

Procjena geotermalnog potencijala naftnog polja Ježevo

Hrastić, Teo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:052196>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

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



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

PROCJENA GEOTERMALNOG POTENCIJALA NAFTNOG POLJA JEŽEVO

Završni rad

Teo Hrastić

N4553

Zagreb, 2023.

PROCJENA GEOTERMALNOG POTENCIJALA NAFTNOG POLJA JEŽEVO

Teo Hrastić

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

Sažetak

Naftna industrija je tijekom povijesti bila jedna od ključnih gospodarskih grana u razvitku Republike Hrvatske, kako na regionalnoj razini, tako i na lokalnoj razini. Budućnost daljnjeg širenja naftnog sektora u RH je neizvjesna, obzirom na trenutni smjer energetske tranzicije društva te postupnog odmaka od korištenja fosilnih goriva u sklopu postojećih regulativa. Obzirom na kontinuirani pad proizvodnje iz eksploatacijskih polja nafte i plina, nesumnjivo će u narednom desetljeću doći do zatvaranja niza polja koja će biti iscrpljena ili ekonomski neisplativa za održanje proizvodnje. Velik dio naftnih i plinskih polja nalazi se na takvim dubinama gdje temperatura fluida u ležištu omogućava revitalizaciju u geotermalna polja, obzirom da u ležištima uz naftu i plin gotovo uvijek postoji i podinski vodonosnik. Cilj završnog rada je bilo istražiti jedno takvo malo naftno polje, Ježevo u Zagrebačkoj županiji, koje je u zreloj fazi eksploatacije, a ležište se nalazi na takvoj dubini koje upućuju na geotermalni potencijal.

Ključne riječi: geotermalna energija, revitalizacija, naftno polje, razrada ležišta
Završni rad sadrži: 42 stranice, 19 slika, i 8 referenci
Jezik izvornika: hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentor: Dr.sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNf-a

Pomagao pri izradi/komentor: Dr.sc. Marija Macenić

Ocjenjivači: Dr.sc. Tomislav Kurevija, redoviti profesor RGNf-a
Dr.sc. Luka Perković, izvanredni profesor RGNf-a
Dr.sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf-a

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| POPIS SLIKA | I |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ANALIZA NAFTNOG POLJA JEŽEVO..... | 4 |
| 2.1. Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja..... | 4 |
| 2.2. Litostratigrafske jedinice eksploatacijskog polja | 4 |
| 2.2.1. Lonja formacija..... | 4 |
| 2.2.2. Široko polje formacija..... | 5 |
| 2.2.3. Kloštar Ivanić formacija..... | 5 |
| 2.2.4. Formacija Ivanić grad | 5 |
| 2.2.5. Prkos formacija..... | 5 |
| 2.2.6. Prečec formacija | 5 |
| 2.3. Geološki opis ležišta..... | 7 |
| 3. PREGLED BUŠOTINA NAFTNOG POLJA JEŽEVO..... | 9 |
| 3.1. Bušotina Ježevo-1 | 9 |
| 3.1.1. Geološka istraživanja | 10 |
| 3.1.2. Geološko-geofizički radovi | 10 |
| 3.1.3. Konstrukcija bušotine Je-1 | 11 |
| 3.2. Bušotina Ježevo-1 Duboka | 12 |
| 3.2.1. DST ispitivanja bušotine JeD-1..... | 12 |
| 3.3. Bušotina Ježevo-2 Duboka | 14 |
| 3.3.1. DST ispitivanja bušotine JeD-2..... | 14 |
| 3.4. Bušotina Ježevo-3 (alfa i beta)..... | 15 |
| 3.4.1. Bušotina Ježevo-3 α | 15 |
| 3.4.2. Bušotina Ježevo-3 β | 15 |
| 3.4.2.1. <i>DST ispitivanje bušotine Je-3β</i> | 16 |
| 3.4.2.2. <i>Konstrukcija bušotine Je-3β</i> | 16 |
| 3.5. Bušotina Ježevo-4 Duboka | 17 |
| 3.5.1. DST ispitivanje bušotine Je-4Du..... | 17 |
| 3.5.2. Gradijent slojnog tlaka | 17 |
| 3.6. Bušotina Ježevo-5 (alfa)..... | 18 |
| 3.6.1. Geološko-geofizički radovi | 18 |
| 3.6.2. Konstrukcija bušotine Je-5 | 18 |
| 3.6.3. Bušotina Ježevo-5 α | 19 |

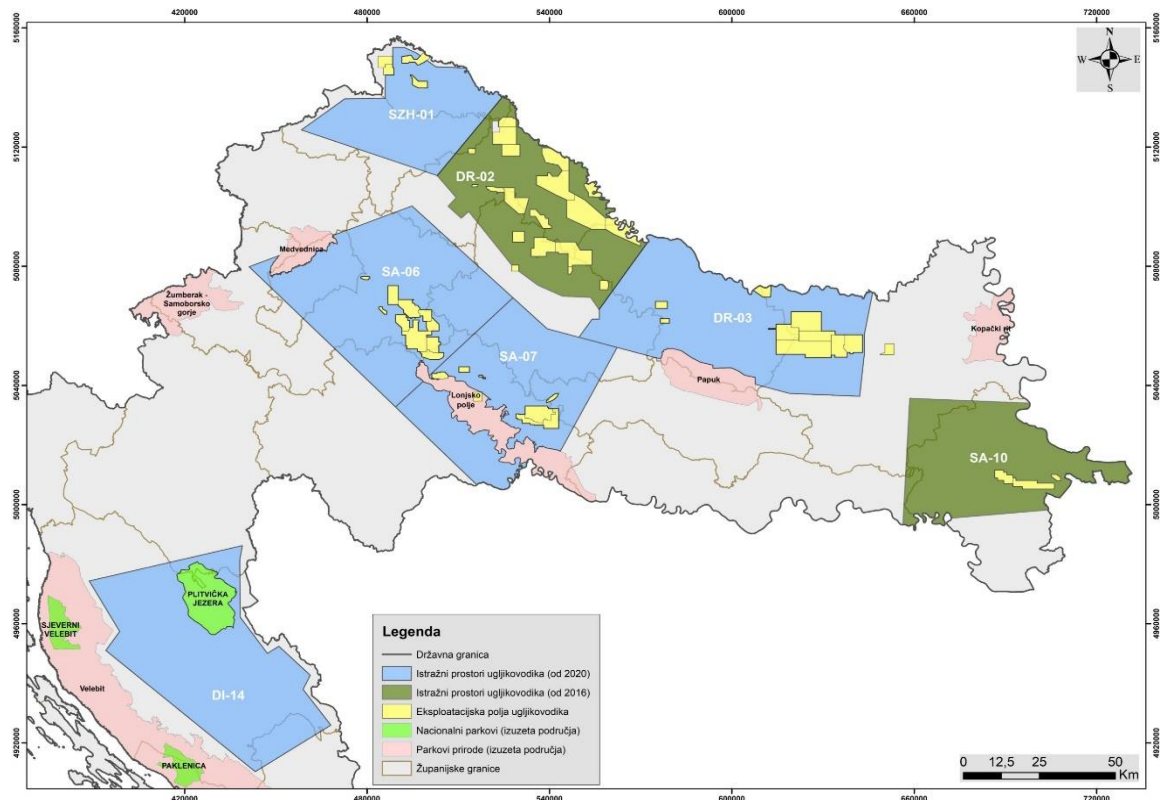
| | |
|---|-----------|
| 3.7. Bušotina Ježevo-7 (alfa) | 20 |
| 3.7.1. DST ispitivanje bušotine Je-7..... | 20 |
| 3.7.2. Bušotina Ježevo-7 α | 20 |
| 3.8. Bušotina Ježevo-8 (alfa i beta) | 21 |
| 3.8.1. Bušotina Ježevo-8 α | 21 |
| 3.8.2. Bušotina Ježevo-8 β | 21 |
| 3.9. Bušotina Ježevo-9 (alfa i beta) | 22 |
| 3.9.1. Bušotina Ježevo-9 α | 23 |
| 3.9.2. Bušotina Ježevo-9 β | 23 |
| 3.9.2.1. <i>Konstrukcija bušotine Je-9β</i> | 23 |
| 3.10. Bušotina Ježevo-10 | 24 |
| 3.10.1. Geološko-geofizički radovi..... | 25 |
| 3.10.2. Konstrukcija bušotine Je-10..... | 25 |
| 3.11. Bušotina Ježevo-11 | 26 |
| 3.11.1. DST ispitivanje bušotine Je-11..... | 27 |
| 3.11.2. Konstrukcija bušotine Je-11 | 27 |
| 3.12. Bušotina Ježevo-12 (alfa) | 28 |
| 3.12.1. Bušotina Ježevo-12 α | 28 |
| 3.12.1.1. <i>DST ispitivanje</i> | 28 |
| 3.12.1.2. <i>Konstrukcija bušotine Je-12α</i> | 28 |
| 3.13. Bušotina Ježevo-13 | 29 |
| 3.13.1. Gradijenti slojnog tlaka, razdiranja i temperature | 29 |
| 3.14. Bušotina Ježevo-14 | 30 |
| 3.14.1. Konstrukcija bušotine Je-14..... | 31 |
| 3.15. Bušotina Ježevo-15 | 31 |
| 3.15.1. Geološko-geofizički radovi..... | 31 |
| 3.15.2. DST ispitivanje bušotine Je-15..... | 32 |
| 3.15.3. Konstrukcija bušotine Je-15 | 32 |
| 4. MOGUĆNOST PRIDOBIVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE NA POLJU JEŽEVO NAKON ZAVRŠETKA EKSPLOATACIJE NAFTE I PLINA | 33 |
| 5. ZAKLJUČAK | 41 |
| 6. LITERATURA | 42 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1-1. Istražni prostori i eksploatacijska polja ugljikovodika u Hrvatskoj | 2 |
| Slika 1-2. Aktivni prostori na kojima se obavlja gospodarska djelatnost eksploatacije i istraživanja geotermalne vode u energetske svrhe u Republici Hrvatskoj..... | 3 |
| Slika 2-1. Eksploatacijska polja ugljikovodika na području Savske depresije | 4 |
| Slika 2-2. Shematski korelacijski profil bušotina Je-4Du i JeD-1 | 6 |
| Slika 2-3. Strukturna karta naftnog polja Ježevo po EK-markeru Rφ..... | 8 |
| Slika 3-1. Karta bušotina naftnog polja Ježevo..... | 9 |
| Slika 3-2. Tehnički podaci i konstrukcija bušotine Je-1 | 11 |
| Slika 3-3. Grafička ekstrapolacija statičkog slojnog tlaka DST -3 za bušotinu JeD-1..... | 13 |
| Slika 3-4. Konstrukcija bušotine Ježevo-3β..... | 16 |
| Slika 3-5. Konstrukcija bušotine Je-5..... | 19 |
| Slika 3-6. Završni geološki profil za istražne eksploatacijske bušotine Je-8, Je-8a, Je-8b .. | 22 |
| Slika 3-7. Konstrukcija bušotine Je-9..... | 24 |
| Slika 3-8. Konstrukcija bušotine Je-10..... | 26 |
| Slika 3-9. Grafička ekstrapolacija statičkog slojnog pritiska..... | 27 |
| Slika 3-10. Očekivani gradijent slojnog tlaka, razdiranja i temperature za bušotinu Je-13.. | 30 |
| Slika 4-1. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za ležište (gama serije Iva pješčenjaka Ivanić Grad formacije)..... | 38 |
| Slika 4-2. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za konstrukciju bušotine Ježevo-X s opremom nakon zamišljene revitalizacije | 38 |
| Slika 4-3. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za otvaranje gama serije slojeva..... | 39 |
| Slika 4-4. Rezultati proračuna proizvodnje programa WellPerform za tri scenarija kumulativnih debljina propusnih gama serija Iva pješčenjaka od 100 m (Inflow 1 – Case -1), 50 m (Case-2) i 200 m (Case-3) | 39 |

1. UVOD

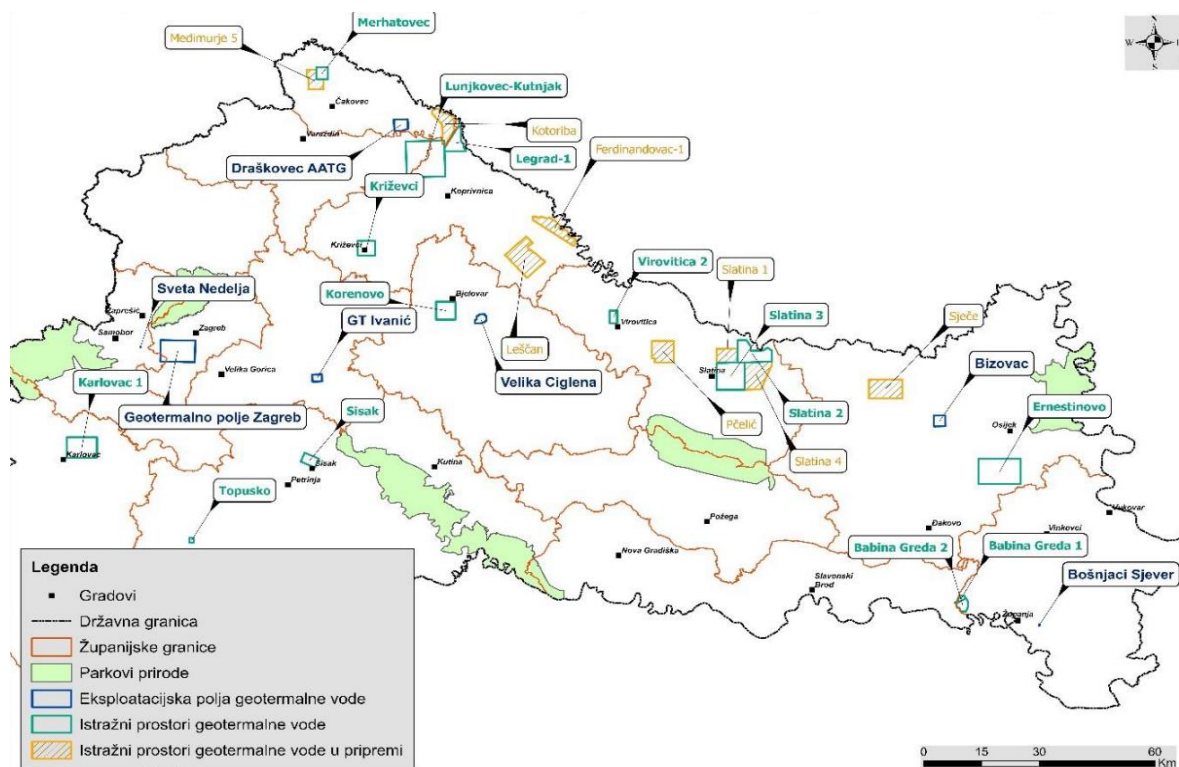
Značajnije istraživanje i proizvodnja nafte i plina u Hrvatskoj započelo je 1952. godine, osnutkom poduzeća Naftaplin. Iskorištavanje nafte najprije je počelo na području Ludbrega i Selnice, a nastavilo se otkrićem prvog naftnog polja Gojlo. Od 1941. godine, od kada postoje podaci o eksploataciji ugljikovodika u Hrvatskoj, ukupno je pridobiveno 92 milijuna tona nafte, oko 9 milijuna tona kondenzata i 60 milijardi m³ prirodnog plina. Najveća godišnja pridobivena količina nafte u Hrvatskoj zabilježena je 1981. godine, a iznosila je 3 140 77 tona. Istodobno, najveća pridobivena količina prirodnog plina od 2 176 657 000 m³ ostvarena je 1989. godine (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja [MINGOR], n.d.). U skladu s povećanjem starosti eksploatacijskih polja, rezerve nafte i kondenzata već godinama bilježe trend opadanja. U razdoblju od 2007. do 2013. godine zbog nedostatka investicija u istraživanje, proizvodnja nafte u Republici Hrvatskoj pala je za 28,5 %, a proizvodnja plina za 34,6 %. To je potaknulo izmjenu regulatornog okvira s ciljem privlačenja i poticanja investicija u istraživanje i eksploataciju ugljikovodika. U srpnju 2014. i krajem 2018. godine raspisana su nadmetanja za istraživanje i proizvodnju ugljikovodika na kopnu. Definirano je sedam istražnih prostora koji se protežu uz područje Drave, istočne Slavonije i Save. To su istražni prostori SA-10, DR-02, SA-06, SA-07, DR-03, SZH-01 i DI-14, vidljivi na Slici 1-1. Temeljem tih nadmetanja, Vlada RH potpisala je ugovore s kompanijama INA- Industrija nafte d.d., Vermilion Zagreb Exploration d.o.o. te Aspect Croatia Kft te na taj način pridonijela daljnjem istraživanju ugljikovodika. (Agencija za ugljikovodike [AZU], n.d.)



