjecanja. Još jedan problem se može javiti i kod rada pakera. Dodatan tlak unutar opreme za frakturiranje može rezultirati kretanjem ili deaktivacijom pakera.

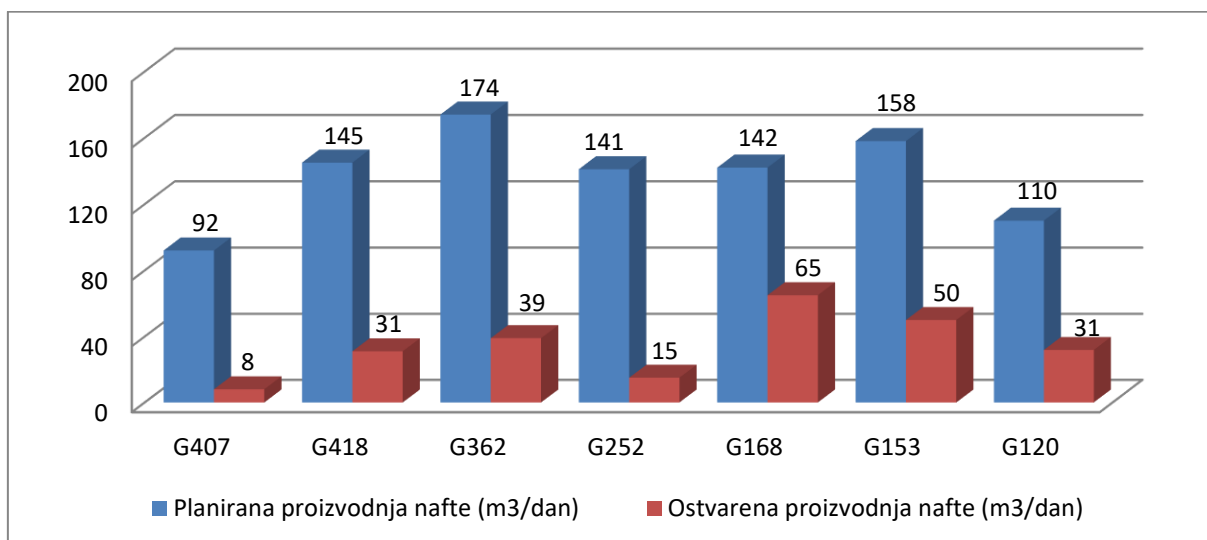
Mnoge bušotinske glave nisu dimenzionirane na projektirane tlakove frakturiranja. Kako bi se premostio naveden problem, na bušotinsku glavu se stavlja izolacijska alatka (eng. *tree saver*) ili se glava zamjenjuje s posebnom glavom za frakturiranje. Osim toga, ako su cijevi unutar bušotine oštećene korozijom ili su zadobile mehaničko oštećenje, može doći do sprječavanja procesa frakturiranja zbog toga što ne mogu izdržati povećana naprezanja. Osim navedenih uvjeta, za proces frakturiranja je potrebna dobra cementna veza. Potrebno je ostvariti dobru međuslojnu izolaciju kako bi frakture nastale unutar perforacija, a ne izvan njih. Dok god postoji dovoljno cementne veze iznad i između zone frakturiranja, perforacije neće ostvariti kontakt između slojeva.

3. PREGLED LITERATURE

Mnogi autori su pokušali definirati optimalan raspon parametara koji će odrediti najboljeg kandidata za frakturiranje. Na naftnom polju Gandhar (Sagar et al., 2008) provedena je selekcija kandidata za frakturiranje uzimajući u obzir sljedeće kriterije:

- nizak indeks proizvodnosti,
- zaštitne cijevi zadovoljavajuće kvalitete,
- bušotina prethodno nije proizvodila više od 40% vode,
- dovoljna udaljenost od utisnih bušotina,
- kvalitetna cementna veza.

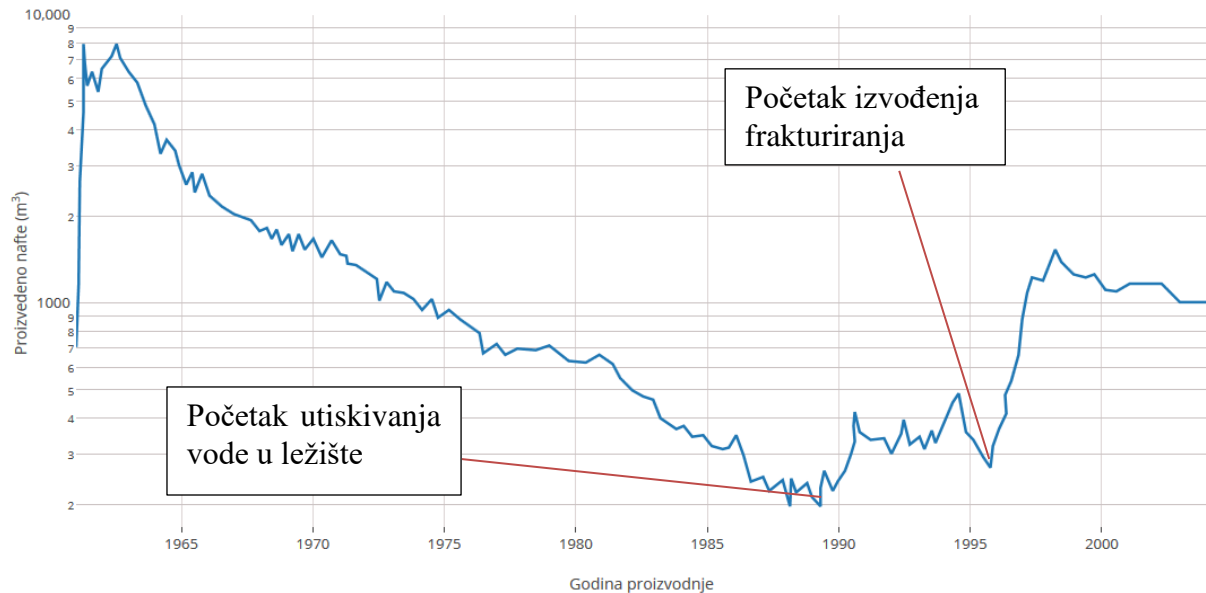
Na temelju navedenih kriterija odabrano je deset bušotina za frakturiranje. Odabrane bušotine se nalaze na južnom dijelu polja koji ima raspon propusnosti od $0,003 \mu\text{m}^2$ (3 mD) do $0,01 \mu\text{m}^2$ (10 mD). Navedene vrijednosti propusnosti i ležišni tlak od 220,6 bar su se koristili kao raspon parametara unutar kojeg su se trebali nalaziti kandidati za frakturiranje. Računalni program DataFRAC korišten je za dizajniranje fraktura za sve bušotine te su se dobiveni podaci unosili u simulacijski model kojim se predviđala očekivanja proizvodnja nakon frakturiranja. Proizvodnja nafte nakon procesa frakturiranja nije dosegla količinu nafte koja je predviđena simulacijskim modelom, što je prikazano na slici 3-1.



Slika 3-1. Odnos predviđene i stvarne proizvodnje nafte nakon frakturiranja na Gandhar polju (Sagar et al., 2008)

Tanjung Raya je staro naftno polje koje se nalazi u regiji južni Kalimantan u Indoneziji. Iz tog kompleksnog starog naftnog i višeslojnog ležišta počelo se proizvoditi 1960-ih, a u danima najveće proizvodnje davalo je $8\,745 \text{ m}^3$ nafte na dan. Do sredine 1990-ih, proizvodnja je pala na $190,8 \text{ m}^3$ nafte na dan. Započelo je utiskivanje vode u ležište što

je rezultiralo povećanjem proizvodnje do 1 590 m³ nafte na dan, no to nije dugo trajalo pa je godišnje u prosjeku opadala 33%. Na polju su započeli procesi frakturiranja novih i starih bušotina te se proizvodnja održala konstantnom na 1 113 m³ nafte tijekom dvije godine. Graf proizvodnje nafte s polja Tanjung Raya je prikazan na slici 3-2.



Slika 3-2. Proizvodnja nafte s polja Tanjung Raya (Burnstad et al., 2004)

Prije početka frakturiranja, postojalo je 350 zona koje su bile potencijalni kandidati za frakturiranje. Proces odabira kandidata najprije su izučavali razradni inženjeri koji su provjeravali kvalitetu formacije, ležišni tlak, udio vode u proizvedenoj nafti i potencijalnom proizvedenom plinu. Na temelju liste odabranih bušotina koju su napravili razradni inženjeri, proizvodni inženjeri su izabrali kandidate na temelju potencijalnih problema s integritetom bušotine, dodatnih radova potrebnih za izoliranje traženog sloja, površinskih ograničenja i problema prilikom dizajna frakture. Konačna lista kandidata je sadržavala dvadesetak bušotina koje su frakturirane. Prilikom odabira kandidata, u obzir su se uzimani sljedeći parametri:

- kvaliteta ležišne formacije (zadovoljavajuća debljina formacije, propusnost i poroznost) uz uvjete zadovoljavajućih vrijednosti umnoška propusnosti te poroznosti i debljine ($k \cdot h > 100 \text{ mD} \cdot \text{m}$ i $\Phi \cdot h > 1 \text{ m}$),
- potencijalno povećanje proizvedene nafte (računato pomoću Darcyjeve jednadžbe),
- ležišni tlak,
- udio vode (treba biti konstantan duži vremenski period),

- lokacija bušotine (udaljenost od rasjeda, blizina zavodnjenih ili utisnih bušotina),
- procjena bušotine (kvaliteta zaštitnih cijevi, cementne veze, perforacija).

Povećanje proizvodnje stimuliranjem ležišta frakturiranjem od 2001. do 2004. je dovelo do povećanja proizvodnje za 80% u odnosu na sve vrste optimizacija bušotina obavljene tijekom navedenog perioda. Na cijelom polju je ostvarena konstantna proizvodnja nafte od 1112,9 m³, unatoč prethodnom godišnjem padu proizvodnje od 33% (Burnstad et al., 2004).

Heydarabadi et al. (2010) su naveli glavne kriterije za odabir kandidata za frakturiranje te su ih primijenili na primjerima dviju bušotina s naftnog polja u Iranu. Najvažniji parametri za odabir kriterija bušotina za frakturiranje su propusnost ležišta, izrada točnog profila naprezanja i procjena širenja frakture. Modeliranje proizvodnosti bušotine prije i poslije frakturiranja pokazuje koliko se povećanje proizvodnosti ležišta može očekivati zbog frakturiranja, što dodatno pomaže prilikom izbora bušotina kandidata. Na temelju dva slučaja iz istraživanja se moglo zaključiti da bušotine nižeg indeksa proizvodnosti i propusnosti daju bolje rezultate primjenom frakturiranja. Rezultati u tablici 3-1. ukazuju da je bušotina B odgovarajući kandidat za frakturiranje prema parametrima navedenima u radu. Većina kriterija navedenih u radu ne odgovara bušotini A zbog čega se ona ne smatra dobrim kandidatom za frakturiranje.

Tablica 3-1. Procjena bušotina A i B kao kandidata za hidrauličko frakturiranje s obzirom na parametre navedene u radu (Heydarabadi et al., 2010)

| kriteriji | bušotina A | bušotina B |
|---|-----------------|--------------------|
| ograničenje širenja frakture i <i>in-situ</i> profil naprezanja | nepouzđano | dobro |
| raspon propusnosti formacije | loše | dobro |
| rezerve nafte/plina, zasićenje ugljikovodicima i ležišni tlak | dobro | dobro |
| povijest proizvodnje bušotina | loše | dobro |
| <i>skin</i> faktor | nepouzđano | nepouzđano |
| rezultati modeliranja proizvodnje bušotine | slabo povećanje | značajno povećanje |

Yin i Wu (2009) su u svom radu analizirali koji faktori imaju najveći utjecaj na odabir bušotine za frakturiranja kako bi se povećala efikasnost frakturiranja. Oni su uvidjeli da je

konvencionalnim metodama teško odrediti važnost različitih parametara za optimalan odabir bušotina. Zbog toga su u svom radu primijenili teoriju neizrazite logike (eng. *fuzzy logic*) koja je uzela u obzir kompleksnost i nejednakost parametara koji utječu na optimizaciju odabira bušotina. Neizrazita logika statistički analizira odnos između efekta frakturiranja i svakog faktora, nakon čega se daje kvantitativna ocjena svakog intervala utjecajnog faktora i određuje konačna težina faktora. Na kraju se stvara neizrazita analitička metoda analiziranja bušotine te sastavlja kompjuterski softver kako bi se odabrala optimalna bušotina. Za analiziranje utjecaja kojeg imaju skin faktor, propusnost, udio proizvodnje vode, ležišnog tlaka i širine frakture na rezultate frakturiranja, Yin i Wu su skupili i razvrstali podatke iz 320 frakturiranih bušotina s naftnog polja Xingshugang. Frakturirane bušotine su podijeljene na četiri intervala A, B, C i D, ovisno o prosječnom dnevnom povećanju proizvodnje nafte u tri mjeseca. U tablicama 3-2. i 3-3. mogu se vidjeti udjeli bušotina po intervalima za određene parametre.

Tablica 3-2. Skin faktor prije frakturiranja određenog intervala i udio bušotina (Yin i Wu, 2009)

| interval | ≥ 4 | 4~2 | 2~0 | ≤ 0 |
|----------|----------|-------|-------|----------|
| A | 19,8 % | 9,9 % | 5,0 % | 0,8 % |
| B | 14,0 % | 6,6 % | 3,3 % | 2,5 % |
| C | 4,1 % | 4,3 % | 7,1 % | 5,2 % |
| D | 2,5 % | 4,7 % | 6,3 % | 4,7 % |

Tablica 3-3. Propusnost prije frakturiranja određenog intervala i udio bušotina (Yin i Wu, 2009)

| interval | 0~30 (mD) | 30~50 (mD) | 50~100 (mD) | 100~300 (mD) |
|----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| A | 17,9 % | 8,9 % | 7,1 % | 0,0 % |
| B | 10,7 % | 8,9 % | 5,4 % | 1,8 % |
| C | 3,6 % | 8,9 % | 8,9 % | 1,8 % |
| D | 1,8 % | 1,8 % | 8,9 % | 3,6 % |

Primjenom modela neizrazite logike, na Xingshugang naftnom polju su se od 433 proizvodne bušotine odabrale 34 za postupak frakturiranja. Prema statistici efikasnosti frakturiranja naftnih bušotina, iz grupe A je frakturirano 11 bušotina i imaju udio od 32,4%, bušotina tipa B ima 15, s udjelom od 43,6%, samo su dvije bušotine iz grupe D u udjelom od 6,4%. U tablici 3-4. mogu se vidjeti podaci za šest bušotina prije i nakon frakturiranja.

