

# Inteligentno opremanje bušotina

---

**Marinović, Filip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:476114>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**INTELIGENTNO OPREMANJE BUŠOTINA**

Diplomski rad

Filip Marinović

N402

Zagreb, 2024.

## INTELIGENTNO OPREMANJE BUŠOTINA

Filip Marinović

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

### Sažetak

Tijekom godina porasla je potražnja za izvorima energije, a konvencionalne metode proizvodnje nafte i plina više nisu dovoljne kako bi se zadovoljila potreba za ugljikovodicima. Naftna i plinska industrija suočava se s brojnim ekonomskim, geografskim i tehničkim izazovima, prvenstveno zbog smanjenja cijena nafte i plina te tržišne nestabilnosti. Posljednjih nekoliko desetljeća primjetan je trend novih načina opremanja bušotina i proizvodnje fluida. Uobičajeno rješenje za smanjenje problema ekonomske isplativosti proizvodnje ugljikovodika jest povećanje proizvodnje nafte i kontropka iz novih i postojećih nalazišta nafte i plina korištenjem inteligentnih sustava za opremanje bušotina. Tehnologija inteligentno opremljenih bušotina jedna je od novijih tehnologija proizvodnje koja se koristi kako bi se maksimizirala proizvodnja i iscrpak iz budućih i postojećih ležišta nafte i plina. Bušotine koje su opremljene inteligentnim uređajima za praćenje i upravljanje, omogućuju operaterima aktivno praćenje i daljinsko zatvaranje ili smanjenje protoka iz različitih dijelova ležišta. U ovom diplomskom radu analizirana je tehnologija inteligentnog opremanja bušotina, uređaji koji se koriste pri inteligentnom opremanju bušotina te primjena u praksi.

Ključne riječi: Inteligentno opremanje, uređaj za regulaciju protoka, dubinski regulacijski ventil, mjerni pretvornik, kontrolni vodovi

Diplomski rad sadrži: 82 stranice, 5 tablica, 57 slika i 60 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

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

Ocjenjivači: Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a  
Dr. sc. Lidia Hrnčević, redovita profesorica RGNF-a  
Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNF-a

## SMART WELL COMPLETION

Filip Marinović

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

### Abstract

Over the years, there has been an increasing demand for energy sources, and conventional methods of oil and gas production are no longer sufficient to meet the growing need for hydrocarbons. The oil and gas industry faces numerous economic, geographical, and technical challenges, primarily due to the decrease in oil and gas prices and market instability. In recent decades, a noticeable trend has emerged in adopting new ways of well completion and production. The typical solution to address the economic feasibility issues of hydrocarbon production involves increasing oil production and recovery from new and existing oil and gas reservoirs using smart well completion systems. Smart well completion technology is one of the newer production technologies utilized to maximize production and recovery from future and existing oil and gas fields. Wells equipped with smart monitoring and control devices allow operators to actively monitor and remotely adjust or reduce flow rates from various parts of the reservoir. This thesis analyzes smart well completion technology, the devices used in smart well completion, and their practical applications.

Keywords: Smart well completion, interval control device, interval control valve, downhole gauges, control lines

Thesis contains: 82 pages, 5 tables, 57 figures and 60 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate professor Borivoje Pašić, PhD

Reviewers: Associate professor Borivoje Pašić, PhD  
Full professor Lidia Hrnčević, PhD  
Associate professor Vladislav Brkić, PhD

## SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| POPIS SLIKA.....   | III       |
| POPIS TABLICA .....  | VI        |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA.....                | VII       |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA .....  | VIII      |
| <b>1. UVOD .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. INTELIGENTNO OPREMLJENE BUŠOTINE .....</b>                       | <b>3</b>  |
| <b>2.1. Primjena tehnologije inteligentnog opremanja bušotina.....</b> | <b>7</b>  |
| <b>2.2. Komponente sustava za inteligentno opremanje .....</b>         | <b>17</b> |
| 2.2.1. Sustav nadzora u bušotini .....                                 | 18        |
| 2.2.1.1. <i>Optička vlakna .....</i>                                   | <i>20</i> |
| 2.2.1.2. <i>Električni mjerni pretvornici.....</i>                     | <i>20</i> |
| 2.2.1.3. <i>Optički mjerni pretvornici.....</i>                        | <i>22</i> |
| 2.2.1.4. <i>Ostale vrste mjernih pretvornika .....</i>                 | <i>23</i> |
| 2.2.2. Sustav kontrole u bušotini.....                                 | 23        |
| 2.2.3. Dubinski regulacijski ventili (ICV) .....                       | 24        |
| 2.2.4. Uređaji za regulaciju protoka (ICD) .....                       | 28        |
| 2.2.4.1. <i>Vanjski zasun.....</i>                                     | <i>30</i> |
| 2.2.4.2. <i>Cijev (vodnik) ispod zasuna .....</i>                      | <i>31</i> |
| 2.2.4.3. <i>Komora.....</i>  | <i>32</i> |
| 2.2.4.4. <i>Otvori/mlaznice .....</i>                                  | <i>32</i> |
| 2.2.5. Autonomni uređaji i ventili za regulaciju protoka .....         | 36        |
| 2.2.6. Izbor između ICV-a i ICD-a .....                                | 42        |
| 2.2.7. Ventil s rukavcem .....   | 44        |
| 2.2.8. Automatski plinski lift .....                                   | 46        |
| 2.2.9. Kontrolni vodovi i zaštita za kontrolne vodove.....             | 47        |
| 2.2.10. Jedinice zonske izolacije.....                                 | 51        |
| 2.2.11. Površinski kontrolni sustav .....                              | 52        |
| 2.2.11.1. <i>Klasifikacija površinskog kontrolnog sustava .....</i>    | <i>52</i> |
| 2.2.12. Bežična tehnologija.....                                       | 53        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.3. Modeliranje inteligentnog opremanja bušotine.....</b>   | <b>55</b> |
| <b>3. PRIMJENA TEHNOLOGIJE INTELIGENTNOG OPREMANJA BUŠOTINA .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>3.1. Strategije inteligentnog opremanja bušotina .....</b>   | <b>56</b> |
| 3.1.1. Reaktivna strategija – „Closed-loop“ strategija.....   | 56        |
| 3.1.2. Proaktivna strategija - „Open-loop“ strategija.....  | 57        |
| 3.1.3. Radni tok kontrole bušotine.....   | 57        |
| <b>3.2. Povećanje iscrpka fluida iz ležišta utiskivanjem vode, kontrola pijeska i prodora vode i plina u inteligentno opremljenim bušotinama.....</b> | <b>59</b> |
| 3.2.1. Povećanje iscrpka fluida iz ležišta utiskivanjem vode.....   | 59        |
| 3.2.2. Kontrola pijeska.....  | 60        |
| 3.2.3. Kontrola konusiranja plina.....  | 62        |
| 3.2.4. Kontrola proizvodnje vode .....  | 63        |
| 3.2.4.1. <i>Primjer iz prakse (Saudi Aramco, Saudijskoj Arabija).....</i>   | <i>63</i> |
| 3.2.4.2. <i>Primjer iz prakse (polje Shuaiba, Oman) .....</i>   | <i>67</i> |
| <b>3.3. Poboljšanje performansi bušotine korištenjem električne uronjive pumpe u kombinaciji s inteligentnim opremanjem.....</b>                      | <b>69</b> |
| 3.3.1. Primjer u praksi.....  | 70        |
| <b>3.4. Rizici i pouzdanost.....</b>  | <b>71</b> |
| <b>4. EKONOMSKA PROCJENA .....</b>  | <b>72</b> |
| <b>5. ZAKLJUČAK.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>6. LITERATURA .....</b>  | <b>78</b> |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1-1. Platforma Snorre kojom je izrađena bušotina na kojoj je prvi puta primijenjeno opremanje inteligentnim uređajima .....                               | 2  |
| Slika 2-1. Proces rada inteligentno opremljene bušotine .....   | 3  |
| Slika 2-2. Prikaz konvencionalne i inteligentno opremljene proizvodne bušotine .....  | 4  |
| Slika 2-3. Sustav inteligentnog opremanja horizontalne bušotine .....   | 5  |
| Slika 2-4. Instalacija sustava inteligentnog opremanja .....  | 5  |
| Slika 2-5. Primjer konstrukcije horizontalne i vertikalne bušotine u istom ležištu.....   | 7  |
| Slika 2-6. Opremanje otvorenog kanala bušotine.....   | 8  |
| Slika 2-7. Otvoreni kanal s prorezanim ili perforiranim lajnerom i opcionalno produženi tubing.....   | 9  |
| Slika 2-8. Selektivno opremanje zacijevljene bušotine podijeljene na tri zone .....   | 9  |
| Slika 2-9. Inteligentno opremljena multilateralna bušotina.....   | 10 |
| Slika 2-10. TAML Razina 1 .....   | 11 |
| Slika 2-11. TAML Razina 2 .....   | 12 |
| Slika 2-12. TAML Razina 3 .....   | 13 |
| Slika 2-13. TAML Razina 4 .....   | 14 |
| Slika 2-14. TAML Razina 5 .....   | 15 |
| Slika 2-15. TAML Razina 6 .....   | 15 |
| Slika 2-16. Usporedba bušotine s velikim dosegom i konvencionalne usmjerene bušotine  | 16 |
| Slika 2-17. Inteligentno opremljena bušotina na TLP platformi Snorre .....  | 17 |
| Slika 2-18. Mjerni pretvornici u inteligentno opremljenoj bušotini.....   | 19 |
| Slika 2-19. Kvarcni piezometar .....  | 21 |
| Slika 2-20. Električni silicijski mjerni pretvornik na izolatoru sastavljen od (1) gornjeg kućišta, (2) baze, (3) diska, (4) spojnog stakla i (5) senzora ..... | 22 |
| Slika 2-21. Sustav kontrole u bušotini.....   | 23 |
| Slika 2-22. Dubinski regulacijski ventil (ICV).....   | 24 |
| Slika 2-23. Prva generacija ICV-a.....  | 26 |
| Slika 2-24. Brtvila u ICV-ovima prve generacije.....  | 27 |
| Slika 2-25. Brtvila u ICV-ovima druge generacije.....   | 28 |
| Slika 2-26. Primjena ICD-ova u bušotinama.....  | 29 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 2-27. Tipični uređaj za regulaciju protoka (ICD).....                               | 30 |
| Slika 2-28. Tipovi ICD-ova .....  | 34 |
| Slika 2-29. AICD tvrtke Equinor.....  | 38 |
| Slika 2-30. Dijagrami smanjenja tlaka u laminarnom i turbulentnom regulatoru.....         | 39 |
| Slika 2-31. AICV pored kovanice od jednog eura.....                                       | 40 |
| Slika 2-32. Skica RCP-a .....   | 40 |
| Slika 2-33. Dizajn AICV-a .....   | 41 |
| Slika 2-34. Direktno kontrolirani ventil s rukavcem .....                                 | 44 |
| Slika 2-35. Hidraulički klizni rukavci .....  | 45 |
| Slika 2-36. Višestruki izravno kontrolirani hidraulički klizni rukavci.....               | 45 |
| Slika 2-37. Kontrola više hidrauličnih kliznih rukavaca pomoću samo tri kontrolna voda    | 46 |
| Slika 2-38. Sustav s automatskim plinskim liftom .....                                    | 47 |
| Slika 2-39. Primjer ravnih spojeva s pokrovnom pločom .....                               | 49 |
| Slika 2-40. Ugradnja zaštitne ploče kontrolnog voda .....                                 | 49 |
| Slika 2-41. Stezaljka kontrolnih vodova .....   | 50 |
| Slika 2-42. Prolasci kontrolnih vodova na vješalici tubinga .....                         | 50 |
| Slika 2-43. Parker s prolazom za kontrolne vodove .....                                   | 51 |
| Slika 2-44. PulseEight Sustav tvrtke Tendeka .....  | 54 |
| Slika 3-1. SWSF za reaktivnu strategiju.....  | 58 |
| Slika 3-2. SWSF za proaktivnu strategiju .....  | 58 |
| Slika 3-3. Zavodnjene zone ležišta.....   | 59 |
| Slika 3-4. Kontrola pijeska u inteligentno opremljenoj bušotini.....                      | 61 |
| Slika 3-5. Kontrola pijeska u zacijevljenom kanalu inteligentno opremljene bušotine ..... | 62 |
| Slika 3-6. Inteligentno opremljen otvoreni kanal bušotine u Saudijskoj Arabiji .....      | 65 |
| Slika 3-7. Polje Shuaiba, Oman.....   | 68 |
| Slika 3-8. Inteligentno opremljena bušotina "X".....                                      | 68 |
| Slika 3-9. Selektivno testiranje kanala .....   | 69 |
| Slika 3-10. Proizvodnja pomoću horizontalne bušotine iz tri zone ležišta.....             | 70 |
| Slika 4-1. Dodana vrijednost korištenjem sustava inteligentnog opremanja bušotina .....   | 74 |



Slika 4-2. Poboljšanje u financijskom toku korištenjem tehnologije inteligentnog opremanje ..... 75

## **POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 2-1. Svojstva različitih tipova ICD-ova.....     | 35 |
| Tablica 2-2. Ponuda AICD-ova tvrtke Halliburton .....    | 37 |
| Tablica 2-3. Usporedba opremanja s ICV-om i ICD-om ..... | 42 |
| Tablica 3-1. Rezultati prvog testiranja .....            | 65 |
| Tablica 3-2. Rezultati drugog testiranja .....           | 66 |

**POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA**

| <b>Oznaka</b>  | <b>Jedinica</b>   | <b>Opis</b>                       |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|
| $\Delta p$     | Pa                | diferencijalni tlak ili pad tlaka |
| Q              | m <sup>3</sup> /s | protok                            |
| L              | m                 | duljina                           |
| $\rho$         | kg/m <sup>3</sup> | gustoća                           |
| w              | m                 | širina                            |
| A              | m <sup>2</sup>    | površina                          |
| v              | m/s               | brzina                            |
| h              | m                 | visina                            |
| d              | m                 | promjer                           |
| $\mu$          | Pas               | viskoznost                        |
| R <sub>h</sub> | m                 | hidraulički radijus               |
| k              | -                 | geometrijska konstanta            |
| D              | m                 | vanjski promjer cijevi            |
| p              | Pa                | tlak                              |

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

| OZNAKA | OPIS  |
|--------|---|
| IWC    | Inteligentno opremljena bušotina (engl. <i>Intelligent Well completion</i> )  |
| SCADA  | Sustav za nadzor, mjerenje i upravljanje industrijskim sustavima (engl. <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> )   |
| TAML   | Tehnologija opremanja multilateralnih bušotina (engl. <i>Technology Advancement of Multilaterals</i> )                      |
| ERD    | Bušotina s velikim dosegom (engl. <i>Extended Reach Drilling</i> )  |
| HD     | Horizontalni doseg (engl. <i>Horizontal Displacement</i> )  |
| SFSW   | Inteligentni tok za inteligentne bušotine (engl. <i>Smart Flow for Smart Wells</i> )  |
| TVD    | Stvarna uspravna dubina (engl. <i>True Vertical Depth</i> )   |
| SCRAMS | Površinski sustav za analizu i kontrolu ležišta (engl. <i>Surface-Controlled Reservoir Analysis and Management System</i> ) |
| ESP    | Električna uronjiva pumpa (engl. <i>Electrical Submersible Pump</i> )   |
| WOC    | Kontakt voda-nafta (engl. <i>Water Oil Contact</i> )  |
| ICV    | Dubinski regulacijski ventil (engl. <i>Interval Control Valve</i> )   |
| ICD    | Uređaj za regulaciju protoka (engl. <i>Interval Control Device</i> )  |
| PDG    | Stalni mjerač u bušotini (engl. <i>Permanent Downhole Gauge</i> )   |
| EHA    | Električno hidraulički aktuator (engl. <i>Electro Hydraulic Actuator</i> )  |
| SCS    | Površinski kontrolni sustav (engl. <i>Surface Control System</i> )  |
| GOR    | Omjer plina i nafte (engl. <i>Gas Oil Ratio</i> )   |
| WOR    | Omjer vode i nafte (engl. <i>Water Oil Ratio</i> )  |
| RCP    | Proizvodnja s kontroliranom brzinom (engl. <i>Rate Controlled Production</i> )  |
| AGL    | Automatski plinski lift (engl. <i>Auto Gas Lift</i> )   |
| HSE    | Zdravlje, sigurnost i okoliš (engl. <i>Health, Safety, and Environment</i> )  |
| OPEX   | Operativni troškovi (engl. <i>Operating Expenses</i> )  |

|        |   |
|--------|---|
| HLMW   | Hidraulička spojnica (engl. <i>Hydraulic-Line downhole Wet-Mate connector</i> )                                 |
| CAPEX  | Kapitalni troškovi (engl. <i>Capital Expenses</i> )   |
| SCSSV  | Sigurnosni ventil kontroliran s površine (engl. <i>Surface-Controlled Subsurface Safety Valve</i> )             |
| IV-ICV | Beskonačno promjenjivi regulacijski ventil za protok (engl. <i>Infinitely Variable Interval Control Valve</i> ) |
| NPV    | Neto sadašnja vrijednost (engl. <i>Net Present Value</i> )  |
| SOI    | Elektronički silicijski mjerni pretvornici na izolatoru (engl. <i>Electronic Silicon-On-Insulator</i> )         |
| SIMOX  | Razdvajanje pomoću usađenog kisika (engl. <i>Separation by Implanted Oxygen</i> )                               |
| EHAs   | Elektro-hidrostaticki aktuatorski sustav (engl. <i>Electro-Hydrostatic actuation system</i> )                   |
| KOP    | Točka skretanja bušotine (engl. <i>Kickoff point</i> )  |
| AICD   | Autonomni intervalni regulacijski uređaj (engl. <i>Autonomous Interval Control Device</i> )                     |
| AICV   | Autonomni intervalni regulacijski ventil (engl. <i>Autonomous Interval Control Valve</i> )                      |
| EOR    | Povećanje iscrpka nafte (engl. <i>Enhanced Oil Recovery</i> )   |
| PDHMS  | Trajni nadzorni sustav na dnu bušotine (engl. <i>Permanent Downhole Monitoring System</i> )                     |

## 1. UVOD

Opremanje bušotine vrlo je važno za razvoj naftnog ili plinskog polja. Kvaliteta dizajna i provedbe opremanja ima ključnu ulogu u postizanju očekivane proizvodnje ugljikovodika (Renpu, 2011a). Svrha opremanja bušotine je povezati površinu s ležištem tako da se željeni fluidi mogu pridobiti iz ili utisnuti u ležište; izolirati ležište od drugih zona, osigurati prostor za provedbu stimulacijskih radova, zaštititi cjelovitost ležišta, posebno u nekonsolidiranim formacijama i osigurati prostor za provedbu mjerenja tlaka i brzine protoka tijekom ispitivanja bušotine.

Brojna naftna i plinska polja diljem svijeta imaju proizvodnju znatno manju od potencijalnih vrijednosti. Rezerve nafte i plina, koje ranije nisu bile ekonomski isplative za eksploataciju, su zanemarene i odbačene, jer je tehnologija, potrebna za isplativo iskorištavanje takvih ležišta, trenutno nedostupna, skupa ili nedokazana. Tijekom posljednjih godina, brojne nove tehnologije promijenile su način proizvodnje ugljikovodika u smjeru boljeg iskorištavanja ležišta i nižih troškova intervencija na bušotinama. Jedan od najrevolucionarnijih izuma u proizvodnji ugljikovodika je inteligentno opremanje bušotine IWC (engl. *Intelligent Well Completions*). Pojam inteligentno opremljene bušotine odnosi se na bušotine opremljene trajnom opremom za dobivanje podataka temeljem mjerenja promjena parametara bušotine i regulacijskim ventilima koji pružaju mogućnost izravnog upravljanja pojedinom dionicom kanala bušotine. Bušotine opremljene na ovaj način karakteriziraju mogućnost prikupljanja i analize podataka iz bušotine te izravno praćenje i kontrola proizvodnje iz ležišta, kao i utjecanje na istu.

Najvažnija prednost inteligentno opremljene bušotine u odnosu na konvencionalno opremljene bušotine je poboljšanje produktivnosti bušotine i pružanje brzog i učinkovitog rješenja za gotovo sve proizvodne probleme bez potrebe za izravnom intervencijom (zahvatom) u bušotini.

Prvo inteligentno opremanje bušotine izvela je kompanija Saga Petroleum na platformi s nategom u nogama Snorre (Slika 1-1.) u Sjevernom moru 1997. godine (Gao et al., 2007). Ideja je proizašla iz traženja rješenja za skupe i složene zahvate u bušotinama (Reed et al., 2012). Od tada je tehnologija inteligentnog opremanja bušotine primijenjena na tisućama polja širom svijeta, a kako inteligentno opremanja bušotine ovisi o karakteristikama bušotine i tehničkim zahtjevima, svaki slučaj se smatra jedinstvenim.

Potreba za povećanjem proizvodnje ugljikovodika, dobivanjem veće količine ugljikovodika i ekonomična proizvodnja iz nekonvencionalnih izvora predstavlja značajan izazov za proizvođače nafte i plina. Visoki početni troškovi i gubitak prihoda zbog zatvaranja bušotine radi dobivanja podataka mjerenjem također su imali važan utjecaj na razvoj tehnologije inteligentnog opremanja.

Općenito, iscrpak fluida iz naftnih ležišta je između 20 i 40% (Muggeridge et al., 2014), dok je cilj mnogih operatora dostići 60%. Inženjeri su otkrili da iscrpak fluida iz ležišta uvelike ovisi o tehnologiji opremanja i upravljanju ležištima. S obzirom na to, razvili su sustav inteligentnog opremanja, koji se temelji na kombinacijama dubinskih mjernih pretvornika i aktuatora kako bi prikupili točnije podatke o bušotini i omogućili trenutnu kontrolu nad proizvodnjom iz bušotine. Također implementacija novih tehnologija postaje sve važnija u industriji nafte i plina. U ovom diplomskom radu bit će predstavljena i obrađena tehnologija inteligentnog opremanja bušotina i njenu primjenu u praksi.