Slika 1-1. Istražni prostori i eksploatacijska polja ugljikovodika u Hrvatskoj (AZU, n.d.)

Trenutno na kontinentalnom području Republike Hrvatske, točnije u Panonskom bazenu, postoji 54 eksploatacijskih polja ugljikovodika iz kojih se crpi nafta, plin i kondenzat. Beničanci, Stružec, Žutica, Šandrovac i Ivanić naša su najveća naftna polja, dok su primjeri plinskih polja: Molve, Kalinovac, Stari Gradac i Okoli. U sklopu razrade tih polja, na području Hrvatske izrađeno je ukupno oko 4500 bušotina (Macenić et al., 2022). S obzirom na prirodni pad proizvodnje ugljikovodika zbog smanjenja tlaka u ležištu i povećanja udjela vode u proizvodnji, raste broj napuštenih, zavodnjenih i likvidiranih naftnih i plinskih bušotina. Budući da likvidacija bušotina predstavlja veliki trošak za naftnu tvrtku, razmatra se njihovo korištenje za potrebe geotermalne energije (Macenić, 2020). Hrvatski dio Panonskog bazena možemo promatrati kao geotermalnu regiju budući da prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta iznosi 0,049 °C/m (60 % viši geotermalni gradijent od europskog prosjeka) i kao takav predstavlja izrazito visok potencijal za iskorištavanje geotermalne energije (MINGOR, n.d.). Uz proizvodnju električne energije, geotermalna energija kao stalni i sigurni oblik obnovljive energije ima velik potencijal i u toplinarstvu gdje se može koristiti za grijanje kućanstva, poslovnih prostora i u poljoprivredi. U Republici Hrvatskoj trenutno je aktivno 7 prostora na kojima se obavlja eksploatacija geotermalne vode u energetske svrhe, a na 14 prostora obavljaju se istražne aktivnosti s ciljem

eksploatacije geotermalne vode (Slika 1-2.). Geotermalna elektrana Velika 1 u Cigleni kraj Bjelovara snage 16,5 MW prva je i trenutno najveća elektrana u Hrvatskoj.



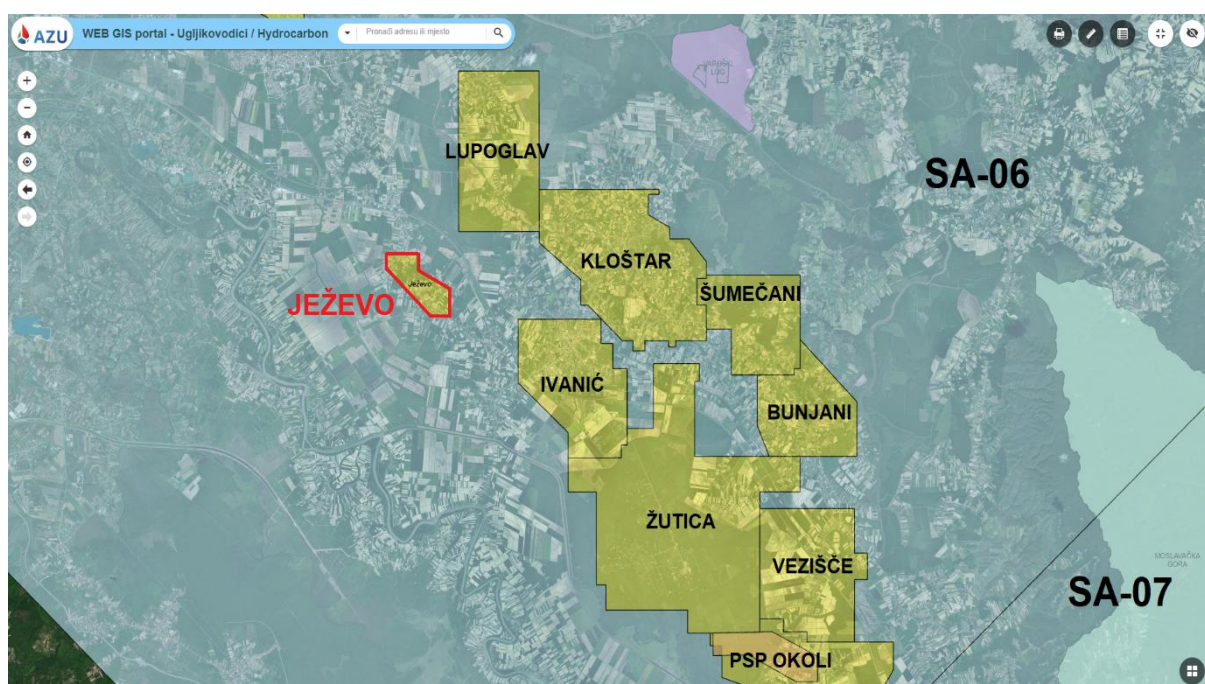
Slika 1-2. Aktivni prostori na kojima se obavlja gospodarska djelatnost eksploatacije i istraživanja geotermalne vode u energetske svrhe u Republici Hrvatskoj (MINGOR, n.d.)

Primjećuje se da su prostori eksploatacije i istraživanja geotermalne vode smješteni uz ili na samom eksploatacijskom polju ugljikovodika. Razlog tome je taj što se podaci prikupljeni iz već izrađenih bušotina nafte i plina koriste kao osnova za projektiranje geotermalnih projekata. Upravo iz tog razloga, svrha ovog završnog rada je da se pomoću primjera bušotinskih podataka naftnog polja Ježevo, prikupljenih od Agencije za ugljikovodike, analiziraju petrofizikalne karakteristike ležišta, promotre analize rezultata testiranja ležišta i na temelju toga sagleda potencijalni geotermalni fluid u ležištu.

2. ANALIZA NAFTNOG POLJA JEŽEVO

2.1. Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja

Naftno polje Ježevo nalazi se u neposrednoj blizini istoimenog naselja po kojemu je dobilo ime. Smješteno je na području Zagrebačke županije u općini Rugvica i gradu Ivanić-Gradu. Prostire se na površini od 3,20 km², na pretežno ravnom terenu, prosječne nadmorske visine od 100 m. Kroz područje protječu potoci Mesura, Stara Zelina i Zelina koji se ulijevaju u potok Črnec, pritok rijeke Lonje. Naftno polje Ježevo zajedno s poljima Ivanić, Žutica, Kloštar, Šumečani, Vežišće, Lupoglav, Okoli i Bunjani pripada dubljem dijelu Savske depresije odnosno Ivaničkoj zoni nakupljanja ugljikovodika. (Slika 2-1.)



Slika 2-1. Eksploatacijska polja ugljikovodika na području Savske depresije (AZU, n.d.)

2.2. Litostratografske jedinice eksploatacijskog polja

Sedimenti bazenske ispune neogensko-kvartarne starosti unutar Savske depresije, a ujedno i unutar polja Ježevo, sastoje se od šest formacija. U nastavku, svaka formacija bit će ukratko opisana pomoću shematskog korelacijskog profila bušotina Je-4Du i JeD-1 koji je prikazan na Slici 2-2.

2.2.1. Lonja formacija

Formacija Lonja predstavlja najmlađu formaciju te obuhvaća naslage pliocena i kvartara. Naslage Lonja formacije izgrađene su od pijeska, šljunka, različito obojenih mekih plastičnih glina, različito debelih proslojaka smeđeg do tamnosmeđeg karboniziranog

ugljena. Podinu formacije određuje EK-marker α' , a krovinu formacije određuje površina terena.

2.2.2. Široko polje formacija

Široko polje formacija obuhvaća naslage gornjeg dijela donjeg pontaa i gornjeg pontaa. Ovu formaciju izgrađuju sive mekane gline, pijesak, sive laporovite gline koje postepeno prelaze u glinovite lapore, svijetlosivi slabo vezani pješčenjak i slabo karbonizirani ugljen. Podinu formacije određuje EK-marker $R\phi$, a krovinu EK-marker α' .

2.2.3. Kloštar Ivanić formacija

Litološki stup ove formacije čini izmjena različito debelih naslaga sivih srednje tvrdih djelomično i pjeskovitih lapora u izmjeni sa sitnozrnatim kvarcintječastim pješčenjacima. Formacija je ograničena EK-markerima Z' i $R\phi$.

2.2.4. Formacija Ivanić grad

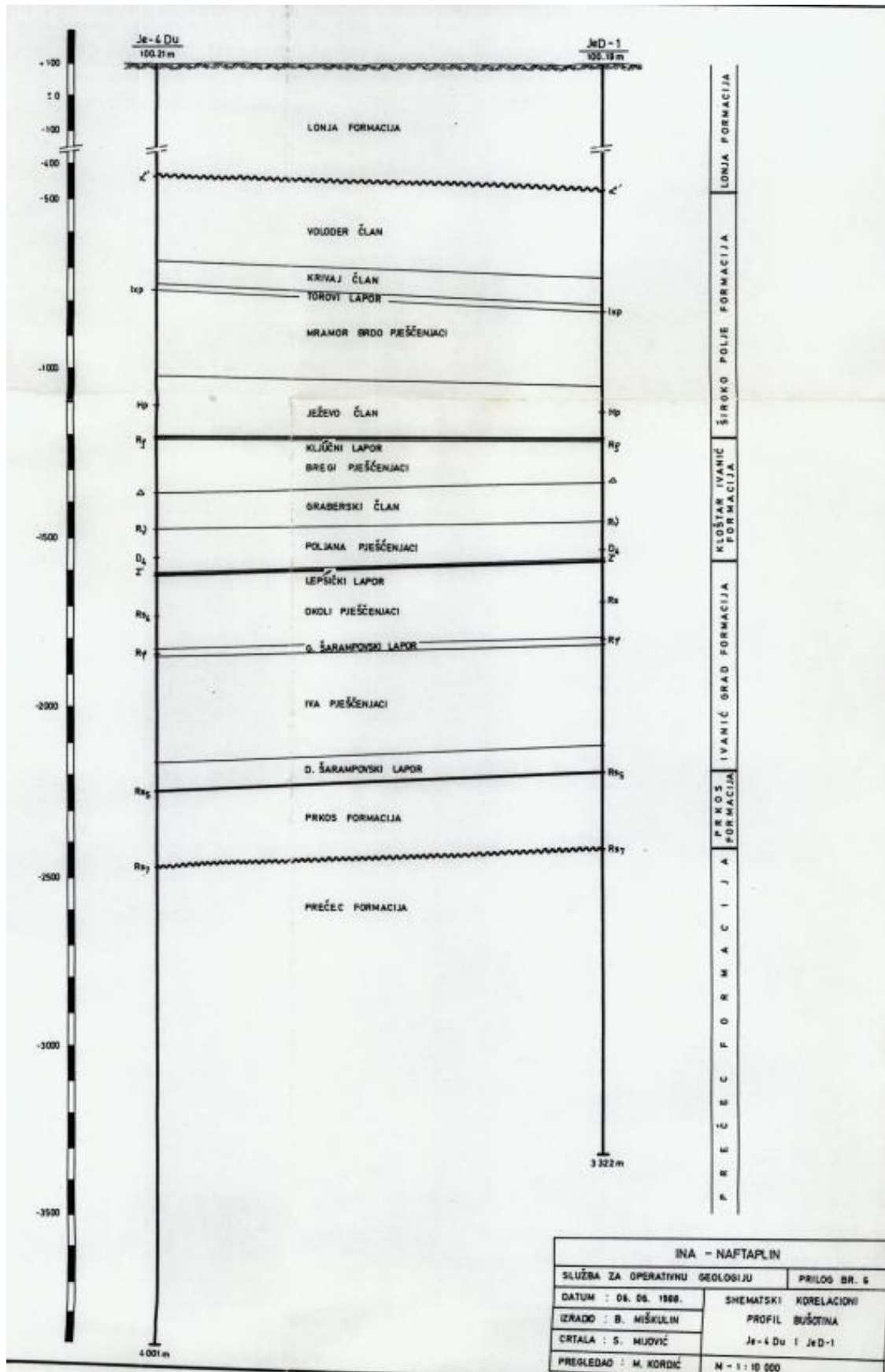
Formaciju Ivanić-Grad karakteriziraju tamnosivi tvrdi pjeskoviti i glinoviti lapori koji u dubljim dijelovima sadrže prosljke pješčenjaka i silta. Formacija je omeđena EK-markerima $Rs5$ i Z' .

2.2.5. Prkos formacija

Formaciju čine sivo smeđi lapori koji prelaze u tvrde laporovite vapnence. Laporoviti vapnenci izmjenjuju se sa tamnosivim, tvrdim raspucanim laporima i sitnozrnatim pješčenjacima. Omeđena je EK-markerima $Rs7$ i $Rs5$.

2.2.6. Prečec formacija

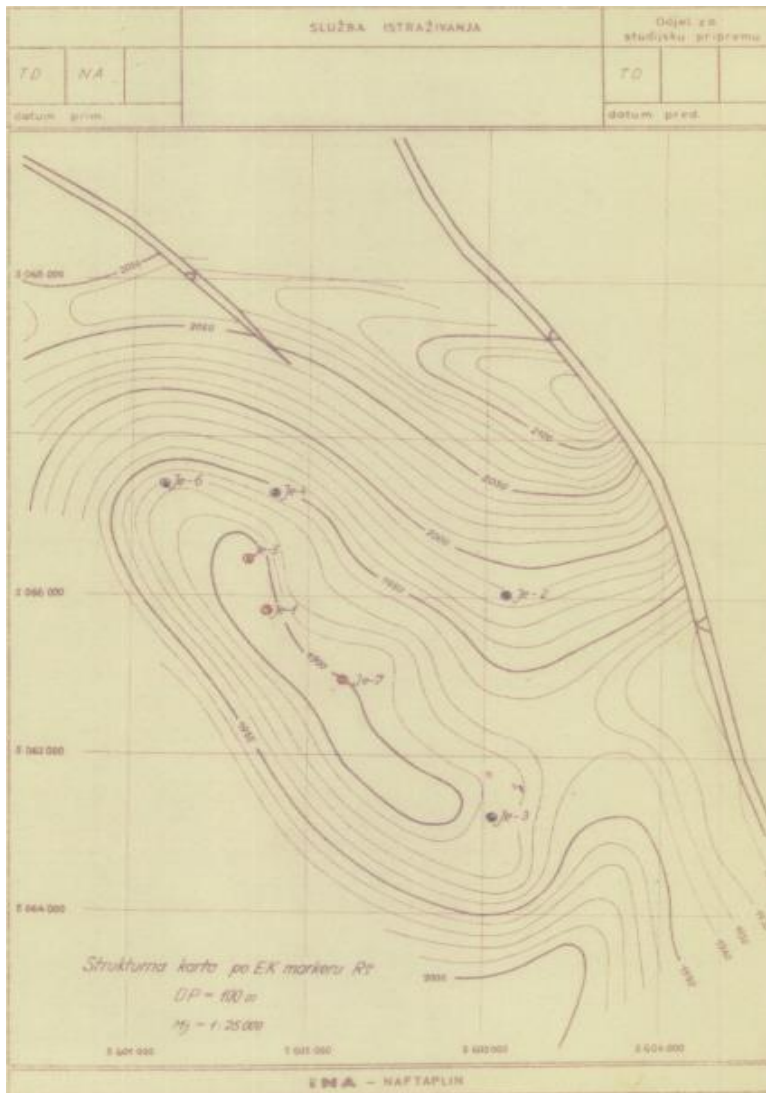
Prečec formacija najstarija je formacija ograničena tektonsko-erozijskom diskordancijom Pt/Tg u podini i EK-markerom $Rs7$ u krovini. Litološki formaciju čini izmjena sivo smeđih laporovitih vapnenaca s tamnosivim tvrdim siltoznim laporom i sivim kvarc pješčenjakom. Kronostratigrafski gledano, obuhvaća stariji i srednji miocen.