Tablica 3-4. Promatrani parametri različitih proizvodnih bušotina (Yin i Wu, 2009)

| broj bušotine | X4-35-P28 | X4-34-P38 | X4-3-P35 | X4-4-P27 | X4-5-P32 | X4-7-P2-9 |
|--|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| skin faktor | 4,98 | 3,62 | 2,73 | -5,2 | 1,69 | 5,25 |
| propusnost (mD) | 23 | 49 | 68 | 157 | 127 | 129 |
| proizvodnja fluida prije frakturiranja (t/dan) | 2,57 | 25,33 | 12,73 | 35,18 | 31,3 | 29,09 |
| proizvodnja vode prije frakturiranja (%) | 86 | 88 | 89 | 83 | 90 | 78 |

| broj bušotine | X4-35- P28 | X4-34- P38 | X4-3- P35 | X4-4- P27 | X4-5- P32 | X4-7- P2-9 |
|--|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| proizvodnja nafte prije frakturiranja (t/dan) | 0,36 | 3,04 | 1,4 | 5,98 | 3,13 | 6,4 |
| proizvodnja fluida nakon frakturiranja (t/dan) | 40,22 | 42,96 | 40,00 | / | 66,87 | 42,07 |
| proizvodnja vode nakon frakturiranja (%) | 73 | 75 | 76 | / | 85 | 71 |
| proizvodnja nafte nakon frakturiranja (t/dan) | 10,86 | 10,74 | 9,60 | / | 10,03 | 12,20 |
| povećanje proizvodnje nafte (t/dan) | 10,5 | 7,7 | 8,2 | / | 6,9 | 5,8 |

Iz tablice se vidi da je proizvodnja fluida prije frakturiranja na bušotini X4-35-P28 bila 2,57 tona na dan, s tim da je udio vode iznosio 86%, a proizvodnja nafte 0,36 tona na dan. Nakon frakturiranja, proizvodnja fluida je povećana na 40,22 tona na dan, pri čemu je udio vode pao na 73%, a proizvodnja nafte narasla na 10,86 tona/dan. Ležište raskriveno bušotinom X4-35-P28 ima visok skin faktor, jako je oštećena i ima nisku propusnost te pokazuje da je frakturiranje imalo na nju velik utjecaj, za razliku od bušotine X4-4-P27 koja ima veliku propusnost i nije toliko oštećena. Autori smatraju da je mudro uz primjenu neizrazite logike koristiti i praktična iskustva.

Yang (2009) je također koristio neizrazitu logiku kao način odabira optimalnih bušotina za frakturiranje. Neizrazita logika rješava problem višestrukih faktora koji imaju utjecaj na odabir kandidata i povećava točnost odabira bušotina i slojeva za frakturiranje, što povećava ekonomičnost projekta. Odredio je parametre koji imaju značajan utjecaj na rezultate frakturiranja: propusnost, poroznost, skin faktor, debljina ležišta, pridobive količine nafte, zasićenje vodom, koeficijent protjecanja, ležišni tlak, proizvodnja nafte, udio proizvedene nafte i pad ležišnog tlaka. Navedene parametre, koji su prikazani u tablici 3-5. je podijelio u četiri skupine: optimalan, vrlo dobar, dobar i loš kandidat. Osim toga, u radu su navedeni kriteriji za odabir slojeva za frakturiranje:

1. Nisko zasićenje vodom, tj. visoko zasićenje naftom;
2. Slojevi nižih propusnosti;
3. Deblji slojevi s velikom vertikalnom heterogenošću;
4. Tanki slojevi niske propusnosti koji imaju stabilnu proizvodnju;
5. Bušotine višeg slojnog tlaka, male depresije i indeksa proizvodnosti;

6. Zaštitne cijevi trebaju biti u dobrom stanju i kvaliteta cementne veze treba biti zadovoljavajuća;
7. Slojevi niske, nejednolične propusnosti sa slabom komunikacijom.

Tablica 3-5. Raspon vrijednosti parametara koji utječu na odabir kandidata za frakturiranje (Yang, 2009)

| parametar | optimalan | vrlo dobar | dobar | loš kandidat |
|--|-----------|------------|-----------|--------------|
| propusnost ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 0 - 30 | 30 - 100 | 100 - 300 | 300 - 1500 |
| poroznost (%) | 0 - 10 | 10 - 20 | 20 - 30 | 30 - 100 |
| skin faktor | 25 - 5 | 5 - 2 | 2 - 0,5 | 0,5 - 0 |
| debljina ležišta (m) | 50 - 10 | 10 - 5 | 5 - 2 | 2 - 0 |
| pridobive količine nafte ($\times 10^4 \text{ m}^3$) | 30 - 25 | 25 - 15 | 15 - 10 | 10 - 0,1 |
| zasićenje vodom (%) | 0 - 40 | 40 - 45 | 45 - 50 | 50 - 100 |
| koeficijent protjecanja ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}/\text{mPa} \cdot \text{s}$) | 10 - 5 | 5 - 3 | 3 - 2 | 2 - 0 |
| trenutni ležišni tlak (bar) | 120 - 100 | 100 - 90 | 90 - 85 | 85 - 80 |
| proizvodnja nafte (m^3/dan) | 0 - 5 | 5 - 20 | 20 - 40 | 40 - 70 |
| udio proizvedene nafte (%) | 0 - 10 | 10 - 40 | 40 - 75 | 75 - 100 |
| potisni tlak u ležištu (bar) | 100 - 65 | 65 - 40 | 40 - 20 | 20 - 8 |

York i Meyer (1992) su obradili stimuliranje naftne regije Kelemayi u Kini. Od svih bušotina, odabrano ih je po pet sa svakog od četiri polja kao potencijalne kandidate za frakturiranje. Jedna bušotina sa svakog polja je odabrana za studiju hidrauličkog frakturiranja. Kriteriji koji su se slijedili prilikom odabira su:

1. Bušotina ne smije biti prethodno frakturirana;
2. Bušotine se trebaju nalaziti u zoni koja je ograničena s gornje i donje strane dobrom barijerom šejlova kako bi se uspješno zadržalo širenje frakture;
3. Bušotine trebaju imati visoke vrijednosti ležišnog tlaka;
4. Odabrane su bušotine kod kojih postoji najviše podataka o propusnosti, poroznosti, zasićenju vodom i PVT;
5. Potrebna je cijela povijest proizvodnje bušotine da bi se smatrala pogodnom;

6. Bušotine imaju jako malu ili nikakvu proizvodnju vode;
7. Uspješne bušotine imaju minimalan postotak proizvedene nafte.

U tablici 3-6. je prikazana proizvodnja iz bušotina prije i nakon frakturiranja Kelemayi polja.

Tablica 3-6. Proizvodnja nafte prije i nakon stimuliranja na Kelemayi polju (York i Meyer, 1992)

| | bušotina 1856 | bušotina 7269 | bušotina 8713 | bušotina 9237 |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ležišni tlak (bar) | 90 | 150 | 246 | 200 |
| temperatura (°C) | 28 | 33 | 80 | 49 |
| propusnost ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 4,1 | 0,5 | 3 | 2 |
| zasićenje vodom (dio cijelog) | 0,37 | 0,3 | 0,38 | 0,4 |
| proizvodnja prije frakturiranja (m^3/dan) | 4,0 | 1,0 | 7,0 | 2,0 |
| proizvodnja 300 dana nakon frakturiranja (m^3/dan) | 10,8 | 7,3 | 15,3 | 6,7 |
| proizvodnja 1000 dana nakon frakturiranja (m^3/dan) | 10,0 | 7,5 | 14,3 | 6,4 |

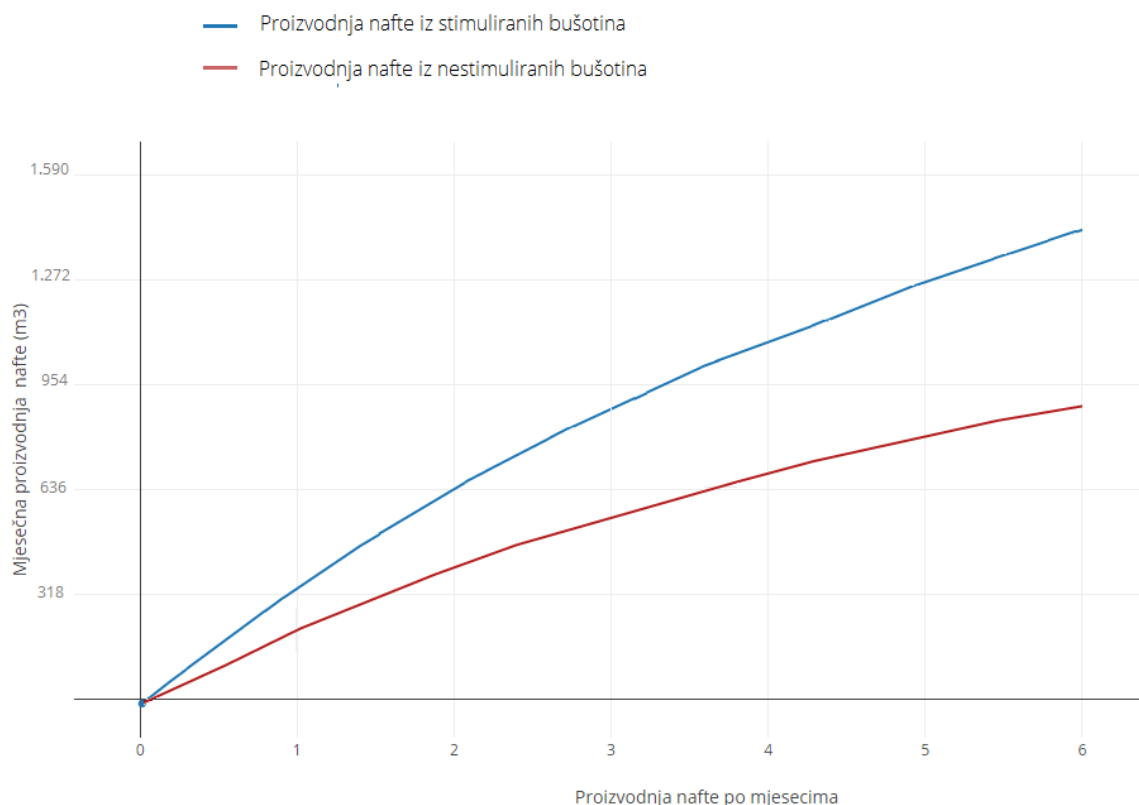
Bustin i Sierra (2009) su prikazali rezultate stimuliranja horizontalne bušotine u Saudijskoj Arabiji, na naftnom polju Abqaiq. Proces stimuliranja je koristio novu metodu selektivnog kiselinskog frakturiranja bez primjene pakera (eng. *Packer-Less Selective Acid Fracture stimulation*). Obavljen je opsežan pregled svih bušotina u karbonatnim stijenama na Abqaiq polju kako bi se odredio najbolji kandidat za primjenu navedene tehnologije stimuliranja. U procesu selekcije su odbačene sve bušotine koje su prethodno stimulirane kiselinskim obradama ili za koje ne postoje karotažni podaci o proizvodnji. Odabrana je proizvodna horizontalna bušotina koja je imala nizak indeks proizvodnosti od 2,62 $\text{m}^3/\text{dan}/\text{bar}$. Bušotina je bila prigušena sapnicom da pad tlaka u formaciji ne dosegne tlak zasićenja, zbog čega je proizvodnja u bušotini bila ograničena na 79,5 m^3 pa sve do 95,4 m^3 . Karotaža proizvodnje je pokazala da 198 metara otvorenog kanala bušotina ne sudjeluje u proizvodnji, iako mjerenja pokazuju jednake vrijednosti mjerenja poroznosti i otpornosti kao i u ostatku kanala. U tablici 3-7. su podaci o proizvodnji iz bušotine prije i poslije procesa frakturiranja.

Tablica 3-7. Podaci o proizvodnji iz bušotine prije i poslije procesa frakturiranja na naftnom polju Abqaiia (Bustin i Sierra, 2009)

| | datum | proizvodnja nafte (m ³ /dan) | indeks proizvodnosti (m ³ /dan/bar) |
|--|--------------|--|---|
| proizvodnja nafte prije frakturiranja | 15. 08. 2004 | 87,29 | 2,99 |
| | 11. 01. 2005 | 78,64 | 2,76 |
| | 15. 04. 2005 | 75,2 | 2,76 |
| | 27. 08. 2005 | 75,2 | 2,63 |
| proizvodnja nafte nakon frakturiranja | 17. 9. 2005 | 514,52 | 16,6 |
| | 18. 9. 2005 | 858,6 | 23,29 |

Dugoročne procjene stimulacije na odabranoj bušotini su pokazale povećanje proizvodnje za 700% za period od tri godine.

Ležište Green River se nalazi u istočnom dijelu američke države Utah kao dio Uintah bazena. Sastoji se od slojeva niskopropusnih pješčenjaka koji sadrže viskoznu naftu s velikim udjelom parafina, u proizvodnji je od 1949. godine. Primjenom hidrauličkog frakturiranja pokušala se povećati pokretljivost nafte i povećati ekonomičnost eksploatacije nafte na polju. Nakon stimuliranja ležišta, svaki mjesec su se prikupljali podaci proizvodnje iz stimuliranih i nestimuliranih bušotina. Za dobru usporedbu podataka koristila se šestomjesečna kumulativna proizvodnja nafte. Prvih šest mjeseci proizvodnje nestimulirane bušotine su u prosjeku proizvele 969,8 m³ nafte. Stimulirane bušotine su u istom vremenskom intervalu proizvele 1573,9 m³ nafte. Slika 3-3. prikazuje tu usporedbu povijesti proizvodnje. U ove podatke su uvrštene vrijednosti proizvodnje 19 bušotina koje nisu stimulirane i 65 bušotina koje su stimulirane (Schubarth et al., 1998)



Slika 3-3. Usporedba kumulativne proizvodnje nafte iz stimuliranih i nestimuliranih bušotina (Schubarth et al., 1998)

Osim navedenih primjera frakturiranja, za potrebe rada se koristilo još nekoliko primjera iz radova koji nisu imali jasne kriterije prilikom odabira optimalnih kandidata za frakturiranje. U radu Nikurova (2006) dan je pregled frakturiranja na naftnom polju Priobskoe u Rusiji koje je granično isplativo pa se skupocjenim frakturiranjem pokušava održati rentabilnost polja. Lee i Salter (1989) su prikazali frakturiranje niskopropusnih pješčenjaka u centralnoj Australiji, na polju Tirrawarra. U ovom radu su se koristili i podaci masivnog frakturiranja (eng. *Massive Hydraulic Fracturing – MHF*) na polju Vyngayakhinskoe u zapadnom Sibiru (Nor-Azlan, et al., 2003). Masivno frakturiranje je tehnološki jednako konvencionalnom, samo što se koristi znatno veća količina materijala. U Rusiji se masivnim frakturiranjem smatra ono frakturiranje za koje je potrebno više od 150 tona proširivača. Hadi i Arifin (2000) su prikazali primjenu frakturiranja na naftnom polju Kenali Asam u Indoneziji kako bi se povećala proizvodnja nafte i riješio problem proizvodnje pijeska iz ležišta.