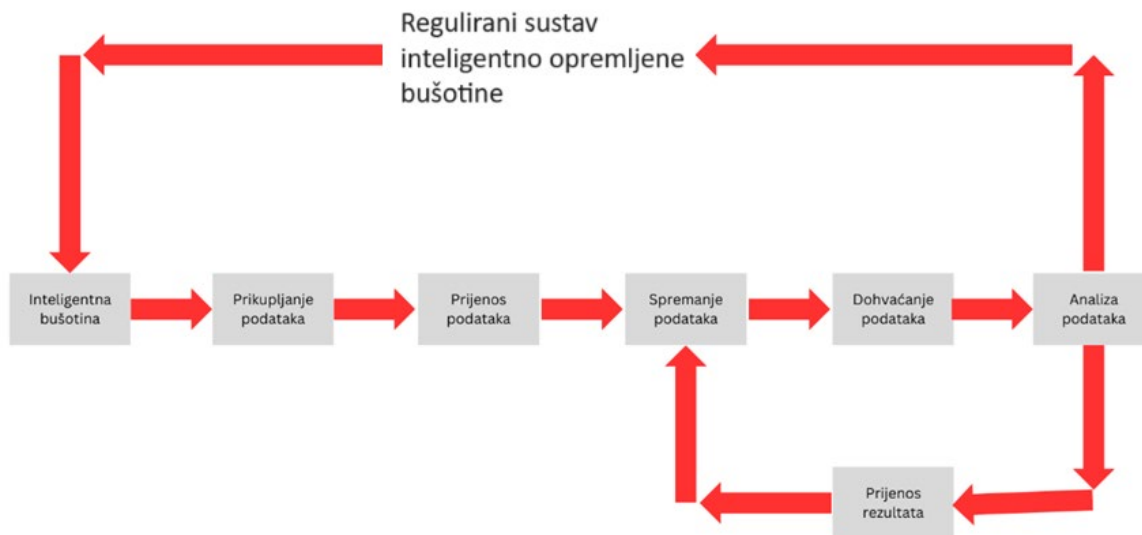


**Slika 1-1.** Platforma Snorre kojom je izrađena bušotina na kojoj je prvi puta primijenjeno opremanje inteligentnim uređajima (Harald Sandberg i Lavik, 2020)

## 2. INTELIGENTNO OPREMLJENE BUŠOTINE

Inteligentni uređaj može se definirati kao vrsta opreme, instrumenta ili stroja koji ima vlastitu računalnu sposobnost, što znači da sustav ima sposobnost automatizirane samoregulacije, bez potrebe za izravnom intervencijom čovjeka u sustavu.

Inteligentno opremanje bušotina uključuje stalne mjerne pretvornike u bušotini i s površine kontrolirane dubinske regulacijske ventile u bušotini, omogućujući praćenje, procjenu i aktivno upravljanje proizvodnjom ili utiskivanjem u stvarnom vremenu bez ikakvih intervencija čovjeka u bušotini. Podaci o bušotini se prenose na površinu radi lokalnog ili daljinskog nadzora bušotine (Schlumberger, 2023). Uz opremu za praćenje i mjerenje, opremanje bušotina inteligentnim uređajima uključuje strategiju upravljanja bušotinom od prikupljanja do analize podataka te korekcije istih (Slika 2-1.).

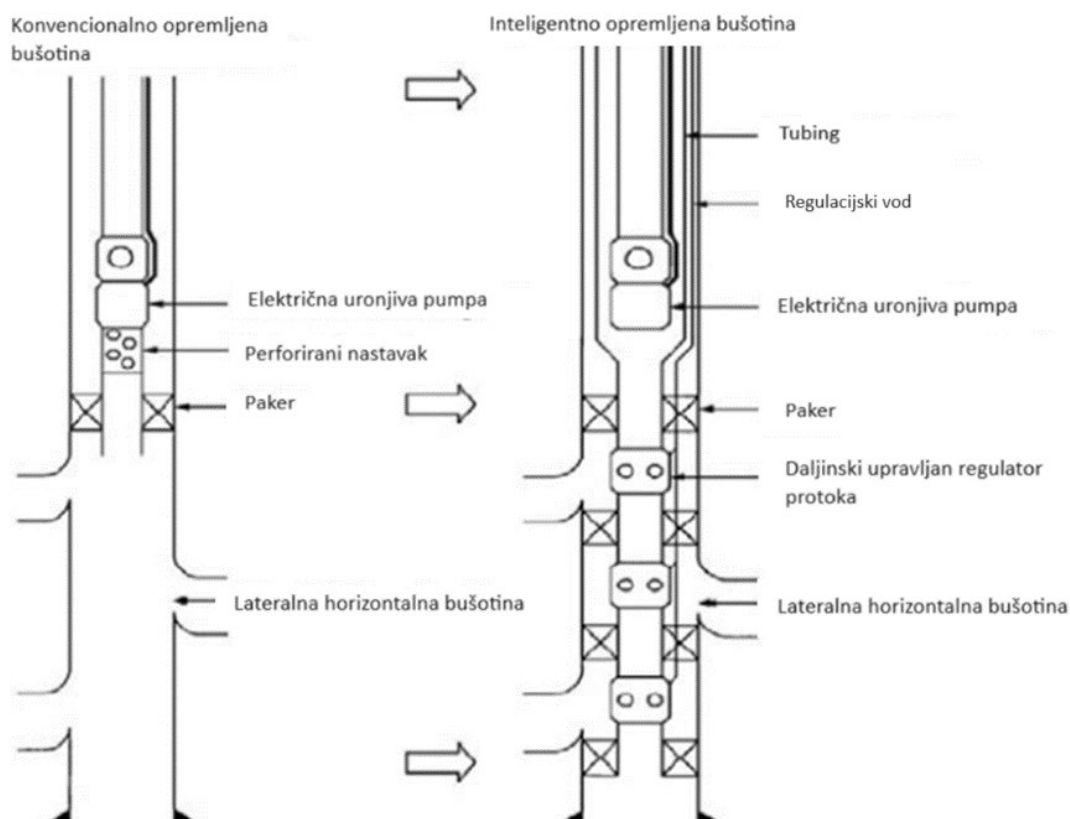


**Slika 2-1.** Proces rada inteligentno opremljene bušotine (Schlumberger, 2023)

U današnje vrijeme je primjena tehnologije inteligentnog opremanja bušotina riješila mnoge probleme na naftnim i plinskim poljima, gdje je na konvencionalno opremljenim bušotinama proizvodnja znatno ispod potencijalnih vrijednosti (Dyer et al., 2007). IWC



tehnologija rješava izazove povezane s otkrivenim i odbačenim marginalnim rezervama ugljikovodika tako što se fokusira na razvijanje isplativih metoda eksploatacije takvih ležišta. Ova tehnologija usmjerena je na prevladavanje prepreka poput visokih troškova, nedostupnosti tehničkih rješenja i nedokazanih tehnologija, koje su prethodno činile eksploataciju pojedinih ležišta ugljikovodika neisplativom (Slika 2-2.).



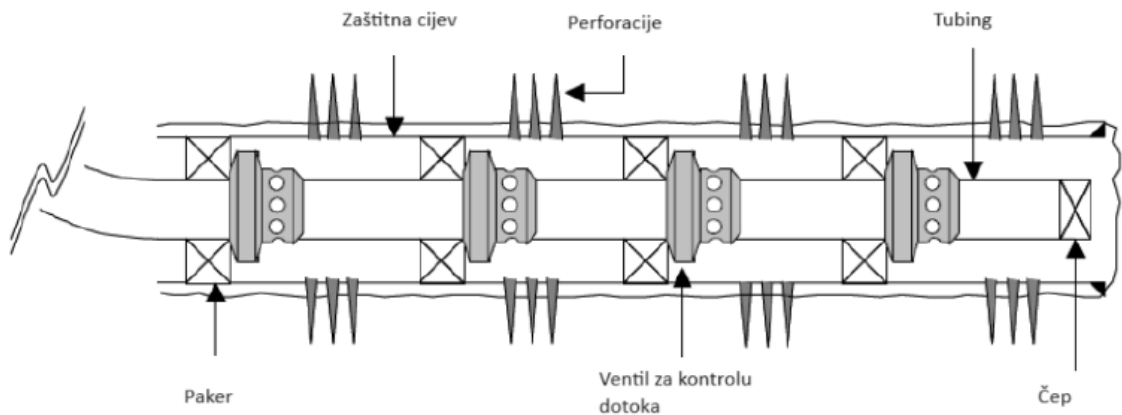
**Slika 2-2.** Prikaz konvencionalne i inteligentno opremljene proizvodne bušotine (Renpu, 2011b)

Inteligentno opremanje bušotina uključuje kombinaciju brtvenih elemenata i pakera, uređaja ili ventila za regulaciju dotoka i mjernih pretvornika u bušotini (Slike 2-3. i 2-4.)

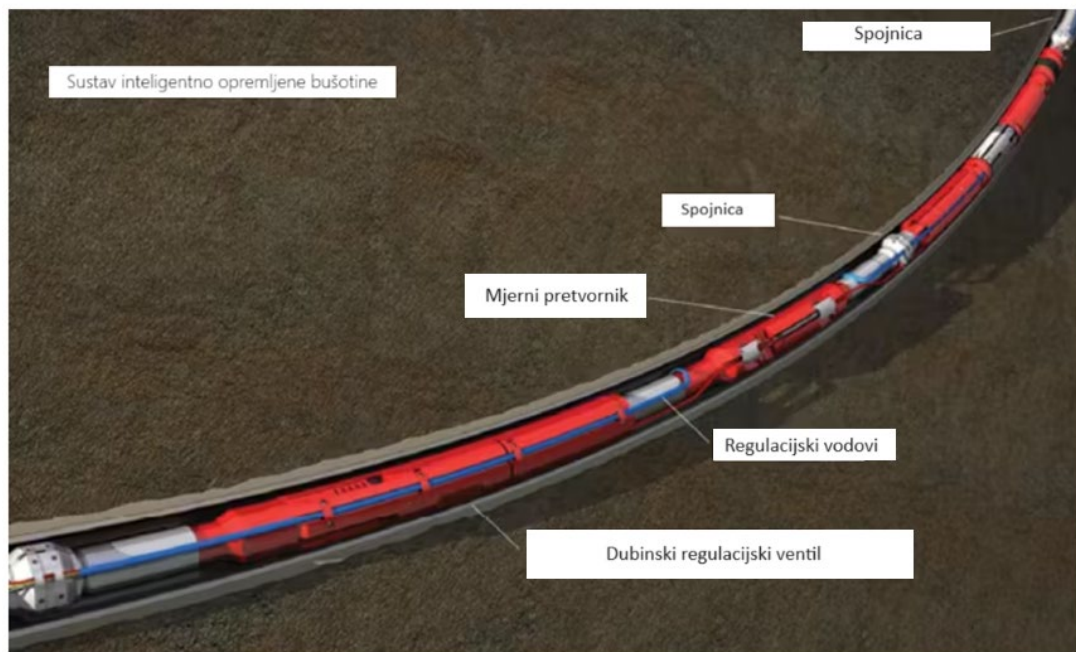
Sustav inteligentnog opremanja bušotine (IWC) sastoji se uglavnom od sljedećih komponenti (Renpu, 2011a):

- 1) Računalnog sustava za nadzor (praćenje), mjerenje, upravljanje/reguliranje, alarmiranje i prikupljanje podataka (engl. *Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA*);
- 2) Regulacijskih vodova u bušotini;
- 3) Ventila i uređaja za kontrolu utoka vode;

- 4) Uklonjivih i promjenjivih alatki podesivih po stupnju otvaranja;
- 5) Pakera za odvajanje proizvodnih zona;
- 6) Mjernih pretvornika temperature, tlaka, protoka, gustoće i za otkrivanje udjela vode u pridobivenom slojnom fluidu.



**Slika 2-3.** Sustav inteligentnog opremanja horizontalne bušotine (Naus et. al., 2006)



**Slika 2-4.** Instalacija sustava inteligentnog opremanja (Offshore, 2017)

Glavne prednosti tehnologije inteligentnog opremanja bušotina su (Tirado et al., 2010):

- ukidanje ili smanjenje broja dodatnih bušotina, intervencija (zahvata) u bušotini i na površinskim objektima;
- smanjeni operativni troškovi;
- smanjenje udjela vode u pridobivenom slojnom fluidu;
- produljenje radnog vijeka bušotina i ležišta;
- održavanje optimalne proizvodnje plina i nafte;
- mogućnost daljinske aktivacije regulacijskih ventila;
- reguliranje stope utiskivanja, čime se maksimizira učinkovitost cijelog postupka;
- zamjena za radove na žici, posebno u horizontalnim bušotinama s velikim dosegom;
- smanjenje neproduktivnog vremena i vremena zastoja rada bušotine;
- mjerenje i prijenos podataka o svojstvima ležišta u stvarnom vremenu za bolje upravljanje ležištem;
- smanjenje rizika od nesreća radnika, zbog smanjenog zahtjeva za prisutnošću na lokaciji bušotine.

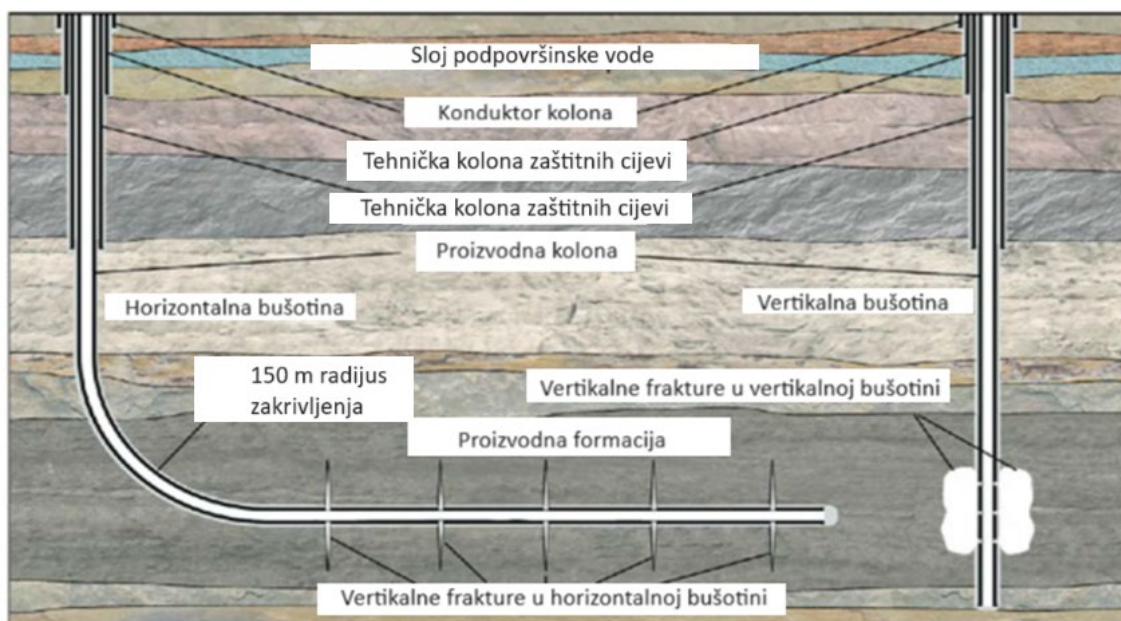
Jedini nedostatak ove tehnologije je puno veća cijena od konvencionalnog načina opremanja bušotina.

## 2.1. Primjena tehnologije inteligentnog opremanja bušotina

Inteligentno opremanje bušotina dokazalo je svoju učinkovitost upravljanja proizvodnjom u sljedećim tipovima bušotina:

- 1) horizontalnim bušotinama,
- 2) multilateralnim bušotinama,
- 3) bušotinama u dubokim odobalnim područjima,
- 4) bušotinama u heterogenim ležištima,
- 5) bušotinama u zrelim ležištima,
- 6) bušotinama s velikim dosegom.

Horizontalne bušotine su bušotine s kutom odklona od najmanje  $80^\circ$ , izbušene kako bi se povećao obuhvat u strukturno složenim i nedostupnim ležištima postavljanjem dugog dijela kanala bušotine unutar ležišta i crpljenjem nafte i plina (Slika 2-5.). Najčešće se upravo ovakve vrste bušotina inteligentno opremaju.



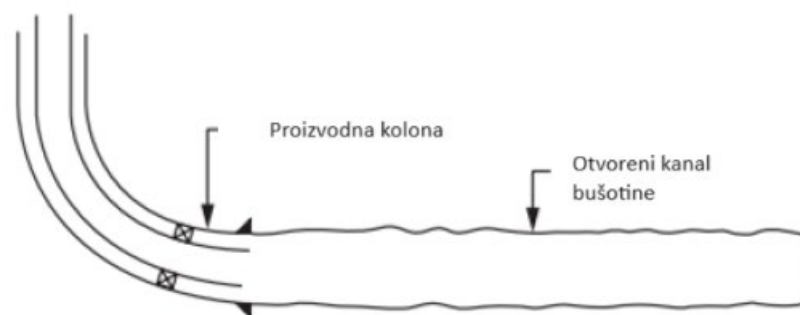
**Slika 2-5.** Primjer konstrukcije horizontalne i vertikalne bušotine u istom ležištu (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2019)

Glavne prednosti horizontalnih bušotina u odnosu na vertikalne (Renpu, 2011b):

- smanjenje problema vezanih uz konusiranje vode i plina smanjenjem diferencijalnog tlaka u ležištu za danu proizvodnju, tako da su potrebe za intervencijama u bušotini u budućnosti također smanjene;
- smanjenje pada tlaka oko kanala bušotine;
- povećanje proizvodnje fluida (veća duljina kanala bušotine unutar samog ležišta);
- smanjeno pridobivanje pijeska;
- postizanje manje brzine strujanja fluida oko kanala bušotine;
- povećanje iscrpka fluida iz ležišta zbog veće i učinkovitije drenaže.

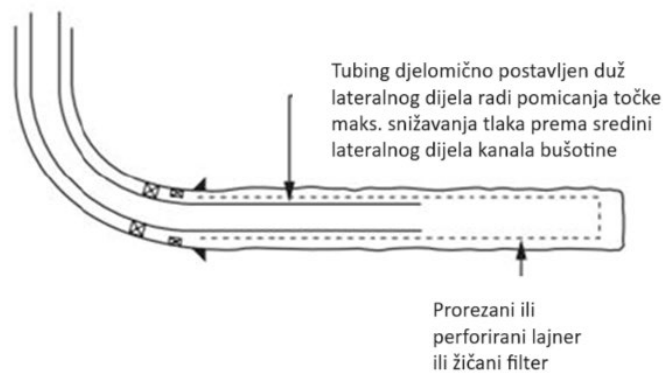
Opremanja horizontalnih bušotina obično su vremenski jedan ili dva puta dulja od konvencionalnih opremanja i znatno su skuplja i složenija s obzirom na druge zahtjeve, poput potrebe za zonskom izolacijom, kontrolom dotoka pijeska, potrebom za selektivnim zatvaranjem intervala iz kojih dotječu plin ili voda te potrebe za izvođenjem operacije stimulacije. Postoje tri načina opremanja horizontalnih bušotina (Heriot Watt University, 2011):

- 1) Opremanje otvorenog kanala bušotine, što podrazumijeva veliki unutarnji promjer kanala, ali i stalnu opasnost od urušavanja stijenki nezacijevljenog dijela bušotine te probleme vezane uz kontrolu dotoka pijeska i napuštanje bušotine (Slika 2-6.).



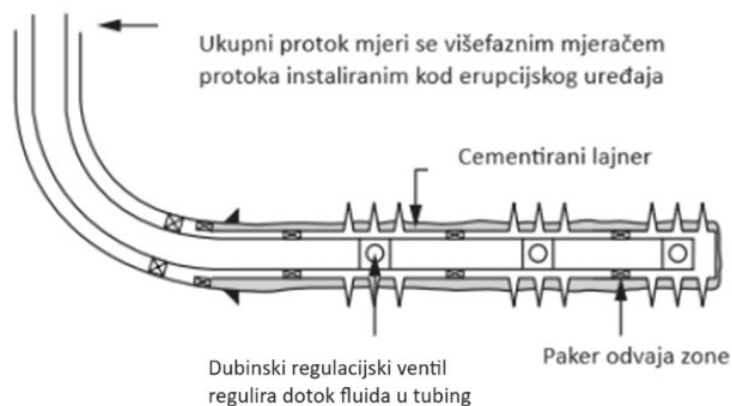
**Slika 2-6.** Opremanje otvorenog kanala bušotine (Heriot Watt University, 2011)

- 2) Otvoreni kanal bušotine opremljen prorezanim ili perforiranim lajnerom što podrazumijeva pristup kanalu čak i ako se kanal uruši, omogućujući pristup opremi na žici ili savitljivom tubing. Međutim, ovim načinom opremanja nije postignuta izolacija kanala bušotine i selektivnost proizvodnih zona (Slika 2-7.).



**Slika 2-7.** Otvoreni kanal s prorezanim ili perforiranim lajnerom i opcionalno produženi tubing (Heriot Watt University, 2019)

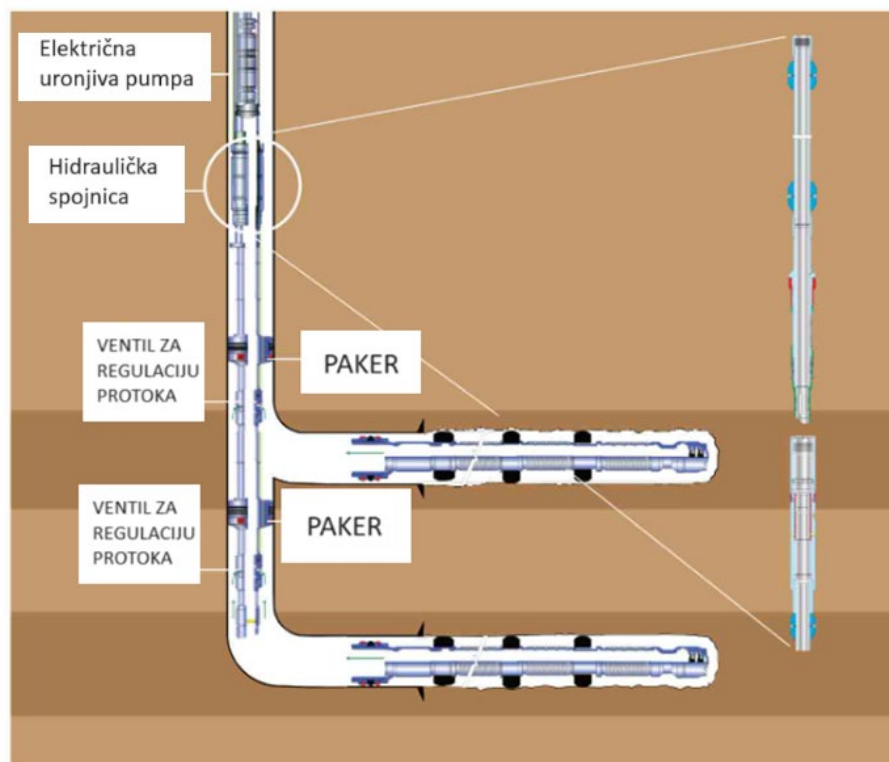
- 3) Opremanje zacijevljenog kanala bušotine što podrazumijeva izoliranje proizvodnih zona omogućuje višestruko hidrauličko frakturiranje te primjenu inteligentnog opremanja (Slika 2-8.).



**Slika 2-8.** Selektivno opremanje zacijevljene bušotine podijeljene na tri zone (Heriot Watt University, 2019)

Multilateralni sustav sastoji se od više usmjerenih kanala bušotina koje se buše i opremaju iz jedne bušotine. Ovaj sustav daje mogućnost dosezanja više ciljanih zona unutar ležišta ugljikovodika i omogućava postizanje veće proizvodnje ugljikovodika. Obično se sastoji od tri ili četiri pojedinačna bočna kanala bušotine, od kojih svaki djeluje kao zasebna bušotina, s varijacijama u produktivnosti i propusnosti. Broj kanala ovisi o broju ciljanih zona koje se žele zahvatiti, analizi rizika, dubinama/tlakovima i parametrima konstrukcije bušotine.