Slika 2-2. Shematski korelacijski profil bušotina Je-4Du i JeD-1 (AZU, 1988)

2.3. Geološki opis ležišta

Prva naftna i plinska ležišta u Savskoj depresiji vezana su uz njezin rubni, sjeveroistočni pojas, odnosno uz glavni uzdužni potolinski rasjed. Nakon otkrivanja naftnog polja Stružec, kao prvog u spomenutom nizu dubokog dijela potoline, započinju još intenzivniji istražni radovi ovog dijela depresije. Tako su utvrđeni perspektivni objekti Ježevo i Žutica koji su daljnjim istraživanjem potvrdili pozitivnost. Istražnim radovima na polju Ježevo u pješčanim naslagama Iva pješčenjaka, odnosno gama seriji koja kronostratigrafski pripada naslagama gornjeg panona (formacija Ivanić-Grad), utvrđena je prisutnost ugljikovodika. Sjeverozapadni dio strukture kao i ekonomski značajne količine nafte otkrivene su 1963. godine istražnom bušotinom Je-1, dok je bušotina Je-3B svojim podacima definirala oblik i pružanje novootkrivenog jugoistočnog dijela strukture. Strukturna karta, izrađena nakon bušenja bušotina Je-7 i Je-7a, prikazuje da polje ima oblik izdužene antiklinale koju čine dva odvojena strukturna oblika – maksimuma, smjera pružanja SZ-JI (Slika 2-3.). Sa sjeverne strane, struktura Ježevo, ograđena je sinklinalom, koja se duboko prostire prema jugoistoku. Prema sjeveroistoku, struktura se postepeno diže i prelazi u rubno područje Savske potoline, dok se prema jugu gubi u dubokom centralnom dijelu potoline. Korelacijom karotažnih dijagrama, unutar gama serije, izdvojeno je 17 pješčanih slojeva odvojenih laporima, od kojih su neki zasićeni naftom. Pojedini se pješčani slojevi zbog različite dubine kontakta nafta-voda mogu smatrati zasebnim hidrodinamičkim cjelinama, odnosno ležištima. Ekonomski značajne akumulacije nafte utvrđene su u ležištima gama 4, 5, 9, 11, 13, i gama₁₄. Prema litološkom sastavu kolektorske stijene sastavljene su od uslojenih sitno do srednje zrnatih pješčenjaka i njihovih međusobnih prijelaza, a odvojeni su laporima.



Slika 2-3. Strukturna karta naftnog polja Jezevo po EK-markeru Rφ (AZU, 1986)

3. PREGLED BUŠOTINA NAFTNOG POLJA JEŽEVO

Na Slici 3-1. vidljivo je 17 bušotina koje se nalaze na području naselja Ježevo i Trebovec. Bušotine su uglavnom smještene uz glavnu prometnicu. Pojedine bušotine sadrže koso usmjerene kanale iz postojećih kanala, s toga polje broji sveukupno 24 kanala bušotina. Detaljan pregled svih bušotina koji uključuje opis konstrukcija bušotina, zadatak bušotina, geološko-geofizičke radove, slijedi u nastavku.



Slika 3-1. Karta bušotina naftnog polja Ježevo (Google Earth, 2023, vlastita grafika)

3.1. Bušotina Ježevo-1

Koordinate bušotine Je-1 su:

Y = 5 601 749,47

X = 5 065 902,01

h = 99,62 m

Zadatak bušotine bio je ispitati litofacijalni razvoj sedimenata pliocena, miopliocena i jednog dijela miocena. Bušotina Je-1 izrađena je na sjeverozapadnom dijelu naftnog polja Ježevo, u vršnom dijelu strukture do dubine 2657 m. Najbliže susjedne bušotine su Je-8 i Je-7. Probušila je naslage kvartara, pliocena te završena u naslagama miocena. Prema granulometrijskoj analizi uzorka jezgre, stijene nositelji ugljikovodika su dobro sortirani pješčenjaci čija srednja veličina zrna iznosi 0,093 mm. Iz bušotine ukupno je proizvedeno 22 394 m³ nafte, 2 085 395 m³ plina i 2 876 m³ vode do 1999. godine.

3.1.1. Geološka istraživanja

Bušotina je jezgrovana, a prema analizi, postotak pijeska u uzorcima je 75,7 %, a grubog silta 24,3 %. Udio komponente CaCO₃ u pješčenjaku je 31,8 %. Pri osvajanju bušotine ukupno je napucano 11 intervala. Kako su u ispitivanju intervali u prevalencijenezijijskim naslagama i seriji „c“ davali vodu odmah su izolirani cementnim čepovima. Otvorena su ostala samo dva intervala u ležištima gama₄ i gama₅ koja su crpljena od 1971. do 1983. godine kada je zbog zavodnjenja zatvoren interval u ležištu gama₅. Ležište gama₅ nalazi se na dubini 2000,5-2017,0 m, efektivne debljine 14,7 m te ima prosječnu poroznost 18,8 % uz početno zasićenje vodom od 33 %. Ležište gama₄ nalazi se na intervalu 1990-1983 m, efektivne debljine 13 m te ima prosječnu poroznost od 14 % uz početno zasićenje vodom 34 %. Određena je propusnost od 11*10E-3 μm².

3.1.2. Geološko-geofizički radovi

Na bušotini Je-1 karotažna mjerenja izvedena su u četiri navrata. Prva mjerenja izvršena su do dubine 1210 m. Druga mjerenja izvršena su poslije ugradnje tehničke kolone do dubine 1928 i imala su informativni karakter. Treća mjerenja izvršena su do dubine 2657,5 m, a obuhvatila su mjerenja temperature, krivine, pada slojeva i laterologa. Prema analizi sekundarnih karotažnih mjerenja zacjevljenje bušotine u statičkim uvjetima, kvaliteta cementne veze opisana je kao izmjena djelomične cementne veze za kolonu i formaciju i slabe veze za kolonu s mjestimičnim intervalima dobre cementne veze za kolonu i formaciju. Ovako opisana cementna veza trebala bi onemogućiti izakolonsku komunikaciju s dubljim i plićim ležištima. Vrh cementa iza kolone ne može se točno odrediti iz mjerenja. Maksimalna izmjerena temperatura iznosi 99,4 °C.

3.1.3. Konstrukcija bušotine Je-1

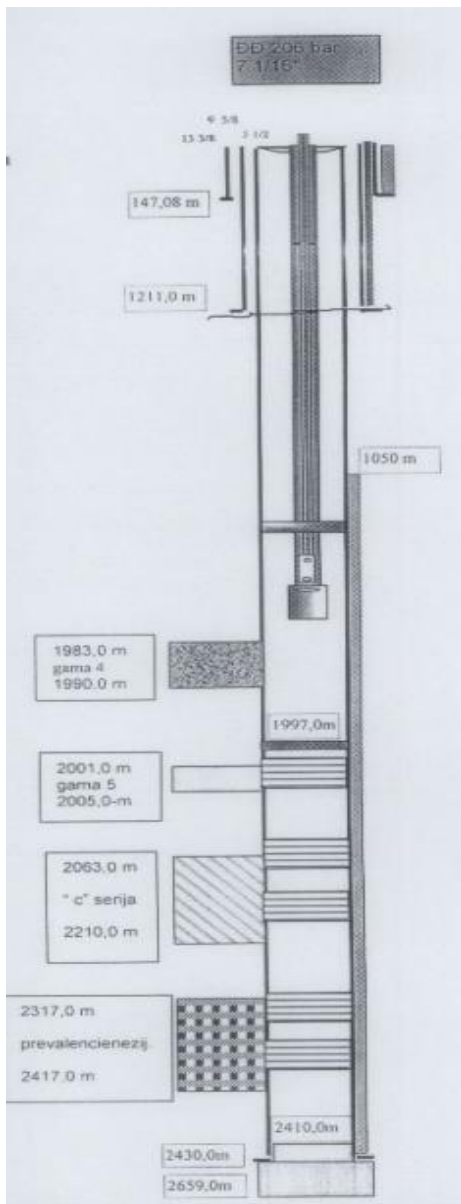
Bušotinom Je-1 otvoreni su intervali gama₄ 1983-1990 m, gama₅ 2001-2005 m i serija c na intervalu 2063-2210 m. Cementacijski čep postavljen je od 2250 m do 2300m. (Slika 3-2.)

Zacjevljenje:

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 147,08 m i zacementirana do ušća

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 1211 m i zacementirana do ušća

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2430 m i zacementirana do 1400 m.



Slika 3-2. Tehnički podaci i konstrukcija bušotine Je-1 (AZU, 1999)

3.2. Bušotina Ježevo-1 Duboka

Koordinate bušotine JeD-1 su:

$$Y = 5\ 602\ 540$$

$$X = 5\ 065\ 110$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Duboka istražna bušotina JeD-1 nalazi se oko 730 m sjeverozapadno od bušotine Je-3, odnosno oko 800 m sjeveroistočno od bušotine Duga Greda – 2. Rezultati istražnih radova na lokalitetu Duga Greda povećali su stupanj vjerojatnosti nalaza ugljikovodika u dubokom dijelu strukture Ježevo, pa je na osnovu reinterpretiranih podataka lokaliteta Duga Greda i Ježevo te okolnih istražnih bušotina odlučeno da se pristupi bušenju bušotine JeD-1. Bušotina JeD-1 probušila je sedimente pliokvartara i završila na dubini 3322 m u tvrdim siltoznim i vapnovitim laporima Prečec formacije. Podloga tercijara i temeljno gorje nisu nabušeni kako je to i programom bilo predviđeno. Objekt istraživanja na ovoj bušotini bili su sedimenti Prkos i Prečec formacije, čije plinske pojave karakteriziraju visoke koncentracije i kratka trajanja.

3.2.1. DST ispitivanja bušotine JeD-1

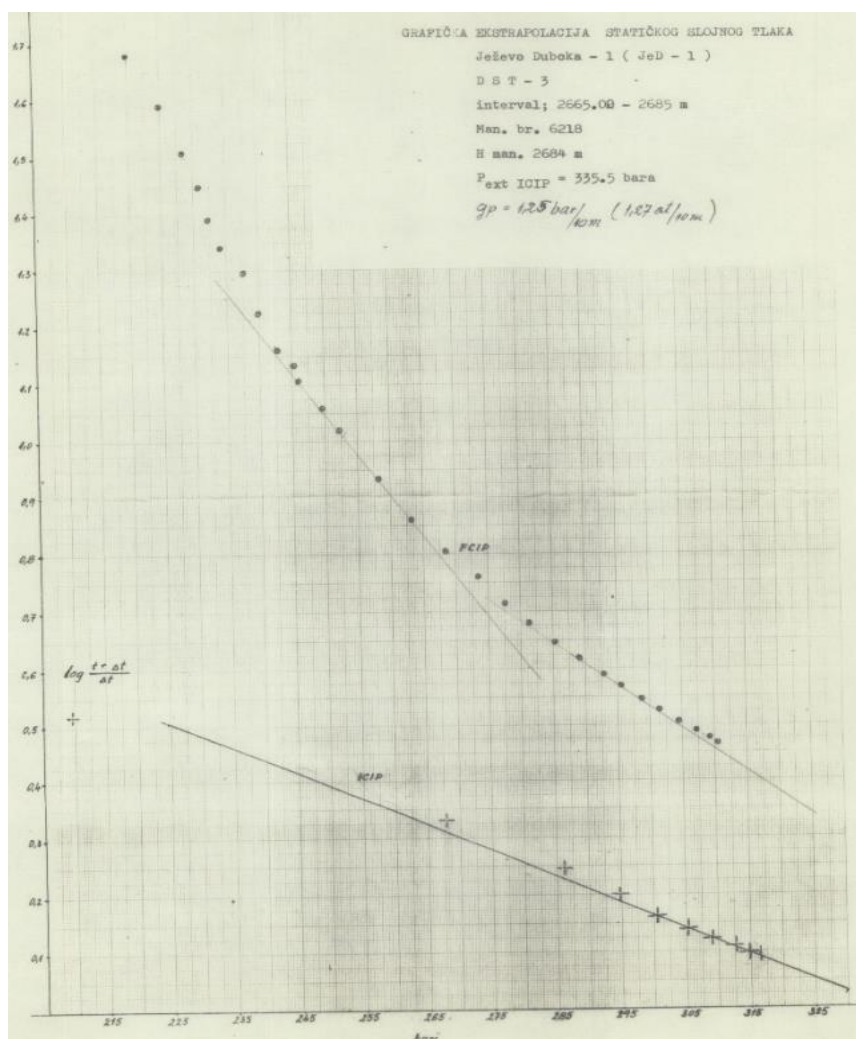
Prvo ispitivanje (DST-1) izvršeno je na intervalu 2463,6-2478 m kojem je prethodila pozitivnost u krhotinama sa sita i mehaničkoj jezgri. Pozitivnost se nalazila u tamnosivim raspucanim tvrdim laporima bez prisustva plina. U bušačim šipkama dobiveno je 250 l isplake. Prema dijagramu dubinskog manometra testirani interval je praktički nepropusan pa su manifestacije na površini u potpunom neskladu sa dobivenim rezultatom dotoka. Izmjerena temperatura na 2505,83 m iznosi 118 °C (4,7 °C/100 m).

Drugo ispitivanje (DST-2) na intervalu 2672,7-2685 m nije uspjelo zbog toga što je odmah nakon aktiviranja paker popustio. Izmjerena temperatura na dubini 2683 m iznosi 111,1 °C.

Treće ispitivanje (DST-3) izvršeno je u otvorenom kanalu bušotine na intervalu 2665-2685 m pomoću 800 m vodenog jastuka. U šipkama je dobiveno cca 5 m³ nafte. Načinjena je grafička interpolacija slojnog tlaka. Vrijednost statičkog slojnog tlaka iznosi 335,5 bara i upotrijebljen je za proračun slojnih karakteristika. Na Slici 3-3. vidljivo je da krivulja porasta drugog statičkog tlaka nije dovoljno zatvorena. Propusna sposobnost iznosi 1,148 * 10E-3 μm, a efektivna debljina sloja iznosi 3 m. Prema tome testirane naslage po Todoroviču mogli bismo svrstati u slabo propusne stijene.

Četvrto ispitivanje (DST-4) izvedeno je na intervalu 2765-2785 m u nezacijevljenom dijelu kanala bušotine. Kolektorska stijena i stijena sjedište pakera je breča miocenske starosti. Korišten je vodeni jastuk od 600 m. U bušačim šipkama dobiveno je 800 l isplake. Prema dijagramu dubinskog manometra testirani interval je vrlo slabo propustan. Izmjerena temperatura na dubini 2785 m iznosi 135 °C.

Peto ispitivanje (DST-5) izvedeno je u otvorenom kanalu bušotine na intervalu 2967-3000 m s namjerom da se ispitaju siltozni lapori Prečec formacije u kojima su u toku bušenja evidentirane značajne količine plina. Mjerenje je izvedeno jednostruko s 2000 m vodenog jastuka. U šipkama je dobiveno 6,2 m³ slabo zapljinjene vode. Propusna sposobnost je vrlo mala, iznosi 0,68*10E-3 μm², a prema tome i efektivna propusnost. Iz dobivenih podataka vidljivo je da je kolektor zasićen vodom i slabo propustan. Iznenađuje podatak o slojnom tlaku koji je ekstremno visok (Gp=1,75 bar/10 m).