4. ODABIR OPTIMALNIH BUŠOTINA ZA FRAKTURIRANJE

Hidrauličko frakturiranje je proces kojim se stvaranjem pukotine u ležištu pokušava poboljšati protok fluida kroz ležište i povećati ekonomičnost eksploatacije nafte. Budući da su za provedbu postupka frakturiranja potrebna velika financijska sredstva, ne mogu se sve bušotine stimulirati na navedeni način. Uz ograničena sredstva, za povećanje proizvodnje nafte i maksimizaciju prihoda potrebno je odabrati najbolje bušotine koje će frakturiranjem dati najbolje rezultate. Mnogi autori su pokušali odrediti najbitnije parametre koji utječu na efikasnost frakturiranja od kojih se najčešće spominje tlak i temperatura ležišta, zasićenje vodom, propusnost, poroznost i preostale rezerve u ležištu. Ipak, nigdje ne postoji točan raspon vrijednosti parametara unutar kojeg se bušotina treba nalaziti kako bi se smatrala optimalnim kandidatom za frakturiranje.

Odabir bušotina za frakturiranje može biti kompliciran i dugotrajan postupak. Tradicionalne metode kombiniraju kvalitativnu analizu s iskustvom, što pokazuje subjektivnost i rizik metoda bez sigurnog povećanja proizvodnje. Postoji mnogo faktora koji mogu utjecati na odabir optimalnih bušotina, a povezani su na neizravan način. Ne postoji mnogo analitičkih modela kojima se odabire optimalan kandidat za frakturiranje na temelju njegovih parametara. U zadnje vrijeme popularna je primjena umjetnih neuronskih mreža (eng. *artificial neural network*) kao najpouzdanija metoda za predviđanje optimalnih bušotina. Glavna primjena neuronskih mreža je kod traženja zavisnosti između podataka koji nisu u isključivo linearnoj vezi, a mogu se ujediniti u jedan složeni ulazni skup. U ovom radu će se pomoću umjetne neuronske mreže u programu JustNN pokušati predvidjeti proizvodnja bušotina nakon frakturiranja u vidu odabira optimalnih kandidata za frakturiranje.

4.1. Prikupljanje podataka

Nakon pregleda literature, za početak analize odabira optimalnih bušotina za frakturiranje potrebno je skupiti sve dostupne podatke na jedno mjesto. U tablicama 4-1. i 4-2. se mogu vidjeti dostupni podaci iz literature o provedenim postupcima frakturiranja i u kojim su uvjetima provedeni. Prvi set podataka (tablica 4-1. i 4-2., redci 1-25) prikupljen je iz literature, dok je drugi set dobiven za bušotine iz Panonskog bazena (redci 26-32). Za sve bušotine su prikazani parametri koji su uzeti u analizu kako bi se odredio njihov značaj za

odabir optimalnih bušotina. Teško je pronaći točne podatke vezane uz parametre frakturiranja, pogotovo za vrijednosti proizvodnje prije i poslije frakturiranja jer se smatraju važnima i često se vode kao poslovna tajna, no ponekad se skrivaju kako bi se prikrili pravi rezultati frakturiranja. Analizom tablica 4-1. i 4-2. može se uočiti veliki raspon vrijednosti podataka pa je nemoguće odmah procijeniti uspješnost frakturiranja bez detaljnije analize. U ovom radu će se usporediti vrijednosti iz tablice s rasponom vrijednosti za koje Yang predviđa da daju optimalne kandidate za frakturiranje, samim time i najveću uspješnost frakturiranja tj., najveće povećanje proizvodnje. Nakon toga će se primjenom neuronske mreže pokušati predvidjeti povećanje proizvodnje za svaki slučaj frakturiranja pa tako naučenu mrežu iskoristiti za simulaciju proizvodnje nakon frakturiranja.

Tablica 4-1. Podaci za analizu odabira optimalnih bušotina za frakturiranje

| br. bušotine | vrsta stijene | propusnost ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) | dubina ležišta (m) | debljina sloja (m) | poroznost (%) | zasićenje vodom (%) | ležišni tlak (bar) |
|--------------|----------------------------|---|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| 1 | pješčenjak | 7 | 3000 | 10 | 15,5 | 40 | 221 |
| 2 | pješčenjak/ konglomerat | 68 | 1180 | 5,72 | 21 | konstantno | 42 |
| 3 | pješčenjak/ konglomerat | 13 | 1060 | 52 | 19 | konstantno | 42 |
| 4 | pješčenjak | 850 | 1005 | 4,76 | 21 | konstantno | 42 |
| 5 | pješčenjak | 140 | 919 | 4,55 | 22 | konstantno | 42 |
| 6 | karbonatna | 11 | - | 100 | 14,1 | 16 | 283 |
| 7 | karbonatna | 6 | - | 63 | 9,3 | 21 | 352 |
| 8 | - | 23 | - | - | - | 86 | - |
| 9 | - | 49 | - | - | - | 88 | - |
| 10 | - | 68 | - | - | - | 89 | - |
| 11 | - | 127 | - | - | - | 90 | - |
| 12 | - | 129 | - | - | - | 78 | - |
| 13 | - | 65 | - | 30 | 12,5 | 40 | - |
| 14 | pješčenjak | 4 | 916 | 58 | 9 | 37 | 90 |
| 15 | konglomerat | - | 1160 | 37 | 14 | 30 | 150 |
| 16 | konglomerat | 3 | 2953 | 57 | 9 | 38 | 246 |
| 17 | konglomerat | 2 | 1504 | 14 | 15 | 40 | 200 |
| 18 | pješčenjak | 5 | 1600 | 7 | 14 | - | - |
| 19 | pješčenjak | 5 | 1500 | 5 | 15 | - | - |
| 20 | pješčenjak | 1 | 2500 | 8,3 | 18 | 30 | - |

| br. bušotine | vrsta stijene | propusnost ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) | dubina ležišta (m) | debljina sloja (m) | poroznost (%) | zasićenje vodom (%) | ležišni tlak (bar) |
|--------------|----------------------------|---|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| 21 | pješčenjak | 1 | - | 13,7 | 10 | - | - |
| 22 | pješčenjak | 1 | - | 20,7 | 10,3 | - | - |
| 23 | pješčenjak | 1 | - | 13,4 | 10 | - | - |
| 24 | pješčenjak | 4 | 2700 | 50 | 18 | 10 | 230 |
| 25 | pješčenjak | 232 | - | 90 | 29 | 30 | 31 |
| 26 | konglomerat | 6,8 | 3000 | 33 | 11 | 16 | 245 |
| 27 | pješčenjak/ konglomerat | 0,83 | 2500 | 14 | 8 | 10 | 220 |
| 28 | pješčenjak/ konglomerat | 1,9 | 2350 | 30 | 10 | 23 | 240 |
| 29 | dolomit | 3,4 | 2860 | 46 | 6 | 31 | 245 |
| 30 | metamorfna | 0,7 | 2840 | 40 | 5 | 28 | 180 |
| 31 | pješčenjak | 5 | 2570 | 9 | 15 | - | 212 |
| 32 | pješčenjak | 7 | 2470 | 10 | 15 | 40 | 186 |

Tablica 4-2. Podaci za analizu odabira optimalnih bušotina za frakturiranje

| br. bušotine | gustoća (kg/m^3) | temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | GOR (m^3/m^3) | skin faktor | proizvodnja prije frakturiranja (m^3/dan) | proizvodnja nakon frakturiranja (m^3/dan) |
|--------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------|---|---|
| 1 | 850 | 143 | 54 | - | 20 | 40 |
| 2 | 825 | 63 | - | 20 | 890 | 1113 |
| 3 | 825 | 63 | - | 20 | 890 | 1113 |
| 4 | 825 | 63 | - | 20 | 890 | 1113 |
| 5 | 825 | 63 | - | 20 | 890 | 1113 |
| 6 | - | - | - | negativan | - | - |
| 7 | - | - | - | negativan | - | - |
| 8 | - | - | - | 5 | - | 13 |
| 9 | - | - | - | 3,6 | 4 | 13 |
| 10 | - | - | - | 2,7 | 2 | 11 |
| 11 | - | - | - | 1,7 | 4 | 12 |
| 12 | - | - | - | 5,3 | 8 | 14 |
| 13 | - | - | - | 5 | 11 | - |
| 14 | 863 | 28 | 68 | - | 4 | 11 |
| 15 | 852 | 33 | 110 | - | 1 | 7 |
| 16 | 842 | 80 | 175 | - | 7 | 15 |

| br. bušotine | gustoća (kg/m ³) | temperatura (°C) | GOR (m ³ /m ³) | skin faktor | produkcija prije frakturiranja (m ³ /dan) | produkcija nakon frakturiranja (m ³ /dan) |
|--------------|------------------------------|------------------|---------------------------------------|-------------|--|--|
| 17 | 843 | 49 | 47 | - | 2 | 7 |
| 18 | - | - | 52 | - | 3 | 9 |
| 19 | - | 37,8 | - | - | 3,5 | 8,7 |
| 20 | - | 89 | 66,1 | - | 40 | 50 |
| 21 | - | 149 | - | -1,7 | 7,95 | 38,4 |
| 22 | - | - | - | 5,6 | 22,4 | 132,6 |
| 23 | - | - | - | 11,3 | 11,9 | 75,1 |
| 24 | - | - | - | 1,3 | 12 | 90 |
| 25 | 930 | - | - | - | 1,5 | 9,1 |
| 26 | - | - | 876 | - | 4,5 | 30 |
| 27 | - | - | 32 | - | 1,7 | 50 |
| 28 | - | - | 120 | - | 0,8 | 15 |
| 29 | - | - | 130 | - | 3,5 | 50 |
| 30 | - | - | 400 | - | 0,5 | 34 |
| 31 | - | - | 1300 | - | 4,9 | 36 |
| 32 | - | - | 640 | - | 1,9 | 30 |

4.2. Usporedba podataka i preporučenih vrijednosti iz literature

Autori koji su navedeni u odlomku „Pregled literature” su dali vrijednosti parametara koji su se koristili kao odabir optimalnih kandidata za frakturiranje. Vrijednosti parametara su dobivene na temelju iskustva prethodnih frakturiranja ili procijenjene od strane iskusnijih inženjera. U sljedećoj tablici će se iskoristiti raspon vrijednosti parametara koje je dao Yang s vrijednostima frakturiranih bušotina iz drugih radova iz tablica 4-1. i 4-2. Zbog toga što nisu dostupni svi podaci o bušotinama koje autor Yang zahtijeva, u tablici 4-3. su prikazani samo oni parametri koji su dostupni u ovom radu.

Tablica 4-3. Presjek parametara za odabir bušotina iz prikupljenih podataka i autora Yang

| n | propusnost ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) | debljina sloja (m) | poroznost (%) | zasićenje vodom (%) | tlak (bar) | skin faktor | proiz vodnja nafte (m^3/dan) |
|----|--|--------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|---|
| 1 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | vrlo dobro |
| 2 | vrlo dobro | vrlo dobro | dobro | - | loš kandidat | optimalno | - |
| 3 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | - | loš kandidat | optimalno | - |
| 4 | loš kandidat | vrlo dobro | dobro | - | loš kandidat | optimalno | - |
| 5 | dobro | vrlo dobro | dobro | - | loš kandidat | optimalno | - |
| 6 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | loš kandidat | - |
| 7 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | loš kandidat | - |
| 8 | optimalno | - | - | loš kandidat | - | optimalno | - |
| 9 | vrlo dobro | - | - | loš kandidat | - | vrlo dobro | optimalno |
| 10 | vrlo dobro | - | - | loš kandidat | - | vrlo dobro | optimalno |
| 11 | dobro | - | - | loš kandidat | - | dobro | optimalno |
| 12 | dobro | - | - | loš kandidat | - | optimalno | vrlo dobro |
| 13 | vrlo dobro | optimalno | vrlo dobro | optimalno | - | optimalno | vrlo dobro |
| 14 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | vrlo dobro | - | optimalno |
| 15 | - | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 16 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | - | vrlo dobro |
| 17 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 18 | optimalno | vrlo dobro | vrlo dobro | - | - | - | optimalno |
| 19 | optimalno | vrlo dobro | vrlo dobro | - | - | - | optimalno |
| 20 | optimalno | vrlo dobro | vrlo dobro | - | - | - | dobro |
| 21 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | - | loš kandidat | vrlo dobro |
| 22 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | - | - | optimalno | dobro |
| 23 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | - | - | optimalno | vrlo dobro |
| 24 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | dobro | vrlo dobro |

| n | propusnost ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) | debljina sloja (m) | poroznost (%) | zasićenje vodom (%) | tlak (bar) | skin faktor | proiz vodnja nafte (m^3/dan) |
|----|--|--------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|----------------|---|
| 25 | dobro | optimalno | dobro | optimalno | loš kandidat | - | optimalno |
| 26 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 27 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 28 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | vrlo dobro |
| 29 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 30 | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | optimalno | - | optimalno |
| 31 | optimalno | vrlo dobro | vrlo dobro | - | optimalno | - | optimalno |
| 32 | optimalno | optimalno | vrlo dobro | optimalno | optimalno | - | optimalno |

Iz tablice se može vidjeti da samo tri bušotine u potpunosti zadovoljavaju uvjete autora Yang. Petnaest bušotina ne zadovoljava sve optimalne kriterije, no i dalje se mogu smatrati dobrim kandidatom za frakturiranje. Ostale bušotine imaju jedan ili više kriterija koji ih smatraju lošim kandidatom za frakturiranje. Po ovoj tablici, samo tri bušotine bi trebale dati jako dobre rezultate nakon frakturiranja. No, prema autorima koji su dali vrijednosti parametara frakturiranih bušotina, sve bušotine su dale zadovoljavajuće rezultate. Od svih bušotina, samo je za bušotinu broj 6 autor napisao da nije zadovoljan rezultatima frakturiranja.