Prednost ove vrste opremanja je smanjenje ukupnih troškova proizvodnje ugljikovodika na terenu, jer omogućuje pristup s jedne točke na površini, većem broju dijelova ležišta te samim tim poboljšava drenažu ležišta. Prednosti također uključuju veću proizvodnju ugljikovodika, smanjeno konusiranje vode i plina, mogućnost dreniranja relativno tankih ležišta, bolji iscrpak fluida iz ležišta i povećanu izloženost bušotine prirodnim sustavima pukotina (Lake, 2007). Primjena tehnologije inteligentnog opremanja na multilateralnim bušotinama omogućuje optimiziranje proizvodnje nafte, produljenje vijeka trajanja bušotine i smanjenje problema s konusiranjem vode, jer daje mogućnost regulacije protoka fluida iz svakog bočnog kanala bušotine. Također pruža operatorima mogućnost izolacije, praćenja, testiranja i regulacije protoka fluida iz svakog kanala zasebno iz jedne bušotine. Najosnovniji slučaj inteligentnog opremanja multilateralne bušotine prikazan je na Slici 2-9.



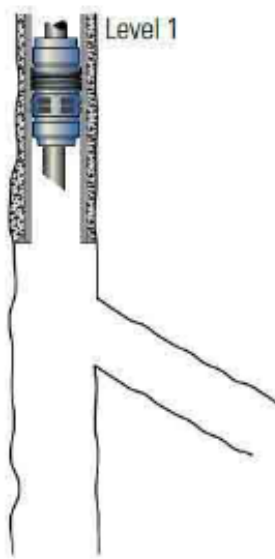
**Slika 2-9.** Inteligentno opremljena multilateralna bušotina (Schlumberger, 2023)

Godine 1997. različiti multilateralni sustavi kategorizirani su u skladu s Tehnološkim napretkom multilateralnih sustava (engl. *Technology Advancement of MultiLaterals - TAML*), definirajući klasifikaciju od šest razina. Tehnološki napredak multilateralnih sustava za višekanalne bušotine temelji se na vrsti i količini potpore koja se pruža na bočnom spoju glavnog i bočnog kanala (čvora). Ova kategorizacija je vrlo korisna za operatore, jer pojednostavljuje prepoznavanje i usporedbu funkcionalnosti i procjenu rizika i prednosti

jednog multilateralnog dizajna opremanja s drugim. Viša razina TAML-a znači veći trošak i složenost, ali i istovremeno veći integritet kanala bušotina (Bellarby, 2009).

### 1) TAML Razina 1

Ovo je najosnovniji tip multilateralnih bušotina. Sastoji se od glavnog nezacijevljenog kanala bušotine i višestrukih bočnih kanala, koji također ostaju nezacijevljeni (Slika 2-10.). Čvorište glavnog kanala i bočnih kanala je bez hidrauličke izolacije ili mehaničke potpore, tako da se integritet bušotine temelji na prirodnoj stabilnosti bušotine (koristi se kod bušotina izrađenih u tvrdim stijenkama). U nekim se slučajevima, u bočni ili glavni kanal za dodatno podržavanje/stabilnost kanala bušotine, postavlja prorezani lajner. Pridobiveni fluidi iz bočnih kanala se miješaju u glavnom vertikalnom kanalu, a selektivno reguliranje protoka iz bočnih kanala ili izolacija proizvodnih zona u tom slučaju nije moguća.

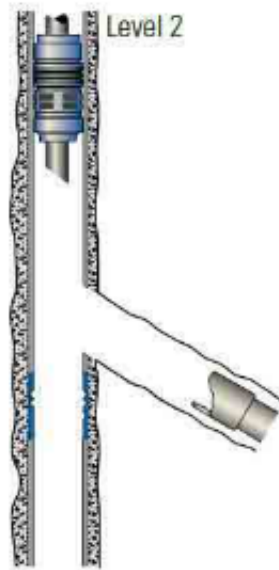


**Slika 2-10.** TAML Razina 1 (Schlumberger, 2021)

### 2) TAML Razina 2

Multilateralne bušotine tipa 2 slične su konstrukcijski tipu TAML 1 s jednom bitnom razlikom: bočni kanali se izbuše iz zacijevljenog i cementiranog glavnog kanala bušotine (Slika 2-11.), kako bi se smanjila mogućnost urušavanja kanala bušotine i osigurala hidraulička izolacija između glavnog i bočnog kanala.

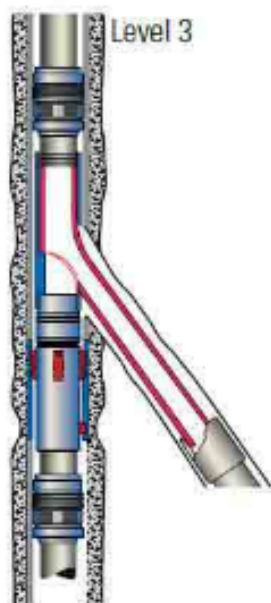




**Slika 2-11.** TAML Razina 2 (Schlumberger, 2021)

### 3) TAML Razina 3

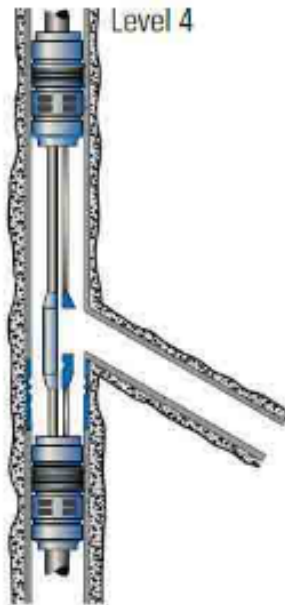
Sustav TAML razine 3 ima zacijevljeni i cementirani glavni kanal bušotine s bočnim otvorenim kanalima bušotine kao i razina 2, u koje je ugrađen prorezani lajner, koji se sidri u glavnom kanalu bušotine (Slika 2-12.). Ovaj sustav osigurava mehaničku potporu čvorišta glavnog i bočnog kanala, ali bez hidrauličke izolacije unutar pojedinog kanala. Ovaj tip opremanja bušotine omogućuje lako pristupanje bočnom kanalu za opremanje sa savitljivim tubingom.



**Slika 2-12.** TAML Razina 3 (Schlumberger, 2021)

#### 4) TAML Razina 4

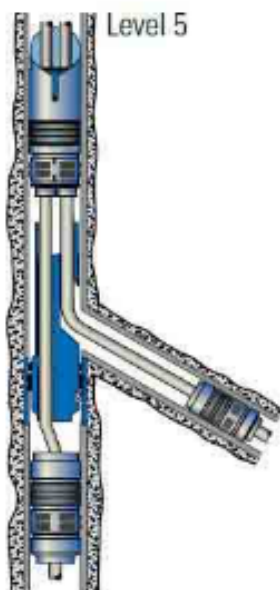
Multilateralne bušotine razine 4 podrazumijevaju zacijevljeni i cementirani glavni kanal bušotine kao i lajner u bočnom kanalu bušotine koji se mehanički spaja s glavnim kanalom (Slika 2-13.). Međutim, zbog ograničene otpornosti cementa na diferencijalni tlak, čvorište ne pruža hidrauličku izolaciju. Postavljaju se pakeri iznad i ispod čvorišta u glavnom kanalu kako bi se pružila zonska izolacija i selektivnost. Ovi sustavi omogućuju intervencije sa savitljivim tubingom kako u glavnom kanalu ispod čvorišta, tako i u bočnom kanalu bušotine.



**Slika 2-13.** TAML Razina 4 (Schlumberger, 2021)

#### 5) TAML Razina 5

Multilateralne bušotine TAML razine 5 imaju zacijevljene i cementirane glavne i bočne kanale bušotine, što pruža mehanički integritet bušotine. U sustavu TAML razine 5, tlak na čvorištu se može održati korištenjem pakera i proizvodnog niza za izolaciju čvorišta (Slika 2-14.). Hidraulička postojanost samog čvorišta ne može se postići cementacijom, već se ona postiže uporabom pomoćnih pakera, rukavaca i ostale opreme unutar kolone zaštitnih cijevi. Tijekom opremanja postavlja se paker s jednim proizvodnim nizom u bočni kanal ispod čvorišta, te ih se povezuje pomoću dvostrukog izolacijskog pakera iznad čvorišta u glavnom kanalu bušotine od kojeg pridobiveni fluid ide prema površini kroz jedan ili više proizvodnih nizova. Ovakav način opremanja omogućuje ponovni ulazak u bočni kanal i u glavni kanal bušotine te je moguće ostvariti proizvodnju iz svake zone zasebno ili zajedno.



**Slika 2-14.** TAML Razina 5 (Schlumberger, 2021)

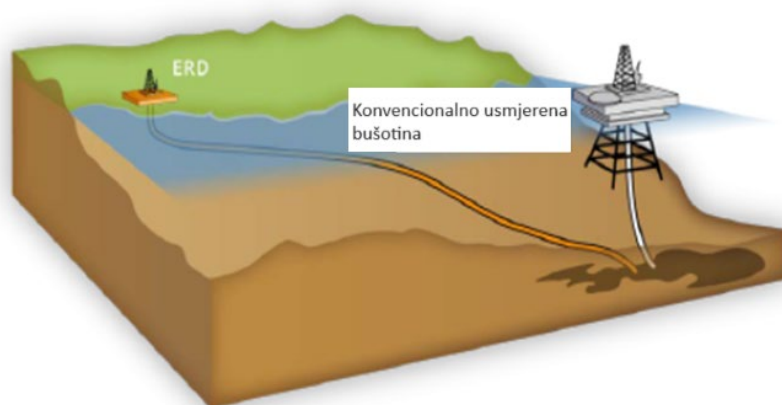
6) TAML Razina 6

Ovaj sustav osigurava hidraulički i mehanički integritet bušotine, koristeći specijalnu spojnicu za otvaranje (Slika 2-15.). Ovaj sustav koristi unaprijed proizvedenu spojnicu čvorišta koja se plastično deformira prije ugradnje i ponovno oblikuje (širi) u bušotini ili se dvije odvojene bušotine izbuše iz jedne glavne bušotine, a unaprijed proizvedena spojnica čvorišta se naknadno ugrađuje u bušotini.



**Slika 2-15.** TAML Razina 6 (Schlumberger, 2021)

Bušotine s velikim dosegom (engl. *Extended Reach Drilling - ERD*) su ekstremno duge i plitke bušotine koje imaju omjer horizontalnog dosega (engl. *Horizontal Displacement - HD*) i stvarne uspravne dubine (engl. *True Vertical Depth - TVD*) od najmanje 2:1 do trenutnog maksimuma od 13:1 (Slika 2-16.). Vrijednost ovog omjera ovisi o dubini ležišta, uvjetima bušenja, raspoloživoj opremi i tehnološkim ograničenjima (Heriot Watt University, 2011).

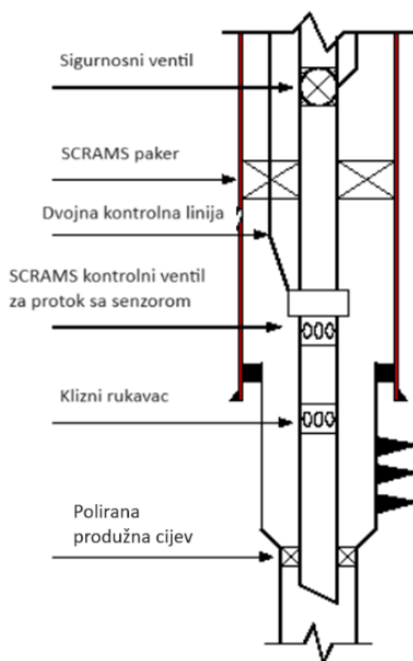


**Slika 2-16.** Usporedba bušotine s velikim dosegom i konvencionalne usmjerene bušotine (Stefanos et al., 2019)

Iako su ERD bušotine tehnički zahtjevne i skupe, one mogu dodati dodatnu vrijednost operacijama razrade naftnih i plinskih polja, jer omogućavaju smanjenje troškova za skupu podmorsku opremu i cjevovode, razvoj odobalnih polja ugljikovodika s kopnene lokacije, korištenje satelitske razrade polja i smanjenje utjecaja na okoliš.

## 2.2. Komponente sustava za inteligentno opremanje

Kao što je spomenuto ranije u radu, prvo inteligentno opremanje predložio je WellDynamics 1997. godine za platformu Snorre, koja je izradila prvu bušotinu opremljenu inteligentnom opremom. Shema ovog sustava prikazana je na Slici 2-17. Ovo opremanje uključuje daljinski upravljive ventile za regulaciju protoka s mjernim pretvornicima i pakerima za osiguravanje izolacije proizvodnih zona. Kako bi se osigurala učinkovita regulacija protoka u različitim dijelovima kanala bušotine, za kontrolu beskonačno promjenjivih regulacijskih ventila za protok (engl. *Infinitely Variable Interval Control Valves - IV-ICV*), koristi se sustav za analizu i upravljanje ležištem s površine (engl. *Surface-Controlled Reservoir Analysis and Management System - SCRAMS*). Regulacijskim ventilima se može upravljati s površine pomoću hidrauličkih ili električnih upravljačkih vodova. Hidrauličku silu stvara hidraulički upravljački vod i isporučuje je SCRAMS modulu, koji raspodjeljuje silu na različite strane regulacijskog ventila pomoću solenoidnih ventila. Električna kontrolna linija omogućuje isporuku energije i signala od dijela za vođenje (kontrolera) regulacijskog sustava bušotine do sve opreme u bušotini pomoću telemetrijskog sustava velike brzine.

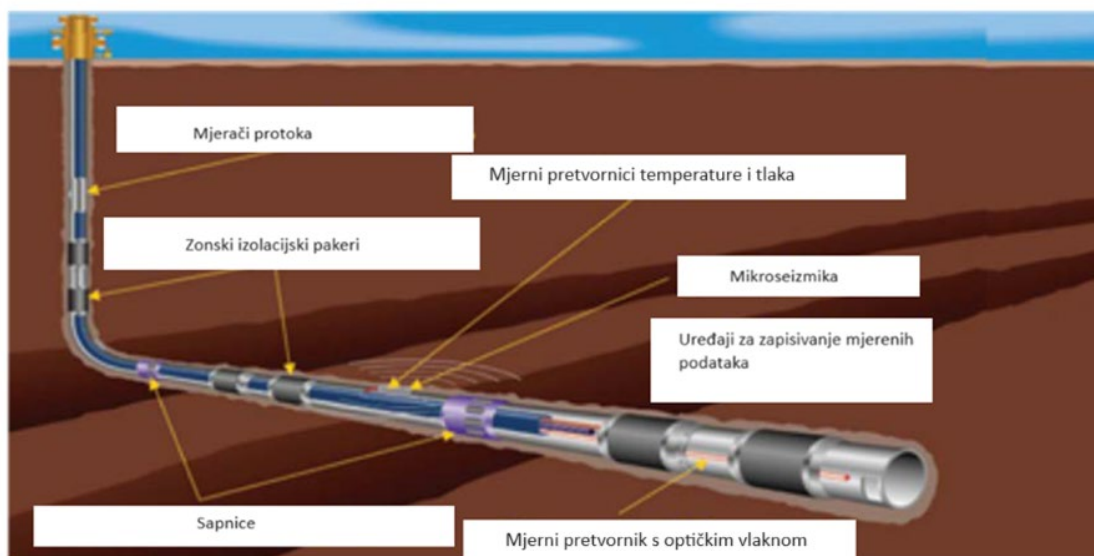


**Slika 2-17.** Inteligentno opremljena bušotina na TLP platformi Snorre (Intelligent Completions, 2000)

Dizajn inteligentnog opremanja bušotine ovisi o specifičnim karakteristikama ležišta kao što su ležišni uvjeti (temperatura, tlak), hidrodinamičke cjeline, kontakt vode i nafte (engl. *Water Oil Contact - WOC*) i slično. Dizajn inteligentnog opremanja bušotine također ovisi o postavljenim ciljevima: povećati iscrpak fluida iz ležišta, optimizirati proizvodnju bušotine ili maksimizirati neto sadašnju vrijednost (engl. *Net Present Value – NPV*). Opća definicija inteligentnog opremanja podrazumijeva primjenu uređaja u bušotini za razumijevanje uvjeta na dnu bušotine te regulaciju protoka temeljenu na tim uvjetima. Integralni dijelovi inteligentno opremljenih bušotina su kontrolne i električne linije, pakeri, dubinski regulacijski ventili (engl. *Interval Control Valves - ICV*) te sustav za analizu podataka i upravljanje bušotinom (Al-Khalifa et al., 2013). Također sadrže mjerne pretvornike za kontinuirano mjerenje različitih fizikalnih veličina kao što su: tlak, temperatura, brzina protoka, brzina seizmičkih i zvučnih valova te naprezanje.

#### 2.2.1. Sustav nadzora u bušotini

Sustav za praćenje rada bušotine pruža mogućnost prikupljanja različitih podataka poput temperature, tlaka, protoka fluida, sastavu fluida i nekih drugih parametara (pH, udio plina, seizmičke podatke) u stvarnom vremenu ili periodički u jednoj ili više točaka u bušotini. U naftnoj industriji koriste se različiti mjerni pretvornici u bušotini, ovisno o parametrima koji se prate. Mjerni pretvornici koji se koriste u inteligentno opremljenim bušotinama postavljaju se u bušotinu najčešće u svrhu mjerenja parametara, kao što su temperatura, tlak, brzina protoka i brzina prostiranja seizmički valovi (Slika 2-18.) (Naldrett i Ross, 2006).



**Slika 2-18.** Mjerni pretvornici u inteligentno opremljenoj bušotini (Stefanos et al., 2019)

Mjerenja koja osiguravaju mjerni pretvornici daju podatke koji se interpretiraju kako bi dali potrebne informacije o radu bušotine. Optička vlakna zamijenila su električne sustave čime se osigurava veća pouzdanost te podnose veće temperature, pa mogu učinkovito raditi u teškim okruženjima (Lake, 2007).

Nadalje, potrebna je strategija upravljanja podacima zbog ogromne količine snimljenih podataka, jer stalni mjerač u bušotini (engl. *Permanent Downhole Gauge - PDG*) može bilježiti tlak svake 2 sekunde (Enyekwe i Ajienka, 2014). Intenzitet prikupljanja podataka može varirati od više puta u sekundi do jednom dnevno, ovisno o radnim parametrima sustava. Moguće je odabrati različite specifikacije točnosti i razlučivosti uređaja kako bi se osigurao optimalan rad sustava. Mjerni pretvornici veće točnosti koriste se za precizne proračune vezane uz ležišta i modeliranje, dok se mjerni pretvornici manje točnosti koriste za otkrivanje razine tekućine u kanalu bušotine odnosno za regulaciju rada pumpe. Treba uzeti u obzir učinak „buke“ te tijekom obrade podataka ukloniti nastali šum. Višefazni protok iz ležišta može uzrokovati pogreške u očitanjima PDG-a ako korišteni mjerni pretvornici nisu namijenjeni za višefazni protok, a dobivene vrijednosti su točnije kada je PDG postavljen bliže perforaciji.



### 2.2.1.1. Optička vlakna

Sustav optičkih vlakana razvijen je za izravnu konverziju mjerenja u bušotini u optičke signale. Optička vlakna imaju učinkovitu otpornost na djelovanje temperature. Kada mjerni pretvornik registrira promjene u tlaku, pretvornik (engl. *Transducer*), unutar mjernog pretvornika generira odgovarajuće promjene u optičkom izlazu. Ta optička promjena može biti u obliku varijacija svjetlosnih svojstava, poput intenziteta ili valne duljine svjetlosti. Mjerni pretvornik može pružiti optički izlaz koji je proporcionalan ili varira ovisno o razini tlaka koju detektira. Kasniji razvoj mjernih pretvornika s optičkim vlaknima rezultirao je ugradnjom vlaknastih Bragg-Grating senzora u bušotine za mjerenje protoka, temperature, tlaka i seizmičkih podataka. Ovaj proces uključuje kombiniranje optičkih i elektrohidrauličkih komponenti kako bi se stvorila infrastruktura koja može funkcionirati u bušotinskom fluidu (Lake, 2007)

### 2.2.1.2. Električni mjerni pretvornici

Razlikuju se dvije glavne vrste električnih mjernih pretvornika: piezoelektrični kristalni mjerni pretvornici i elektronički silicijski mjerni pretvornici na izolatoru (engl. *Electronic Silicon-On-Insulator - SOI*).

#### Piezoelektrični kristalni mjerni pretvornici

To su uređaji koji koriste piezoelektrični efekt u otkrivanju promjena tlaka i temperature pretvarajući ih u električni naboj. Postoje dvije glavne vrste ovih mjernih pretvornika, odnosno kvarcni i safirni mjerni pretvornici.

#### a) Kvarcni mjerni pretvornici

Ovaj tip mjernog pretvornika koristi kristale kvarca kao senzore kako bi osigurao stabilan rad. Struja se generira kada se primijeni tlak zbog piezoelektričnog svojstva kremena. Ova tehnologija predstavlja jedan od najčešće korištenih mjernih pretvornika za mjerenje tlaka u bušotini jer pruža vrlo visoku preciznost. Ograničenja ovog modela su zahtjevi za napajanje iz baterijske ćelije (Slika 2-19.) za prijenos izmjerenih podataka i nije prikladan za radne uvjete s temperaturom iznad 200 °C.



**Slika 2-19.** Kvarcni piezometar (Datacan, 2023)

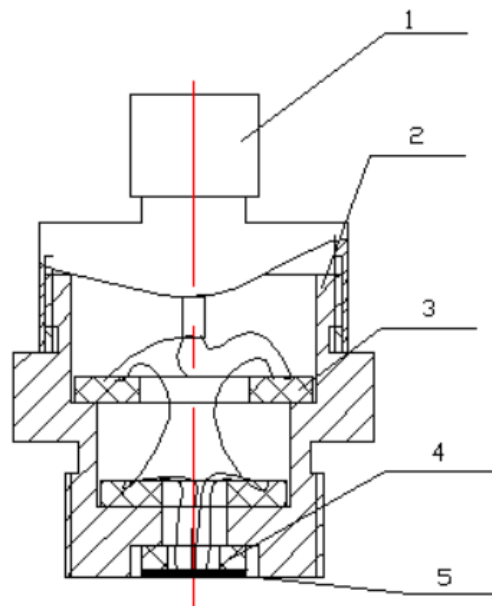
#### b) Safirni mjerni pretvornici

Safirni mjerni pretvornici imaju isti princip rada kao kvarcni mjerni pretvornici, ali uz upotrebu safirnih kristala kao senzora. Safir ima stabilna svojstva deformacije i karakterizira ga visoka elastičnost, što je i razlog zašto se više koristi u uvjetima visokog tlaka. Nedostaci ovog modela su njegova visoka cijena i visoka osjetljivost na temperaturu.