Slika 3-3. Grafička ekstrapolacija statičkog slojnog tlaka DST -3 za bušotinu JeD-1 (AZU, 1984)

3.3. Bušotina Ježevo-2 Duboka

Koordinate bušotine JeD-2 su:

$$Y = 5\ 601\ 590$$

$$X = 5\ 065\ 830$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Duboka istražna bušotina JeD-2 locirana je sjeverozapadno od bušotine JeD-1. Ova bušotina imala je zadatak probušiti kompletni litološki stup sedimenata tercijara i nabušiti stijene njihove podloge. Bušotina nije u potpunosti ispunila zadatak jer je zbog preseljenja bušačkog postrojenja na polje Molve, bušenje obustavljeno na dubini 3020 m u siltozrnim laporima Prečec formacije, a projektom je bilo predviđeno bušenje do 4000 m. Prema pravilima rudarsko-naftne struke, bušotina je trajno napuštena.

3.3.1. DST ispitivanja bušotine JeD-2

Prvo ispitivanje bušotine (DST-1) izvedeno je u otvorenom kanalu bušotine u intervalu 2658,5-2672 m. Namjera je bila ispitati raspucane laporovite vapnence Prkos formacije unutar kojih je na 2440 m utvrđena pojava plina. Dobiveno je 9 m³ slojne vode s tragovima nafte i plina. Račun slojnih karakteristika izveden je prema Horneru-u, dobiven je ekstrapolirani slojni tlak 355,5 bar i temperatura sloja 124,4 °C, obujamski protok 82,97 m³/dan, efektivna propusnost 1,23*10E-3 μm². Usprkos dobroj slojnoj energiji, ispitivane kolektorske stijene pokazale su se relativno slabo propusne.

Ispitivani interval kod drugog ispitivanja (DST-2) bili su raspucani vapnenci Prečec formacije na dubini 2658,5-2672 m. Rezultati ispitivanja pokazali su da su ispitivani kolektori neobično slabo propusni, usprkos visoke slojne energije (p_{ex} = 401,2 bara i T_{sl} = 135 °C), što je imalo za posljedicu dotok od svega 10 l nafte zagađene isplakom.

Treće ispitivanje bušotine (DST-3) također je pokazao da su ispitivani intervali slabo propusni. Dobiveno je 1 m³ isplake. Iako ekstrapolacija nije moguća jasno je da kolektor ima znatnu sojnu energiju, jer već izmjereni slojni tlak ima gradijent veći od hidrostatskog.

Posljednje ispitivanje (DST-4) izvršeno je na intervalu 2892-2903 m u raspucanim vapnencima Prečec formacije. Za vrijeme ispitivanja ostvaren je dotok nafte i plina u količinama procijenjenim kao komercijalne. Unatoč činjenici da ekstrapolirana vrijednost početnog statičkog tlaka iznosi 436 bara, a završnog tlaka 405 bara, što ukazuje na ograničenost ležišta ugljikovodika, rezultati ispitivanja ukazuju na dobro propusne kolektorske stijene sa dobrom slojnom energijom. Propusna sposobnost iznosi 73,21 *10E-

3 μm^2 , a izračunati prosječni efektivni permeabilitet iznosi $18,3 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Izmjerena slojna temperatura iznosi 117,6 °C.

3.4. Bušotina Ježevo-3 (alfa i beta)

Koordinate bušotine Je-3 su:

$$Y = 5\ 603\ 041$$

$$X = 5\ 064\ 603$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Duboka istražna bušotina Je-3 nalazi se na vrhu strukture Ježevo. Zadatak bušotine bio je da utvrdi strukturne odnose, kao i eventualno prisustvo ugljikovodika na centralnom dijelu strukture. Na bušotini vršena su karotažna mjerenja kod dubine 659 m, informativna mjerenja prije testiranja na dubini 1565,8 m i 2030,6 m te završna mjerenja kod konačne dubine 2174,5 m. Na osnovu materijala iz bušotine, mehaničkih i bočnih jezgara, interpretacijom EK dijagrama nisu ustanovljene značajnije pojave ugljikovodika te je odlučeno da se bušotina likvidira.

3.4.1. Bušotina Ježevo-3 α

Iz postojećeg kanala bušotine Je-3 izrađen je koso umjereni kanal bušotine Je-3 α prema slijedećim elementima skretanja: $A = 41^\circ$, $L = 300\ \text{m}$, $H_v = 1955\ \text{m}$. Kanal ove bušotine usmjeren je u maksimum strukturnog nadsvođenja koji je utvrđen 150 m južno od bušotine Je-10. Bušotina Je-3 α probušila je u normalnom slijedu naslage kvartara, gornji i donji pont i dio naslage gornjeg panona. Završena je u naslagama gornjeg panona na dubini 2279 m. Projektirano ležište gama₄ nabušeno je dublje nego je bilo predviđeno geološkom prognozom te je ono djelomično ili potpuno zavodnjeno.

3.4.2. Bušotina Ježevo-3 β

Da bi se projektirana ležišta nabušila na strukturno povoljnijoj poziciji i dovoljno iznad kontakta nafta-voda odlučeno je da se pristupi bušenju novog usmjerenog kanala bušotine Je-3 β . Bušotina Je-3 β izrađena je kao koso usmjerena iz starog kanala bušotine Je-3 na jugoistočnom krilu antiklinalne strukture polja prema zadanim elementima: $H_v = 1950\ \text{m}$, $A = 356^\circ$, $L = 290\ \text{m}$. Probušila je sva ležišta gama serije izdvojena korelacijom karotažnih dijagrama i zaustavljena na dubini 2252 m. Projektirana je bila na ležišta gama₄ koje je u cijelosti bilo zasićeno ugljikovodicima, te gama₅ i gama₉ samo djelomično zasićenih ugljikovodicima. Vrsta stijene u ležištu je pješčenjak, početni ležišni tlak bio je 205,9 bara,

a ležišna temperatura na dubini 1897 m iznosi 108 °C. Bušotina je crpila naftu do 1996. godine kada je zbog potpunog zavodnjenja zatvorena.

3.4.2.1. DST ispitivanje bušotine Je-3β

Prvim testiranjem na bušotini (DST-1) ispitane su naslage ležišta gama₄ gornjeg panona. Dobiveno je 6 m³ nafte i 0,4 m³ emulzije isplaka-nafta. Testirane naslage imaju slabu propusnost i visoku slojnu energiju (ekstrapolirani slojni tlak iznosi 203,38 bar). Testiranjem su potvrđene već poznate slojne karakteristike na naftnom polju Ježevo.

3.4.2.2. Konstrukcija bušotine Je-3β

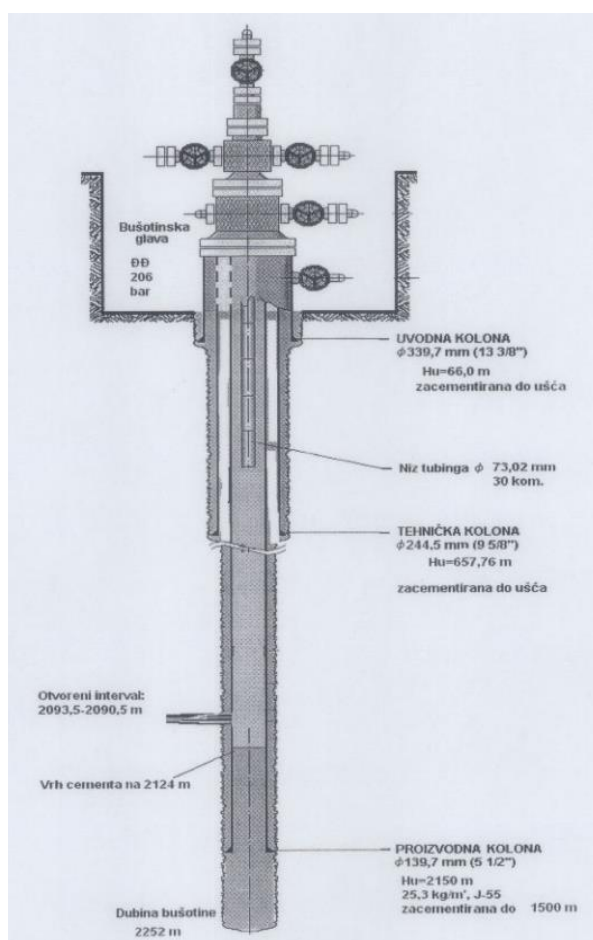
Zacjevljenje:

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 66 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 657 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2150 m i zacementirana do 1500 m.

Otvoreni intervali 2093-2090 m, vrh cementa na 2124 m. (Slika 3-4.)



Slika 3-4. Konstrukcija bušotine Ježevo-3β (AZU, 2000)

3.5. Bušotina Ježevo-4 Duboka

Koordinate bušotine Je-4Du su:

$$Y = 5\ 602\ 203$$

$$X = 5\ 066\ 303$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Bušotina Je-4Du locirana je na brahiantiklinali Ježevo izvan kontura proizvodnog naftnog polja Ježevo. Zadatak bušotine bio je da sigurnije definira prisustvo ugljikovodika u Prkos formaciji u kojoj su bušotinom JeD-2 utvrđeni tragovi nafte i plina. Također je trebalo potvrditi postojanje ležišta nafte ili plinsko-kondenzatnog ležišta u Prečec formaciji u kojoj je bušotinom JeD-1 utvrđeno prisustvo nafte, a na JeD-2 značajnije pojave plina i nafte. Bušenje je vršeno u klastičnim naslagama – laporima, vap.laporima, siltoznim laporima, pješčenjacima, siltoznim pješčenjacima. Duboka istražna bušotina Je-4 Du izbušena je do 4001 m te je djelomično ispunila zadatak jer praćenjem i ispitivanjem za vrijeme izrade kanala bušotine nije otkrila i utvrdila ekonomske količine ugljikovodika. Bušotina je likvidirana kao negativna.

3.5.1. DST ispitivanje bušotine Je-4Du

Prvim ispitivanjem (DST-1) ispitan je interval 2420,4-2445 m. Iz dobivenih rezultata testirani laporoviti vapnenci su vrlo slabe propusnosti, gotovo nepropusni.

Drugo testiranje (DST-2) izvršeno je na intervalu 2919-2932 m s 2200 m vodenog jastuka. Iz dobivenih rezultata vidi se da je i ispitanim kvarc-kalkarenitima prisutna nafta, ali je sloj slabe propusnosti.

Treće testiranja (DST-3) izvedeno je na intervalu 2929-2954 m s 2400 m vodenog jastuka. Dijagrami dubinskih manometara registrirali su samo statički tlak isplake te se ispitivanje moralo ponoviti. Temperatura izmjerena na dubini 2952 m iznosi 132 °C.

Novi pokušaj testiranja (DST-4) izveden je na intervalu 2946-2954 m s 2400 m vodenog jastuka. Dobiven je stupac od 9 m emulzije. Dijagrami dubinskih manometara odraz su vrlo slabe propusnosti. Temperatura na 2951 m iznosi 136 °C.

3.5.2. Gradijent slojnog tlaka

Do 2700 m gradijent slojnog tlaka postepeno raste do 1,57 at/10 m. Testiranjem je na dubini 2930 m utvrđen slojni tlak od 1,785 at/10 m i u tom momentu je bio viši čak i od tlaka isplake. Također je testiranjem na dubini 3516 m dobivena najmanja moguća vrijednost gradijenta slojnog tlaka od 1,63 at/10 m (krivulja se nije dovoljno razvila za ekstrapolaciju).

S dubinom vrijednost slojnog gradijenta raste i maksimalne vrijednosti dostiže na intervalu 3730-4000 m od 1,72 at/10 m, Unatoč registriranim visokim slojnim tlakovima i povremeno jakim površinskim manifestacijama prisustva plina i nafte u isplaci, nedostatak kolektora dobre propusnosti uvjetovao je da se niti jedan interval ne može smatrati perspektivnim u smislu pridobivanja nafte i plina.

3.6. Bušotina Ježevo-5 (alfa)

Koordinate bušotine Je-5 su:

$$Y = 5\ 601\ 630$$

$$X = 5\ 066\ 230$$

$$h = 99\ \text{m}$$

Bušotina Je-5 izrađena je na sjeverozapadnom dijelu polja, u vršnom dijelu strukture. Najbliže susjedne bušotine su Je-9β i Je-8β. Izrađena je vertikalno, do konačne dubine od 2251 m. Probušila je naslage pješčenjaka iz kvartara, gornjeg i donjeg pontata te gornjeg panona. Ugljikovodicima su zasićena ležišta gama^{4,5,9,11}, iz kojih se do sad crpila nafta. Ostala ležišta su djelomično ili potpuno zavodnjena te kao takva s ekonomskog stajališta nezanimljiva. Iz bušotine Je-5 ukupno je proizvedeno 61 091 m³ nafte, 5 718 388 m³ plina i 1764 m³ vode do 1999. godine.

3.6.1. Geološko-geofizički radovi

Na bušotini Je-5 izvršena su izvršena su detaljna EK mjerenja (za ugradnju tehničke kolone, u toku bušenja, na kraju bušenja). Laboratorijska fizikalna ispitivanja izvršena su na uzorcima jezgara pješčenjaka iz bušotine Je-5. Prema tim podacima najčešće vrijednosti poroznosti kreću se oko 17 %. Primjećuje se sklonost opadanja poroznosti sa dubinom. S druge strane, propusnost naslaga vrlo je mala, kreće se od $k = 0$ do maksimalno $k = 14 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Zasićenost vodom dobiveno interpretacijom EK dijagrama uglavnom je između 37 i 50 %, a zasićenost naftom doseže maksimalnu vrijednost do 7,4 %. Temperatura unutar tijela Iva pješčenjaka, očitana sa termodijagrama za bušotinu Je-5 u intervalu 1898-2210 m, približno linearno raste od 86,5 °C na početku intervala, do 96,5°C na kraju intervala.

3.6.2. Konstrukcija bušotine Je-5

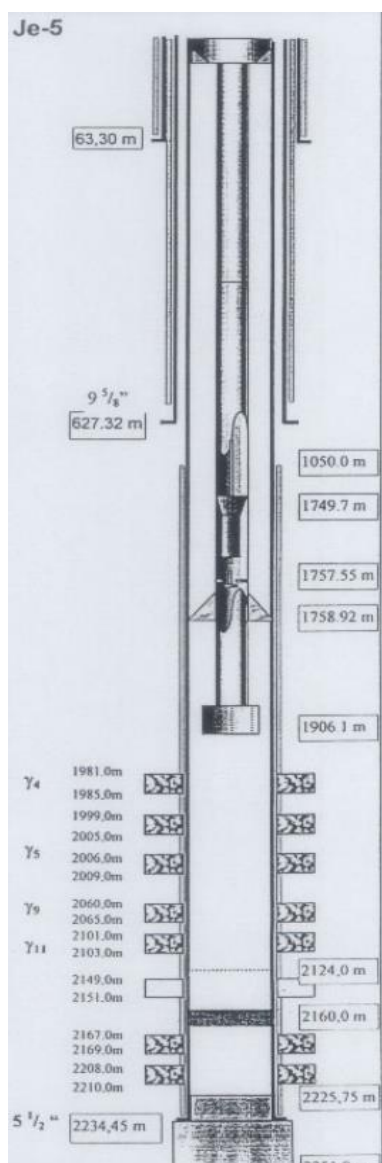
Zacjevljenje:

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 63 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 627 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2234 m i zacementirana u prstenastom prostoru do 1500 m

Vrh cementa u koloni je na 2225 m, a sveukupno je otvoreno 6 intervala. (Slika 3-5.)