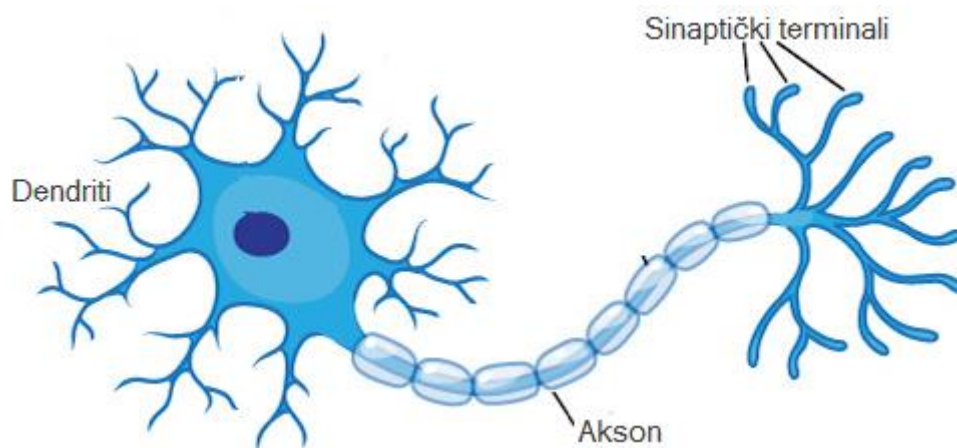
4.3. Primjena neuronske mreže za odabir kandidata

4.3.1. Umjetna neuronska mreža

Umjetna neuronska mreža u širem je smislu riječi umjetna replika ljudskog mozga kojom se nastoji simulirati postupak učenja (Dalbello Bašić et al., 2008). Neuronska mreža jest skup međusobno povezanih jednostavnih procesnih elemenata, jedinica ili čvorova čija se funkcionalnost temelji na biološkom neuronu. Pri tome je obradbeni moć mreže pohranjena u snazi veza između pojedinih neurona, tj. težinama do kojih se dolazi postupkom prilagodbe, odnosno učenjem iz skupa podataka za učenje. Neuronska mreža obrađuje podatke distribuiranim paralelnim radom svojih čvorova. Glavna prednost neuronskih mreža nad konvencionalnim metodama obrade podataka su mogućnost rada s

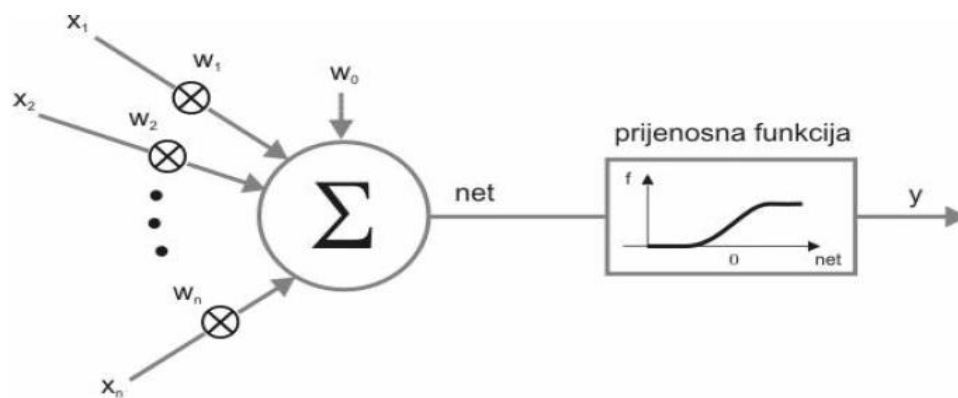
nejasnim i manjkavim podacima, mogu raditi s velikim brojem parametara, stvaraju vlastite odnose između podataka i sposobni su formirati znanje učeći iz vlastitih iskustava.

U sastavu mozga nalazi se izuzetno velik broj neurona (oko 10^{11}) koji su međusobno povezani brojnim vezama. Biološki neuron, kao osnovna gradivna jedinica biološke mreže, prima i obrađuje informacije od drugih neurona. Biološki neuron se može prikazati kao stanica sastavljena od tijela, mnoštva dendrita i aksona (slika 4-1.). Mali razmak između završetka aksona prethodnog neurona i dendrita sljedećeg neurona naziva se sinapsa. Impulsi, koji se generiraju u tijelu neurona, putuju kroz akson do sinapsi. Signali se od sinapsi dendritima prosljeđuju do tijela neurona, gdje se prikupljaju i obrađuju. Ako je kumulativna vrijednost signala tijekom kratkog vremenskog intervala veća od praga osjetljivosti neurona, tijelo generira impulse koji se šalju duž aksona prema drugim neuronima, a ako je manja, neuron ostaje nepobuđen i ne generira impulse.



Slika 4-1. Prikaz biološkog neurona (Szymik, 2011)

Većina dosad razvijenih modela umjetnih neurona svojom strukturom podsjeća na biološke modele, bez pretenzija da postanu njihovi stvarni modeli. Neuron prima signale iz mnogih izvora. Ti izvori su obično podaci i definirani su kao ulazne varijable x , ili samo ulazi (eng. *input*). Ulazi dolaze do spojeva koji imaju određenu snagu, koja se naziva „težina“ (eng. *weight*). Vrijednost težine je pretpostavljena brojem, koji svojom vrijednosti ukazuje na jači dolazni signal, što ima veći utjecaj na izlaz (eng. *output*). Nakon što je signal primljen, odredi se suma ponderirana težinskim koeficijentima i odredi se aktivacijska funkcija (eng. *activation function*) neurona. Aktivacijska funkcija neurona je matematička funkcija koja pretvara sumu ponderiranu težinskim koeficijentima u izlaz. Aktivacijska funkcija obično je sigmoidnog oblika, no može biti i tangens hiperbolična.



Slika 4-2. Shematski prikaz jednostavnog modela neurona (Dalbelo Bašić et al., 2008)

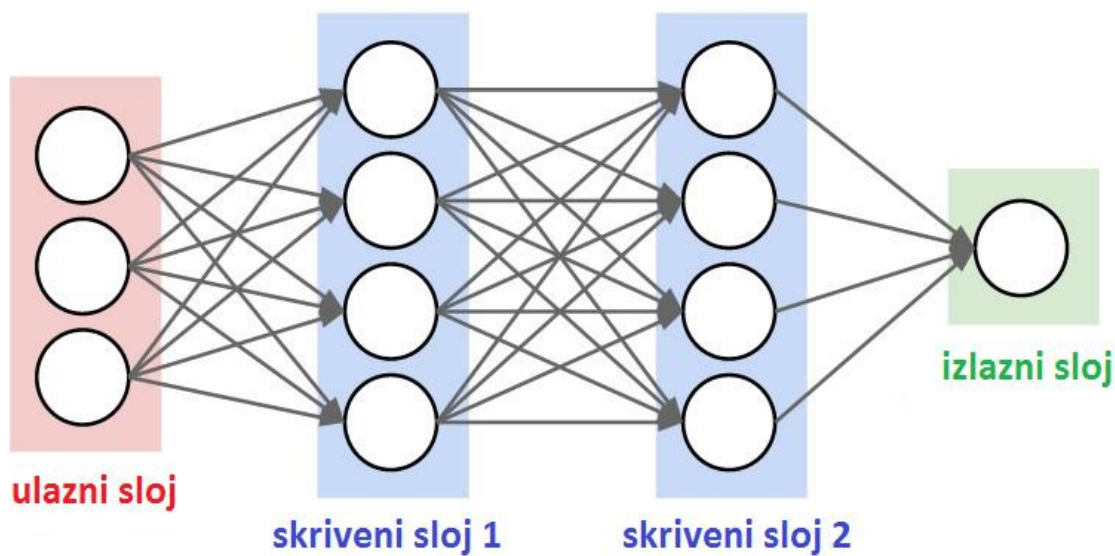
Jednostavnije neuronske mreže se konstruiraju kako bi obavljale određeni zadatak. Prije postupka obrade podataka, obavlja se postupak učenja ili treniranja (eng. *training*) mreže. Pod postupkom učenja kod neuronskih mreža se podrazumijeva iterativan postupak predočavanja ulaznih primjera (uzoraka, iskustva) i eventualno očekivana izlaza (Dalbelo Bašić et al., 2008). Postoje dvije vrste učenja mreže, ovisno o tome je li poznata vrijednost izlaza iz mreže. Prvi je učenje s učiteljem (eng. *supervised learning*) koje predstavlja učenje uz primjere u obliku para (ulaz, izlaz), a drugi je učenje bez učitelja (eng. *unsupervised learning*) gdje mreža uči bez poznavanja izlaza. Skup primjera za učenje često se dijeli na tri odvojena skupa: skup za učenje, skup za testiranje i skup za provjeru (validaciju). Primjeri iz prvog skupa služe za učenje u užem smislu (podešavanje težinskih faktora). Pomoću primjera iz drugog skupa vrši se tijekom učenja provjera rada mreže s trenutnim težinskim faktorima. Umjetnu neuronsku mrežu moguće je, naime, pretrenirati - nakon određenog broja iteracija mreža gubi svojstvo generalizacije i postaje stručnjak za obradu podatka iz skupa primjera za učenje dok preostale podatke obrađuje loše. Točnost i preciznost obrade podataka se provjerava nad trećim skupom primjera, skupom za provjeru.

Način na koji su neuroni međusobno organizirani i povezani u mreži određuju njezinu arhitekturu. Postoje četiri osnovne arhitekture (Dalbelo Bašić et al., 2008):

- aciklička,
- mreža s povratnom vezom,
- lateralno povezana mreža,
- hibridne mreže.

Arhitektura neuronske mreže u ovom radu je aciklička, što znači da nema povratnih veza između neurona pa signali koji krenu od ulaznih neurona nakon određenog broja prijelaza dolaze do izlaza mreže. Ovakva vrste mreža se sastoji od ulaznog sloja neurona, izlaznog

sloja i skrivenog sloja. Ovakva mreža može sadržavati jedan ili više skrivenih slojeva neurona. Neuroni ulaznog sloja nemaju ulaznih signala tj., nemaju funkcionalnost neurona te su to obično podaci organizirani u vektor konkretnih vrijednosti. Broj neurona u pojedinom sloju može biti različit te su izlazi neurona jednog sloja, ulazi u sljedeći sloj. Glavna mana ovakve vrste mreža je otežavanje procesa učenja zbog velikog broja neurona i zbog potrebe da mreža sama odluči što trebaju naučiti skriveni neuroni (za izlazne neurone se zna).



Slika 4-3. Aciklička struktura neuronske mreže (<http://cs231n.github.io/neural-networks-1>)

4.3.2. Primjena neuronske mreže

U ovom radu će se za izradu neuronske mreže koristiti program JustNN. Program može vrlo jednostavno učitati podatke i izraditi višeslojnu neuronsku mrežu koja će učiti iz tih podataka. Iz seta ulaznih podataka je moguće odrediti manji dio koji će služiti kao set za provjeru izlaznih vrijednosti kako bi se greška svela na što manju vrijednost. Nakon procesa učenja, u programu se može vidjeti koji parametri najviše utječu na promjenu izlaznih vrijednosti. Izlazna vrijednost neuronske mreže u ovom radu je indeks proizvodnosti. U ovom radu će se razmatrati uspješnost frakturiranja prema povećanju indeksa proizvodnosti, tj. prema vrijednosti omjera indeksa proizvodnosti prije i poslije frakturiranja.

Prije izrade neuronske mreže, potrebno je napraviti set podataka za učenje. Set za učenje treba sadržavati velik broj i raspon podataka kako bi mreža nakon učenja davala što točnije rezultate. Za izradu seta podataka za učenje u ovom radu se koristio program

PROSPER. To je program za modeliranje proizvodnih karakteristika bušotina, dizajna i optimizaciju proizvodnje. U ovom radu će se koristiti za izračun vrijednosti indeksa proizvodnosti za niz različitih parametara. Indeks proizvodnosti se može definirati sljedećom jednačinom:

$$J = \frac{q}{p_e - p_{wf}} \quad (4.1)$$

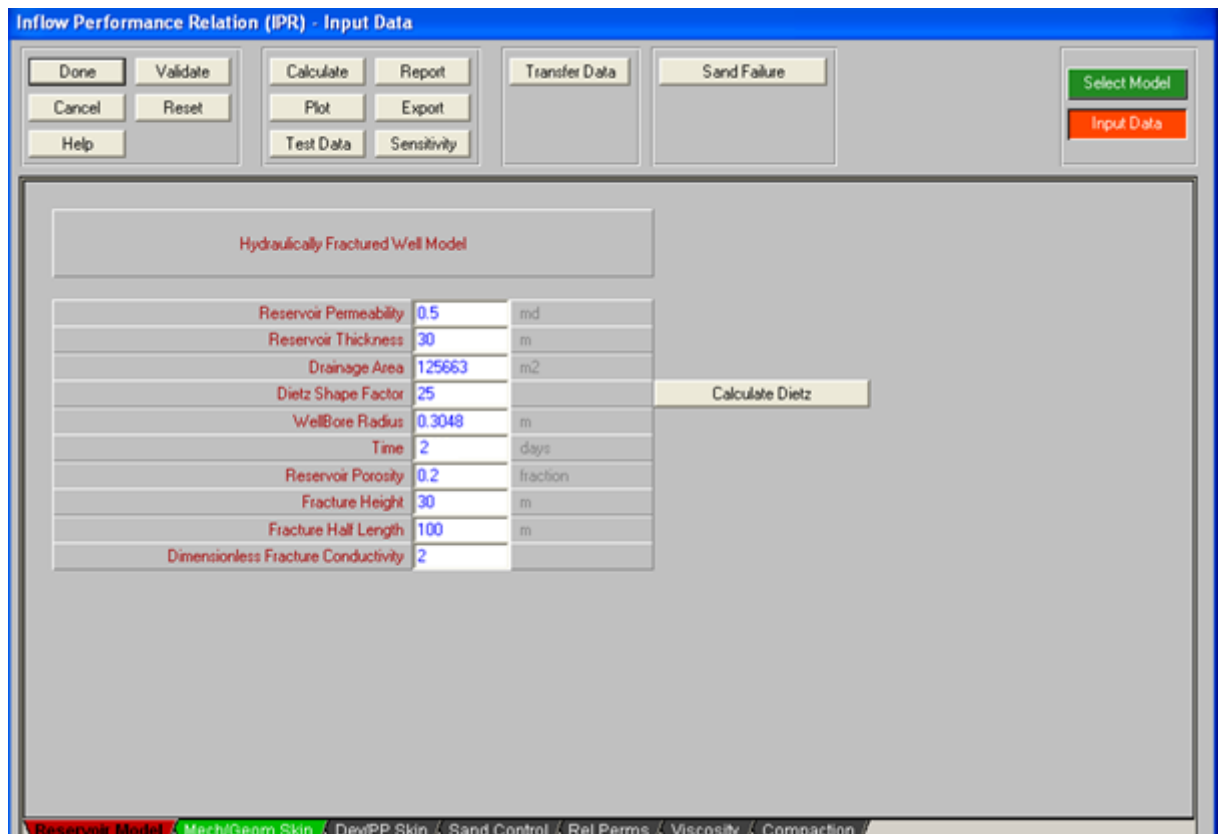
pri čemu je:

J – indeks proizvodnosti, m³/dan/bar

q – proizvodnja nafte, m³/dan

p_e – ležišni tlak na granici crpljenja, bar

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



Slika 4-3. Prikaz sučelja programa PROSPER

U programu PROSPER su izrađena dva seta podataka koji će kasnije postati setovi za učenje neuronske mreže u programu JustNN. Jedan set podataka se odnosi na nefrakturiranu bušotinu, a drugi na frakturiranu bušotinu. Pomoću PROSPERA, za oba seta podataka se računa vrijednost indeksa proizvodnosti bušotine. U tablici 4-4. se mogu vidjeti

parametri koji su se mijenjali prilikom izračuna indeksa proizvodnosti, kao i njihove vrijednosti. U početku je uz ove parametre bila razmatrana i poroznost, no u PROSPERu se pokazalo da ona nema nikakav utjecaj na indeks proizvodnosti te je izbačena. Kod oba seta podataka su pretpostavljene vrijednosti drenažnog radijusa, radijusa bušotine, vremena, skin faktor i Dietzov faktor oblika bušotine te se njihove vrijednosti mogu vidjeti u tablici 4-5.