#### Elektronični silicijski mjerni pretvornik na izolatoru (SOI)

Na temelju tehnologije silicij na izolatoru (SOI), dizajniran je i proizveden novi mjerni pretvornik tlaka s visokofrekventnim odzivom (Slika 2-20.), otporan na visoke temperature u kojem se sloj silicijevog dioksida u silicijskom materijalu razvija implantacijom kisika (engl. *Separation by Implanted Oxygen – SIMOX*). SIMOX se koristi za stvaranje struktura koje poboljšavaju izolaciju i smanjuju osjetljivost na radijaciju u poluvodičkim uređajima, a time doprinose povećanoj pouzdanosti i performansama u naprednoj integraciji. Osim toga,

koristi se tehnologija spajanja silicija i stakla kako bi se stvorilo kućište mjernog pretvornika bez unutarnjih naprezanja (Zhao et al., 2006).



**Slika 2-20.** Električni silicijski mjerni pretvornik na izolatoru sastavljen od (1) gornjeg kućišta, (2) baze, (3) diska, (4) spojnog stakla i (5) senzora (Zhao et al., 2006)

### 2.2.1.3. Optički mjerni pretvornici

Optička vlakna uvedena su u industriju nafte i plina 1990. godine kao obećavajuća tehnologija za očitavanje ležišnih parametara. Danas se ova tehnologija široko koristi za mjerenje temperature i tlaka u kanalu bušotine. Razvijena je kako bi se omogućila izravna konverzija mjerenja u bušotini u optičke signale. Optički mjerni pretvornik predstavlja neelektrični sustav koji koristi optičko vlakno kao senzorski element (intrinzični senzor) za mjerenje temperature i tlaka te drugih fizikalnih veličina. Laser (jednofrekventni vlaknasti laser) ili super luminiscentni izvor šalje svjetlost kroz optičko vlakno. Ovo svjetlo dopire do detektora, koji mjeri promjene u intenzitetu, valnoj duljini, fazi, vremenu prolaza ili polarizaciji (Al-Arnaout et al., 2008).

Optički mjerni pretvornici imaju brojne prednosti u odnosu na druge mjerne pretvornike. Glavna prednost je u tome što ovi mjerni pretvornici ne zahtijevaju električni kabel, pa se mogu postaviti u visokonaponskim ili eksplozivnim okruženjima, jer nema opasnosti od

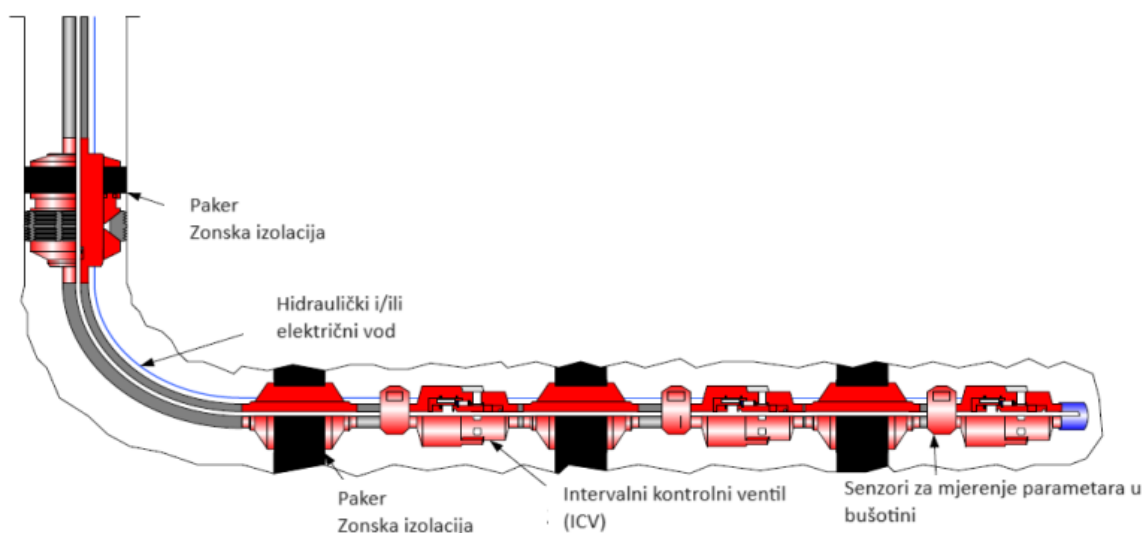
električnih iskri. Dizajnirani su da podnose visoke temperature i ne smetaju drugim uređajima jer su neosjetljivi na elektromagnetske smetnje.

#### 2.2.1.4. Ostale vrste mjernih pretvornika

S evolucijom tehnologija mjernih pretvornika i potrebom za više informacija iz bušotine, sada su dostupne druge vrste mjernih pretvornika kao što su pasivni akustični mjerni pretvornici, mjerni pretvornici za detektiranje vode u pridobivenom fluidu, mjerači protoka s optičkim vlaknima, mjerni pretvornici za određivanje pH vrijednosti i mjerni pretvornici za određivanje udjela plina u pridobivenom fluidu.

#### 2.2.2. Sustav kontrole u bušotini

Sustav kontrole u bušotini predstavlja izvedbeni sustav inteligentnog opremanja bušotine. Ovaj sustav se sastoji od kombinacije pakera koji odvajaju svaku zonu, posebnih regulacijskih uređaja u bušotini koji omogućuju regulaciju protoka fluida kako bi se poboljšao faktor iscrpka fluida iz ležišta, kao i sustava za njihovim upravljanjem, kontrolnih vodova i sustava za praćenje parametara u bušotini (Slika 2-21.).



Slika 2-21. Sustav kontrole u bušotini (Shaw, 2011)

### 2.2.3. Dubinski regulacijski ventili (ICV)

Glavni zadatak dubinskog regulacijskog ventila za regulaciju protoka u bušotinama (Slika 2-22.) je regulacija protoka u bušotini, uključujući potpuno zaustavljanje protoka za proizvodnu zonu ili lateralni kanal bušotine.

Regulacijski ventili se instaliraju za postizanje sljedećih ciljeva:

- aktivno upravljanje kretanjem fronte vode i/ili plina,
- kontroliranje i zatvaranje ležišta ili dijela ležišta iz kojeg se prekomjerno proizvode pijesak, voda i/ili plin,
- kombiniranu proizvodnju nafte i/ili plina iz (ili utiskivanje u) više zona (ili ležišta) na određenom polju.



**Slika 2-22.** Dubinski regulacijski ventil (ICV) (Reyes i Arias, 2004)

Normalni radni raspon ICV-a pokazuje nelinearni odnos između brzine protoka i primijenjenog diferencijalnog tlaka. To znači da pad tlaka može postati neprihvatljivo visok pri visokim intenzitetima proizvodnje. Osjetljiva regulacija brzine protoka zahtijeva malu vrijednost koeficijenta protoka ventila, ali to će povećati pad tlaka za danu brzinu protjecanja slojnog fluida.

Prihvatljiva vrijednost pada tlaka sa stajališta performansi bušotine ovisit će o karakteristikama ležišta i tehničkim karakteristikama proizvodne kolone i zaštitnih cijevi. Većina postavljenih ICV-ova radi s padom tlaka manjim od 7 bara, pri čemu su uobičajene vrijednosti od 1 bara ili niže.

Brzina protoka kroz ICV može se mjeriti korištenjem konvencionalnog mjernog separatora na površini ili višefaznog mjerača protoka u bušotini ili na površini. Tehnika je zatvoriti sve ICV-ove osim jednog koji će biti otvoren, odnosno kojeg se testira. No, nedostatak ove tehnike je taj što izmjerena brzina protoka nije reprezentativna za stvarnu brzinu protoka kada bušotina normalno proizvodi s pomiješanim protokom iz različitih zona ležišta. Najveći nedostatak je kad ventil radi s protokom manjim od kritičnog. U ovom slučaju, tlak nizvodno od ventila, odnosno unutar proizvodnih cijevi, utječe na ponašanje i odziv ventila.

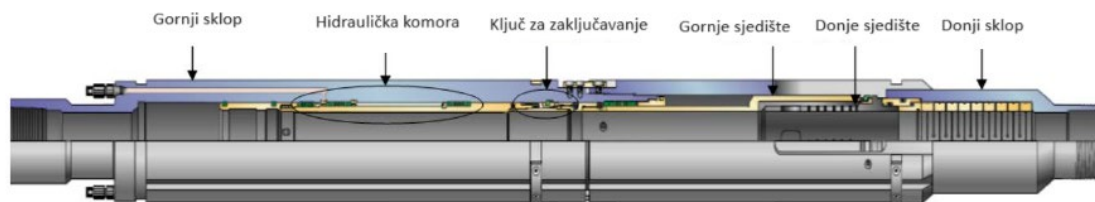
Ventil za regulaciju protoka je daljinski upravljana komponenta u inteligentno opremljenoj bušotini koja se koristi za djelomično ili potpuno ograničavanje protoka (Rahman et al., 2012). Dizajnirani su da daju fleksibilnu i točnu regulaciju protoka sa širokim rasponom brzine protoka fluida. U isto vrijeme treba osigurati što manje smanjenje tlaka na ventilu kako bi se uštedjela ležišna energija (Elmsallati et al., 2005). Ovi uređaji se kontroliraju s površine putem hidrauličkog, električnog ili elektro-hidrostatickog pogonskog sustava (engl. *Electro-Hydrostatic Actuation system - EHAs*), a postavljaju se između različitih odvojenih zona bušotine i ležišta.

Rani model ICV-a bio je četveroklipni ventil za kontrolu intervala, s regulacijom koja je omogućavala samo potpuno otvorene/zatvorene pozicije i dva međupoložaja. Takav tip ICV-a nije mogao pružiti potpunu regulaciju protoka u bušotini, a rješenje za to bio je regulacijski ventil s beskonačno varijabilnim položajem (engl. *Infinitely Variable Interval Control Valve - IV-ICV*). U njegovom razvoju su sudjelovale dvije servisne tvrtke na temelju zahtjeva za prigušivanje protoka u inteligentno opremljenim bušotinama. Današnji ICV-ovi imaju jednostavniji mehanizam rada i mogu podnijeti visoke radne temperature i tlakove.

Razlikuju se dva glavna tipa ICV-ova prema njihovom funkcionalnom mehanizmu: ICV za otvaranje i zatvaranje (engl. *On/Off*) i ICV za regulaciju (engl. *Choking ICV*). On/Off ICV omogućuje selektivno zatvaranje određenih zona i ne pruža mogućnost prigušenja protoka. ICV za regulaciju protoka pruža mogućnost odabira između različitih položaja i veličina otvora ventila. Ovi otvori su uobičajeno vrlo mali u početnim pozicijama te se povećavaju

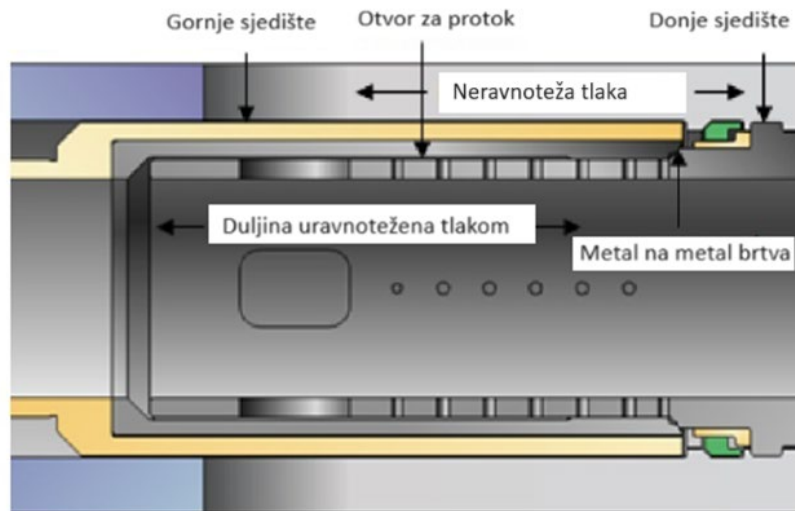
da bi osigurali prostor za povećanje protoka u krajnjim pozicijama. ICV-ovi mogu biti kuglasti ventil, nalikovati tradicionalnoj kliznoj manžeti, funkcionirati poput vretena s bočnim džepom ili mogu imati zaklopku sličnu onoj kao kod sigurnosnog ventila (Shaw, 2011).

Kao što je prikazano na Slici 2-23, prva generacija ICV-a se sastojala od gornjeg i donjeg sklopa, uravnoteženog hidrauličkog klipa, gornjeg i donjeg sjedišta i donjeg podslopa. Gornji nosač osigurava strukturni integritet i u njemu se nalaze hidraulične klipne komore. Diferencijalni tlak koji se primjenjuje preko hidrauličkog klipa uzrokuje pomicanje sklopa gornjeg sjedišta i omogućuje protok tekućine između cijevi i prstenastog prostora. Regulacija protoka se koristi za postizanje željenih karakteristika protoka. Hidraulički tlak se primjenjuje kroz upravljačke vodove (s obje strane hidrauličkog klipa) kako bi se ventil pomaknuo u bilo kojem smjeru.



**Slika 2-23.** Prva generacija ICV-a (Rahman et al., 2012)

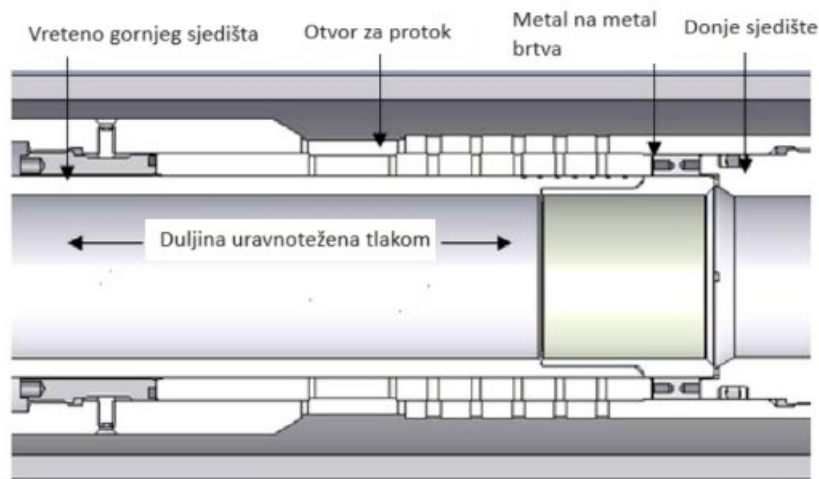
Značajna razlika između vanjskog promjera gornjeg i donjeg sjedišta uzrokuje neravnotežu tlaka duž osovine, posebno na liniji brtve stvarajući nejednake i suprotne sile na dva sjedišta u potpuno zatvorenom položaju. Kako bi se pojačalo brtvljenje, ugrađen je potisni klip u donjem sklopu sjedišta i ključ za zaključavanje u gornjem sklopu sjedišta (Slika 2-24.). Brtvena površina metal na metal izložena je smanjenju tlaka uzrokovanim pomicanjem gornjeg sjedišta preko vanjskog promjera otvora za protok.



**Slika 2-24.** Brtvila u ICV-ovima prve generacije (Rahman et al., 2012)

Druga generacija ICV-a dizajnirana je na temelju većine komponenti prve generacije ICV-a uz modificiranje gornje i donje konfiguracije sjedišta (Slika 2-25.). Vreteno gornjeg sjedišta pomiče se unutar unutarnjeg promjera otvora za protok i dosjeda u profil udubljenja izvan metal na metal površine brtve. To omogućuje održavanje konstantnog vanjskog promjera i osigurava kontinuiranu cilindričnu liniju na metal na metal kontaktu za gornje i donje sjedište. Ova karakteristika omogućuje održavanje konstantnog vanjskog promjera ventila i osigurava neprekidan kontakt između cilindričnih površina metala za gornje i donje sjedište. Ova posebna značajka važna je u ventilima za regulaciju protoka, jer osigurava pouzdanu i preciznu regulaciju protoka fluida uz očuvanje integriteta ventila tijekom različitih uvjeta rada te eliminira sve suprotne sile, stoga nema potrebe za mehaničkom potporom u održavanju metal na metal površine brtve. To znači da mehanizam ključa i sklop klipa za pojačavanje više nisu potrebni.





**Slika 2-25.** Brtvila u ICV-ovima druge generacije (Rahman et al., 2012)

ICV su glavna komponenta inteligentno opremljenih bušotina i trebaju biti pažljivo projektirani. Najvažniji parametri koji utječu na učinkovitost ICV-a su: njihov broj, lokacija u bušotini i funkcionalnost. Sustav inteligentno opremljenih bušotina trebao bi učinkovito regulirati protok u bušotini koji ovisi o razlikama u propusnosti i poroznosti ležišta, zasićenosti fluidima, pornom tlaku i drugim svojstvima stijene. Ispravno poznavanje potisnog mehanizama ležišta i podataka o ležištu, kao što su zasićenost, propusnost, kontakt nafta-voda, kontakt plin-nafta omogućuje optimalno postavljanje ICV-ova pri opremanju bušotina.

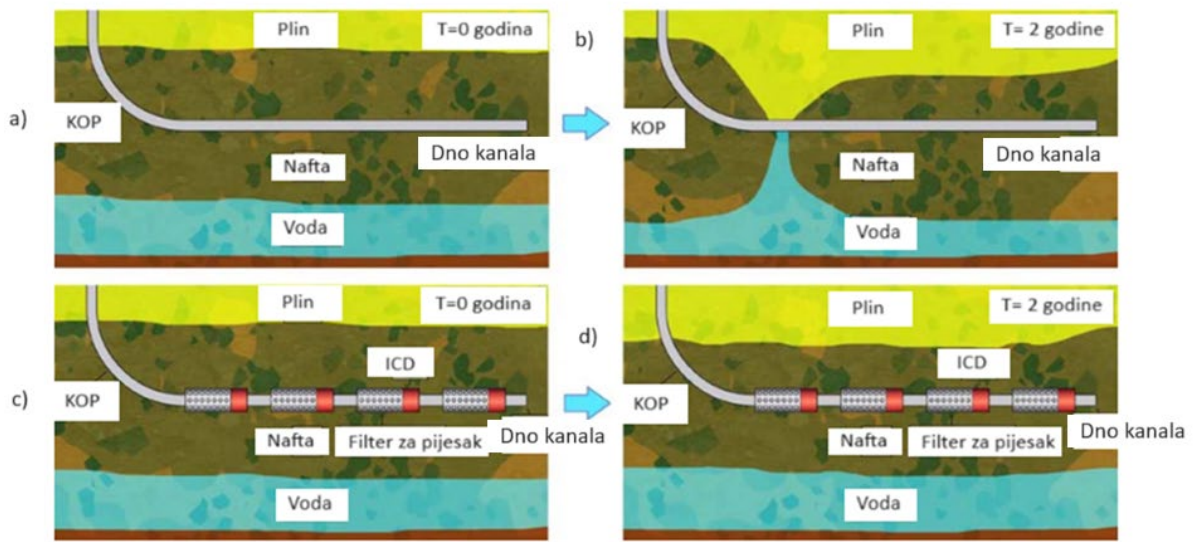
#### 2.2.4. Uređaji za regulaciju protoka (ICD)

Uređaji za regulaciju protoka (engl. *Inflow Control Devices - ICD*) su pasivne komponente inteligentnog opremanja koje izjednačavaju protok iz ležišta duž kanala bušotine te također produžavaju vrijeme proizvodnje bušotine bez proizvodnje neželjenih fluida. ICD-ovi se instaliraju nasuprot proizvodne formacije ležišta, unutar pješčanih zasipa ili unutar perforiranih cijevi kao dio proizvodne opreme bušotine. Odgađaju prodor plina i vode u bušotinu, produžujući proizvodno vrijeme ležišta. Opsežna testiranja protoka u bušotini i naknadno terensko iskustvo dokazali su sposobnost ICD-ova da:

- smanje konusiranje vode i plina,
- produže razdoblje proizvodnje na bušotini,

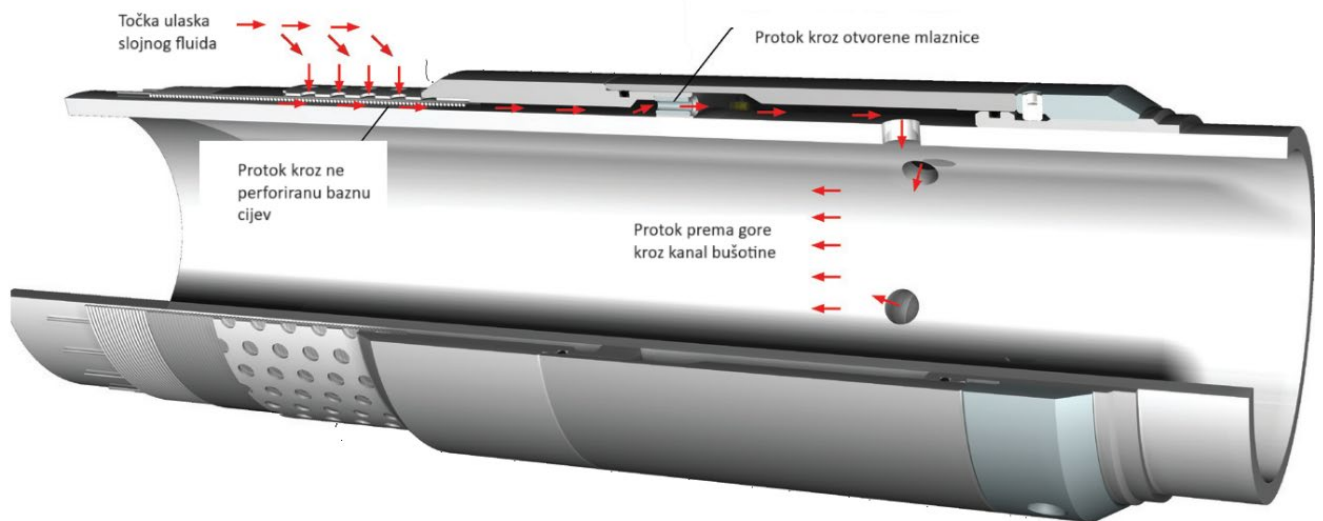
- smanje brzine protoka u prstenastom prostoru,
- poboljšavaju iscrpak fluida iz ležišta.

Na Slici 2-26 (a i b) prikazano je kako u kratkom vremenskom razdoblju dolazi do prodora vode i plina u bušotinu (u slučaju otvorenog kanala bušotine), dok to nije slučaj kod korištenja ICD-ova (Slika 2-26. c i d). Točka skretanja bušotine na slici je označena kraticom KOP (engl. *Kickoff point*).