Slika 3-5. Konstrukcija bušotine Je-5 (AZU, 1999)

3.6.3. Bušotina Ježevo-5 α

Uklapanjem podataka dobivenih na ovoj bušotini u već postojeće podatke o strukturnoj građi, došlo je do zaključka da bi se strukturno viši položaj naslaga mogao očekivati zapadno od bušotine Je-5. U cilju izbjegavanja troškova preseljenja i izgradnje novih temelja, odlučeno je da se s istog mjesta izradi koso usmjeren kanal bušotine Ježevo-5 α s ciljem dobivanja potrebnih podataka. Zadatak bušotine bio je da ispita razvoj kolektorskih i izolator stijena te utvrdi eventualna pozitivna zasićenja ugljikovodicima. Bušotina je skrenuta na 736 m od ušća ($A = 270^\circ$), usmjerena prema zapadu i probušena do konačne dubine 2116 m.

Zbog skretanja, u bušotini Je-5 α nije izvođena ni jedna operacija testiranja. Tako je izostalo testiranje intervala koji su na osnovu uzoraka iz isplake pokazivali pozitivna zasićenja ugljikovodicima. Bušotina je probušila seriju najperspektivnijih naslaga i obustavljena cca 150 m unutar Iva pješčenjaka. S obzirom da su tragovi pozitivnih zasićenja u pješčenjacima vrlo slabi, a bušotina znatno strukturno dublja nego što je bilo planirano, bušotina je likvidirana kao negativna.

3.7. Bušotina Ježevo-7 (alfa)

Koordinate bušotine Je-7 su:

$$Y = 5\ 602\ 020$$

$$X = 5\ 065\ 620$$

$$h = 100\ \text{m}$$

U cilju realnijeg definiranja strukturne forme te naftno-hidroloških odnosa u istražnoj fazi ispitivanja, odlučeno je da se na razmaku od 620 m od bušotine Je-5 u pravcu istražne bušotine Je-3 područje ispita dubokom istražnom bušotinom Je-7. Budući da je kontakt nafta-voda u ležištu Iva pješčenjaka neujednačen pješčanim horizontima, novoizrađena bušotina Je-7 imala je istražno-razradni karakter. Nakon istraživanja SZ dijela strukture (bušotina Je-6) preostalo je za ispitati II dio između bušotina Je-1 i Je-3. Na SI krilu antiklinale, locirana je bušotina Je-7. Zbog nedovoljnog zasićenja ugljikovodicima unutar Iva pješčenjaka, bušotina je likvidirana kao negativna.

3.7.1. DST ispitivanje bušotine Je-7

Testiran je otvoreni interval 1914,4-1938,5 m. Dobiveno je 600 l isplake i 8,1 m³ slojne vode. Oblik krivulja tlaka na snimljenim dijagramima ukazuju na visoku propusnost s postojanjem skin efekta koji umanjuje vrijednost propusnosti od 106 na 30,3*10E-3 μm^2 . Temperatura sloja izračunata preko temperaturnog dijagrama iznosi 81 °C.

3.7.2. Bušotina Ježevo-7 α

Da bi se ispitao dio strukture JZ od bušotine Je-7, gdje se prema strukturnoj karti očekivalo veće zasićenje ugljikovodicima, a radi izbjegavanja troškova preseljenja, izbušen je koso usmjeren kanal bušotine Je-7 α . Bušotinom unutar Iva pješčenjaka nisu utvrđeni tragovi pozitivnosti pa je bušotina likvidirana kao negativna.

3.8. Bušotina Ježevo-8 (alfa i beta)

Koordinate bušotine Je-8 su:

$$Y = 5\ 601\ 427$$

$$X = 5\ 066\ 044$$

$$h = 100\ \text{m}$$

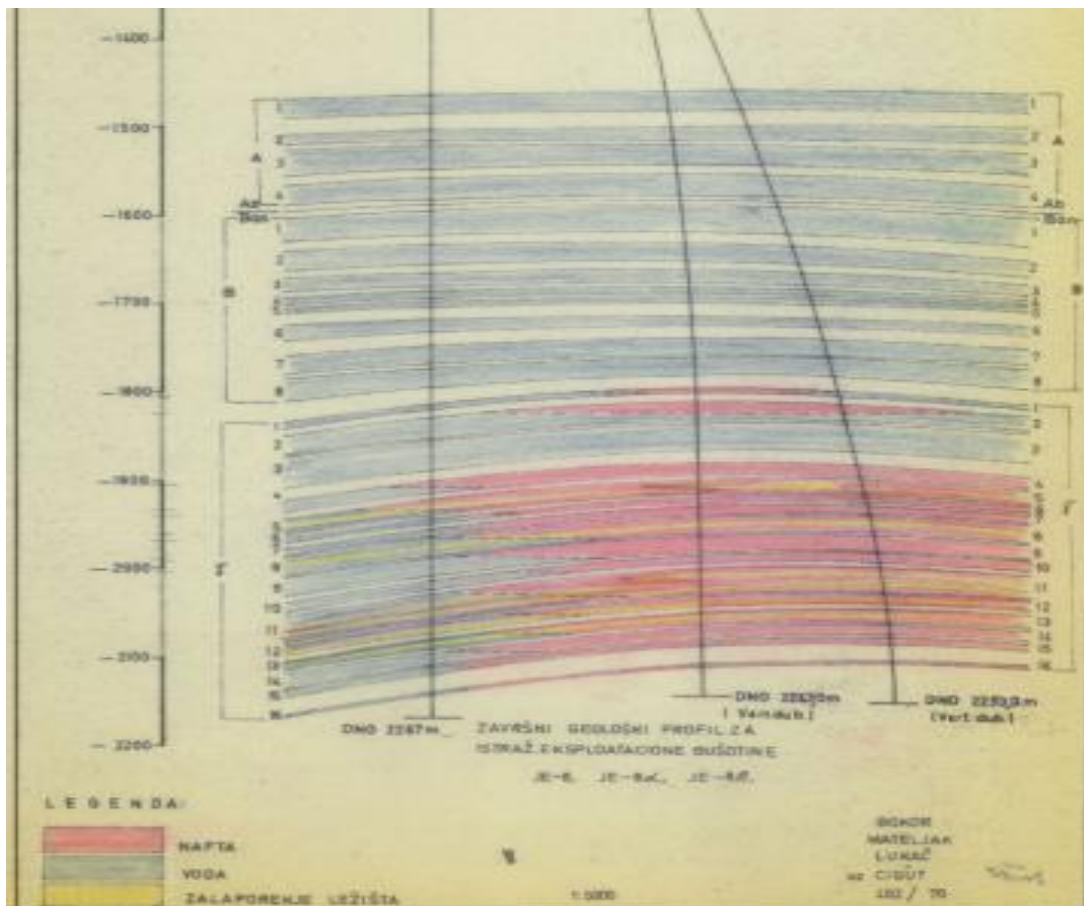
Bušotina Je-8 čiji je kanal ujedno korišten za bušotine Je-8 α i Je-8 β nalazi se na jugozapadnom dijelu strukture Ježevo. Završena je na dubini 2267 m u srednje tvrdim djelomično vapnovitim laporima. Kolektorski slojevi „A“ i „B“ serije nabušeni su u zavodnjenom dijelu što je i vidljivo na geološkom profilu bušotina (Slika 3-6.). Glavna produktivna serija gama nabušena je u znatno slabijem zasićenju ugljikovodicima nego što se je predvidjelo geološkim programom.

3.8.1. Bušotina Ježevo-8 α

Koso usmjerena bušotina Je-8 α usmjerena je prema elementima skretanja $H = 2253\ \text{m}$, $L = 386,5\ \text{m}$, $A = 79^{\circ}20'$ te su njome probušeni svi litostratigrafski članovi kao na bušotini Je-8 bez značajnijeg zasićenja ugljikovodicima. Konačna dubina bušotine po EK iznosi 2313 m, a temperatura na toj dubini iznosi $94\ ^{\circ}\text{C}$.

3.8.2. Bušotina Ježevo-8 β

Budući da je bušotina Je-8 α nabušila ležišta gama serije na granici kritičnog zasićenja vodom, odlučeno je da se djelomičnim korištenjem starog kanala bušotine, izradi nova koso usmjerena bušotina Je-8 β . Bušotina je imala za cilj da prema zadanim elementima skretanja $H = 2269,5\ \text{m}$, $L = 228,5\ \text{m}$, $A = 66^{\circ}$ dosegne gama seriju u višem dijelu strukture. Gama seriju u višem dijelu strukture, odnosno u najplićem dijelu strukture, karakterizira poroznost između 14-19,5 %, efektivna debljina između 2-11,9 m i zasićenje vodom od 35-45 %. Prema analizi sekundarnih karotažnih mjerenja, cementna veza iza kolone je u pretežnom dijelu snimljenog intervala dobra i za kolonu i za formaciju. Temperatura na dubini 2269,5 m iznosi $92\ ^{\circ}\text{C}$.



Slika 3-6. Završni geološki profil za istražne eksploatacijske bušotine Je-8, Je-8 α , Je-8 β (AZU, 1999)

3.9. Bušotina Ježevo-9 (alfa i beta)

Koordinate bušotine Je-9 su:

$$Y = 5\ 601\ 522$$

$$X = 5\ 066\ 459$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Bušotina Je-9 nalazi se na središnjem dijelu strukture Ježevo. Zadatak bušotine bio je da probuši projektirana ležišta gama serije odnosno da potvrdi predviđene akumulacije ugljikovodika u ležištima gama serije te da na osnovu rezultata omogući daljnju razradu ležišta u smjeru sjevera. Probušene su naslage kvartara, gornjeg i donjeg pontona te gornjeg panona no bušotina nije ispunila zadatak jer je su ležišta gama serije probušena ispod kontakta nafta-voda.

3.9.1. Bušotina Ježevo-9 α

Pristupilo se bušenju usmjerenog kanala Je-9 α prema sjeverozapadu. Skretanje kanala bušotine započeto je na dubini 798 m sa zadanim elementima skretanja: H = 1990 m, L = 600 m, A = 326°. Dubina bušotine po EK iznosi 2195 m, a maksimalna temperatura na dnu bušotine 90 °C. Analizom rezultata bušenja i EK mjerenja zaključeno je da bušotina nije potvrdila pretpostavku o pružanju maksimuma strukture prema sjeverozapadu i da je gama serija probušena ispod kontakta nafta-voda.

3.9.2. Bušotina Ježevo-9 β

Kako ni bušotina Je-9 α nije ispunila zadatak, odlučeno je da se izvrši ponovno skretanje kanala bušotine. Usmjeravanje bušotine Je-9 β započelo je na dubini 1393 m, a zadani elementi skretanja bili su: H = 1985 m, L = 115 m, A = 200°. Litološki sastav probušenih naslaga približno je jednak sastavu naslaga probušenih bušotina Je-9 i Je-9 α . Ugljikovodicima su zasićena ležišta gama₄₋₁₄ iz kojih se do sad crpila nafta. Na intervalu 1994-2183 m ležišna temperatura je 107 °C, šupljikavost 15-24 %, propusnost 5-10*10E-3 μ m², početni ležišni tlak 198 bara, početno zasićenje vodom 34-60 %. Bušotina Je-9 β ispunila je zadatak probušivši ležišta gama serije na strukturno višoj poziciji, iznad kontakta nafta-voda. Iz bušotine Je-9 β ukupno je proizvedeno 35 694 m³ nafte, 2 594 825 m³ plina i 3 195 m³ vode do 1999. godine.

3.9.2.1. *Konstrukcija bušotine Je-9 β*

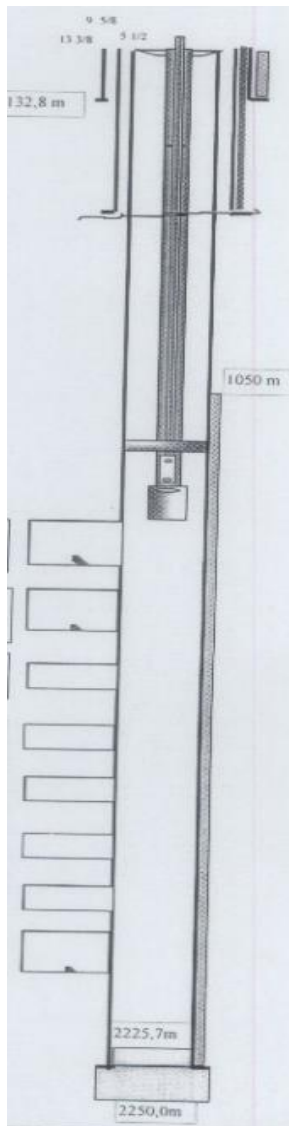
Zacjvljenje:

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 132 m i zacimentirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 451 m i zacimentirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2245 m i zacimentirana do 1050 m

Bušotinom Je-9 β ukupno je otvoreno 8 intervala. (Slika 3-7.)



Slika 3-7. Konstrukcija bušotine Je-9β (AZU, 1999)

3.10. Bušotina Ježevo-10

Koordinate bušotine Je-10 su:

$$Y = 5\ 603\ 094$$

$$X = 5\ 065\ 091$$

$$h = 100\text{ m}$$

Bušotina Je-10 izbušena je na jugoistočnom dijelu polja Ježevo. Prvobitno je bušotina bila locirana nešto južnije, ali je pomaknuta na novu lokaciju. Najbliže do tada izbušene bušotine bile su Je-3 južno, Je-2 sjeverno te Je-7 sjeverozapadno od bušotine. Između tih bušotina postojalo je veće neistraženo područje u kojem se pretpostavljala pojava još jednog maksimuma te se zbog toga pristupilo bušenju bušotine Je-10. Bušotina je izrađena

vertikalno do konačne dubine 2197 m. Probušila je naslage kvartara, gornjeg i donjeg pontate gornjeg panona. Ukupno je proizvedeno 7 861 m³ nafte, 558 104 m³ plina i 3 966 m³ vode do 1999. godine.

3.10.1. Geološko-geofizički radovi

Elektrokarotažni dijagram bušotine pokazuje da je naftom zasićeno ležište gama₅ iz kojeg se već crpila nafta, ali i ležište gama₄ koje do tad nije bilo raskriveno. Prosječne vrijednosti ležišnih parametara na intervalu 1971-1991 m za ležišta gama₄ i gama₅ kreću se od 18-20 % za poroznost, a oko 40 % za zasićenje vodom. Maksimalna temperatura na dnu bušotine je 102,2 °C. Na intervalu 1989-1966 m određena je propusnost od 15*10E-3 μm² i efektivna debljina ležišta od 16 m. Analiza cementne veze pokazuje da je cementacija na intervalu 2008-2005 m dobra, na intervalu 2005-1998 m vrlo loša dok na intervalu 1998-1990 m cementna praktički nema.

3.10.2. Konstrukcija bušotine Je-10

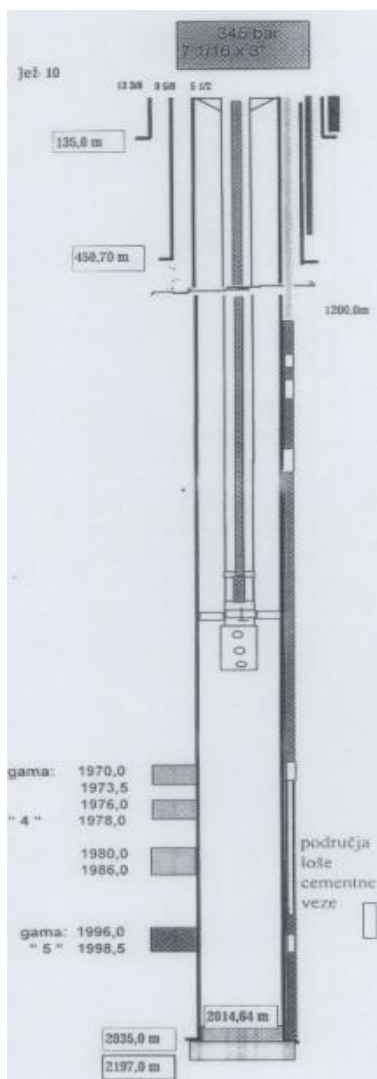
Zacjevljenje:

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 135 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 450 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2035 m i zacementirana do 1200 m

Bušotinom Je-10 ukupno je otvoreno 4 intervala. (Slika 3-8.)