Tablica 4-4. Raspon vrijednosti parametara za izradu ulaznog seta podataka neuronske mreže

| propusnost (mD) | tlak (bar) | temperatura (°C) | zasićenje vodom (%) | debljina ležišta (m) |
|-----------------|------------|------------------|---------------------|----------------------|
| 5 | 90 | 80 | 20 | 10 |
| 10 | 150 | 110 | 40 | 30 |
| 50 | 220 | 140 | - | 60 |
| 100 | - | - | - | - |

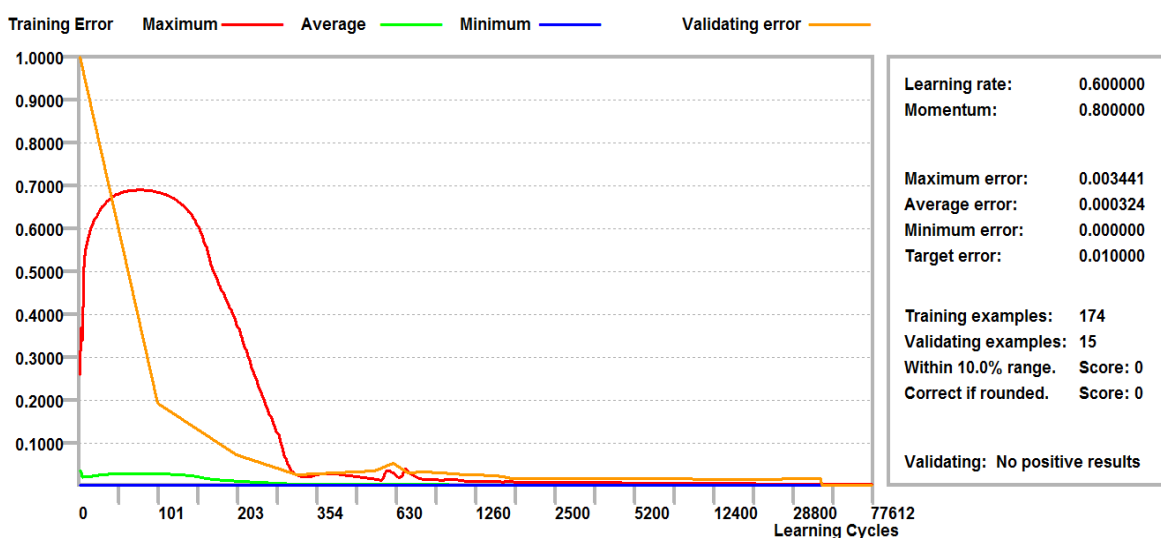
Tablica 4-5. Konstantne vrijednosti prilikom proračuna u programu Prosper i njihove vrijednosti

| | | |
|--------------------------------------|---------|--------------------------------|
| područje dreniranja | 126 663 | m ² |
| Dietzov faktor oblika | 25 | - |
| radijus bušotine | 0,3048 | m |
| vrijeme | 2 | dan |
| poroznost | 0,2 | dio cijelog |
| poluduljina frakture | 100 | m |
| bezdimenzionalna vodljivost frakture | 2 | - |
| skin faktor | 2 | - |
| GOR | 96 | m ³ /m ³ |

Na temelju tablice 4-4., napravljene su sve kombinacije parametara te je u PROSPERU-u izračunat njihov indeks proizvodnosti. Tako je napravljen set od 216 podataka koje će neuronska mreža koristiti za učenje predviđanja indeksa proizvodnosti za frakturirane i nefrakturirane bušotine.

Nakon izrade ulaznog seta podataka, može se koristiti program JustNN za izradu neuronske mreže. U program su se učitale vrijednosti ulaznih parametara dobivenih iz

PROSPER-a za frakturirane i nefrakturirane bušotine. Navedeni set podataka je označen kao set za učenje. Nakon što se učitao set za učenje neuronske mreže, u program se učitao set podataka iz tablica 4-1. i 4-2. i naznačio se kao set podataka za koje je potrebno napraviti predikciju rezultata tj. potrebno pretpostaviti budući indeks proizvodnosti. Napravljena je neuronska mreža s jednim skrivenim slojem, 174 primjera za treniranje i 15 primjera za validaciju podataka. Na slici 4-4. se može vidjeti kako je tekao proces učenja i kako se s brojem ciklusa učenja smanjivala pogreška. Na kraju procesa predikcije rezultata, u programu se mogu vidjeti relativne važnosti svih ulaznih parametara na izlazne vrijednosti tj. indeks proizvodnosti (slika 4-5).



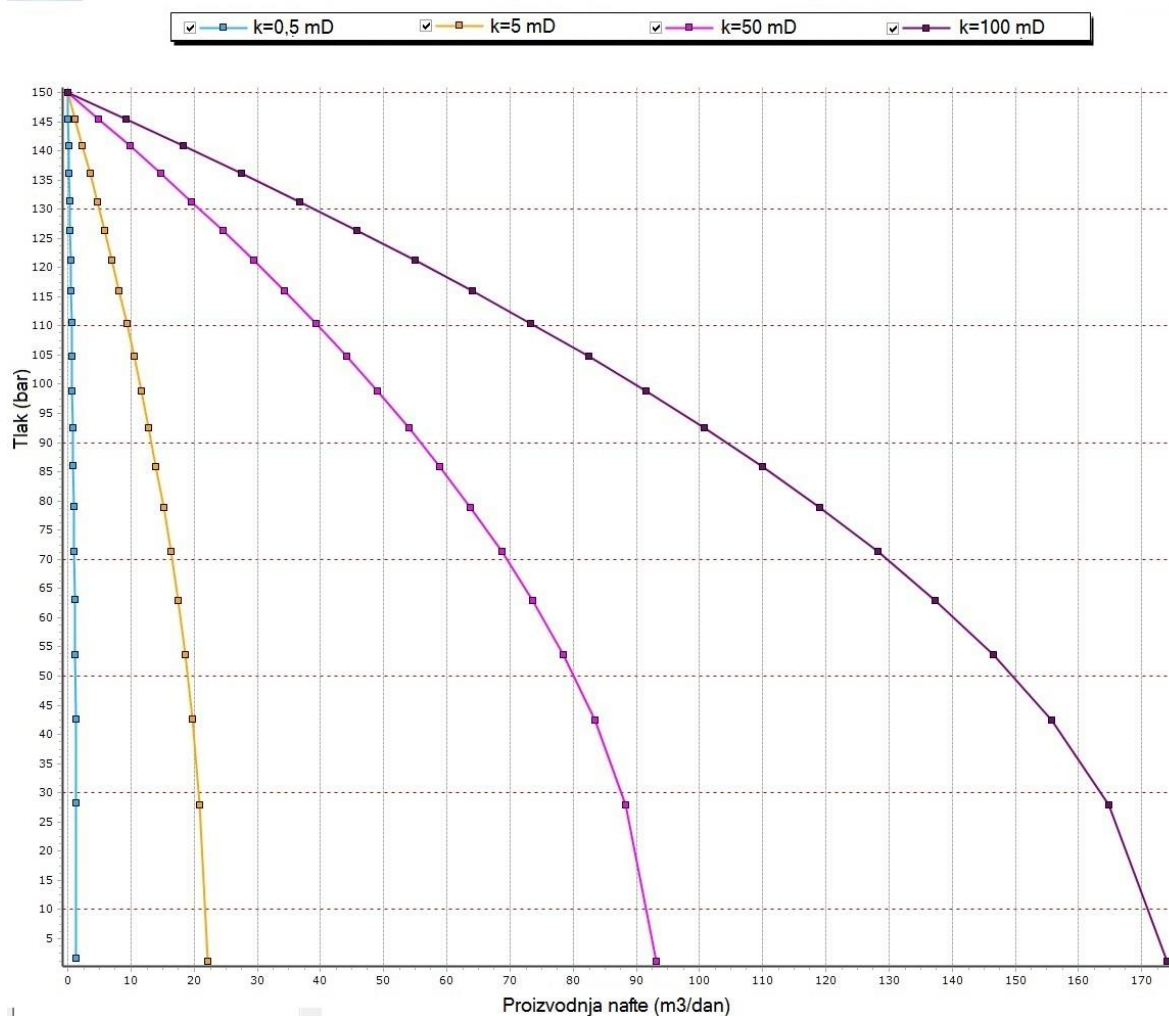
Slika 4-4. Učenje neuronske mreže u programu JustNN

svi podaci v2 - ext-t2dan.tvq 43716 cycles. Target error 0.0100 Average training error 0.000365
The first 5 of 5 Inputs in descending order.

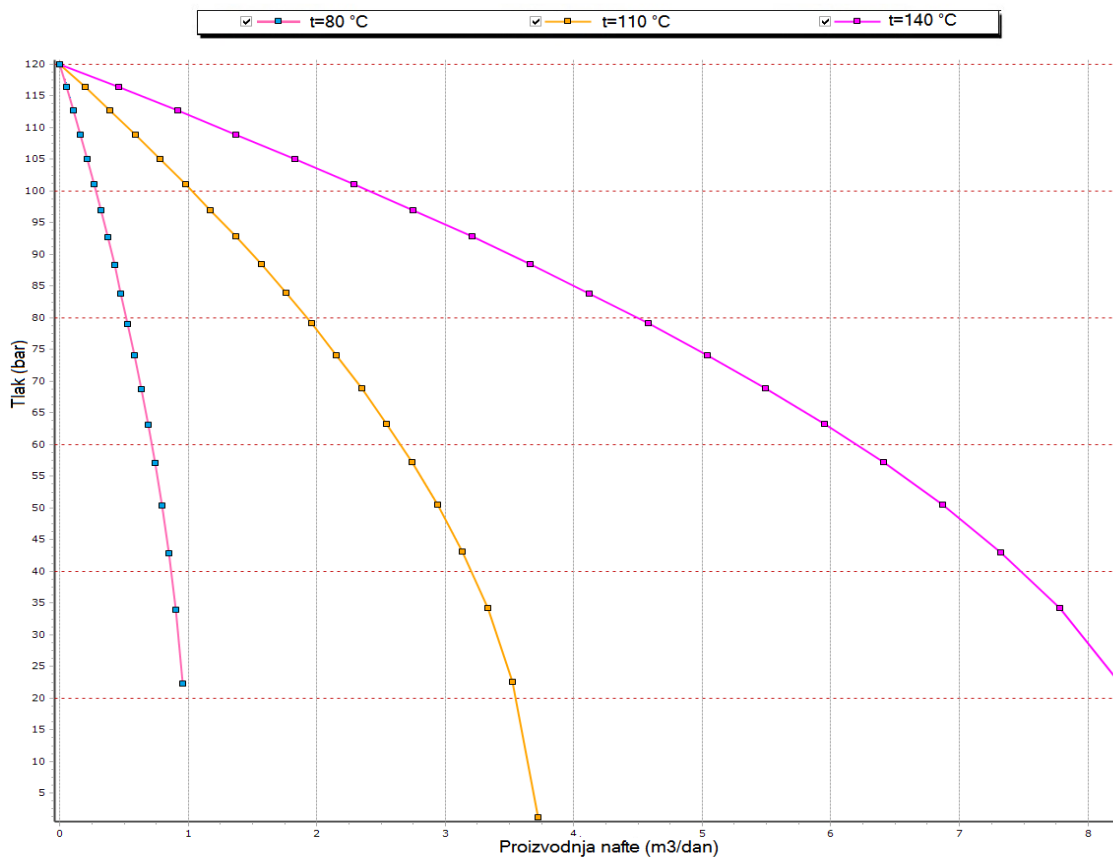
| Column | Input Name | Importance | Relative Importance |
|--------|----------------------|------------|---|
| 0 | Propusnost | 113.9470 | <div style="width: 100%; height: 10px; background-color: green;"></div> |
| 1 | Temperatura | 38.4835 | <div style="width: 33%; height: 10px; background-color: green;"></div> |
| 4 | Debljina ležišta | 27.3733 | <div style="width: 24%; height: 10px; background-color: green;"></div> |
| 2 | Tlak | 12.9597 | <div style="width: 11%; height: 10px; background-color: green;"></div> |
| 5 | Proizvodni udio vode | 0.1184 | <div style="width: 0.1%; height: 10px; background-color: green;"></div> |

Slika 4-5. Relativna važnost parametara u neuronskoj mreži za predviđanje vrijednosti indeksa proizvodnosti

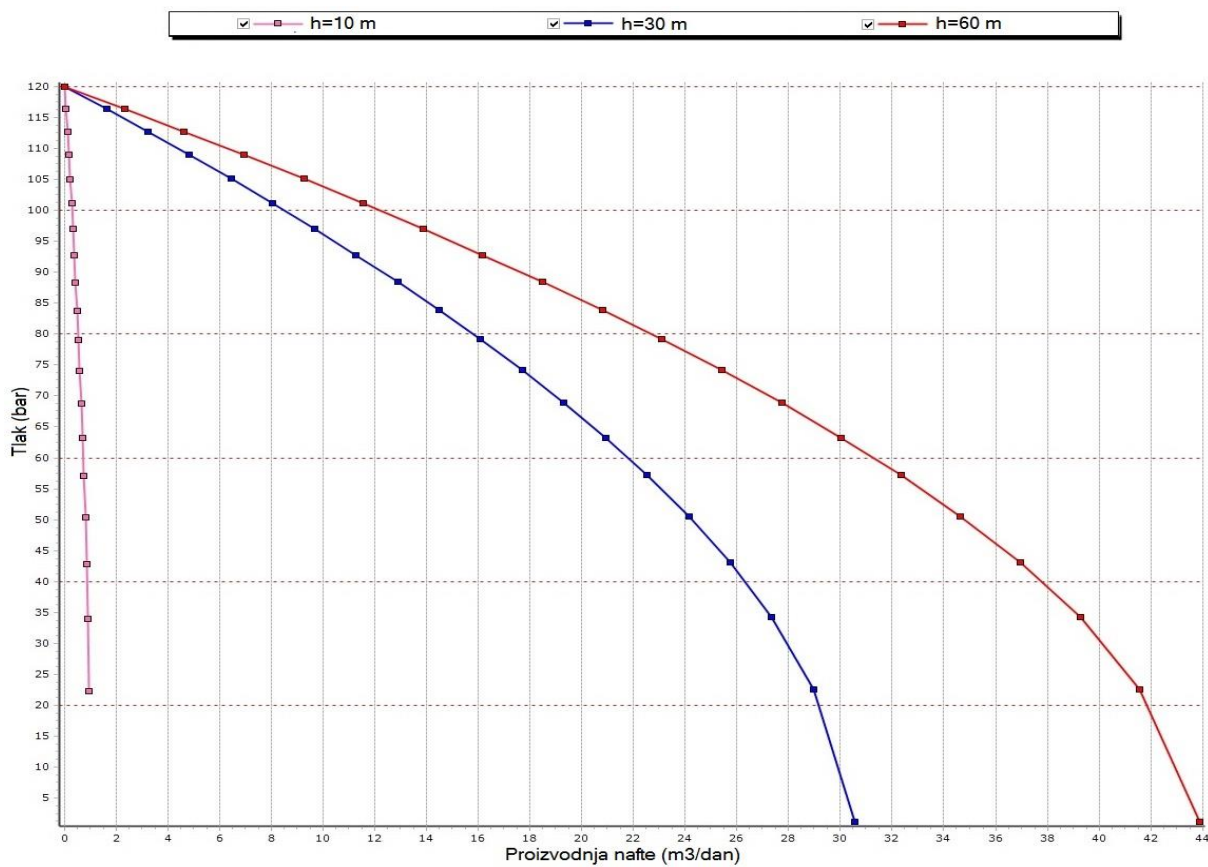
U programu PROSPER može se na temelju krivulja indeksa proizvodnosti odrediti koji parametar najviše utječe na njegovu vrijednost. Najutjecajniji parametar će najviše mijenjati izgled krivulje indeksa proizvodnosti. Na slikama 4-6. do 4-10. se prikazuje utjecaj pojedinog parametra na izgled krivulje. Dobivene su tako što se mijenjao samo jedan parametar, dok su ostali bili konstantni. Prema krivuljama može se zaključiti da propusnost ležišta ima najveći utjecaj na vrijednosti indeksa proizvodnosti, što pokazuje i relativna važnost parametara u neuronskoj mreži na slici 4-5. Najmanji utjecaj ima proizvodni udio vode koji je gotovo zanemariv.