**Slika 2-26.** Primjena ICD-ova u bušotinama (Olsen et al., 2017)

ICD-ovi su obično dizajnirani kao binarni (otvorena i zatvorena kontrola) ili varijabilni (kontrola po stupnjevima zatvaranja ventila). Pad tlaka od ležišta kroz ICD omogućuje kontrolu protoka slojnog fluida kroz kanal bušotine. Pravilnim podešavanjem ovog pada tlaka, inženjeri mogu precizno regulirati količinu i smjer protoka slojnog fluida u bušotini. Tijekom operacija hidrauličkog frakturiranja ili utiskivanja fluida radi poboljšanja proizvodnje, ICD-ovi se koriste za zatvaranje određenih zona ležišta, što pomaže usmjeriti tlak na željenu zonu i sprječava nepoželjne interakcije s drugim zonama ležišta. Smješta se u svaki spojni zasun u bušotini, te može biti upravljani od strane operatora ili automatski. Također, mogu se upravljati preko električnog ili hidrauličnog sustava vodova te mogu biti varijabilni od otvorenog do zatvorenog položaja ili mogu raditi u višestrukim koracima (Cullick i Sukkestad, 2010). Ova je tehnologija prvi put korištena u polju Norsk Hydros Troll 1992. godine. Slika 2-27 prikazuje konstrukciju tipičnog ICD-a.



**Slika 2-27.** Tipični uređaj za regulaciju protoka (ICD) (Weatherford, 2010)

Fluid iz ležišta koji ulazi s vanjske strane uređaja za regulaciju protoka teče kroz rešetke duž osnovne cijevi. Zatim, slojni fluid utječe u komoru prije nego što prođe kroz nekoliko mlaznica. Na kraju, nafta teče kroz velike mlaznice unutar kućišta, a protok se regulira pomoću mlaznica na uređaju. Prema tipičnoj ICD primjeni u Sjevernom moru (Aadnoy i Hareland, 2009), protok slojnog fluida povezan je s nizom elemenata koji uzrokuju smanjenja tlaka: vanjski zasun, cijev ispod zasuna, komora i mlaznice.

#### 2.2.4.1. Vanjski zasun

Vanjski zasun ICD-a odnosi se na vanjski ovojni sloj ili strukturu uređaja za regulaciju protoka. Ovaj vanjski zasun igra ključnu ulogu u procesu regulacije protoka fluida (nafte, plina) koji ulazi u bušotinu. Vanjski zasun može imati posebne dizajne perforacija koje omogućuju preciznu regulaciju protoka kroz uređaj u bušotini. Cilj je postići ravnomjerno raspoređivanje tlaka i protoka duž kanala bušotine, kako bi se optimizirala proizvodnja. Na vanjskom zasunu, svaki utor ima pravokutni otvor, a samo 11% vanjske površine zasuna predstavlja područje protoka (Bernt i Geir, 2009). Za jedan metar duljine zaslona, izračunata efektivna ulazna površina je 12 320 mm<sup>2</sup>. Brzina dotoka fluida (m/s) dana je jednadžbom (Bernt i Geir, 2009):

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{12320 * 10^{-6}} = 81,67Q$$

(2-1)

Gdje su:

v – brzina dotoka (m/s)

Q – protok (m<sup>3</sup>/s)

A – efektivna ulazna površina (m<sup>2</sup>)

Bourgoyne et al. (1986) modelirali su pad tlaka kao laminarni tok između dvije ploče, a protok (m<sup>3</sup>/s) je definiran jednadžbom:

$$Q = \frac{wh^3 * \Delta p}{12\mu * L}$$

(2-2)

Gdje su:

w – širina zasuna (m)

h – visina zasuna (m)

$\Delta p$  – pad tlaka (Pa)

$\mu$  - viskoznost (Pa·s)

L – duljina zasuna (m)

w\*h se definira kao efektivna površina protoka.

#### 2.2.4.2. Cijev (vodnik) ispod zasuna

Pad tlaka u cijevi (vodniku) ima određene složenosti. Aksijalni protok kroz mlaznice, u bilo kojem trenutku predstavlja kumulativni protok iz otvora zasuna uzvodno i on će se povećavati od jednog kraja cijevi do drugog (Aadnoy i Hareland, 2009). Ovaj opis sugerira da smanjenje tlaka duž cijevi (vodnika) nije konstantno i da ovisi o aksijalnom protoku kroz mlaznice. Pravokutni oblik vodnika predstavlja još jednu složenost. Bourgoyne et al. (1986)

definirali su ekvivalentni hidraulički radijus koji se može koristiti u jednadžbi protoka za kružni otvor. Veličina jednog vodnika iznosi 12,78 mm × 5,13 mm. Efektivna površina vodnika, nakon oduzimanja područja gdje je omotana žica, iznosi 9,7 mm × 5,1 mm. Prema tome, hidraulički radijus je:

$$R_H(mm) = \frac{Površina}{Površina\ u\ kontaktu\ s\ fluidom} = \frac{P}{P_{kontakt\ s\ fluidom}} = \frac{9,7 * 5,1}{2 * (9,7 * 5,1)} = 1,67\ mm$$

(2-3)

Hidraulički promjer je četiri puta veći od hidrauličkog radijusa ili 6,69 mm, a za laminari protok, pad tlaka računa se:

$$\Delta p = \frac{32\mu v}{d^2}$$

(2-4)

Gdje je  $d$  hidraulički promjer (mm).

Koristeći jednadžbu 2-4, smanjenje tlaka može se izraziti kao:

$$\Delta p = \frac{32\mu}{\frac{\pi}{4} * 0,00669 * 0,00669} * 1(m) = 20\ 300\mu Q$$

(2-5)

#### 2.2.4.3. Komora

Smanjenje tlaka unutar komore se zanemaruje, jer je brzina fluida mala zbog velike veličine komore.

#### 2.2.4.4. Otvori/mlaznice

Bourgoyne et al. (1986.) izrazili su pad tlaka kroz mlaznicu za potpuno turbulentni protok:

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{\rho Q^2}{2A^2} = \frac{\rho Q^2}{2\pi r^2}$$

(2-6)

Gdje su:

$\rho$  – gustoća nafte ( $\text{kg/m}^3$ )

$r$  – promjer mlaznice (m)

Ukupni pad tlaka

Ukupni pad tlaka za protok je zbroj padova tlaka navedenim ranije. Za gustoću nafte od  $750 \text{ kg/m}^3$  i viskoznost od  $0,0005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  ( $0,5 \text{ cP}$ ):

$$\Delta p = \frac{779Q}{l} + 11.5Q + 5.28 * 10^7 * \frac{Q^2}{n} \quad (2-7)$$

Gdje su:

$l$  – duljina zasuna (m)

$n$  – broj mlaznica (-)

Kako bi se saznala vrsta protoka (laminaran ili turbulentan protok) koristi se Reynoldsov broj. Reynoldsov broj govori da li je protok turbulentan ili laminaran. Vrijednosti Reynoldsovog broja ispod 2320 vrijede za potpuno laminarne protoke, gdje smanjenje tlaka ovisi o viskoznosti fluida, a za vrijednosti iznad 2320, protok je turbulentan gdje smanjenje tlaka ovisi o gustoći fluida.

$$Re = \frac{vd}{\vartheta} \leq 2320 \quad (2-8)$$

Gdje su:

$v$  – srednja brzina protoka (m/s)

$d$  – promjer cijevi (m)

$\vartheta$  – kinematička viskoznost ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

Kinematička viskoznost je:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

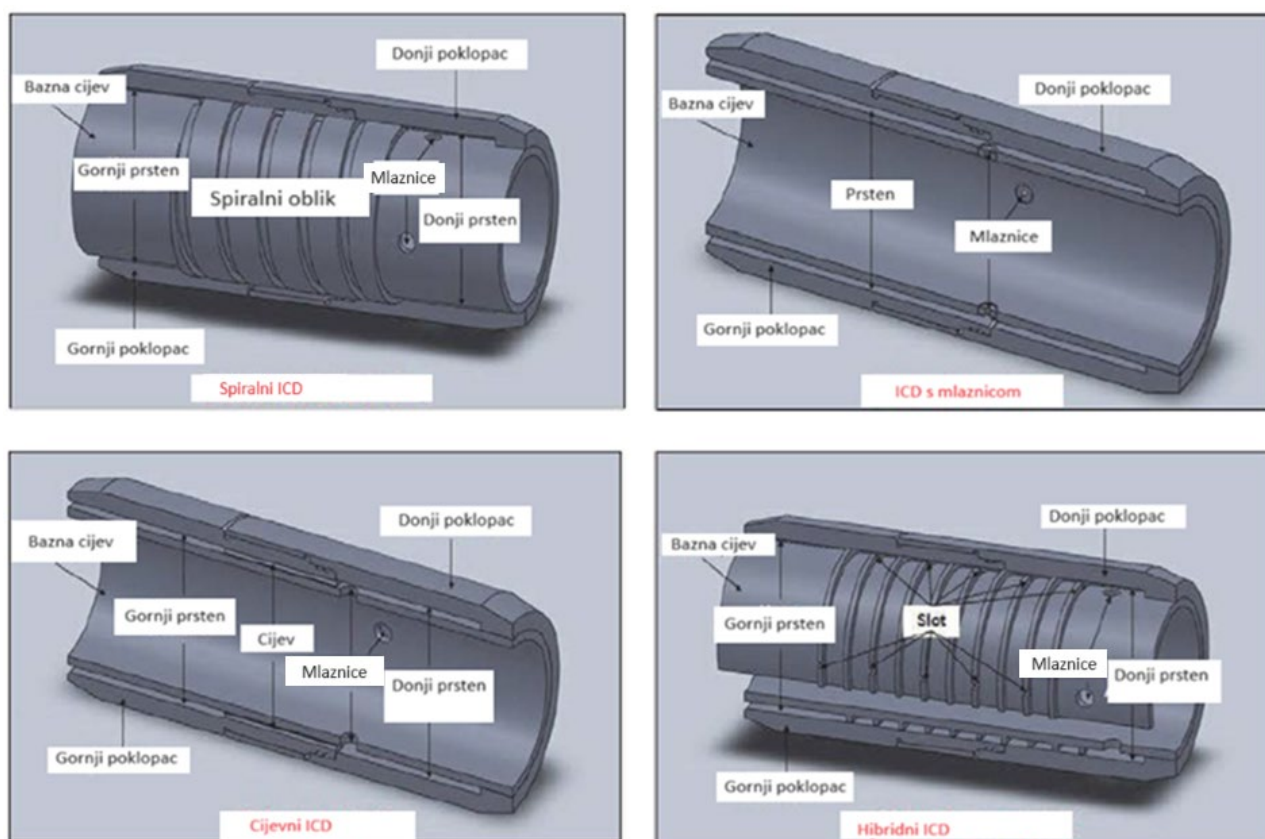
Gdje su:

$\rho$  – gustoća fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  - viskoznost fluida ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )

Najčešće se koriste četiri vrste ICD-ova (Quanshu et al., 2013): spiralni ICD, ICD na bazi mlaznice (restriktivni), cijevni ICD i hibridni ICD.

Slika 2-28 pokazuje različite vrste ICD-ova. S drugačijom geometrijom, ova četiri tipa imaju različite mehanizme djelovanja te su također pogodni za različite uvjete protoka (Tablica 2-1).



Slika 2-28. Tipovi ICD-ova (Quanshu et al., 2013)

**Tablica 2-1.** Svojstva različitih tipova ICD-ova (Rafiei, 2016)

| <b>Element pada tlaka ICD-a</b>   | <b>Spiralni ICD</b> | <b>Cijevni ICD</b> | <b>ICD s mlaznicom</b> | <b>Hibridni ICD</b> |
|---|---------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Pad tlaka uzrokovan:  |                     |                    |                        |                     |
| Trenjem   | H                   | H                  | N                      | N                   |
| Akceleracijom   | L                   | L                  | H                      | H                   |
| Važnost pojave emulzije u ležištu   | H                   | H                  | N                      | N                   |
| Rizik od:   |                     |                    |                        |                     |
| Erozije   | L                   | L                  | M                      | M                   |
| Čepljenja   | L                   | H                  | M                      | M                   |
| Fleksibilnost u bušotini  | L                   | L                  | H                      | H                   |
| H = visoka ovisnost, M = srednja ovisnost, L = niska ovisnost, N = nema ovisnosti |                     |                    |                        |                     |

ICD na bazi mlaznice ima najjednostavniji dizajn i može se lako ugraditi u bušotinu. Prolaskom slojnog fluida kroz mlaznice dolazi do stvaranja diferencijalnog tlaka preko uređaja (Quanshu et al., 2013). To stvara otpor protoku jer fluid struji od veće površine prema dolje kroz mlaznice malog promjera. Važno je napomenuti da ovakav dizajn može rezultirati otporom strujanja fluida zbog usmjeravanja kroz mlaznice malog promjera, stvarajući time kontrolirani dotok u kanal bušotine. Međutim, potrebno je uzeti u obzir i neke nedostatke ovog tipa ICD-a. Naime, postoji rizik od erozije ili začepjenja mlaznica zbog malih promjera. U praksi, održavanje optimalnog rada ovakvih uređaja zahtijeva praćenje stanja bušotine i redovito održavanje kako bi se spriječile oštećenja ili smanjenje učinkovitosti.

Spiralni ICD koristi spiralne kanale oko osnovne cijevi za stvaranje smanjenja tlaka. Distribucija protoka kroz široko područje rezultira značajnim smanjenjem brzine protoka slojnog fluida, čime se postiže otpornost na eroziju i začepjenje. U ovom kontekstu, spiralni kanal igra ključnu ulogu u upravljanju utoka ležišnih fluida u kanal bušotine. Spiralni oblik omogućava postizanje kontroliranog pada tlaka, sprječavajući nagli utok slojnog fluida koji



bi mogao uzrokovati probleme poput erozije materijala ili začepjenja. Ovakav pristup smanjuje osjetljivost uređaja na oštećenja i osigurava dugotrajni i učinkoviti rad bušotine.

Cijevni ICD koristi niz dugih cijevi kako bi generirao pad tlaka. Otpor protoku nastaje kada slojni fluid protiče iz područja veće površine prema dolje kroz cijevi. Ovaj uređaj je dizajniran s ciljem reguliranja utoka fluida iz ležišta u bušotinu. Princip djelovanja cijevnog ICD-a leži u stvaranju specifičnog protoka kroz dulje cijevi. Otpor protoku postiže se usmjeravanjem fluida niz cijevi, što rezultira smanjenjem brzine kretanja fluida. Ova kontrolirana distribucija utoka fluida pomaže u sprječavanju naglih utoka i smanjuje osjetljivost uređaja na eroziju ili začepjenje.

Hibridni ICD-ovi često uključuju distribuiranu ili raznovrsnu geometriju s nizom protočnih otvora. Ovaj dizajn pomaže u ravnomjernijoj distribuciji protoka fluida duž kanala bušotine, sprječavajući protok iz određenih zona. Dizajnirani su da budu prilagodljivi promjenama uvjeta u ležištu. Mogu pružiti dinamičniji odgovor na varijacije u svojstvima fluida i tlaku, optimizirajući proizvodnju tijekom radnog vijeka bušotine. Dizajn ove varijante ICD-a ima za cilj smanjiti rizik od erozije i začepjenja. Regulacijom protoka putem različitih mehanizama, poput kombinacije različitih protočnih kanala ili ograničenja, uređaj može pružiti otpornost na erozivne učinke proizvedenih fluida i smanjiti vjerojatnost začepjenja.

#### 2.2.5. Autonomni uređaji i ventili za regulaciju protoka

Jedna od novih tehnologija je autonomni ICV/ICD (engl. *Autonomous Interval Control Device/Valve - AICD/AICV*). Ne zahtijevaju nikakvu kontrolu s površine, odnosno oni su samoregulirajući. Smatra se prvom tehnologijom koja može u potpunosti zatvoriti neželjeni dotok plina i vode kako bi se poboljšao iscrpак nafte iz ležišta (Aakre et al., 2013). Mogu automatski regulirati utok neželjenih fluida iz određenih zona ležišta te tako smanjiti troškove separacije, transporta i odlaganja neželjenih slojnih fluida. AICD može regulirati protok s obzirom na to koji se fluid trenutno proizvodi. Također, njegovim radom dobiva se puno manji omjer plina i nafte (engl. *Gas Oil Ratio - GOR*) kao i vode i nafte (engl. *Water Oil Ratio - WOR*) nego kod konvencionalnih ICD-ova. Na tržištu postoje različite vrste AICD-ova poput Halliburtonov EquiFlow AICD, Equinorov RCP, FloSure AICD i drugi.

Tvrtka Halliburton navodi sljedeće prednosti AICD-a:

- rješavanje problema konusiranja vode ili plina,

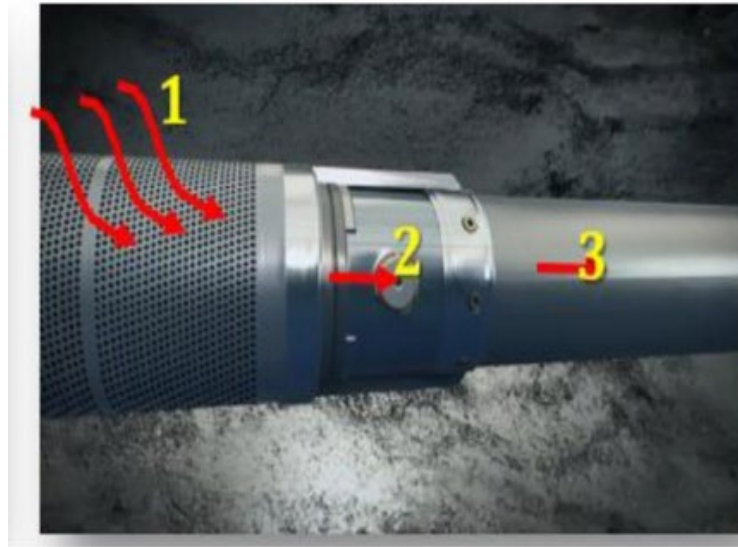
- maksimalno povećava konačni iscrpak fluida iz ležišta,
- minimizira proizvodnju neželjenih slojnih fluida,
- smanjuje troškove i rizike,
- odgađa proizvodnju vode i plina.

Također, u svojoj ponudi nude 4 različita dizajna AICD-a koji ovise o viskoznosti nafte (Tablica 2-2)

**Tablica 2-2.** Ponuda AICD-ova tvrtke Halliburton (Halliburton, 2021)

| <b>Dizajn</b> | <b>Viskoznost Nafte</b> | <b>Tip Nafte</b>    | <b>Kontrolirani fluidi</b> | <b>Dostupne Veličine (mm)</b> |
|---------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Raspon 1      | 0,0003 do 0,0015 Pa·s   | vrlo laka           | voda i plin                | 60,325<br>73,025              |
| Raspon 2      | 0,0015 do 0,01 Pa·s     | laka                | voda i plin                | 88,9<br>114,3                 |
| Raspon 3      | 0,003 do 0,2 Pa·s       | laka, srednje teška | voda i plin                | 139,7<br>168,275              |
| Raspon 4      | 0,15 Pa·s i više        | teška, jako teška   | voda i plin                |                               |

Equinorov AICD dizajniran je kako bi se odgodila pojava vode i plina u proizvodnom fluidu te eliminirala posljedice tog proboja. AICD u regulirajućoj cijevi ograničava protok niskoviskoznih fluida i omogućuje visoko viskoznom fluidu da teče prema bušotini. Slika 2-29 prikazuje put protoka fluida iz ležišta u bušotinu opremljenu Equinorovim AICD-om. Protok iz ležišta protiče kroz filter do AICD-a, pa iz AICD-a u proizvodni niz.



**Slika 2-29.** AICD tvrtke Equinor (Razaq et al., 2022)

AICV kombinira najbolje iz AICD-ova i ICV-ova. Zatvara se automatski te potpuno eliminira dotok neželjenih slojnih fluida na mjestima prodora tih fluida u bušotinu dok se u isto vrijeme vrši proizvodnja iz drugih zona ležišta, osiguravajući optimalnu proizvodnju i iscrpak fluida iz ležišta. Potpuno je samoregulirajuć te ne zahtijeva nikakvu kontrolu, elektroniku ili kablove s površine. Tehnologija se bazira na različitim karakteristikama laminarnog i turbulentnog protoka. Sastoji se od dva različita regulatora protoka (jedan laminarni regulator i jedan turbulentni regulator) serijski postavljenih.

Regulator za laminarni protok je cijevni element, a smanjenje tlaka se opisuje jednadžbom:

$$\Delta p = \frac{32 * \mu * v * L}{D^2}$$

(2-10)

Gdje su

$\mu$  - viskoznost fluida (Pas)

$v$  - brzina fluida (m/s)

$L$  – duljina cijevi (m)

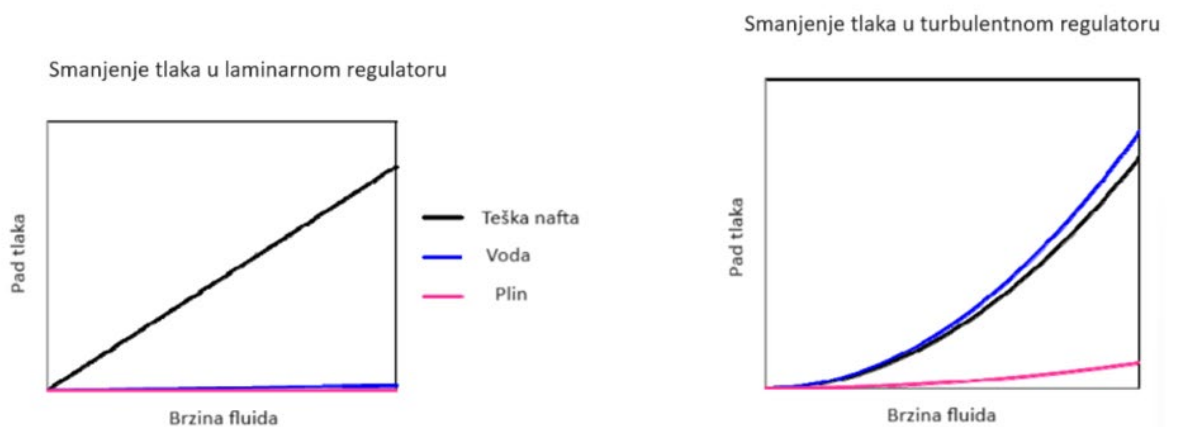
$D$  - promjer cijevi (m).

Regulator za turbulentni protok je tanka ploča s otvorom, a smanjenje tlaka je opisano jednadžbom:

$$\Delta p = k * \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2-11)$$

Gdje je  $k$  geometrijska konstanta, a  $\rho$  je gustoća fluida ( $\text{kg/m}^3$ ).

AICV (Slika 2-31.) koristi mali protok fluida koji protiče pri određenom pilot tlaku kroz regulatore laminarnog i turbulentnog protoka. Tlak između ta dva regulatora se koristi za upravljanje ventilom koji je paralelan s protokom fluida. Glavni protok fluida protiče kroz ovaj ventil. Slika 2.30 prikazuje smanjenje tlaka u laminarnom i turbulentnom regulatoru.