Slika 3-8. Konstrukcija bušotine Je-10 (AZU, 1999)

3.11. Bušotina Ježevo-11

Koordinate bušotine Je-11 su:

$$Y = 6\ 602\ 800$$

$$X = 5\ 065\ 105$$

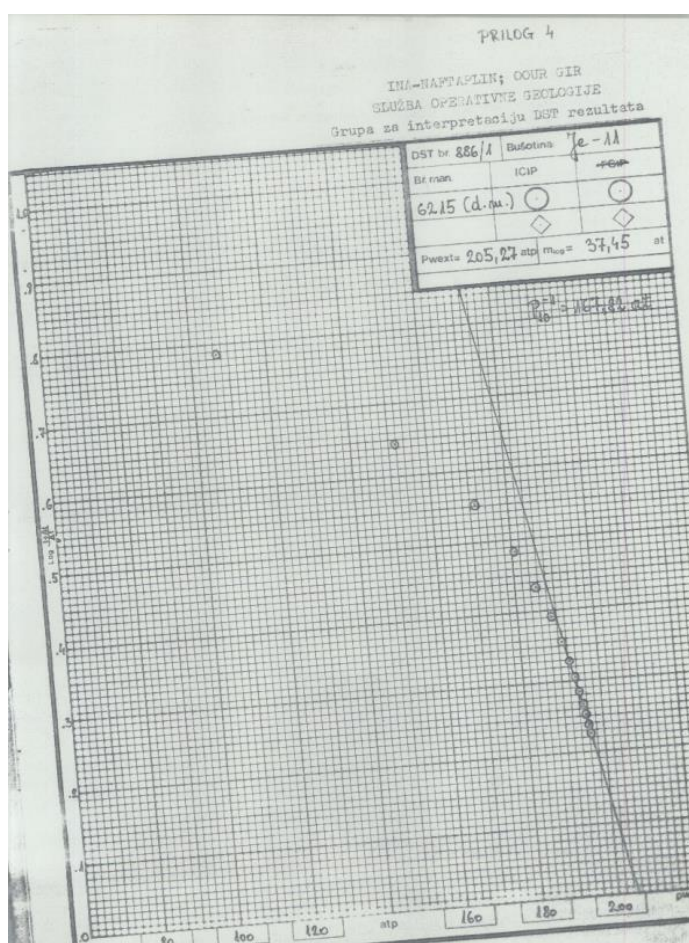
$$h = 100\ \text{m}$$

Na temelju podataka o strukturi bušotina Je-10 i Je-3, koje su do tad bile izbušene na jugoistočnom dijelu polja, izrađena je bušotina Je-11. Bušotina je probušila naslage kvartara, gornji i donji pont i dio naslaga gornjeg panona. Bušenje je obustavljeno u laporu gornjeg panona ispod ležišta gama₇ na dubini 2041 m (H_v = 2032 m). Bušotina je ispunila zadatak jer je utvrdila ležište gama₄ u naftnom zasićenju. Međutim, ležište gama₄ utvrđeno je 15 m dublje od prognoze i u donjem dijelu zavodnjeno. Iz tog razloga, bušotina je sa postojećih

temelja usmjerena na plići dio strukture prema sljedećim elementima: $A = 6^\circ$, $L = 120$ m, $H_v = 1958$ m. Bušotina je crpila naftu i periodu od 1981. do 1996. godine kada je zavodnjena. Zbog potrebe praćenja ležišnih tlakova, izvršena je prenamjena bušotine u mjernu.

3.11.1. DST ispitivanje bušotine Je-11

Izvršeno je DST ispitivanje intervala 1993-1985,3 m. Dobiven je plin i 1 m^3 emulzije nafta-isplaka. Prema grafičkoj ekstrapolaciji statičkog slojnog pritiska, krivulje protoka imaju blago položen oblik, što nam govori o slaboj propusnosti (Slika 3-9.). Izmjereni statički slojni tlak iznosio je $196,64$ at, a ekstrapolirani slojni tlak $205,27$ at. Temperatura testiranog intervala iznosila je 95°C .



Slika 3-9. Grafička ekstrapolacija statičkog slojnog pritiska (AZU, 1979)

3.11.2. Konstrukcija bušotine Je-11

Zacjevljenje:

Uvodna kolona ($13 \frac{3}{8}$ ") ugrađena do 105 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona ($9 \frac{5}{8}$ ") ugrađena do 440 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona ($5 \frac{1}{2}$ ") ugrađena do 2040 m i zacementirana do 1400 m

Vrh cementa u koloni nalazi se na 2015 m.

3.12. Bušotina Ježevo-12 (alfa)

Koordinate bušotine Je-12 su:

$$Y = 6\ 369\ 531$$

$$X = 5\ 065\ 113$$

$$h = 101\ \text{m}$$

Bušotina Je-12 locirana je u jugoistočnom dijelu polja neposredno uz ušće bušotine Je-3. Bušotina je izrađena koso usmjereno prema sljedećim elementima: $A = 97^\circ$, $L = 330\ \text{m}$, $H_v = 1960\ \text{m}$. Zadatak bušotine bio je probušiti prognozirana ležišta gama serije i registrirati predviđena zasićenja ugljikovodicima, pridonijeti podatke za razrješavanje strukturnih odnosa na jugoistočnom dijelu polja te omogućiti daljnju razradu ležišta. Bušenje je zaustavljeno na 2092 m u naslagama gornjeg panona. Geološkim praćenjem i prema EK dijagramu nije ustanovljena prisutnost ugljikovodika u ležištu gama₄ jer je nabušeno 32 m dublje od prognoze, ispod kontakta nafta-voda.

3.12.1. Bušotina Ježevo-12 α

Odlučeno je da se pristupi bušenju nove koso usmjerene bušotine Je-12 α koja bi trebala registrirati zasićenja ugljikovodicima u povoljnijem dijelu strukture. Usmjeravanje je započelo na dubini 1019 m, a ostvareni su slijedeći elementi: $A = 49^\circ$, $L = 218\ \text{m}$, $H_v = 1963\ \text{m}$.

3.12.1.1. DST ispitivanje

Izvršeno je DST ispitivanje u otvorenom kanalu bušotine na intervalu 1999-2011 m. Kolektor stijena je zalaporeni pješčenjak koji je imao pozitivne indikacije na zasićenje naftom. U bušaćim šipkama dobiveno je 740 l emulzije nafta-voda, s dosta niskim postotkom nafte. Na dijagramima dubinskih manometara, uočavamo da krivulje protoka imaju blago nagnuti oblik što ukazuje na malu propusnost intervala. Očitani statički slojni tlak iznosio je 194,93 bar, a temperatura 100 °C. Na temelju analize podataka, zaključuje se da je testirani interval slabe propusnosti sa slojnom energijom u granicama hidrostatskog tlaka.

3.12.1.2. Konstrukcija bušotine Je-12 α

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 105 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 440 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 ½") ugrađena do 2055 m i zacementirana do 1450 m

3.13. Bušotina Ježevo-13

Koordinate bušotine Je-13 su:

$$Y = 5\ 602\ 960$$

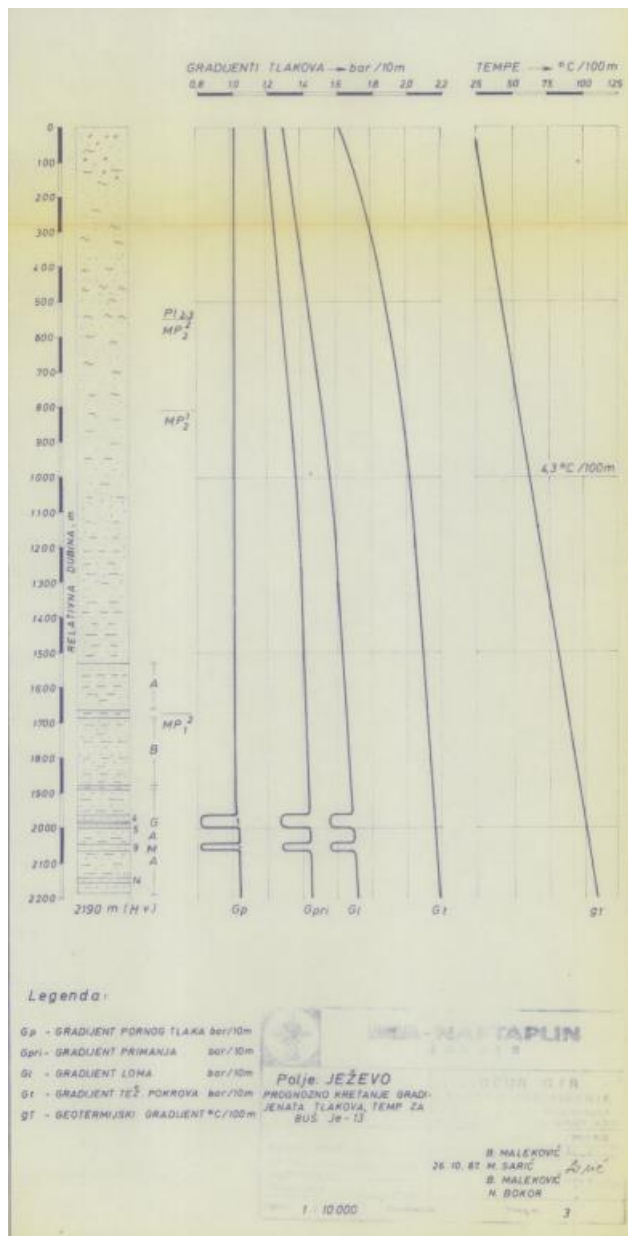
$$X = 5\ 065\ 020$$

$$h = 10\ \text{m}$$

Bušotina Je-13 locirana je na području sela Ježevo. Ušće bušotine smješteno je na sjeverozapadnom kraju strukture, 90 m u smjeru jugoistoka od ušća bušotine Je-10 te 450 m sjeveroistočno od ušća bušotine Je-3. Kanal bušotine je koso usmjeren na ležište gama⁴, a usmjeravanje je vršeno prema slijedećim elementima usmjeravanja: $A = 268^\circ$, $L = 400\ \text{m}$, $H_v = 1963\ \text{m}$. Geološko praćenje bušotine započelo je na dubini 1450 m i vršeno je sve do konačne dubine od 2264 m ($H_v = 2177,8\ \text{m}$). Bušotina je ispunila zadatak, nabušivši sve projektom predviđene naslage. Interval od 2046-2056 m, u kojem se uočeni tragovi pozitivnosti, sadrži tamonosive, srednje tvrde do tvrde lapore i svijetlosive sitnozrnate kvarc tinjčaste pješčenjake.

3.13.1. Gradijenti slojnog tlaka, razdiranja i temperature

Na temelju očekivanih gradijenata slojnog tlaka, razdiranja i temperatura (Slika 3-10.), opisana je bušotina Je-13. Iznad serije gama pretpostavljen je normalni slojni tlak sa gradijentom 1,01 bar/10 m. Kroz ležišta gama serije do dubine 1890 m prema podacima hidrodinamičkih mjerenja, početni slojni tlak je povišen, sa gradijentom 1,04 bar/10 m. Pretpostavljeni gradijent slojnog tlaka unutar ležišta koja su u proizvodnji je pao ispod hidrostatskog na 0,8 bar/10 m. Gradijent primanja stijena u području normalnog tlaka do dubine 1890 m je oko 1,44 bar/10 m. Podaci mjerenja temperature u statičkim uvjetima prilikom ispitivanja bušotina pokazuju srednji temperaturni gradijent kroz kanal bušotine oko 4,3 °C/100 m, a na dnu bušotine očekuje se temperatura oko 110 °C.



Slika 3-10. Očekivani gradijent slojnog tlaka, razdiranja i temperature za bušotinu Je-13 (AZU, 1987)

3.14. Bušotina Ježevo-14

Koordinate bušotine Je-14 su:

$$Y = 5\ 603\ 170$$

$$X = 5\ 065\ 030$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Bušotina Je-14 projektirana je kao proizvodna bušotina za ležište gama serije. Locirana je na području jugoistočnog dijela strukture, a ušće bušotine smješteno je na zajedničkoj platformi zajedno s bušotinom Je-13. Kanal bušotine koso je usmjeren na krovinu ležišta

gama₄. Zadani elementi usmjeravanja su: $A = 231^\circ$, $L = 285$ m, $H_v = 1964$ m. Zadatak bušotine bio je da privede proizvodnji ležište gama serije zasićene ugljikovodicima i da pruži podatke potrebne za daljnju razradu polja. Ostvarena dubina bušotine je 2248 m. Bušotina je probušila sedimentnu seriju kvartara, gornji i donji pont te gornji panon gdje je i završena. S obzirom da je bušotina geološki praćena od 1450 m, opis pojedinih serija do te dubine vođen je pomoću podataka sa susjednih bušotina, a za opis naslaga ispod te dubine, korišteni su podaci EK dijagrama. Temperatura bušotine prema EK dijagramu iznosi 90°C . Svi jezgrovani intervali pokazali su pozitivnost pod UV svjetlom. Bušotina je ispunila zadatak potvrdivši zasićenja ugljikovodicima.

3.14.1. Konstrukcija bušotine Je-14

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 104 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 445 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2155 m i zacementirana do 1100 m.

3.15. Bušotina Ježevo-15

Koordinate bušotine Je-15 su:

$$Y = 5\ 603\ 177$$

$$X = 5\ 065\ 039$$

$$h = 100\ \text{m}$$

Bušotina Je-15 izrađena je na jugoistočnom dijelu polja Ježevo na zajedničkoj platformi s bušotinama Je-13 i Je-14. Koso je usmjerena na vršni dio strukture, a završena je u naslagama gornjeg panona na dubini 2232 m. Zadatak bušotine bio je da ležišta gama serije privede proizvodnji. Geološko praćenje bušotine vršeno je od 1450-2232 m. Od ležišta u kojima se potvrdila prisutnost nafte i koja su bila u proizvodnji, najdublje zaliježu ležišta gama_{15,14} i gama₁₃.

3.15.1. Geološko-geofizički radovi

Analizom EK dijagrama bušotine Je-15 plice od gama serije registrirano je nekoliko slojeva pješčenjaka koji prema krivuljama otpora i spontanog potencijala ukazuju da su zasićeni plinom. Prema karotažnom dijagramu, u podini i krovini gama₄ i gama₅ ležišta kao i između njih dobra je cementna veza iza kolone. U području ležišta gama₄ na intervalu 1992-2016 m, poroznost je oko 17 %, efektivna debljina je 15 m, a propusnost $4 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$.

3.15.2. DST ispitivanje bušotine Je-15

Izvršeno je DST ispitivanje u otvorenom kanalu bušotine na intervalu 2018-2025 m s ciljem da se utvrdi zasićenje u pješčenjacima donjeg panona. Dobiveno je 0,1 m³ isplake. Krivulja tlaka dobro se razvila i na prvi pogled izgleda povoljno, međutim visoka vrijednost nagiba pravca ekstrapolacije odraz je slabe propusnosti. Ekstrapolirani tlak iznosi 189 bara, što je u granicama hidrostatskog tlaka. Izmjerena temperatura na dubini 2022 m iznosi 101,1 °C, odnosno gradijent temperature je 4,5 °C/100 m.

3.15.3. Konstrukcija bušotine Je-15

Uvodna kolona (13 3/8") ugrađena do 106 m i zacementirana do ušća.

Tehnička kolona (9 5/8") ugrađena do 598 m i zacementirana do ušća.

Proizvodna kolona (5 1/2") ugrađena do 2220 m i zacementirana do 500 m.