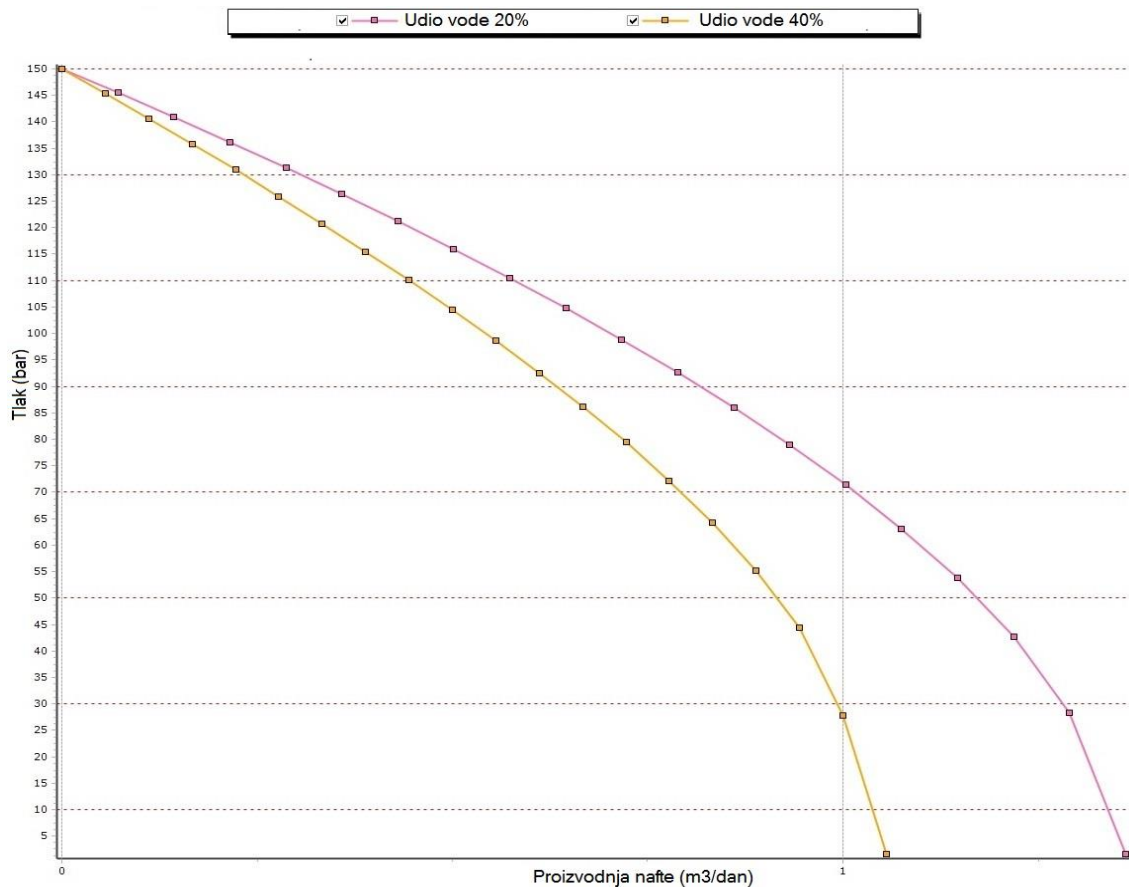
Slika 4-6. Utjecaj propusnosti na krivulju indeksa proizvodnosti



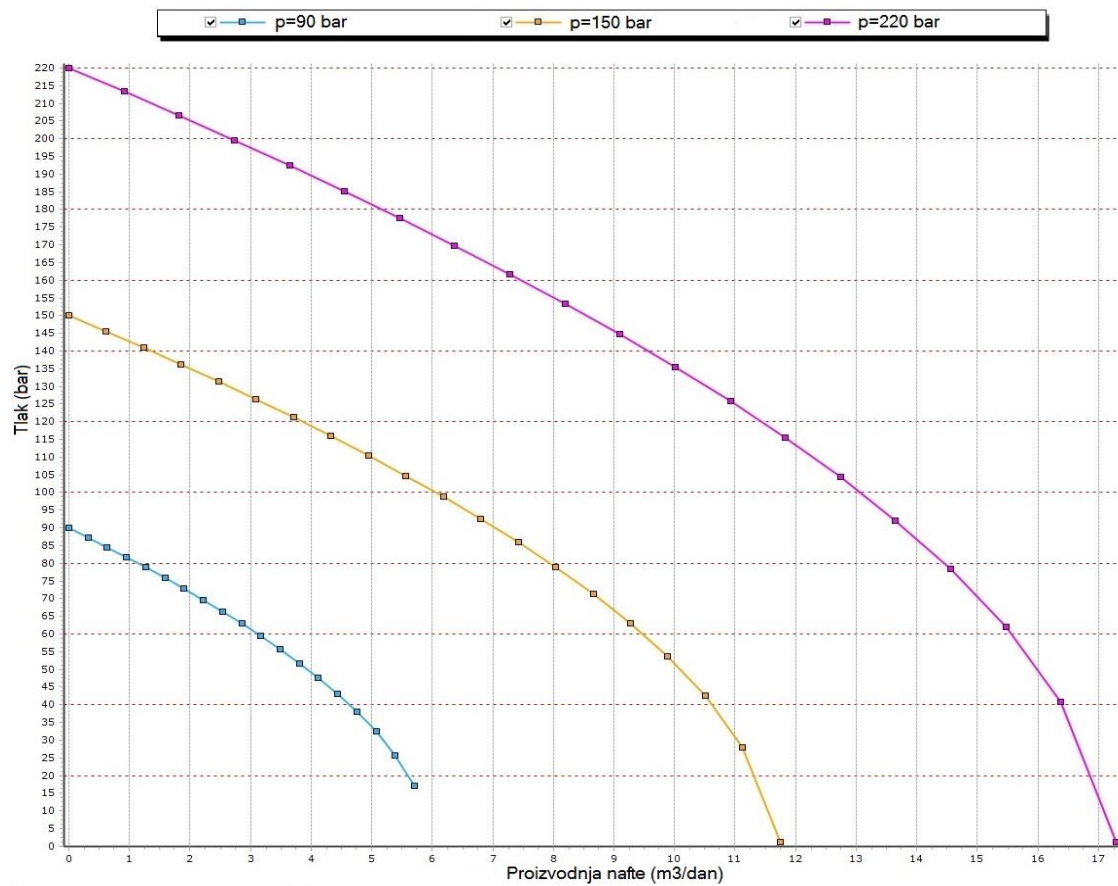
Slika 4-7. Utjecaj temperature na krivulju indeksa proizvodnosti



Slika 4-8. Utjecaj debljine ležišta na krivulju indeksa proizvodnosti



Slika 4-9. Utjecaj udjela proizvedene vode na krivulju indeksa proizvodnosti



Slika 4-10. Utjecaj ležišnog tlaka na krivulju indeksa proizvodnosti

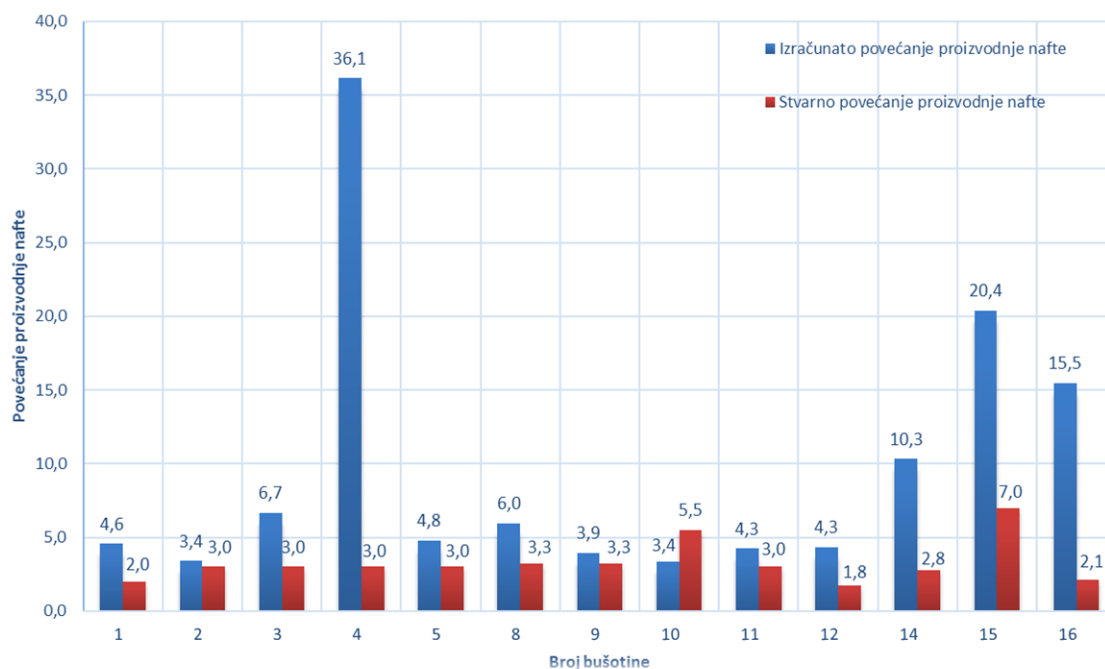
Iz literature su dostupne vrijednosti proizvodnje nafte prije i poslije frakturiranja. Neuronska mreža daje vrijednosti indeksa proizvodnosti prije i poslije frakturiranja. Kako bi se ove vrijednosti mogle usporediti, potrebno je prvo razmotriti njihov međusobni odnos. Ako se pretpostavi da će vrijednost potisnog tlaka u ležištu tj. razlika između ležišnog tlaka i tlaka u bušotini biti konstantna prije i poslije frakturiranja, onda će i omjer indeksa proizvodnosti prije i poslije frakturiranja te omjer proizvodnje nafte prije i poslije frakturiranja biti jednaki. Pomoću ove pretpostavke se može, računanjem indeksa proizvodnosti prije i poslije frakturiranja, pretpostaviti proizvodnja nakon frakturiranja. U tablici 4-6. se nalaze vrijednosti omjera indeksa proizvodnosti koji su dobiveni neuronskom mrežom te vrijednosti omjera proizvodnje nafte koje su otprije poznate.

Tablica 4-6. Usporedba vrijednosti omjera indeksa proizvodnosti i omjera proizvodnje nafte