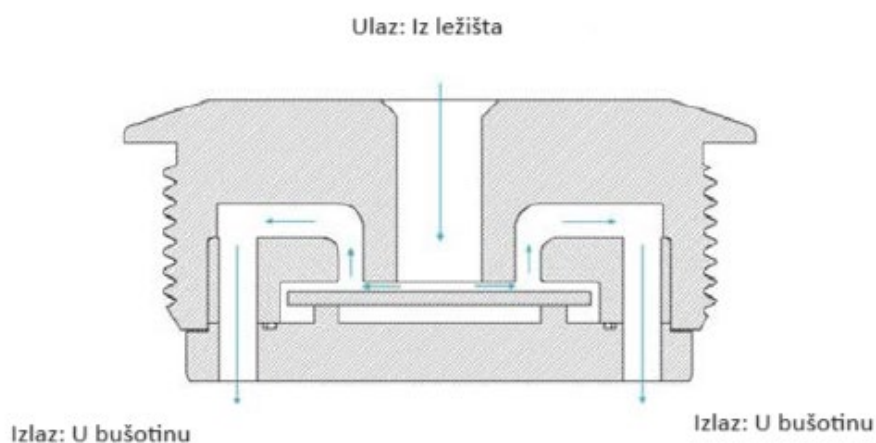


**Slika 2-30.** Dijagrami smanjenja tlaka u laminarnom i turbulentnom regulatoru (Razaq et al., 2022)



**Slika 2-31.** AICV pored kovanice od jednog eura (Aakre et al., 2013)

Strelice na Slici 2-32 pokazuju putanju protoka fluida unutar AICV-a tvrtke Equinor (RCP ventila), kontroliranom brzinom (engl. *Rate Controlled Production - RCP*). Kada plin (fluid male viskoznosti) protiče kroz ventil, slobodno plutajući disk (pokretni dio uređaja) pomaknut će se do sjedišta i smanjiti područje protoka dopuštajući ograničenje protoka tog fluida. Položaj diska ovisi o svojstvima fluida i uvjetima protoka (Halvorsen et al., 2012)



**Slika 2-32.** Skica RCP-a (Vidar et al., 2011)

Karakteristike ovog autonomnog ventila za regulaciju protoka (AICV) opisane su Bernoullijevim jednadžbom 2-12 (Aakre et al., 2013.) uz manji učinak visine i stlačivosti.

$$p_1 + \frac{1}{2}pv_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}pv_2^2 + \Delta p_{trenje}$$

Gdje su:

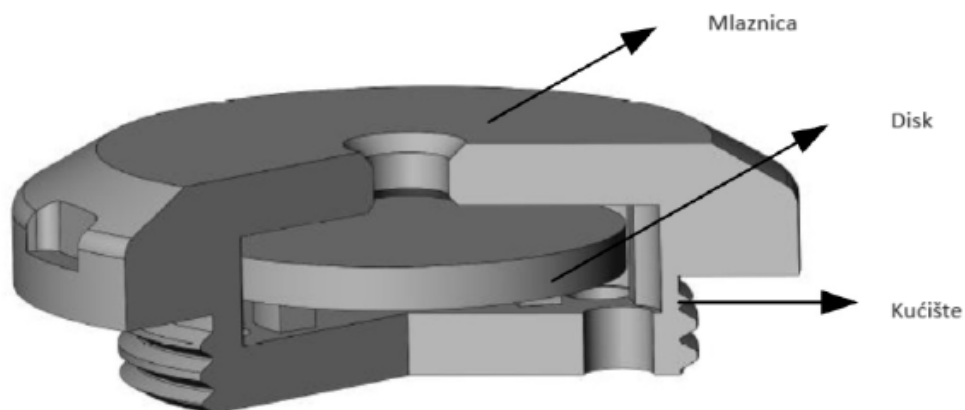
$p_1$  – statički tlak (Pa)

$\frac{1}{2}\rho v_1^2$  – dinamički tlak (Pa)

$\Delta p_{\text{trenje}}$  – smanjenje tlaka zbog trenja (Pa)

Fenomen opisan Bernoullijevom jednažbom koristi se u radu RCP ventila, pri čemu su zbroj statičkog tlaka, dinamičkog tlaka i smanjenja tlaka konstantni.

Uvedene su brojne mehaničke izmjene dizajna AICV-a kako bi se poboljšala njegova integracija, robusnost i izdržljivost. Novije verzije AICV-a sastoje se od samo tri komponente: kućišta ventila, mlaznice i diska (Slika 2-33.).



**Slika 2-33.** Dizajn AICV-a (Vidar et al., 2011)

Da bi se osigurala veća stabilnost i otpornost na eroziju, debljina diska i mlaznice su povećane, a materijal koji se koristi za njegovu izradu je volfram karbid. AICV je također smanjen kako bi se spriječilo smanjenje unutarnjeg promjera opremljene bušotine, odnosno kako bi se izbjeglo ograničavanje kretanja alatki za izvođenje intervencija u bušotini. Danas, kako bi se zadovoljila potražnja za različitim brzinama protoka i zahtjevima kontrole dotoka, razvijeni su različiti tipovi AICD-ova različitih veličina, materijala i konfiguracija.

## 2.2.6. Izbor između ICV-a i ICD-a

Područja primjene tehnologija ICV-a i ICD-a se preklapaju (Gao et al., 2007). Al-Khelaiwi et al. (2010) predložili su usporedno istraživanje ICV-a i ICD-a kako bi razvili jednostavni alat za procjenu optimalnog dizajna inteligentno opremljene bušotine (Tablica 2-3). Ovaj alat može se koristiti za određivanje najprikladnije tehnologije za određenu primjenu.

**Tablica 2-3.** Usporedba opremanja s ICV-om i ICD-om (AL-Khelaiwi et al., 2010)

| Segment                                    |                               | ICD ili ICV |
|--|-------------------------------|-------------|
| Slabo poznavanje karakteristika ležišta    |                               | ICV         |
| Fleksibilniji razvoj ležišta               |                               | ICV         |
| Broj kontroliranih zona                    |                               | ICD         |
| Unutarnji promjer kanala bušotine          |                               | ICD         |
| Vrijednost informacija                     |                               | ICV         |
| Multilateralne bušotine                    | Kontrola bočnog kanala        | ICV         |
|  | Kontrola unutar bočnog kanala | ICD         |
| Upravljanje s više ležišta                 |                               | ICV         |
| Propusnost formacije                       | Visoka                        | ICD         |
|  | Srednja ili mala              | ICV         |
| Dostupnost alata za modeliranje            |                               | ICV         |
| Dugoročna pouzdanost opreme                |                               | ICD         |
| Izolacijska barijera ležišta               |                               | ICV         |
| Poboljšano čišćenje bušotine               |                               | ICV         |
| Tretman kiselinom ili inhibitorom kamenca  |                               | ICV         |
| Cijena opreme                              |                               | ICD         |
| Instalacija (Rizik, cijena i kompleksnost) |                               | ICD         |
| Proizvodnja plina                          | Kontrola dotoka plina         | ICD         |
|  | Kontrola dotoka vode          | ICV         |

### 1) Fleksibilniji razvoj

Kada je ICD instaliran, nema mogućnosti promjene promjera protoka u kanalu bušotine bez intervencije, međutim, to se može učiniti za promjer protoka ICV-a. ICV-ovi imaju više stupnjeva slobode od ICD-ova, što omogućuje primjenu fleksibilnijih strategija razvoja projekta iskorištavanja ležišta na terenu. Reaktivna kontrola temeljena na neželjenim tokovima fluida znači da u usporedbi s ICV-om, sposobnost ICD-a da reagira na neželjene fluide (plin i voda) je ograničena. Razlika postaje još veća kod ICV-a s više postavki u usporedbi s ICD-om. ICV-ovi omogućuju proizvodnju slojnog fluida iz bušotine pri optimalnom postotku vode ili plina primjenom najprikladnijih (zonskih) ograničenja koja maksimiziraju ukupnu proizvodnju nafte uz minimalan udio vode ili plina (Al-Khelaiwi et al., 2010). Opremanje bušotine s ICD-om koristi proaktivnu kontrolu nad fluidom koji istiskuje naftu. Međutim, nakon što je uređaj instaliran, nije moguće modificirati postavljena ograničenja kako bi se kasnije postigao optimalan iscrpak nafte (Naus et al., 2006). Ovdje ICV-ovi imaju prednost zbog svoje kontinuirane fleksibilnosti u modificiranju ograničenja protoka.

### 2) Broj kontroliranih zona:

Najveći broj instaliranih ICV-ova u jednom opremanju do sada iznosi šest (Al-Khelaiwi et al., 2010). S druge strane broj instaliranih ICD-a ograničen je samo brojem pakera i troškovima. Na primjer, tvrtka Saudi Aramco predložila je njihovu instalaciju svakih 15 do 30 metara (Hembling et al., 2007). Kada je potrebno više kontroliranih intervala u horizontalnoj bušotini, može se reći da su ICD-ovi preferirani izbor. To je zato što opremanje s ICD-om potencijalno može imati mnogo više kontroliranih zona u usporedbi s opremanjem s ICV-om.

### 3) Unutarnji promjer alatke za protok fluida

Veći promjer unutarnjeg protoka samog uređaja daje prednost ICD-u nad ICV-om, budući da ICV ima smanjeni unutarnji promjer protoka.

### 4) Primjene u multilateralim bušotinama

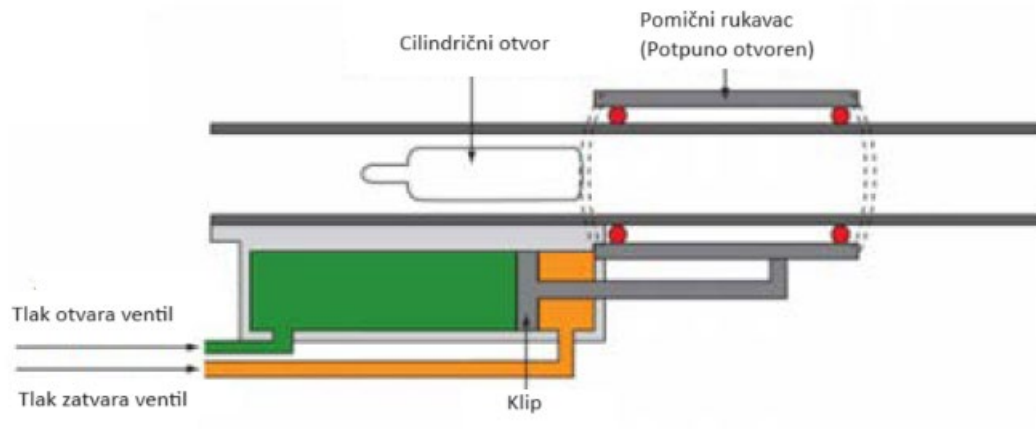
Trenutno se ICV-ovi mogu instalirati samo u glavni kanal bušotine zbog ograničenja dostupne tehnologije kontrole povezivanja glavnog i lateralnog kanala bušotine, ali može



uravnotežiti protok iz više lateralnih kanala bušotine ili reagirati na promjene u performansama određenih lateralnih kanala bušotine (Haugen et al., 2006). ICD-ovi nisu u mogućnosti upravljati ukupnom brzinom protoka iz svih lateralnih kanala bušotine, međutim mogu pružiti regulaciju protoka duž duljine pojedinog lateralnog kanala bušotine (Al Qudaihy et al., 2006). Ova razlika u primjeni dovodi do integracije ICV i ICD tehnologija za optimalno opremanje multilateralnih bušotina.

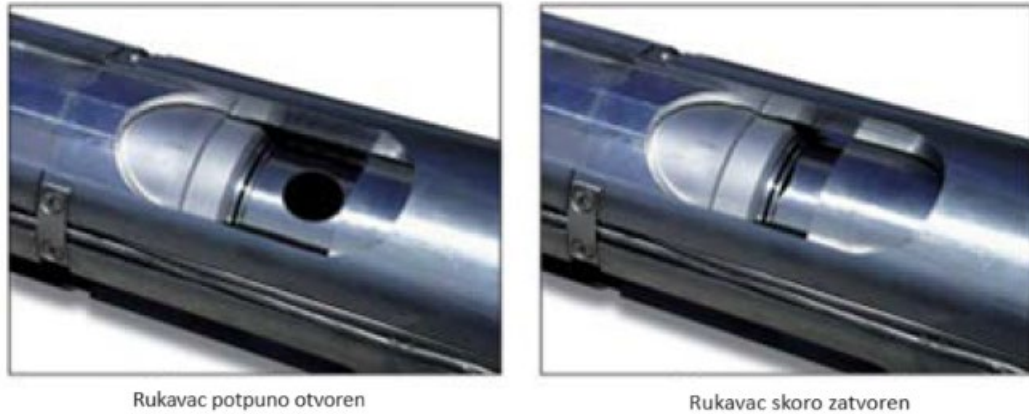
### 2.2.7. Ventil s rukavcem

Ventili mogu biti potpuno električni, elektro-hidraulički ili hidraulički. Za regulaciju protoka od prstenastog prostora do cijevi koristi se ventil s rukavcem. Kuglasti ventil ili omotani rukavac mogu se koristiti za regulaciju protoka u tubing. Inženjeri bi trebali odabrati, postaviti i upravljati svim vrstama ventila kako bi izbjegli probleme kao što su izdvajanje asfaltna, kamenca te erozija. Uobičajeni ventil s rukavcem je izravno upravljani hidraulički ventil (Slika 2-34.). Ovaj ventil može biti potpuno zatvoren ili potpuno otvoren.



**Slika 2-34.** Direktno kontrolirani ventil s rukavcem (Bellarby, 2009)

Za otvaranje ili zatvaranje rukavca potreban je diferencijalni tlak dovoljan da nadvlada trenje između klipa i rukavca. Kamenac, asfalt ili druge naslage u bušotini mogu povećati potrebni diferencijalni tlak, što znači da se sila za otvaranje ili zatvaranje rukavca mora povećati. Hidraulički rukavac u potpuno otvorenom i gotovo zatvorenom položaju prikazan je na donjoj slici (Slika 2-35.).

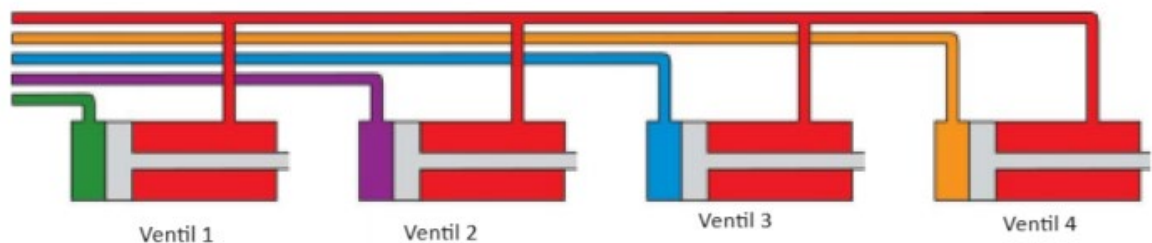


Rukavac potpuno otvoren

Rukavac skoro zatvoren

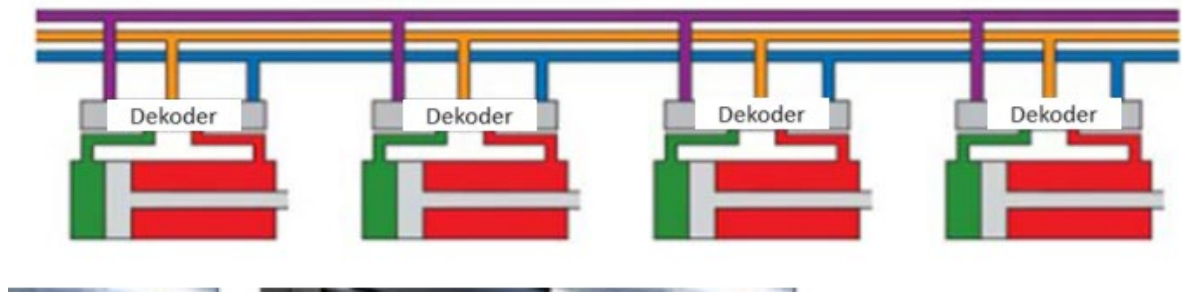
**Slika 2-35.** Hidraulički klizni rukavci (Bellarby, 2009)

Ako hidraulični sustav propušta i ventili se ne mogu upravljati daljinski putem hidrauličnog sustava, mnogi ventili za regulaciju protoka u bušotini mogu se aktivirati putem profila za postavljanje (engl. *Landing nipple*) i ili pomoću opreme na žici (engl. *Slick line*) ili savitljivog tubinga (engl. *Coiled tubing*). Ako je hidraulički sustav začepljen, tada će hidrauličko zaključavanje spriječiti pomicanje rukavca bez obzira na intenzitet udaranja opremom (engl. *Jarring*). Zato su potrebna dva kontrolna voda da bi se upravljalo jednim ventilom. Uobičajeno je koristiti jedan zajednički vod za više ventila, obično „kontrolni vod za ostvarivanje tlaka zatvaranja“ (engl. *Pressure to close*). Slika 2-36 prikazuje četiri ventila. Ako operator želi otvoriti sve ventile, tada se tlak primjenjuje na zelene, ljubičaste, plave i narančaste linije, ali ne i na crveni vod. Ako želi ventile dva i četiri, ali ostaviti druga dva zatvorena, tada se pritisak primjenjuje na ljubičaste i narančaste vodove, ali ne na zelene, plave ili crvene vodove. Ako želi zatvoriti sve ventile (zbog postavljanja brtvi ili za ispitivanje tlaka u bušotini), tada se tlak primjenjuje samo u crvenom vodu.



**Slika 2-36.** Višestruki izravno kontrolirani hidraulički klizni rukavci (Bellarby, 2009)

Obično su kontrolni vodovi dio površinskog ili podmorskog sustava kontrole. Granica za broj kontrolnih vodova obično je vješalica tubinga. Postavljanje više kontrolnih vodova u ravno pakiranje (engl. *Flat pack*) je složenije od postavljanja pojedinačnog hidrauličnog voda. Ponekad je nemoguće postaviti višestruke hidrauličke kontrolne vodove za intervalno upravljanje, uključujući mjerenje, utiskivanje kemikalija i upravljanje sigurnosnim ventilima, kroz vješalicu tubinga, erupcijski uređaj ili glavu bušotine. Kako bi se smanjio broj kontrolnih vodova, dostupni su digitalni dekoderi. Digitalni dekoderi pretvaraju tlačne signale primijenjene kroz višestruke kontrolne vodove u primijenjeni tlak za pojedini ventil. Na Slici 2-37 prikazan je primjer tri kontrolna voda pomoću kojih je moguće upravljati s maksimalno šest intervalnih ventila.



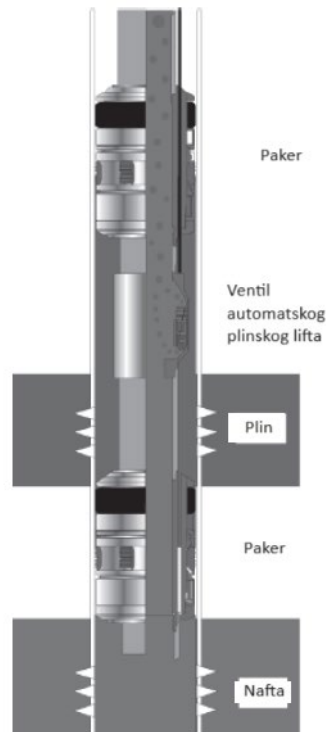
**Slika 2-37.** Kontrola više hidrauličnih kliznih rukavaca pomoću samo tri kontrolna voda (Bellarby, 2009)

Inženjeri mogu smanjiti broj vodova i povećati opcije za kontrolu ventila i njihov broj dodavanjem električne kontrole. Jedan hidraulički vod i jedan električni kabel mogu se koristiti za učinkovito upravljanje bilo kojim brojem ventila, uključujući ventile s više položaja. U nekim slučajevima može se koristiti potpuno električna regulacija protoka u bušotini, a prednost ovog sustava je da zahtijeva samo jedan kabel.

#### 2.2.8. Automatski plinski lift

Jedna od najnovijih primjena tehnologije inteligentno opremljenih bušotina je automatski plinski lift (engl. *Auto Gas Lift - AGL*). To je sustav koji proizvodi plin iz plinskog ležišta i utiskuje ga u proizvodni niz pomoću automatskog ventila za plinski lift. Korištenjem ovog sustava nema potrebe za konvencionalnom opremom za plinski lift (kompresor, separator, cjevovod, dehidrator). U konvencionalnim sustavima plinskog lifta, plin se pumpa s površine kroz prstenasti prostor, ali u automatskom plinskom sustavu plin se utiskuje u proizvodni

niz kontroliranim protokom. Shematski prikaz bušotine s auto plinskim liftom prikazan je na Slici 2-38.



**Slika 2-38.** Sustav s automatskim plinskim liftom (Vasper, 2008)

Cilj ovog sustava je povećati proizvodnju nafte smanjenjem hidrostatskog tlaka stupca fluida u bušotini. Korištenje manometara u proizvodnom nizu i prstenastom prostoru blizu ventila za automatski plinski lift poboljšava se optimizacija proizvodnje nafte u bušotini.

#### 2.2.9. Kontrolni vodovi i zaštita za kontrolne vodove

Tehnologija inteligentnog opremanja bušotine zahtijeva višestruke vodove za prijenos podataka i energije do sustava upravljanja i nadzora u bušotini. Ti vodovi mogu biti vodovi za električnu energiju i podatke, vodovi za hidrauličku kontrolu ili vodovi od optičkih vlakana.

Električni vodič je sposoban prenositi signale između površinskog kontrolera i uređaja u bušotini preko telemetrijskog sustava. Telemetrijski sustav u bušotini odnosi se na skup tehnologija i uređaja koji omogućuju prijenos podataka s dna bušotine na površinu ili između

različitih dijelova kanala bušotine. Ovi sustavi igraju ključnu ulogu u praćenju i upravljanju bušotinama te omogućuju prijenos informacija o stanju bušotine, proizvodnji i drugim relevantnim parametrima.

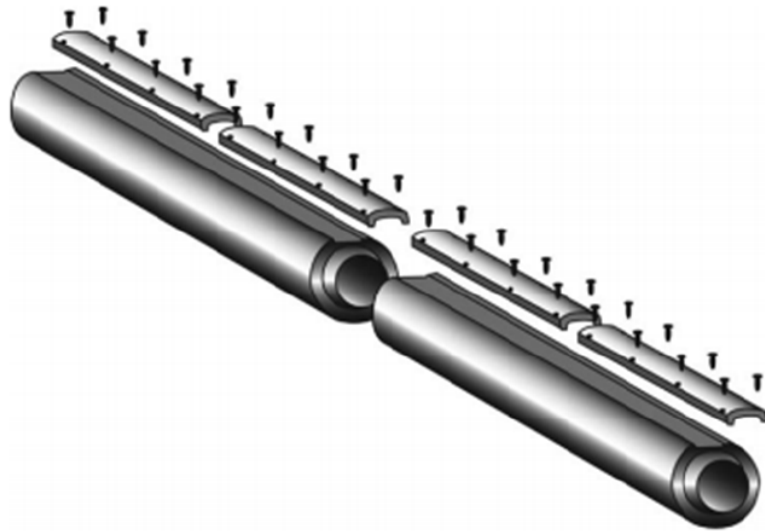
Postoje dva glavna tipa hidrauličnih kontrolnih sustava: izravni hidraulični sustav i višestruki hidraulični sustav. U izravnom hidrauličnom sustavu broj kontrolnih linija mora biti jednak broju uređaja na dnu bušotine, dok u višestrukome hidrauličnom sustavu kontrolne linije dijele nekoliko uređaja na dnu bušotine, čime se smanjuje broj kabela i prolaza kroz otvore na pakerima u bušotini.