4. MOGUĆNOST PRIDOBIVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE NA POLJU JEŽEVO NAKON ZAVRŠETKA EKSPLOATACIJE NAFTE I PLINA

Pregledom cjelokupne bušotinske dokumentacije naftnog polja Ježevo u Agenciji za ugljikovodike, vidljivo je da postoji određeni geotermalni potencijal koji bi se mogao koristiti nakon prestanka eksploatacije nafte i plina s ovog polja. Kako se za izradu završnog rada nije smjelo koristiti Elaborate o rezervama navedenog polja, obzirom da je polje trenutno u procesu eksploatacije tvrtke INA d.d. za inicijalnu procjenu geotermalnog potencijala korištena je samo dokumentacija bušotinskog fonda iz AZU. Iz takve dokumentacije nije se moglo iščitati detalje o povijesti proizvodnje polja, poglavito o kretanjima ležišnog tlaka, dubinama razdjelnica nafta-voda te postupku vođenja razrade polja u vidu podržavanja ležišnog tlaka. No, obzirom da postoji niz hidrodinamički odvojenih proslojaka unutar gama naslaga, od kojih su neke u potpunosti zasićene vodom, razumno je za pretpostaviti da u tim proslojcima vlada početni statički tlak, koji je na nizu istražnih radova definiran gradijentom od 1,05 bar/10m. Također, postoji niz mjerenja vrijednosti temperature u gama serijama, ali i dubljim intervalima skroz do 4000m dubine, koji ujednačeno ukazuju da se u području polja Ježevo gradijent kreće otprilike u srednjoj vrijednosti od 4,7°C/100m. Pri ciljanim dubinama gama serija temperatura se kreće u rasponu 95 – 115 °C, ovisno o pojedinom mjerenju u krovinskim ili podinskim proslojcima. Postoje i mnogobrojna DST ispitivanja u kanalima bušotina, koji su opisani u prethodnim poglavljima, te rezultati ukazuju da pješčenjačke gama serije imaju vrijednost propusnosti između 10-15 mD, a analizama na jezgrama i geofizičkim mjerenjima određena je srednja poroznost pješčenjačkih serija od 17%. Proučavanjem bušotinskih profila vidljivo je da većina bušotina ima ugrađenu standardnu 9 5/8“ II tehničku kolonu, no na gotovo svim bušotinama ugrađena je proizvodna kolona 5 1/2“ od površine do ležišta. Najčešće su proizvodne kolone cementirane od 1200-1400 m sve do gama serija na dubinama 1900-2100m. S aspekta proizvodnje geotermalnog fluida ovo je nepovoljni scenarij, obzirom da zbog potrebe većih obroka crpljenja cementirana 5 1/2“ stvara veće hidrauličke gubitke uslijed trenja. Na većini istražnih bušotina van eksploatacijskih polja nafte i plina koje imaju geotermalni potencijal, eventualna proizvodnja se uvijek razmatra kroz 9 5/8“ kolonu, eventualno uz ugradnju tubinga koji služi za spuštanja potopne pumpe (ESP) na određenu dubinu ispod dinamičke razine fluida u bušotini (najčešće dubine od 200-400m). U slučaju revitalizacije polja Ježevo, proizvodne kolone bi se morale odrezati od površine do vrha cementa na dubinama između 1200-1400 m, ovisno o pojedinoj bušotini. Na taj način koristila bi se 9 5/8“ kolona punog profila za protjecanje geotermalne vode, a od dubine 1200

m do 2000 m postojala bi restrikcija, obzirom da bi se protjecanje odvijalo kroz kolonu od 5 1/2“.

Također, prilikom strujanja geotermalne vode od ležišta do površine dolazi do prijenosa toplinske energije u stijene pa temperatura vode na površini ne odgovara temperaturi u ležištu. Naime, kretanjem fluida kroz bušotinu iz ležišta do ušća dolazi do prijenosa topline od fluida prema stijenskoj formaciji, zbog razlike u temperaturi fluida i temperature stijene. Također, ukoliko fluid sadrži veće količine otopljenih plinova može doći i do dodatnog efekta pothlađivanja kapljevine ekspanzijom plina u samoj bušotini, a na temelju smanjivanja tlaka prema površini. U naftnom rudarstvu, opće prihvaćena teorija proračuna pada temperature u bušotini je Ramey-ev model gubitka toplinske energije u stijene proizvodnjom fluida. Ramey (1962) dao je proračun distribucije temperature u bušotini kroz koju se utiskuje vrući fluid kao i prijenos topline fluida u bušotini na okolnu stijenu. Proračune je postavio pod pretpostavkom da fluid zadržava početnu temperaturu te su analize rezultate gubitka topline pri beskonačnom protjecanju fluida. Za geotermalne bušotine potrebno je proračunati vremenski ograničen tok fluida te se dobije gubitak topline u funkciji svojstava fluida i brzine protjecanja fluida. Promatra se tok samo jedne faze. S obzirom da se ukupni koeficijent prijenosa topline dobiva zbrajanjem pojedinačnih koeficijenata prijenosa topline, slijede se tri glavne smjernice za izračun ukupnog koeficijenta. Toplinska otpornost cijevi ili kolone zaštitnih cijevi (casing) često se zanemaruje, s obzirom da je toplinska vodljivost čelika viša od toplinske vodljivosti ostalih materijala koji se nalaze u bušotini i od toplinske vodljivosti same stijenske formacije. Toplinska otpornost tekuće vode ili pare se često može zanemariti, s obzirom da se koeficijenti toplinskog prijenosa topline tankim slojem visoki, te pružaju mali otpor prijenosu topline. Korelacije za određivanje temperature fluida u cijevima vrijede pod pretpostavkama da se fizička i toplinska svojstva stijene i bušotinskog fluida ne mijenjaju s promjenom temperature, da se prijenos topline na stijensku formaciju odvija radijalno te da prijenos topline u bušotini odvija brže od prijenosa topline u stijenskoj formaciji, te se može iskazati ustaljenim stanjem. Navedene metode sastavni su dio programskih paketa koji se koriste u naftnom proizvodnom inženjerstvu, kao što su Prosper ili WellPerform.

Za svako geotermalno ležište s tehnološki odabranim načinom proizvodnje i potrošnje, postoji granična proizvodnja ispod koje je moguće eksploatirati konstantnu energiju kroz duže razdoblje. Ako se s potrošnjom energije iz ležišta prijeđe ova granična vrijednost, proizvodni vijek ležišta će se znatno skratiti. Proizvodnja, gotovo jednaka ili manja od ovoga limesa može se nazvati održivom proizvodnjom. Proizvodnja toplinske energije i njena

rekuperacija unutar ležišta ponaša se uglavnom asimptotski. U prvobitnom stadiju krivulja odražava ubrzani pad energije ili intenzivan porast tijekom restitucije topline procesima unutar samoga ležišta, a zatim se pad ili porast funkcije usporava. Početno stanje energije u ležištu u teorijskom smislu postiglo bi se tek nakon beskonačnoga vremena, no u praksi se to događa puno ranije, sukladno vremenu eksploatacije i kao rezultat djelovanja prirodnih sila poput gradijenata tlaka i temperature. Geotermalna energija je održiva energija u određenim granicama za svaki slučaj zasebno i može se nazvati obnovljivom samo u za to povoljnim geološkim strukturama. Održivost se postiže kada za resurs u eksploataciji, unutar zadanih granica, postoji mogućnost očuvanja i obnavljanja njegovoga znatnoga dijela za daljnju upotrebu u budućnosti. Obnovljivost nasuprot, objašnjava se sposobnošću svojstvenoj samo prirodnim resursima, koja isključivo ovise o kontinuiranim prirodnim procesima kao što je generirani toplinski tok iz zemljine unutrašnjosti koji djeluje regenerativno na pothlađeni dio stijenske mase. Stoga, omjer proizvodnje i obnovljivosti u određenom razdoblju, trebao bi biti jednak prirodnom procesu regeneracije početnih rezervi geotermalnog ležišta, pa se samo tada može govoriti o potpunoj održivosti proizvodnje. Omjer održivost/obnovljivost u kontekstu geotermalne energije ovisi o temperaturnim granicama, procesu prijenosa topline u ležištu (kondukcija, konvekcija, subdukcija, advekcija), vrsti resursa, rezervama i vremenskom faktoru, tehnologiji pridobivanja, vrsti (para, voda, mješavina) i kemizmu fluida, načinu reinjektiranja, vremenu obnovljivosti i slično. Može se pretpostaviti da omjer ukupne energije geotermalnoga ležišta i ukupno vrijeme eksploatacije ima najvišu vrijednost pri maloj proizvodnji. Također, iskustveno, za 30-godišnje razdoblje izotermne proizvodnje potrebno je održavati razmak između proizvodnih i utisnih bušotina od 1500 – 2000m.

Obzirom na značajnu heterogenost razmatranih slojeva kao potencijalnih kolektora za geotermalnu vodu na polju Ježevo, potrebno je napraviti analizu osjetljivosti proizvodnje fluida i dinamičkih tlakova na dnu bušotine, kako bi se pokušalo odrediti optimalne proizvodne kapacitete. Iz analize bušotinskih podataka vidljivo je da na široj makrolokaciji Ježevo vladaju uvjeti približno hidrostatskog tlaka u slojevima koji su dokazano zasićeni vodom ili naftom i vodom (DST ispitivanja). No, obzirom da nije poznato kretanje ležišnog tlaka u gama serijama iz kojih se proizvodila nafta, realno je očekivati korištenje proizvodnih pumpi za proizvodnju geotermalnog fluida te utisnih pumpi za povrat fluida nazad u ležište.

Kod lokacija kao što je Ježevo (kao i sve ostale eventualne pripadajuće mikrolokacije unutar eksploatacijskog prostora), gdje vladaju normalni tlakovi u propusnim sredinama i to vrlo blizu hidrostatskog, ne može se očekivati značajniji eruptivni način rada bušotine, ili se

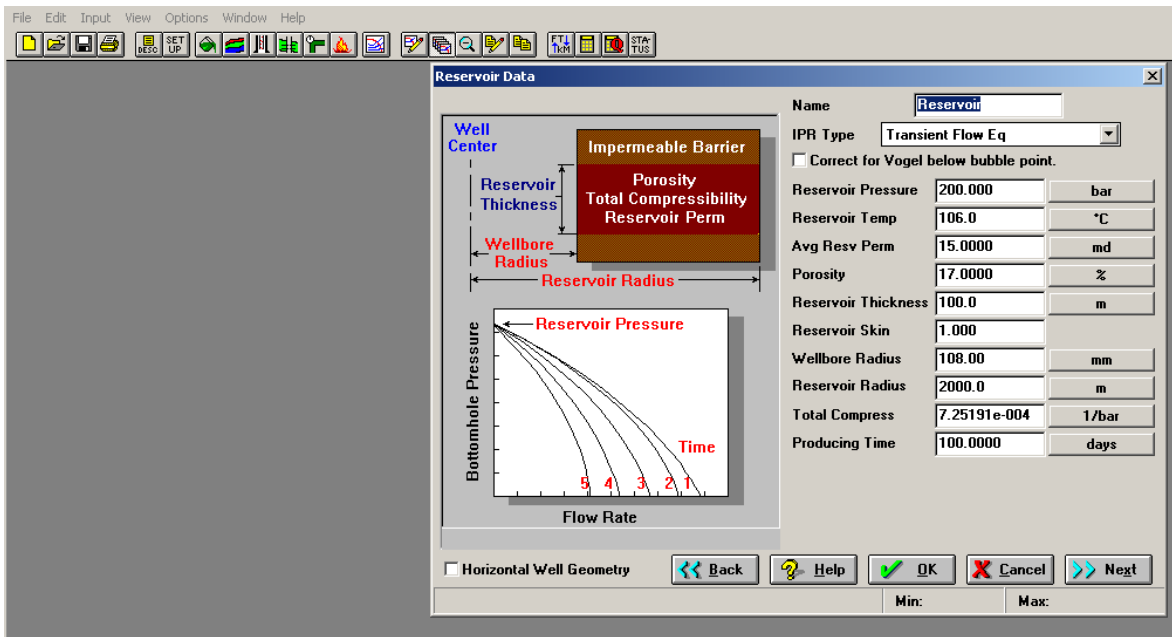
pak mogu očekivati manje količine samoizljevom, ukoliko postoje značajnije količine otopljenih plinova (CH komponente) u vodi (efekt gaslifta).

Ovakva situacija hidrostatskog tlaka je iznimno česta u sedimentacijskim bazenima bez značajnijeg tektonskog djelovanja gdje nije došlo do pojave natpritisnutih slojeva zasićenih fluidom. U ovakvim slučajevima podrazumijeva se korištenje potopnih proizvodnih pumpi visokog radnog kapaciteta za dobivanje značajnijih proizvodnih količina. Osnovni tehnoekonomski kriterij projektiranja proizvodno-utisnih geotermalnih parova bušotina jest dimenzioniranje veličine protoka u funkciji dinamičke potenciometrijske površine u bušotini i potrošnje električne energije pumpe. Naime, u funkciji fizikalnih parametara sloja (poroznost, propusnost, oštećenost sloja), te ležišnih uvjeta (debljina proizvodnog sloja zasićenog vodom, otvorenost i način otvaranja intervala) uvjetuje se odnos proizvodnog obroka crpljenja i dinamičke razine geotermalne vode ispod površine, kao i osnovno projektiranje radnih uvjeta inflow/outflow analizom ugrađene bušotinske opreme. Na ovaj odnos također utječe i površina protjecanja te hrapavost površine, no u naftnom inženjerstvu najčešće se radi o standardnoj 9 5/8“ II tehničkoj koloni zaštitnih cijevi vanjskog promjera 244,5 mm, odnosno unutrašnjeg promjera 219 mm u ovom slučaju. No, na naftnim poljima učestalo se nalazi i ugrađena proizvodna kolona 5 1/2“ od površine do ležišta koja je djelomično cementirana pa je potrebno računati i s restrikcijama u protočnoj površini na gotovo polovici dubine bušotine, kao što je to ovdje slučaj na polju Ježevo. Ukoliko su proizvodni slojevi niske propusnosti potrebno je ostvariti veliku depresiju tlaka na dnu bušotine kako bi se proizvodile značajnije količine geotermalnog fluida. Ovo je direktna mjera snage potopne pumpe i njezinog usisa, odnosno, što je veća proizvodnja fluida bit će i veća dubina dinamičke razine fluida u bušotini, a time i dublji smještaj potopne pumpe. Visina dizanja potopne pumpe diktira i snagu te potrošnju električne energije, no najbitnije i konstrukcijski rast vanjskog promjera pumpe, gdje je unutrašnji promjer tehničke kolone ili proizvodne kolone faktor ograničenja.