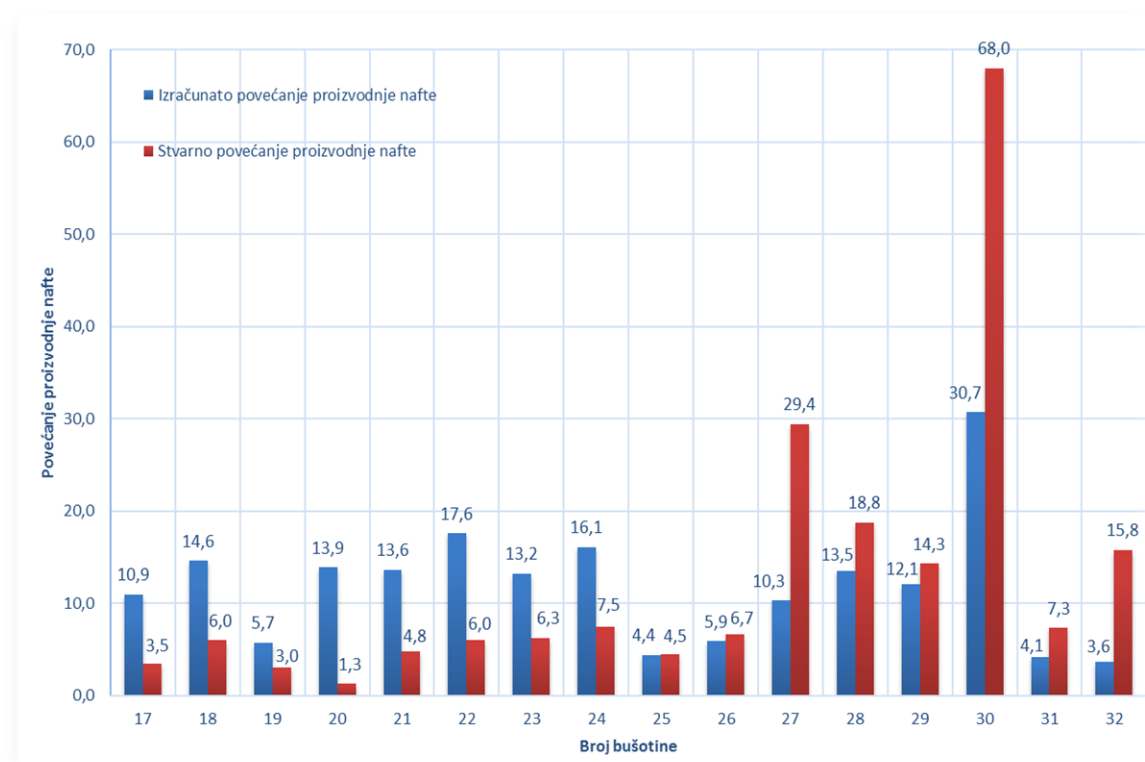
| n | indeks proizvodnosti | | | proizvodnja nafte | | |
|----|----------------------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|-------|
| | prije frakturiranja | nakon frakturiranja | omjer | prije frakturiranja | nakon frakturiranja | omjer |
| 1 | 1,5 | 7,1 | 4,6 | 20,0 | 40,0 | 2,0 |
| 2 | 9,0 | 30,5 | 3,4 | 2,8 | 8,3 | 3,0 |
| 3 | 8,7 | 57,8 | 6,7 | 2,8 | 8,3 | 3,0 |
| 4 | 13,6 | 491,8 | 36,1 | 2,8 | 8,3 | 3,0 |
| 5 | 13,6 | 65,4 | 4,8 | 2,8 | 8,3 | 3,0 |
| 6 | 12,0 | 71,4 | 5,9 | - | - | - |
| 7 | 5,7 | 46,8 | 8,2 | - | - | - |
| 8 | 13,0 | 77,5 | 6,0 | 4,0 | 13,0 | 3,3 |
| 9 | 32,0 | 126,3 | 3,9 | 4,0 | 13,0 | 3,3 |
| 10 | 47,2 | 159,2 | 3,4 | 2,0 | 11,0 | 5,5 |
| 11 | 68,5 | 291,3 | 4,3 | 4,0 | 12,0 | 3,0 |
| 12 | 68,5 | 297,0 | 4,3 | 8,0 | 14,0 | 1,8 |
| 13 | 36,5 | 121,5 | 3,3 | 11,0 | - | - |
| 14 | 3,1 | 31,6 | 10,3 | 4,0 | 11,0 | 2,8 |
| 15 | 24,1 | 491,8 | 20,4 | 1,0 | 7,0 | 7,0 |
| 16 | 2,3 | 36,1 | 15,5 | 7,0 | 15,0 | 2,1 |
| 17 | 0,5 | 5,6 | 10,9 | 2,0 | 7,0 | 3,5 |
| 18 | 1,8 | 26,5 | 14,6 | 85,0 | 509,0 | 6,0 |
| 19 | 1,0 | 6,0 | 5,7 | 3,0 | 9,0 | 3,0 |
| 20 | 0,3 | 4,2 | 13,9 | 40,0 | 50,0 | 1,3 |
| 21 | 0,4 | 5,0 | 13,6 | 8,0 | 38,0 | 4,8 |
| 22 | 0,4 | 7,3 | 17,6 | 22,0 | 133,0 | 6,0 |
| 23 | 0,4 | 4,7 | 13,2 | 12,0 | 75,0 | 6,3 |
| 24 | 2,5 | 40,1 | 16,1 | 12,0 | 90,0 | 7,5 |

| n | indeks proizvodnosti | | | proizvodnja nafte | | |
|----|------------------------|------------------------|-------|------------------------|------------------------|-------|
| | prije frakturiranja | nakon frakturiranja | omjer | prije frakturiranja | nakon frakturiranja | omjer |
| 25 | 111,3 | 491,8 | 4,4 | 2,0 | 9,0 | 4,5 |
| 26 | 3,3 | 19,4 | 5,9 | 4,5 | 30,0 | 6,7 |
| 27 | 0,3 | 3,3 | 10,3 | 1,7 | 50,0 | 29,4 |
| 28 | 0,6 | 8,1 | 13,5 | 0,8 | 15,0 | 18,8 |
| 29 | 1,6 | 19,4 | 12,1 | 3,5 | 50,0 | 14,3 |
| 30 | 0,6 | 17,8 | 30,7 | 0,5 | 34,0 | 68,0 |
| 31 | 1,1 | 4,7 | 4,1 | 4,9 | 36,0 | 7,3 |
| 32 | 1,9 | 6,7 | 3,6 | 1,9 | 30,0 | 15,8 |

Predviđanjem vrijednosti indeksa proizvodnosti primjenom neuronske mreže i računanjem omjera indeksa proizvodnosti prije i poslije frakturiranja pokušalo se predvidjeti buduće povećanje proizvodnje nafte iz bušotina. Cilj toga je izračunati koje će bušotine dati najbolje rezultate nakon frakturiranja, tj. koje je bušotine najisplativije stimulirati od svih bušotina s polja. Iz analize su izbačene bušotine broj 6, 7 i 13 zbog nedostatka podataka o proizvodnji nakon frakturiranja



Slika 4-11. Usporedba izračunatog i stvarnog povećanja proizvodnje nafte



Slika 4-12. Usporedba izračunatog i stvarnog povećanja proizvodnje nafte

Iz slika 4-11. i 4-12. se može vidjeti da računate vrijednosti odstupaju od stvarnih vrijednosti. Odstupanje vrijednosti neuronske mreže je unutar 50% greške za devet bušotina, dok je unutar 25% za samo pet bušotina. Može se primijetiti da je neuronska mreža dala bolja predviđanja za bušotine iz Panonskog bazena, nego za one dobivene iz literature. Nemogućnost neuronske mreže da točnije predvidi proizvodnju iz bušotina se može prepisati malom setu ulaznih podataka. Za učenje neuronske mreže je potreban velik broj ulaznih podataka, pogotovo kad nema jasne veze među njima. Osim toga, za određene bušotine su nedostajale ključne vrijednosti poput tlaka ili temperature, što na ovako malom setu ulaznih podataka čini veliku razliku.

8. ZAKLJUČAK

Tehnologija frakturiranja su u naftnoj industriji uspješno izvodi već desetljećima. Odabir područja u kojem će se frakturirati ležište predstavlja problem koji ovisi od ležišta do ležišta. Ispravnim odabirom bušotine za frakturiranje se postiže povećanje proizvodnje ugljikovodika uz manja ulaganja. Za optimalan odabir kandidata, potrebno je poznavati parametre koji na njega utječu. Postoje mnogi radovi koji navode bitne parametre za frakturiranje, no do danas ne postoje jedinstvene vrijednosti parametara koji su primjenjivi na sva ležišta. U ovom radu je napravljena usporedba vrijednosti parametara koje je naveo Yang za odabir optimalnih kandidata i vrijednosti bušotina koje su se frakturirale kao odabrani optimalni kandidati na proizvodnom polju. Analiza je pokazala da se samo tri bušotine od trideset dvije promatrane frakturirane bušotine smatraju optimalnim kandidatom. Iako se druge bušotine ne smatraju optimalnim kandidatima, frakturiranjem se povećala njihova proizvodnja te autori smatraju ta frakturiranja uspješnima.

Neuronska mreža se odavno koristi u različitim industrijama te je našla svoju primjenu i u naftnoj industriji. Primjenjuje se za predviđanje proizvodnje nafte nakon frakturiranja zbog velike količine ulaznih podataka koji nisu povezani jasnim vezama. Razni autori, poput Yina i Wua te Yanga, pokazuju njihovu primjenu za odabir kandidata za frakturiranje uz obećavajuće rezultate. Za predviđanje optimalnih kandidata i njihovo povećanje proizvodnje nakon frakturiranja u ovom radu koristila se neuronska mreža. Pomoću ulaznog seta podataka izrađenog u programu PROSPER se pokušalo primijeniti neuronsku mrežu, te predvidjeti promjenu indeksa proizvodnosti, samim time i povećanje proizvodnje uz pretpostavku konstantne depresije na sloj. Izračunati indeksi proizvodnosti dobiveni pomoću neuronske mreže se nisu dobro poklopili sa stvarnim podacima proizvodnje nafte. Samo je devet bušotina od dvadeset devet bilo unutar 50% greške. Ovakva odstupanja se mogu pripisati manjku dostupnih podataka za učenje mreže, kao i složenosti međusobne povezanosti parametara koji utječu na rezultate frakturiranja. Podaci dobiveni iz neuronske mreže i programa PROSPER nam daju zaključiti da su jedni parametri važniji od drugih. Propusnost se smatra najutjecajnijim parametrom, što ukazuje neuronska mreža i program PROSPER. Nakon propusnosti, najvažnijim parametrima se smatraju temperatura i debljina ležišta, dok se utjecaj zasićenja vodom smatra zanemarivim.

9. LITERATURA

1. Dalbelo Bašić, B., Čupić, M. and Šnajder, J., 2008. Umjetne neuronske mreže. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, Hrvatska.
2. Burnstad, R.G., Martin, A.N., Stemberger, D.J. and Purwanto, B., 2004, January. A case study of a mature field redevelopment using propped hydraulic fracturing. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
3. Bustin, B. and Sierra, L., 2009. First regional selective packerless acid fracture stimulation with coiled tubing: a documented case history from Saudi Arabia. SPE paper, (120938).
4. Hadi, G.S. and Arifin, M.A., 2000, January. Implementation of hydraulic fracturing to improve oil production and to solve sand problem (case study: Kenali asam field). In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
5. Heydarabadi, F.R., Moghadasi, J., Safian, G. and Ashena, R., 2010, January. Criteria for selecting a candidate well for hydraulic fracturing. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
6. Lee, B.O. and Salter, G.B., 1989, January. Evaluation of Hydraulic Fracturing Applications in Central Australia. In SPE Asia-Pacific Conference. Society of Petroleum Engineers.
7. Martin, A.N. and Economides, M., 2010, January. Best practices for candidate selection, design and evaluation of hydraulic fracture treatments. In SPE Production and Operations Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
8. Nauroy, Jean-François. Geomechanics applied to the petroleum industry. Editions Technip, 2011.
9. Nikurova, L.F., Surtaev, V.N. and Yamilov, R.R., 2006, January. Enhancing Well Productivity After Hydraulic Fracturing in the Priobskoe Oilfield (Russian). In SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
10. Nor-Azlan, N., Sanchez, A.I. and Diyashev, I.R., 2003, January. Massive Hydraulic Fracturing-A Case History in Western Siberia, Russia. In SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific. Society of Petroleum Engineers.
11. Sagar, R.K., Pandey, A.K., Vinod, A.K., Prasad, D., Panse, R., Nugraha, I. and Taneja, P., 2008, January. Optimized Hydraulic Fracturing for the Gandhar Field. In SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
12. Schubarth, S.K., Yeager, R.R. and Murphy, D.W., 1998, January. Advanced fracturing and reservoir description techniques improves economics in Utah, Green River formation oil project. In SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Society of Petroleum Engineers.
13. Szymik, B. (2011). Neuron Diagram & Types | ASU - Ask A Biologist. Askabiologist.asu.edu. dostupno na: <https://askabiologist.asu.edu/neuron-anatomy/> [01. 02. 2017].

14. Yang, E., 2009, August. Selection of target wells and layers for fracturing with fuzzy mathematics method. In Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD'09. Sixth International Conference on (Vol. 4, pp. 366-369). IEEE.
15. Yin, D. and Wu, T., 2009, December. Notice of Retraction Optimizing Well for Fracturing by Fuzzy Analysis Method of Applying Computer. In Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on (pp. 286-290). IEEE.
16. York, D.J. and Meyer, R.K., 1992. Hydraulic Fracturing In China. Journal of Canadian Petroleum Technology, 31(07).

Internetski izvori

17. CS231n. 2017. dostupno na: <http://cs231n.github.io/neural-networks-1> [25. 01. 2017.]

Hvala tvrtki Petroleum Experts Limited na donaciji akademske licence Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu za programski paket IPM, u sklopu kojeg se nalazi program PROSPER, korišten za izradu ovog diplomskog rada.

I would like to thank the Petroleum Experts Company for donating academic licence to the University of Zagreb, Faculty of Mining Geology and Petroleum Engineering for IPM software that was used in this thesis.

DODATAK

Set za učenje neuronske mreže iz programa Prosper nakon frakturiranja

| Broj mogućnost | Propusnost (mD) | Temperatura (°C) | Tlak (bar) | Poroznost (%) | Debljina ležišta (m) | Udio vode (%) | Indeks proizvodnost (m ³ /dan/bar) |
|----------------|-----------------|------------------|------------|---------------|----------------------|---------------|---|
| 1 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 10 | 20 | 0,17 |
| 2 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 10 | 40 | 0,17 |
| 3 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 30 | 20 | 0,50 |
| 4 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 30 | 40 | 0,50 |
| 5 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 60 | 20 | 1,00 |
| 6 | 0,5 | 80 | 90 | 20 | 60 | 40 | 1,00 |
| 7 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 10 | 20 | 0,21 |
| 8 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 10 | 40 | 0,21 |
| 9 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 30 | 20 | 0,62 |
| 10 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 30 | 40 | 0,62 |
| 11 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 60 | 20 | 1,25 |
| 12 | 0,5 | 80 | 150 | 20 | 60 | 40 | 1,25 |
| 13 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 10 | 20 | 0,20 |
| 14 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 10 | 40 | 0,20 |
| 15 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 30 | 20 | 0,59 |
| 16 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 30 | 40 | 0,59 |
| 17 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 60 | 20 | 1,18 |
| 18 | 0,5 | 80 | 220 | 20 | 60 | 40 | 1,18 |
| 19 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 10 | 20 | 0,25 |
| 20 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 10 | 40 | 0,25 |
| 21 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 30 | 20 | 0,75 |
| 22 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 30 | 40 | 0,75 |
| 23 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 60 | 20 | 1,51 |
| 24 | 0,5 | 110 | 90 | 20 | 60 | 40 | 1,51 |
| 25 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 10 | 20 | 0,30 |
| 26 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 10 | 40 | 0,30 |
| 27 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 30 | 20 | 0,89 |
| 28 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 30 | 40 | 0,89 |
| 29 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 60 | 20 | 1,78 |
| 30 | 0,5 | 110 | 150 | 20 | 60 | 40 | 1,78 |
| 31 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 10 | 20 | 0,29 |
| 32 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 10 | 40 | 0,29 |
| 33 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 30 | 20 | 0,87 |
| 34 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 30 | 40 | 0,87 |
| 35 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 60 | 20 | 1,73 |
| 36 | 0,5 | 110 | 220 | 20 | 60 | 40 | 1,73 |
| 37 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 10 | 20 | 0,36 |
| 38 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 10 | 40 | 0,36 |

| | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|----|----|----|-------|
| 39 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 30 | 20 | 1,09 |
| 40 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 30 | 40 | 1,09 |
| 41 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 60 | 20 | 2,18 |
| 42 | 0,5 | 140 | 90 | 20 | 60 | 40 | 2,18 |
| 43 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 10 | 20 | 0,41 |
| 44 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 10 | 40 | 0,41 |
| 45 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 30 | 20 | 1,23 |
| 46 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 30 | 40 | 1,23 |
| 47 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 60 | 20 | 2,46 |
| 48 | 0,5 | 140 | 150 | 20 | 60 | 40 | 2,46 |
| 49 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 10 | 20 | 0,40 |
| 50 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 10 | 40 | 0,40 |
| 51 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 30 | 20 | 1,20 |
| 52 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 30 | 40 | 1,20 |
| 53 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 60 | 20 | 2,41 |
| 54 | 0,5 | 140 | 220 | 20 | 60 | 40 | 2,41 |
| 55 | 10 | 80 | 90 | 20 | 10 | 20 | 3,33 |
| 56 | 10 | 80 | 90 | 20 | 10 | 40 | 3,33 |
| 57 | 10 | 80 | 90 | 20 | 30 | 20 | 10,00 |
| 58 | 10 | 80 | 90 | 20 | 30 | 40 | 10,00 |
| 59 | 10 | 80 | 90 | 20 | 60 | 20 | 20,00 |
| 60 | 10 | 80 | 90 | 20 | 60 | 40 | 20,00 |
| 61 | 10 | 80 | 150 | 20 | 10 | 20 | 4,16 |
| 62 | 10 | 80 | 150 | 20 | 10 | 40 | 4,16 |
| 63 | 10 | 80 | 150 | 20 | 30 | 20 | 12,49 |
| 64 | 10 | 80 | 150 | 20 | 30 | 40 | 12,49 |
| 65 | 10 | 80 | 150 | 20 | 60 | 20 | 24,98 |
| 66 | 10 | 80 | 150 | 20 | 60 | 40 | 24,98 |
| 67 | 10 | 80 | 220 | 20 | 10 | 20 | 3,95 |
| 68 | 10 | 80 | 220 | 20 | 10 | 40 | 3,95 |
| 69 | 10 | 80 | 220 | 20 | 30 | 20 | 11,84 |
| 70 | 10 | 80 | 220 | 20 | 30 | 40 | 11,84 |
| 71 | 10 | 80 | 220 | 20 | 60 | 20 | 23,69 |
| 72 | 10 | 80 | 220 | 20 | 60 | 40 | 23,69 |
| 73 | 10 | 110 | 90 | 20 | 10 | 20 | 5,03 |
| 74 | 10 | 110 | 90 | 20 | 10 | 40 | 5,03 |
| 75 | 10 | 110 | 90 | 20 | 30 | 20 | 15,09 |
| 76 | 10 | 110 | 90 | 20 | 30 | 40 | 15,09 |
| 77 | 10 | 110 | 90 | 20 | 60 | 20 | 30,18 |
| 78 | 10 | 110 | 90 | 20 | 60 | 40 | 30,18 |
| 79 | 10 | 110 | 150 | 20 | 10 | 20 | 5,94 |
| 80 | 10 | 110 | 150 | 20 | 10 | 40 | 5,94 |
| 81 | 10 | 110 | 150 | 20 | 30 | 20 | 17,83 |
| 82 | 10 | 110 | 150 | 20 | 30 | 40 | 17,83 |
| 83 | 10 | 110 | 150 | 20 | 60 | 20 | 35,65 |
| 84 | 10 | 110 | 150 | 20 | 60 | 40 | 35,65 |

| | | | | | | | |
|-----|----|-----|-----|----|----|----|--------|
| 85 | 10 | 110 | 220 | 20 | 10 | 20 | 5,77 |
| 86 | 10 | 110 | 220 | 20 | 10 | 40 | 5,77 |
| 87 | 10 | 110 | 220 | 20 | 30 | 20 | 17,30 |
| 88 | 10 | 110 | 220 | 20 | 30 | 40 | 17,30 |
| 89 | 10 | 110 | 220 | 20 | 60 | 20 | 34,60 |
| 90 | 10 | 110 | 220 | 20 | 60 | 40 | 34,60 |
| 91 | 10 | 140 | 90 | 20 | 10 | 20 | 7,15 |
| 92 | 10 | 140 | 90 | 20 | 10 | 40 | 7,15 |
| 93 | 10 | 140 | 90 | 20 | 30 | 20 | 21,44 |
| 94 | 10 | 140 | 90 | 20 | 30 | 40 | 21,44 |
| 95 | 10 | 140 | 90 | 20 | 60 | 20 | 42,88 |
| 96 | 10 | 140 | 90 | 20 | 60 | 40 | 42,88 |
| 97 | 10 | 140 | 150 | 20 | 10 | 20 | 8,20 |
| 98 | 10 | 140 | 150 | 20 | 10 | 40 | 8,20 |
| 99 | 10 | 140 | 150 | 20 | 30 | 20 | 24,59 |
| 100 | 10 | 140 | 150 | 20 | 30 | 40 | 24,59 |
| 101 | 10 | 140 | 150 | 20 | 60 | 20 | 49,18 |
| 102 | 10 | 140 | 150 | 20 | 60 | 40 | 49,18 |
| 103 | 10 | 140 | 220 | 20 | 10 | 20 | 8,09 |
| 104 | 10 | 140 | 220 | 20 | 10 | 40 | 8,09 |
| 105 | 10 | 140 | 220 | 20 | 30 | 20 | 24,08 |
| 106 | 10 | 140 | 220 | 20 | 30 | 40 | 24,08 |
| 107 | 10 | 140 | 220 | 20 | 60 | 20 | 48,16 |
| 108 | 10 | 140 | 220 | 20 | 60 | 40 | 48,16 |
| 109 | 50 | 80 | 90 | 20 | 10 | 20 | 16,67 |
| 110 | 50 | 80 | 90 | 20 | 10 | 40 | 16,67 |
| 111 | 50 | 80 | 90 | 20 | 30 | 20 | 50,00 |
| 112 | 50 | 80 | 90 | 20 | 30 | 40 | 50,00 |
| 113 | 50 | 80 | 90 | 20 | 60 | 20 | 99,99 |
| 114 | 50 | 80 | 90 | 20 | 60 | 40 | 99,99 |
| 115 | 50 | 80 | 150 | 20 | 10 | 20 | 20,81 |
| 116 | 50 | 80 | 150 | 20 | 10 | 40 | 20,81 |
| 117 | 50 | 80 | 150 | 20 | 30 | 20 | 62,44 |
| 118 | 50 | 80 | 150 | 20 | 30 | 40 | 62,44 |
| 119 | 50 | 80 | 150 | 20 | 60 | 20 | 124,88 |
| 120 | 50 | 80 | 150 | 20 | 60 | 40 | 124,88 |
| 121 | 50 | 80 | 220 | 20 | 10 | 20 | 19,74 |
| 122 | 50 | 80 | 220 | 20 | 10 | 40 | 19,74 |
| 123 | 50 | 80 | 220 | 20 | 30 | 20 | 59,21 |
| 124 | 50 | 80 | 220 | 20 | 30 | 40 | 59,21 |
| 125 | 50 | 80 | 220 | 20 | 60 | 20 | 118,43 |
| 126 | 50 | 80 | 220 | 20 | 60 | 40 | 118,43 |
| 127 | 50 | 110 | 90 | 20 | 10 | 20 | 25,15 |
| 128 | 50 | 110 | 90 | 20 | 10 | 40 | 25,15 |
| 129 | 50 | 110 | 90 | 20 | 30 | 20 | 75,46 |
| 130 | 50 | 110 | 90 | 20 | 30 | 40 | 75,46 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|----|----|----|--------|
| 131 | 50 | 110 | 90 | 20 | 60 | 20 | 150,92 |
| 132 | 50 | 110 | 90 | 20 | 60 | 40 | 150,92 |
| 133 | 50 | 110 | 150 | 20 | 10 | 20 | 29,71 |
| 134 | 50 | 110 | 150 | 20 | 10 | 40 | 29,71 |
| 135 | 50 | 110 | 150 | 20 | 30 | 20 | 89,14 |
| 136 | 50 | 110 | 150 | 20 | 30 | 40 | 89,14 |
| 137 | 50 | 110 | 150 | 20 | 60 | 20 | 178,27 |
| 138 | 50 | 110 | 150 | 20 | 60 | 40 | 178,27 |
| 139 | 50 | 110 | 220 | 20 | 10 | 20 | 28,83 |
| 140 | 50 | 110 | 220 | 20 | 10 | 40 | 28,83 |
| 141 | 50 | 110 | 220 | 20 | 30 | 20 | 86,50 |
| 142 | 50 | 110 | 220 | 20 | 30 | 40 | 86,50 |
| 143 | 50 | 110 | 220 | 20 | 60 | 20 | 173,01 |
| 144 | 50 | 110 | 220 | 20 | 60 | 40 | 173,01 |
| 145 | 50 | 140 | 90 | 20 | 10 | 20 | 35,73 |
| 146 | 50 | 140 | 90 | 20 | 10 | 40 | 35,73 |
| 147 | 50 | 140 | 90 | 20 | 30 | 20 | 107,20 |
| 148 | 50 | 140 | 90 | 20 | 30 | 40 | 107,20 |
| 149 | 50 | 140 | 90 | 20 | 60 | 20 | 214,40 |
| 150 | 50 | 140 | 90 | 20 | 60 | 40 | 214,40 |
| 151 | 50 | 140 | 150 | 20 | 10 | 20 | 40,99 |
| 152 | 50 | 140 | 150 | 20 | 10 | 40 | 40,99 |
| 153 | 50 | 140 | 150 | 20 | 30 | 20 | 122,96 |
| 154 | 50 | 140 | 150 | 20 | 30 | 40 | 122,96 |
| 155 | 50 | 140 | 150 | 20 | 60 | 20 | 245,91 |
| 156 | 50 | 140 | 150 | 20 | 60 | 40 | 245,91 |
| 157 | 50 | 140 | 220 | 20 | 10 | 20 | 40,13 |
| 158 | 50 | 140 | 220 | 20 | 10 | 40 | 40,13 |
| 159 | 50 | 140 | 220 | 20 | 30 | 20 | 120,39 |
| 160 | 50 | 140 | 220 | 20 | 30 | 40 | 120,39 |
| 161 | 50 | 140 | 220 | 20 | 60 | 20 | 240,78 |
| 162 | 50 | 140 | 220 | 20 | 60 | 40 | 240,78 |
| 163 | 100 | 80 | 90 | 20 | 10 | 20 | 33,33 |
| 164 | 100 | 80 | 90 | 20 | 10 | 40 | 33,33 |
| 165 | 100 | 80 | 90 | 20 | 30 | 20 | 99,99 |
| 166 | 100 | 80 | 90 | 20 | 30 | 40 | 99,99 |
| 167 | 100 | 80 | 90 | 20 | 60 | 20 | 199,99 |
| 168 | 100 | 80 | 90 | 20 | 60 | 40 | 199,99 |
| 169 | 100 | 80 | 150 | 20 | 10 | 20 | 41,63 |
| 170 | 100 | 80 | 150 | 20 | 10 | 40 | 41,63 |
| 171 | 100 | 80 | 150 | 20 | 30 | 20 | 124,88 |
| 172 | 100 | 80 | 150 | 20 | 30 | 40 | 124,88 |
| 173 | 100 | 80 | 150 | 20 | 60 | 20 | 249,75 |
| 174 | 100 | 80 | 150 | 20 | 60 | 40 | 249,75 |
| 175 | 100 | 80 | 220 | 20 | 10 | 20 | 39,48 |
| 176 | 100 | 80 | 220 | 20 | 10 | 40 | 39,48 |

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|----|----|----|--------|
| 177 | 100 | 80 | 220 | 20 | 30 | 20 | 118,43 |
| 178 | 100 | 80 | 220 | 20 | 30 | 40 | 118,43 |
| 179 | 100 | 80 | 220 | 20 | 60 | 20 | 236,85 |
| 180 | 100 | 80 | 220 | 20 | 60 | 40 | 236,85 |
| 181 | 100 | 110 | 90 | 20 | 10 | 20 | 50,31 |
| 182 | 100 | 110 | 90 | 20 | 10 | 40 | 50,31 |
| 183 | 100 | 110 | 90 | 20 | 30 | 20 | 150,92 |
| 184 | 100 | 110 | 90 | 20 | 30 | 40 | 150,92 |
| 185 | 100 | 110 | 90 | 20 | 60 | 20 | 301,85 |
| 186 | 100 | 110 | 90 | 20 | 60 | 40 | 301,85 |
| 187 | 100 | 110 | 150 | 20 | 10 | 20 | 59,42 |
| 188 | 100 | 110 | 150 | 20 | 10 | 40 | 59,42 |
| 189 | 100 | 110 | 150 | 20 | 30 | 20 | 178,27 |
| 190 | 100 | 110 | 150 | 20 | 30 | 40 | 178,27 |
| 191 | 100 | 110 | 150 | 20 | 60 | 20 | 356,54 |
| 192 | 100 | 110 | 150 | 20 | 60 | 40 | 356,54 |
| 193 | 100 | 110 | 220 | 20 | 10 | 20 | 57,67 |
| 194 | 100 | 110 | 220 | 20 | 10 | 40 | 57,67 |
| 195 | 100 | 110 | 220 | 20 | 30 | 20 | 173,01 |
| 196 | 100 | 110 | 220 | 20 | 30 | 40 | 173,01 |
| 197 | 100 | 110 | 220 | 20 | 60 | 20 | 346,02 |
| 198 | 100 | 110 | 220 | 20 | 60 | 40 | 346,02 |
| 199 | 100 | 140 | 90 | 20 | 10 | 20 | 72,79 |
| 200 | 100 | 140 | 90 | 20 | 10 | 40 | 72,79 |
| 201 | 100 | 140 | 90 | 20 | 30 | 20 | 218,38 |
| 202 | 100 | 140 | 90 | 20 | 30 | 40 | 218,38 |
| 203 | 100 | 140 | 90 | 20 | 60 | 20 | 436,76 |
| 204 | 100 | 140 | 90 | 20 | 60 | 40 | 436,76 |
| 205 | 100 | 140 | 150 | 20 | 10 | 20 | 81,97 |
| 206 | 100 | 140 | 150 | 20 | 10 | 40 | 81,97 |
| 207 | 100 | 140 | 150 | 20 | 30 | 20 | 245,91 |
| 208 | 100 | 140 | 150 | 20 | 30 | 40 | 245,91 |
| 209 | 100 | 140 | 150 | 20 | 60 | 20 | 491,83 |
| 210 | 100 | 140 | 150 | 20 | 60 | 40 | 491,83 |
| 211 | 100 | 140 | 220 | 20 | 10 | 20 | 80,26 |
| 212 | 100 | 140 | 220 | 20 | 10 | 40 | 80,26 |
| 213 | 100 | 140 | 220 | 20 | 30 | 20 | 240,78 |
| 214 | 100 | 140 | 220 | 20 | 30 | 40 | 240,78 |
| 215 | 100 | 140 | 220 | 20 | 60 | 20 | 481,55 |
| 216 | 100 | 140 | 220 | 20 | 60 | 40 | 481,55 |

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko – geološko – naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Ivan Vučina