Optički sustav omogućuje pretvaranje izmjerenih podataka u optičke signale i prijenos istih na površinu. Ovaj sustav karakterizira učinkovita otpornost na promjenu temperature te velika brzina prijenosa podataka.

Električni kablovi i hidraulične kontrolne linije zahtijevaju zaštitu. Vodovi i kablovi za regulaciju protoka u bušotini izloženi su agresivnim fluidima promjenjivog sastava, eroziji i vibracijama. Postoje materijali za izradu kontrolnih vodova, poput metala i omotača, koji omogućavaju izloženost ležišnim uvjetima i operacijama u bušotini. Kako bi se smanjile vibracije, ključan je omotač kablova. Obično se omotač označava bojama kako bi se pratilo koja boja kabela odgovara kojoj funkciji. Dodatna zaštita nije potrebna kada su kablovi ili kontrolne linije izložene fluidima male brzine koji teku paralelno s kabelom. Kada slojni fluidi teku izravno na cijev (npr. uz perforacije), preporučuju se spojni segmenti protiv erozije kako bi se minimalizirala oštećenja. Oni su važni kad bušotina ima problem s pijeskom. Spojni segmenti mogu se modificirati kako bi pružili zaštitu kontrolnim i podatkovnim vodovima.

Ovi kontrolni vodovi moraju biti zaštićeni kada su smješteni u blizini protoka. Postoje dva načina da se to postigne:

- 1) Prva metoda koristi ravan spoj s utorima i pokrovnom pločom (Slika 2-39.). Pričvršćivanje pokrovne ploče na mjesto zahtijeva vrijeme i nosi rizik od otpuštanja vijaka koji bi mogli pasti kroz bušotinu na njeno dno.



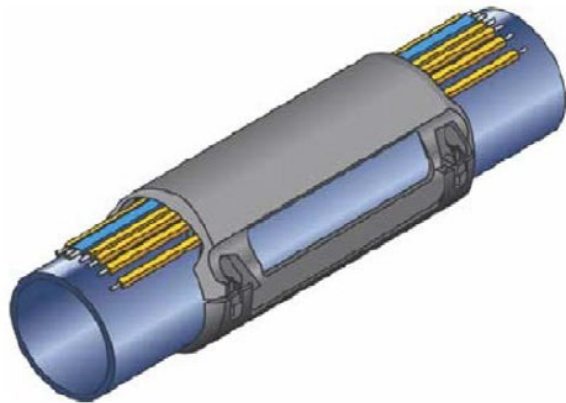
**Slika 2-39.** Primjer ravnih spojeva s pokrovnom pločom (Bellarby, 2009)

- 2) Druga metoda koristi neovisnu pokrovnu ploču koja se drži na mjestu s križnim spojevima (Slika 2-40.). Ova metoda pruža manje zaštite, ali je lakša za instalaciju i nabavu.



**Slika 2-40.** Ugradnja zaštitne ploče kontrolnog voda (Bellarby, 2009)

Također, za maksimalnu zaštitu upravljačkih vodova tijekom instalacije dizajnirane su stezaljke upravljačkih vodova. Stezaljke apsorbiraju sve vlačne i tlačne sile i smanjuje rizik od oštećenja upravljačkih vodova. Tipična stezaljka kontrolnih vodova prikazana je na Slici 2-41. Općenito, ove stezaljke se postavljaju na spojnice proizvodnih cijevi gdje su kontrolne linije najviše izložene oštećenjima.



**Slika 2-41.** Stezaljka kontrolnih vodova (Ali i Shafiq, 2008)

Kabeli i upravljački vodovi protežu se od svakog uređaja u bušotini do površine. U vješalici tubinga i glavi bušotine mora biti dovoljno otvora kako bi se omogućilo izlazak kontrolnih vodova iz kanala bušotine na površinu (Slika 2-42.).

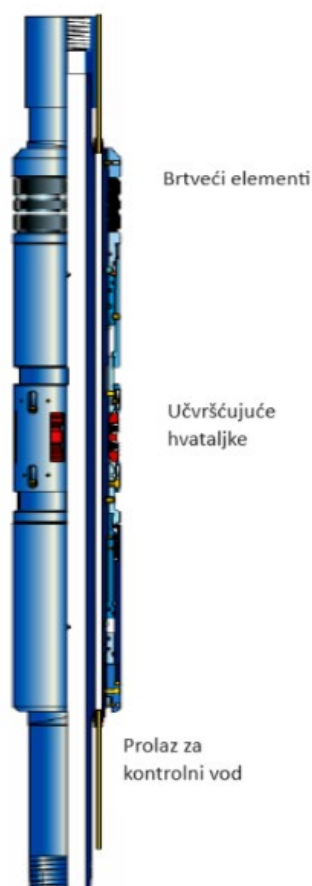


**Slika 2-42.** Prolasci kontrolnih vodova na vješalici tubinga (Ali i Shafiq, 2008)

## 2.2.10. Jedinice zonske izolacije

Izolacija proizvodnih zona igra ključnu ulogu u inteligentno opremljenim bušotinama. Glavne funkcije uređaja za izolaciju su podijeliti bušotinu na više zona (izolirati bušotinske fluide i tlakove) i omogućiti prolaz električnih, hidrauličnih ili optičkih kabela.

Ovi pakeri moraju osigurati fleksibilnost za postavljanja električnih uronjenih pumpi (engl. *Electric Submersible Pump - ESP*), kontrolnih vodova, inteligentnih sustava za nadzor bušotine i druge opreme ispod pakera bez gubitka integriteta brtvljenja. Parker se sastoji od jednog ili više brtvećih elastomernih elemenata kako bi se stvorile točke izolacije unutar kanala bušotine te mora omogućiti prolaz za kontrolne vodove (Slika 2-43.). Robusnost bubrećih pakera i odsutnost bilo kakvih hidrauličkih ili mehaničkih dijelova čine ga najboljom opcijom. U procesu rada, paker se ugrađuje zajedno s kontrolnim vodovima u bušotinu.



**Slika 2-43.** Paker s prolazom za kontrolne vodove (Ali i Shafiq, 2008)



### 2.2.11. Površinski kontrolni sustav

Inteligentni površinski kontrolni sustav bušotine (engl. *Surface Control System - SCS*) proširenje je arhitekture sustava upravljanja inteligentno opremljenom bušotinom. Omogućuje automatizaciju i optimizaciju rada opreme u bušotini kako bi se postiglo napredno upravljanje bušotinom. Hidraulički, električni ili optički vodovi koriste se za osiguranje povezanosti između uređaja u bušotini i SCS-a. Tehnologija inteligentno opremljene bušotine omogućuje kontrolu procesa proizvodnje ugljikovodika ili utiskivanja fluida u ležište. Kod opisivanja ovog dijela sustava kontrole potrebno je razlikovati tri elementa: izlazi procesa, kontrolirana varijabla i nezavisna varijabla (Mathieson et al., 2006). Izlazi procesa su parametri koji opisuju stanje sustava i koji su stalno praćeni mjernim pretvornicima ugrađenim u bušotinu (promatranje procesa). Kontrolirana varijabla je parametar preko koje su kontrolirani izlazi procesa (tlak u pojedinoj zoni, protok, udio vode i sl.), a nezavisna varijabla je parametar sustava kojim kontroliramo proces (pozicija ventila, stanje ventila ili bilo koja druga kontrolna veličina koja utječe na tijek ili karakteristike procesa). Veza između kontrolirane i manipulirane varijable je definirana algoritmom (podržan ulaznim podacima koji definiraju i kalibriraju kontrolirani model u nekom rasponu) i primijenjene kontrolne strategije sustava.

#### 2.2.11.1. Klasifikacija površinskog kontrolnog sustava

##### a) Izravni hidraulički sustav

Sustav je baziran na tome da su uređaji u bušotini izravno povezani s hidrauličkim sustavom na površini preko fluida. Broj kontrolnih vodova mora odgovarati broju dubinskih uređaja kojima se upravlja hidraulički. Pozicioniranje ventila ovisi o dubinskim mehaničkim uređajima ili o površinskoj opremi.

##### b) Višestruki hidraulički sustav

Za razliku od prethodnog sustava, smanjeni broj kontrolnih linija dijeli se među nekoliko aktuatora na dnu bušotine pružajući vezu između svakog uređaja u bušotini i hidrauličkog sustava na površini. U ovom sustavu broj kontrolnih vodova manji je od broja uređaja u bušotini.

#### c) Integrirano upravljanje i praćenje protoka

Uređaji za upravljanje protokom i mjerni pretvornici su integrirani u istu infrastrukturu za napajanje i komunikaciju, omogućujući selektivan rad jednog ili više uređaja putem dostupne pogonske snage. Pozicioniranje ventila obično je vrlo precizno i postiže se pomoću kontrolnog kruga implementiranog unutar elektronike na dnu bušotine.

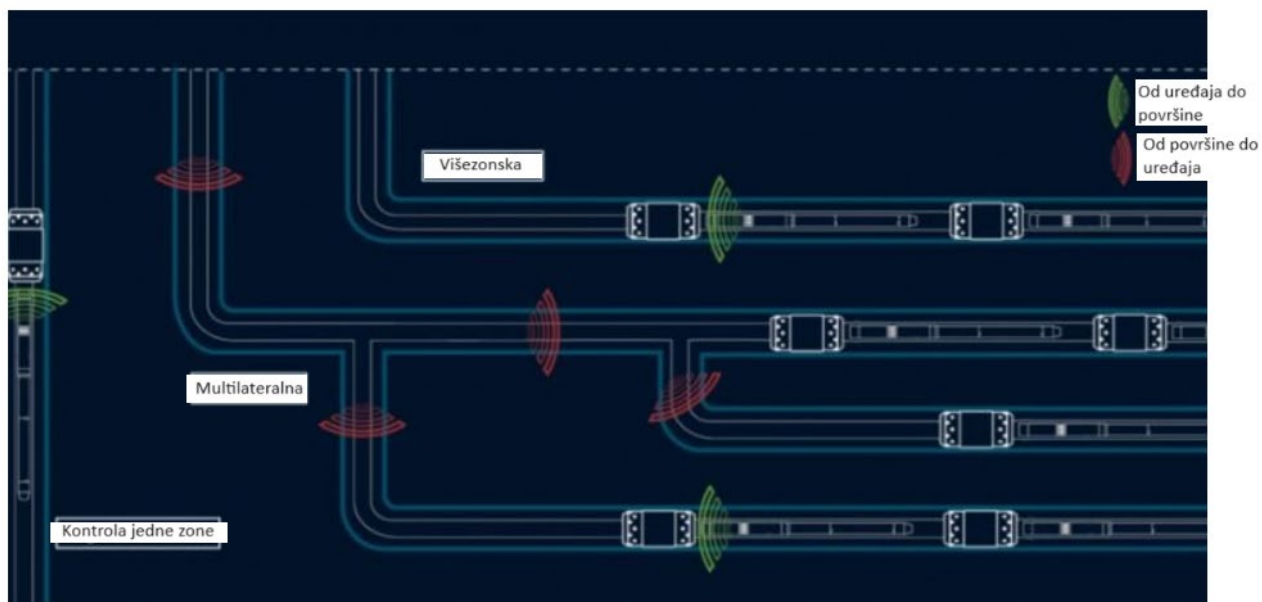
#### d) Praćenje na dnu bušotine

Ovaj sustav se obično koristi zajedno s nadzemnim mjernim sustavom kako bi se dobila povratna informacija o procesima proizvodnji ili utiskivanju fluida u bušotinu nakon prilagodbe bilo koje od manipuliranih varijabli. Trajni mjerni pretvornici na dnu bušotine temelje se na električnim ili optičkim sustavima.

### 2.2.12. Bežična tehnologija

S porastom broja uređaja za praćenje i kontrolu na dnu bušotine i zbog potrebe za poboljšanjem iscrpka fluida iz ležišta i maksimalizaciju proizvodnje slojnog fluida, tvrtka Tendeka razvila je tehnologiju bežičnog inteligentnog opremanja bušotine. Sustav PulseEight tvrtke Tendeka koristi jedinstvenu telemetriju tlaka kako bi omogućio bežičnu komunikaciju između sustava praćenja i kontrole na dnu bušotine i ušća bušotine. Prvo je u bušotini instalirano nekoliko bežičnih mjerača tlaka/temperature kako bi se osigurala komunikacija dubinske opreme s bušotinskom glavom. Za iskorištavanje punog potencijala sustava i omogućavanje veće kontrole, tvrtka Tendeka krenula je u projekt razvoja dvosmjerne komunikacije putem ventilskog sustava PulseEight ICV (Slika 2-44.). Bilo je potrebno slati podatke o tlaku/temperaturi prema površini, dok su impulsi tlaka slani niz bušotinu kako bi komunicirali s ICV-om u kanalu bušotine. Proizvodnja bušotine privremeno se ograničava kako bi se stvorio impuls tlaka, koji je detektiran na manometru na površini (Naldrett i Asen, 2012). Ovaj sustav koristi energiju bušotine za prijenos podataka na površinu i ne zahtijeva dodatne instalacije na površini jer se postojeći manometar na bušotinskoj glavi može koristiti za detekciju niza impulsa. PulseEight tehnologija pojednostavljuje operacije uklanjanjem potrebe za tradicionalnim hidrauličnim ili električnim kontrolnim vodovima. Veze na dnu bušotine su eliminirane, što značajno smanjuje ukupne troškove sustava i poboljšava sigurnost bušotine te smanjuje utjecaj na zdravlje i okoliš (engl. *Health, Safety, and Environment - HSE*). Ovaj uređaj može se ugraditi tijekom faze opremanja bušotine ili naknadno u postojeće bušotine kako bi se maksimizirala

proizvodnja. Svaki uređaj funkcioniira neovisno pružajući modularnu fleksibilnost kako bi zadovoljio različite zahtjeve, od praćenja jedne zone do proizvodnje iz više zona ili multilateralnih kanala bušotine. Kontrola sustava obavlja se pomoću integriranog softvera u kontrolnoj sobi.



Slika 2-44. PulseEight Sustav tvrtke Tendeka (Rogtec, 2017)

### **2.3. Modeliranje inteligentnog opremanja bušotine**

Glavna ideja je definirati PVT uvjete u ležištu (tlak, volumen i temperatura ležišnog fluida), stanje ležišta kao i broj potrebnih uređaja za uspješnu kontrolu protoka. Više softvera koristi se za modeliranje performansi protoka iz ležišta u bušotinu kako bi se optimizirali svi aspekti dizajna opremanja bušotine. Tijekom posljednjeg desetljeća, nekoliko tvrtki uvelo je mogućnost modeliranja ICV/ICD u svojem softveru. Primjeri uključuju softvere Prosper (Petroleum Experts) i PIPESIM (Schlumberger). Cilj je stvoriti matematičke modele koji precizno opisuju ponašanje svih komponenata sustava te omogućuju simulaciju različitih operativnih scenarija.

Za procjenu vrijednosti korištenja sustava za inteligentno opremanje bušotina, modeliraju se scenariji s konvencionalnim opremanjima i onima temeljenima na upravljanju protokom u softverima za simulaciju ležišta. Takva simulacija omogućuje predviđanje budućeg ponašanja ležišta u stvarnim uvjetima pomoću numeričkih metoda. Kao primjer, Schlumbergeov softver Eclipse simulaciju može koristiti za procjenu učinkovitosti konfiguracije ventila za regulaciju protoka slojnog fluida. Koristi se za modificiranje parametara opremanja ležišta i predviđanje promjena u proizvodnji iz određenog ležišta.

### **3. PRIMJENA TEHNOLOGIJE INTELIGENTNOG OPREMANJA BUŠOTINA**

#### **3.1. Strategije inteligentnog opremanja bušotina**

Bušotina opremljena inteligentnim uređajima smatra se “inteligentnom“ samo kada pridonosi optimizaciji i maksimiziranju proizvodnje slojnog fluida iz ležišta. Učinkovitost inteligentnog opremanja bušotine povezana je uglavnom s tri ključna elementa: regulacija protoka, praćenje protoka i optimizacija protoka. Regulacija protoka je mogućnost podjele bušotine na pojedinačne kanale/intervale i regulacije protoka bez potrebe za izravnom intervencijom pomoću ICV-a/ICD-a. Praćenje protoka je mogućnost pružanja podataka u stvarnom vremenu o ključnim parametrima ležišta (temperaturi, tlaku, brzini protoka, sastavu slojnog fluida itd.) s frekvencijama prikladnim za modeliranje i razumijevanje ponašanja bušotine i ležišta. Optimizacija protoka je sposobnost kombiniranja prikupljenih podataka o ležištu s prikupljenim i procesnim podacima o proizvodnji te analiziranje tih podataka kako bi se generirale informacije o ponašanju ležišta, donosile odluke o modificiranju arhitekture opremanja bušotine pomoću ICV-ova i mijenjale postavke uređaja za regulaciju protoka na pravovremen način (Rahimi i Tahami, 2010).

Dodatna vrijednost inteligentnih uređaja za opremanje bušotine ovisi o odabranoj strategiji optimizacije. Koriste se dvije glavne vrste strategija optimizacije za regulaciju protoka u inteligentno opremljenim bušotinama. Svaka od niže navedenih strategija ima pozitivnih i negativnih strana.

##### **3.1.1. Reaktivna strategija – „Closed-loop“ strategija**

U reaktivnoj strategiji, djelovanje ventila za regulaciju protoka provodi se kao odgovor na trenutna i/ili povijesna mjerenja i podatke proizvodnje pomoću rutinske optimizacije ili pravila koja su već poznata u svrhu poboljšanja trenutnih performansi proizvodnje. Naprimjer, ako dođe do povećanja proizvodnje vode u određenoj zoni ležišta, reagira se prigušivanjem ventila za protok u toj zoni te poticanjem proizvodnje iz drugih zona. Ova strategija temelji se na analizi trenutnih uvjeta i povijesnih podataka, kako bi se donijele odluke o trenutnom poboljšanju performansi bušotine. Prilagodbe se često vrše putem upravljanja protokom pomoću ICV-a kako bi se optimizirala proizvodnja. Ključna prednost reaktivne strategije je sposobnost brze prilagodbe na trenutne uvjete i promjene u proizvodnji. Međutim, nedostatak može biti ograničena mogućnost dugoročnog planiranja i predviđanja, budući da se odluke temelje na trenutnim situacijama i povijesnim podacima.

U suštini, reaktivna strategija je usmjerena na trenutno optimiziranje proizvodnje temeljem trenutnih potreba i uvjeta u bušotini, pružajući fleksibilnost u rješavanju iznenadnih promjena.

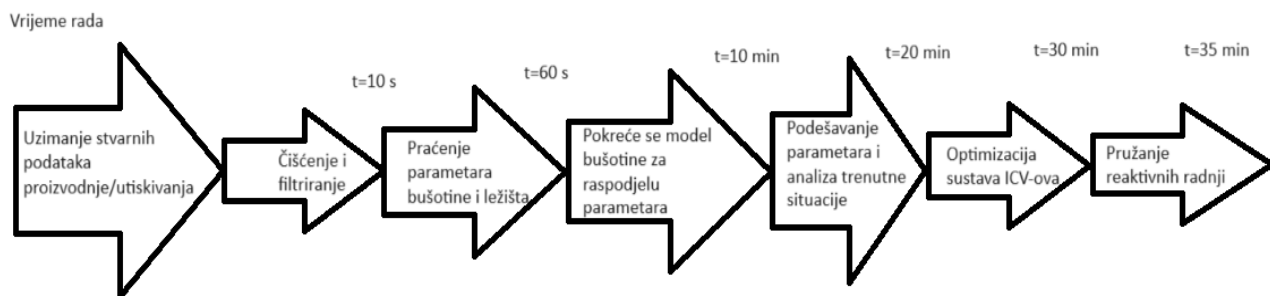
### 3.1.2. Proaktivna strategija - „Open-loop“ strategija

Proaktivna strategija koristi modele kako bi omogućila predviđanje ponašanja ležišta tijekom određenog vremenskog razdoblja. Ova strategija se primjenjuje kako bi se spriječili budući problemi. Djelovanje ventila za reguliranje protoka provodi se s obzirom na prognozu koja se temelji na dostupnim informacijama. Proaktivni sustav je automatiziran i prati unaprijed postavljen skup pravila. Na temelju predviđanja, ICV se prilagođava kako bi se spriječili potencijalni problemi prije nego što se pojave. Ova strategija omogućuje smanjenje rizika i dugoročnu optimizaciju performansi bušotine. Prednost proaktivne strategije leži u mogućnosti anticipiranja i prevencije problema prije nego što oni utječu na proizvodnju, čime se smanjuje potreba za reaktivnim intervencijama. Međutim, jedan od izazova proaktivne strategije može biti točnost modela u predviđanju ponašanja ležišta i proizvodnje, budući da se temelje na pretpostavkama i podacima dostupnim u trenutku prognoze. U konačnici, proaktivna strategija teži unaprijed planirati i optimizirati proizvodnju, čime se povećava efikasnost i smanjuje potreba za hitnim intervencijama u bušotini.

### 3.1.3. Radni tok kontrole bušotine

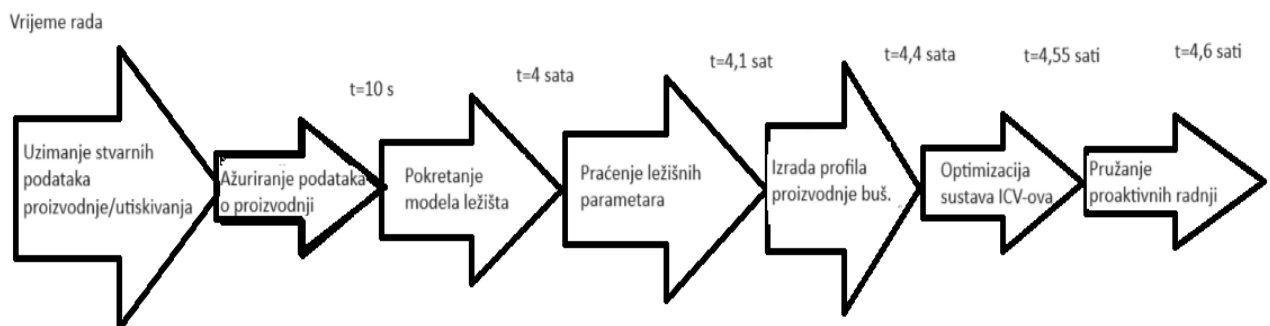
Predložen je radni tok nazvan „Pametni protok za pametne bušotine“ (engl. *Smart Flow for Smart Wells - SWSF*) kako bi se razvila automatizirana radna metoda za praćenje, analizu i optimizaciju procesa prodora vode u bušotinu pomoću inteligentnog opremanja (Carvajal et al., 2014).