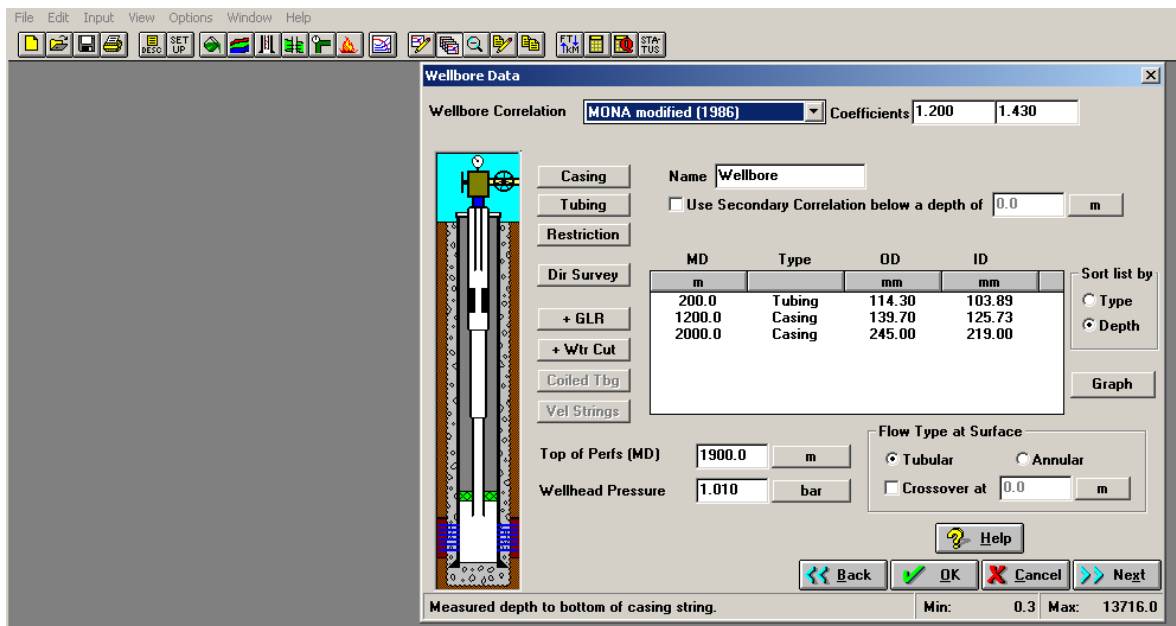
Za naftno polje Ježevo, izvedeni su proračuni dinamičkog tlaka na dubini od 2000 m, što je težinska dubina svih gama serija odnosno kolektorskih naslaga Iva pješčenjaka unutar Ivanić Grad formacije. Početni tlak u analizi iznosi 200 bar (gradijent približno jednak hidrostatskom), uz temperaturu od 106 °C u ležištu (4,7°C/100m uz temperaturu površine 12°C). Prema podacima iz dostupne dokumentacije, dubina razdjelnice nafta-voda nalazi se na dubini od 1890 m za gama seriju 4, no obzirom na heterogenost slojeva predviđa se otvaranje svih vodonosnih slojeva gama serije od 1-17. Analizirana debljina proizvodnih slojeva iznosi 250 m (otvorene perforacije) obzirom da se serije naftnih i vodonosnih slojeva

pojavljaju na dubinama od 1850 – 2100 m, no uz proslojke lapora. Stoga se prema geofizičkim podacima procjenjuje da je neto dubina slojeva koji mogu proizvoditi geotermalnu vodu otprilike 100 m. Udio plina u geotermalnoj vodi kreće se između 3 - 5 m³/m³ (pretežno CH₄), a za vertikalnu korekciju dvofaznog protoka korištena je korelacija MONA modified. Ležišna IPR krivulja izračunata je temeljem pretpostavke u potpunosti razvijenog tranzijentnog tipa protjecanje nakon 100 dana. Efektivna poroznost je sukladno analizama podešena na 17 %, a skin pribušotinske zone kao pretpostavka iznosi 1. Pretpostavljen je radijus ležišta od 2000 m, uz ukupnu kompresibilnost sustava od $7,2 \times 10^{-4}$ bar. Tlak ušća u analizi iznosi 1 bar uz inicijalnu pretpostavku slabe eruptivne proizvodnje, iako je u programu Wellperform podešavan tlak ušća kako bi se našla optimalna točka. Jedina mogućnost snažnije eruptivne proizvodnje bi bila ukoliko u dubljim dijelovima koji nisu testirani postoje značajnije količine otopljenog plina, pa je moguća eruptivna proizvodnja uslijed efekta gaslifta izdvajanjem prirodnog plina, no navedena proizvodna ispitivanja nisu odrađena. Pad temperature pri protjecanju fluida od dna do ušća izračunat je unificiranim modelom (Gringarten et al., 1975). Analiza osjetljivosti dinamičkih tlakova na dnu obavljena je za efektivne varijacije propusnih debljina od 100 m kao osnovne, te slučajeva 50 m i 200m, i to uz pretpostavku srednje propusnosti pješčenjaka od 15 mD po cijeloj debljini intervala, za što se uporište može pronaći u brojnim DST ispitivanjima.

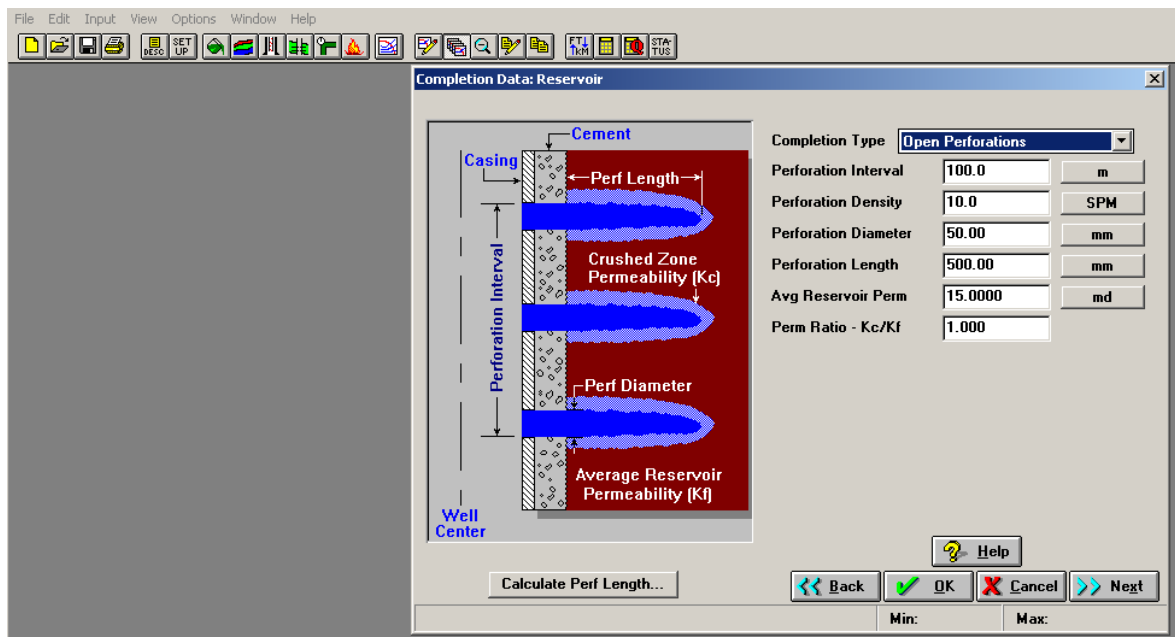
Za proračun mogućih proizvodnih kapaciteta korišten je programski paket WellPerform, tvrtke IHS Markit koja je fakultetu ustupila akademsku licencu. Navedeni program računa moguću proizvodnju uzevši u obzir konstrukciju bušotine, sastave fluida, petrofizikalne i termodinamičke karakteristike fluida i stijena te dinamičke tlakove na dnu bušotine i na ušću.



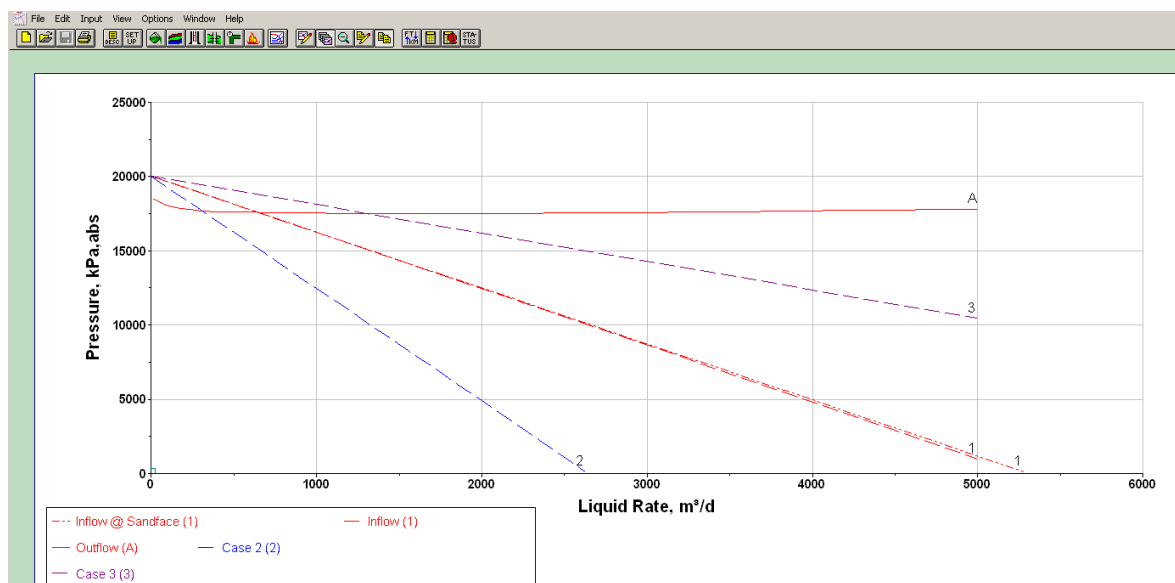
Slika 4-1. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za ležište (gama serije Iva pješčenjaka Ivanić Grad formacije)



Slika 4-2. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za konstrukciju bušotine Ježev-X s opremom nakon zamišljene revitalizacije



Slika 4-3. Prikaz osnovnog sučelja programa WellPerform i unošenja podataka vezanih za otvaranje gama serije slojeva



Slika 4-4. Rezultati proračuna proizvodnje programa WellPerform za tri scenarija kumulativnih debljina propusnih gama serija Iva pješčenjaka od 100 m (Inflow 1 – Case -1), 50 m (Case-2) i 200 m (Case-3)

Na Slici 4-4. je vidljivo da je moguća uspostava eruptivnog protoka za postavljen ležišni i proizvodni model, odnosno vrijednost protoka iz sjecišta krivulja karakteristika produktivnosti ležišta (*inflow*) i produktivnosti kroz ugrađenu opremu (*outflow*) obzirom na

depresije tlaka za navedenu proizvodnju, a time i posljedično dinamičke razine geotermalne vode pri usisu potopne pumpe ukoliko se koristi. Obzirom na iznimno veliku investiciju u iskorištavanje geotermalne toplinske energije i proizvodnju toplinske energije iz geotermalnog fluida, nužno je uvijek ukalkulirati i geološki rizik i heterogenost cijelog člana Iva pješčenjaka. Kako bi se pokazala funkcionalna zavisnost pridobivih količina i dinamičkog tlaka na dnu bušotine analizirane su i pretpostavka tanjih slojeva koji su propusni i sudjelovali bi u cirkulaciji geotermalnog ležišta. Istovjetna analiza obavljena je uz izmjene efektivne propusne debljine od 50 i 200 m, uz realnu od 100 m debljine, uz konstantih 15 mD propusnosti slojeva i 17% poroznost.

Rezultati analize eruptivne proizvodnje programom WellPerform iz gama serija Iva pješčenjaka (1850-2100 m), Ivanić Grad formacija su sljedeći:

1. realni scenarij

(kumulativna dubina propusnih intervala zasićenih vodom od 100m:

- protok: 632 m³/d (7,3 l/s)

-ustaljeni dinamički tlak: 176 bar

-temperatura ušća: 99 °C

-toplinska snaga na ušću bušotine (99°C ->40°C): 1,81 MWt

2. najgori mogući scenarij

(kumulativna dubina propusnih intervala zasićenih vodom od 50m:

- protok: 297 m³/d (3,4 l/s)

-ustaljeni dinamički tlak: 177 bar

-temperatura ušća: 94 °C

-toplinska snaga na ušću bušotine (94°C ->40°C): 0,78 MWt

3. najbolji mogući scenarij

(kumulativna dubina propusnih intervala zasićenih vodom od 200m:

- protok: 1302 m³/d (15,1 l/s)

-ustaljeni dinamički tlak: 175 bar

-temperatura ušća: 102 °C

-toplinska snaga na ušću bušotine (102°C ->40°C): 3,92 MWt

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirano je naftno polje Ježevo s ciljem određivanja geotermalnog potencijala kolektorskih stijena gama serija Iva pješčenjaka unutar Ivanić Grad formacije. Kako u Republici Hrvatskoj postoji trenutno 57 eksploatacijskih polja ugljikovodika od kojih su neka u zreloj fazi eksploatacije, postoji nesumnjivo velik potencijal privođenja proizvodnji geotermalne energije na nekim od trenutno aktivnih polja. Prvenstveno su to naftna i polja koja su na dubinama većim od otprilike 1500 m, obzirom da je tada moguće direktno iskorištavanje vrele vode u energetske sustavima, ili čak proizvodnja električne energije. Analizom cjelokupno dostupne bušotinske dokumentacije naftnog polja Ježevo utvrđen je geotermalni potencijal, obzirom da je većina gama serija Iva pješčenjaka u potpunosti zasićen vodom, ili je voda prisutna u obliku podinskog akvifera u proslojcima iz kojih se proizvodi nafta. Dostupna dokumentacija iz AZU u obliku pregleda bušotinskog fonda u dobrom dijelu je dostatna kako bi se inicijalno potvrdilo ili opovrgnulo postojanje ekonomičnih zaliha geotermalne vode. Također, osnovni prikupljeni petrofizikalni podaci ležišta bili su dostatni za pokazni proračun proizvodnje na primjeru jedne revitalizirane bušotine na polju Ježevo. No, za ozbiljnije analize revitalizacije, koje prelaze okvire ovog rada, potrebno je dobiti i dopuštenje INA d.d. za uvid u podatke iz Elaborata o rezervama koji su neophodni za shvaćanje cijelog historijata proizvodnje ugljikovodika, te prvenstveno podatke o veličini akvifera, kretanju ležišnog tlaka i razdjelnice nafta i voda nakon desetljeća crpljenja. Bez ovih podataka, rezultati predočeni ovom analizom vrijede za sve proslojke koji su potpuno zasićeni vodom, ili nisu sudjelovali u proizvodnji ugljikovodika, dok za ostale proslojke postoji rizik opisan nedostatnim podacima. No, geotermalni potencijal na polju svakako postoji te bi se u određenim količinama mogao koristiti na lokaciji u sklopu programa napuštanja naftnih polja i njihovom revitalizacijom u geotermalna.

6. LITERATURA

1. AGENCIJA ZA UGLJIKOVODIKE [AZU] (1984-2000). Bušotinski fond naftnog polja Ježevo. Interna dokumentacija.
2. AGENCIJA ZA UGLJIKOVODIKE [AZU]. URL: <https://www.azu.hr/hr-hr> (24.8.2023.)
3. GOOGLE EARTH. URL: <https://earth.google.com> (30.8.2023.)
4. GRINGARTEN, A. C., I SAUTY, J. P. (1975): The Effect of Reinjection on the Temperature of a Geothermal Reservoir Used for Urban Heating. U Proc. Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Vol. 2, 1370-1374.
5. MACENIĆ, M. (2020). 'Konceptualni model eksploatacije geotermalne energije revitalizacijom napuštenih naftnih i plinskih bušotina u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske, doktorski rad, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb
6. MACENIĆ, M., KUREVIJA, T., I HERBST, T. (2022). 'Eksploatacija geotermalne energije revitalizacijom privremeno napuštenih bušotina', *Nafta i Plin*, 41.(170. - 171.), str. 89-96.
7. MINISTARSTVO GOSPODARSTVA I ODRŽIVOG RAZVOJA [MINGOR]. URL: <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/naftno-rudarstvo-i-geotermalne-vode-za-energetske-svrhe/5403> (16.8.2023.)
8. RAMEY, H.J., (1962). Wellbore heat transmission. *Journal of petroleum Technology*, 14(04), pp.427-435.

IZJAVA

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

Teo Hrastić

Teo Hrastić



KLASA: 602-01/23-01/69
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 12.09.2023.

Teo Hrastić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/69, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 23.05.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

PROCJENA GEOTERMALNOG POTENCIJALA NAFTNOG POLJA JEŽEVO

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada prof. dr. sc. Tomislav Kurevija nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu dr. sc. Marija Macenić.

Mentor:

(potpis)

prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

(titula, ime i prezime)

(potpis)

dr. sc. Marija Macenić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)