Reaktivni radni tok (Slika 3-1.): Podaci se prikupljaju tijekom prethodna 24 sata i pretvaraju u dnevne prosječne podatke. Model za simulaciju rada bušotine se ažurira i pokreće unosom poznatih parametara ležišta. Sustav zatim pruža raspodjelu parametara protoka u bušotini za posljednjih 24 sata i uspoređuje rezultate s trenutnim podacima. Nakon usklađivanja, parametri se prenose u drugu petlju kako bi se optimizirala i odabrala najbolja kombinacija postavki ICV-ova.



**Slika 3-1.** SWSF za reaktivnu strategiju (Carvajal et al., 2014)

Proaktivni radni tok (Slika 3-2.): Sustav bilježi podatke o proizvodnji/utiskivanja svakih 30 dana, ažuriraju i ponovno se simulira ponašanje ležišta koristeći više od 200 scenarija, procjenjuju se parametri ležišta, optimizira postavke pozicije ICV-ova, uspoređuju rezultati iz reaktivnog načina i pružaju reaktivne akcije.



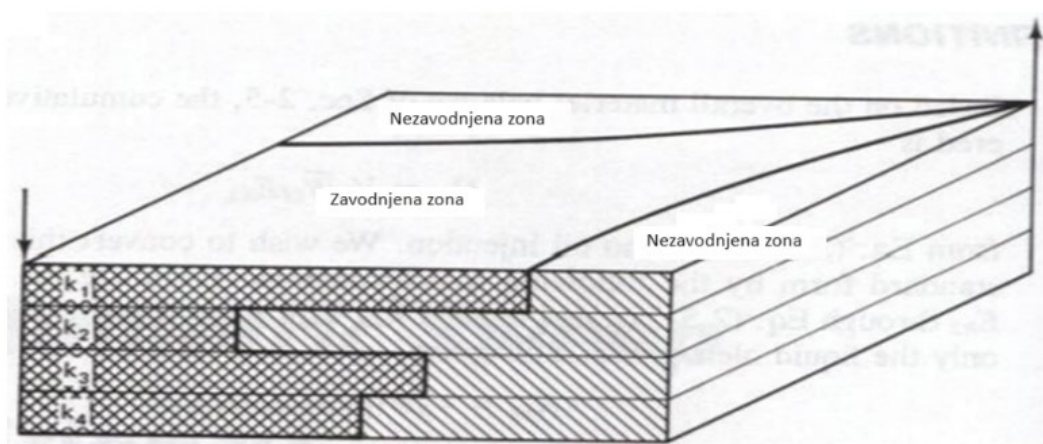
**Slika 3-2.** SWSF za proaktivnu strategiju (Carvajal et al., 2014)

### 3.2. Povećanje iscrpka fluida iz ležišta utiskivanjem vode, kontrola pijeska i prodora vode i plina u inteligentno opremljenim bušotinama

#### 3.2.1. Povećanje iscrpka fluida iz ležišta utiskivanjem vode

Utiskivanje vode je uobičajena sekundarna metoda za održavanje ležišnog tlaka uz istovremeno pomicanje nafte prema proizvodnim bušotinama. Zone visoke propusnosti mogu značajno utjecati na ovaj postupak jer prirodne frakture u tim zonama omogućavaju brzi proboj vode, što dovodi do prijevremenog opadanja proizvodnje, odnosno povećanja udjela vode u pridobivenom fluidu. Utisne bušotine razdvajaju se u različite zone (intervale) pomoću pakera, pri čemu svaki segment ima vlastite uređaje za kontrolu. To može pomoći u rješavanju problema neravnomjernog pomicanja vodene fronte.

Na modelu prikazanom na Slici 3-3, prvi sloj već je zavodnjen vodom, dok drugi slojevi još uvijek nisu. Veći udio vode u pridobivenom fluidu može biti uzrokovan zavodnjenjem gornjeg sloja, što može dovesti do brzog dosezanja maksimalnog dozvoljenog udjela vode i dovesti u pitanje daljnju isplativost proizvodnje.



Slika 3-3. Zavodnjene zone ležišta (Meshioye et al., 2010)

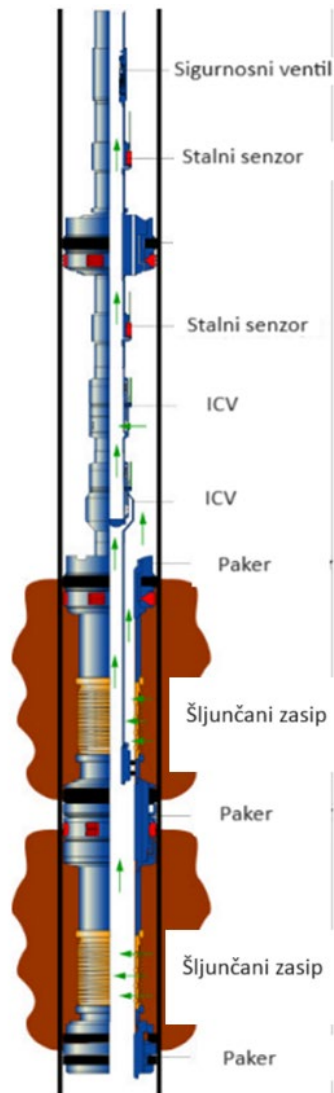
Rješenje za taj problem je prestati s utiskivanjem vode u prvi sloj i povećati utiskivanje vode u drugi sloj regulacijom protoka preko ICV-ova. To će odmah smanjiti udio vode u pridobivenom slojnom fluidu i poboljšati pomicanje nafte prema proizvodnim bušotinama. Identifikaciju zona u koju će se utiskivati više vode omogućuju ventili za regulaciju protoka.



### 3.2.2. Kontrola pijeska

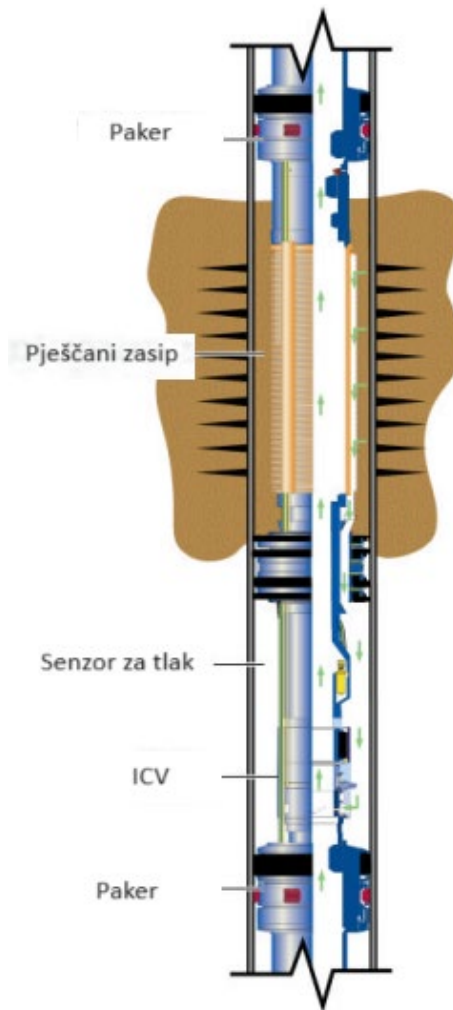
Kretanje pijesaka iz formacije moguće je u slučaju nekonsolidiranih formacija, formacijama male čvrstoće uz malo ili nimalo vezivog materijala među zrnima, ali isto tako i iz formacija značajne čvrstoće i s vezivom među zrnima. U oba slučaja proizvodnja pijesaka iz formacije može započeti odmah ili se ostvariti kasnije tijekom radnog vijeka bušotine. Dolazi do smanjene proizvodnje zbog stvaranja taloga čestica pijeska unutar zaštitnih cijevi, tubinga i/ili u ostalim dijelovima proizvodnog sustava što predstavlja značajan tehnički i financijski problem. Metode kontrole dotoka pijeska mogu se podijeliti na mehaničke (filtri i zasipi) i kemijske. Upotreba ventila ili uređaja za regulaciju protoka može značajno doprinijeti kontroli i prevenciji proizvodnje pijeska unutar bušotine. Korištenjem sustava praćenja za određivanje parametara utoka slojnog fluida i kontrolnog sustava za ograničavanje protoka fluida u bušotinu, protok može biti održavan ispod kritičnih brzina koje bi inače oštetile formaciju stijene, što je važno za održavanje stabilnosti kanala bušotine. Proizvodnja pijeska zbog višefaznog protoka i vodenog otapanja prirodnog cementnog veziva između zrna može biti smanjena, a zone s tendencijom proizvodnje vode također se mogu suziti ili zatvoriti.

Jedno rješenje za kontrolu dotoka pijeska u dvije zone je rješenje s tubingom. Kao što je prikazano na Slici 3-4, dvije zone su izolirane jedna od druge pakerom, a svaka zona je zasebno opremljena pješčanim (šljunčanim) zasipom. Protok je razdvojen po zonama, odnosno donje zone proizvode se kroz tubing, a iz gornje zone kroz prstenasti prostor između zaštitne cijevi i tubinga. Ako se opremaju više od dvije zone, zone se moraju grupirati, a fluidi iz njih miješati prije prolaska kroz regulacijske ventile (Bixenman, et al., 2001). Kompletni sustavi s tri ili četiri zasebne zone za kontrolu pijeska mogu se postići integracijom ventila za regulaciju protoka i stalnih mjernih pretvornika u proizvodnoj zoni. Integracija uređaja za regulaciju protoka s postavljanjem pješčanog (šljunčanog) zasipa ključna je za učinkovito upravljanje pijeskom. Prstenasti prostor između proizvodnog niza i zaštitne cijevi obično se koristi za usmjeravanje proizvodnje, ali u ovom dizajnu nije dostupan zbog potrebe za omogućavanjem protoka kroz pješčani zasip. U ovom dizajnu, umjesto prstenastog prostora, proizvodnja se usmjerava prema uređaju za regulaciju protoka, a to omogućuje regulaciju protoka i istovremeno dopušta protok kroz pješčani zasip.



**Slika 3-4.** Kontrola pijeska u inteligentno opremljenoj bušotini (Bixenman, et al., 2001)

Dizajn inteligentnog opremanja u bušotini sa zaštitnim cijevima omogućava da proizvodni fluid prolazi kroz prostor između pješčanog zasipa i zaštitne cijevi do donjeg kraja proizvodne zone. Paker odvaja pješčani zasip i uređaj za regulaciju protoka s otvorom za protok fluida iz zone prekrivene zasipom. Paker djeluje kao prepreka za čestice, odnosno sprječava da propant iz šljunčanog zasipa uđe u zonu s opremom za kontrolu pijeska. Prostor između pakera i donjeg izolacijskog pakera stvara prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i uređaja za regulaciju protoka. To omogućava upotrebu uređaja za regulaciju protoka koji su tipični za opremanje zacijevljenih i perforiranih bušotina bez problema s dotokom pijeska. Dijagram ovako opremljenog proizvodnog intervala prikazan je na Slici 3-5.



**Slika 3-5.** Kontrola pijeska u zacijevljenom kanalu inteligentno opremljene bušotine (Bixenman, et al., 2001)

### 3.2.3. Kontrola konusiranja plina

Konusiranje je definirano kao proizvodni problem u kojem plin iz plinske kape smanjuje proizvodnju nafte infiltriranjem u zonu perforacija. Ovaj fenomen ovisi o brzini protoka slojnog fluida kroz ležište te je obično povezan s visokim intenzitetima proizvodnje. U određenom trenutku tijekom proizvodnje, kontakt plina i nafte dosegnut će perforacije, što će rezultirati probojem plina i dominacijom plinske faze u proizvodnji iz bušotine. Maksimalna proizvodnja pri kojoj neće doći do proboja plina definira se kao kritična proizvodnja, no ponekad proizvodnja ispod te kritične vrijednosti nije ekonomski isplativa.

Glavni cilj tehnologije inteligentnog opremanja bušotina je zadržati plin u ležištu što je duže moguće. Strategija za kontrolu problema konusiranja plina je razvoj povratne regulacije

koja će kontinuirano mijenjati protok kroz regulacijske ventile unutar bušotine ili regulator protoka na bušotinskoj glavi kako bi održala udio plina u bušotini ispod određene razine. Time se sprječava oštećenje opreme na površini i optimizira proizvodnja uzimajući u obzir učinke prirodnog plinskog dizanja i regulacije protoka proizvodnje (Leemhuis et al., 2007). Optimizacija proizvodnje postiže se preko povećanja ili smanjenja proizvodnje zbog promjene gustoće smjese te promjenom proizvodnje zbog regulacije ventila na dnu bušotine ili ventila u bušotinskoj glavi kako bi se postigao određeni udio plina u pridobivenom fluidu. Modeliranje proizvodnje nafte (uzimajući u obzir kontrolu protoka na dnu bušotine putem ICV-ova i/ili na bušotinskoj glavi) provodi se kako bi se odredila optimalni udio plina u proizvedenom slojnom fluidu.

Usporedbom učinkovitosti kontrole ICV-ova s kontrolom na bušotinskoj glavi utvrđeno je da ICV-ovi predstavljaju učinkovitiju strategiju od regulatora protoka na bušotinskoj glavi, jer rezultati zonske optimizacije uvijek daju veću proizvodnju, posebno u dugim horizontalnim bušotinama koje su karakterizirane zonskim razlikama u konusiranju plina.

#### 3.2.4. Kontrola proizvodnje vode

Kontrola prekomjerne proizvodnje vode postaje izazov u današnje vrijeme, te se implementiraju brojne strategije za upravljanje proizvodnje slojne vode kako bi se smanjila količina proizvedene vode i istovremeno maksimizirala produktivnost bušotine.

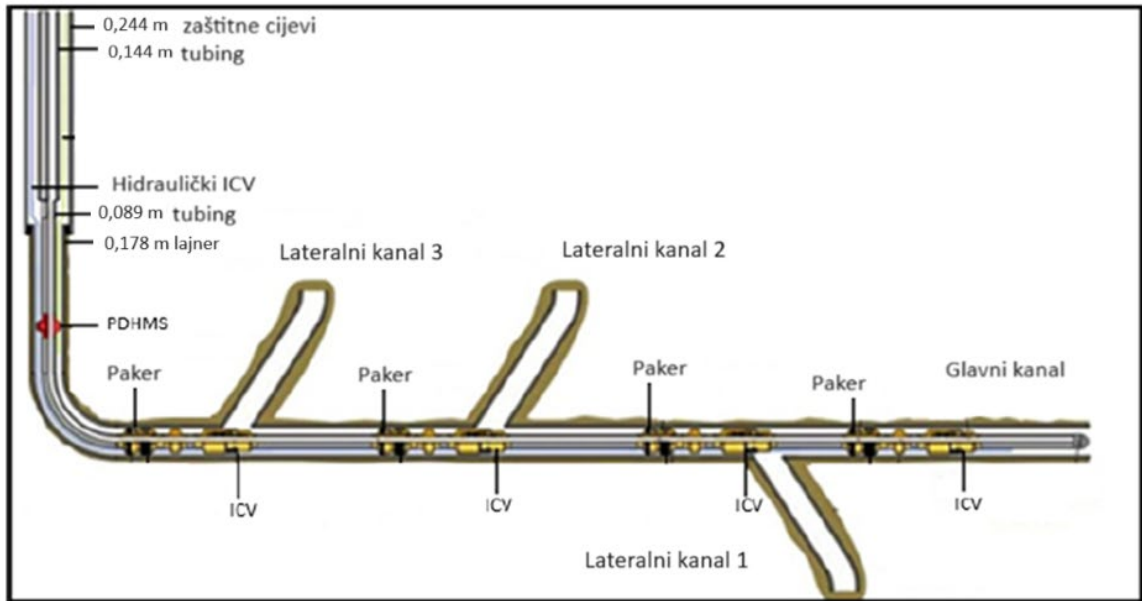
Tehnologija inteligentno opremljenih bušotina postala je jedna od najboljih metoda za kontrolu proizvodnje vode, posebno u bušotinama s više od jednog lateralnog kanala (Rahimi i Tahami, 2010)

##### 3.2.4.1. *Primjer iz prakse (Saudi Aramco, Saudijskoj Arabija)*

Studija slučaja provedena je na inteligentno opremljenoj bušotini tvrtke Saudi Aramco kojom se crpi iz karbonatnog ležišta na istoku Saudijske Arabije. Iz ležišta se proizvodni fluid pridobiva vodonapornim režimom, koji podržava tlak u ležištu. Kompanija Saudi Aramco je uspješno koristila horizontalne multilateralne bušotine i bušotine s maksimalnim kontaktom s ležištem kako bi poboljšala i maksimizirala proizvodnja iz ležišta. Bušotina "A" je izbušena i zacijevljena zaštitnim cijevima promjera 0,2127 m i cementiranim lajnerom promjera 0,1778 m unutar željene zone ležišta. Zatim se bušio horizontalni otvoreni glavni kanal bušotine promjera 0,1556 m te lateralni kanali iz zacijevljenog kanala promjera 0,1778

m. Opremanje se izvršilo u jednom manevru, a uključio je centralizer tubinga, ICV-ove, pakere, proizvodne pakere te trajni nadzorni sustav na dnu bušotine (engl. *Permanent Downhole Monitoring System - PDHMS*). Postojali su određeni koraci koje je trebalo slijediti prilikom projektiranja procesa optimizacije inteligentne bušotine. Većina ICV-ova ima 11 stupnjeva, pri čemu nula znači da je ventil potpuno zatvoren, a 10 da je ventil potpuno otvoren. Optimizacija počinje otvaranjem svih lateralnih kanala do potpuno otvorene pozicije i mjerenjem proizvodnje i udjela vode. Zatim započinje testiranje pojedinačnih lateralnih kanala otvaranjem jednog i zatvaranjem drugih. Ovaj postupak se ponavlja za sve lateralne kanale. Osim toga, mogu se izvoditi određene kombinacije testiranjem nekoliko lateralnih kanala istovremeno dok se drugi zatvaraju. Mjereni su i zabilježeni podaci o proizvodnji i tlaku pri protoku za svaki test koji se onda analiziraju kako bi se odredila najučinkovitija kombinacija koja će se koristiti.

Bušotina "A" je projektirana i izrađena kao inteligentno opremljena horizontalna bušotina s tri lateralna kanala (riblja kost) iz tri prozora u lajneru promjera 0,1778 m. Ukupan kontakt s ležištem iznosi 2640 m, glavni kanal 780 m, a lateralni kanali 390, 890 i 580 m. Bušotina je opremljena s četiri hidraulička intervalna ventila za kontrolu protoka, četiri pakera promjera 0,1778 m, jednim kliznim bočnim vratima promjera 0,0889 m i jednim PDHMS-om s cijevi promjera 0,0889 m (Slika 3-6.). Četiri hidraulička ICV-a u bušotini očito čine ovu bušotinu inteligentno opremljenom. Ti ventili pružaju potrebnu regulaciju za gušenje/zatvaranje lateralnih kanala i imaju 11 pozicija, uključujući potpuno otvoreno i potpuno zatvoreno. Oni se hidraulički upravljaju s površine putem kontrolnog voda promjera 6,35 mm. Dodatno, tu su i stalni mjerni pretvornici tlaka/temperature na dnu bušotine koji pružaju stvarne podatke u stvarnom vremenu. Konačno, kako je opremanje otvorenog kanala, zonalna izolacije postiže se pomoću napuhavajućih pakera.



**Slika 3-6.** Inteligentno opremljen otvoreni kanal bušotine u Saudijskoj Arabiji (Al-Khalifa et al., 2013)

Nakon provođenja prvog testiranja lateralnih kanala, bušotina je imala proizvodnju od 380 m<sup>3</sup> po danu s udjelom vode od 21,5%. Cilj testiranja bio je razumjeti proizvodni potencijal i udio vode za svaki lateralni kanal zasebno. Tablica 3-1 sažima rezultate testiranja bušotine.

**Tablica 3-1.** Rezultati prvog testiranja (Al-Khalifa et al., 2013)

| Test | Postavke ICV-a |                |                |                | Proizvodnja<br>(m <sup>3</sup> /dan) | Udio vode<br>(%) | Tlak na dnu<br>bušotine<br>tijekom<br>protoka<br>(bar) |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------|------------------|--|
|      | G.K.           | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |                                      |                  |  |
| 1    | 10             | 10             | 10             | 10             | 380                                  | 21,5             | 200  |
| 2    | 10             | 0              | 0              | 0              | 550                                  | 0,2              | 170  |
| 3    | 0              | 10             | 0              | 0              | 410                                  | 0,1              | 170  |
| 4    | 0              | 0              | 10             | 0              | 380                                  | 25,1             | 180  |
| 5    | 0              | 0              | 0              | 10             | 220                                  | 43,6             | 175  |

Testiranje je pokazalo da su iz lateralnih kanala (L<sub>2</sub> i L<sub>3</sub>) proizvedila veća količina vode. Mjerenja tlaka tijekom protoka pokazala su da nije bilo snažne dominacije protoka od strane bilo kojeg lateralnog kanala. Nakon pregleda rezultata testiranja, nisu poduzete dodatne mjere i bušotina je vraćena u stanje prije testa, sa svim kanalima potpuno otvorenim.

Nakon dvije godine kontinuirane proizvodnje od posljednjeg testa lateralnih kanala, proizvodnja nafte iz bušotine smanjila se na razinu od 270 m<sup>3</sup> po danu, a udio vode povećao se na 58%. Kako bi se potpuno razumjelo ponašanje bušotine, proveden je još jedan test pojedinačnih lateralnih kanala. Cilj testa bio je pratiti promjene u doprinosu lateralnih kanala i optimizirati proizvodnju povećanjem udjela nafte i smanjenjem udjela vode u pridobivenom fluidu. Tablica 3-2 sažima rezultate testiranja.

**Tablica 3-2.** Rezultati drugog testiranja (Al-Khalifa et al., 2013)

| Test | Postavke ICV-a |                |                |                | Stopa proizvodnje<br>m <sup>3</sup> /dan | Udio vode (%) | Površinski otvor<br>sapnice<br>(mm) | Tlak na dnu<br>bušotine<br>tijekom<br>protoka (bar) |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|---------------|-------------------------------------|---|
|      | G.K            | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |  |               |                                     |   |
| 1    | 10             | 10             | 10             | 10             | 270                                      | 58            | 17,066                              | 193   |
| 2    | 10             | 10             | 10             | 10             | 795                                      | 50            | 50,8                                | 186   |
| 3    | 10             | 0              | 0              | 0              | 400                                      | 65            | 50,8                                | 187   |
| 4    | 3              | 0              | 0              | 0              | 350                                      | 54            | 50,8                                | 180   |
| 5    | 0              | 10             | 0              | 0              | 875                                      | 0,9           | 50,8                                | 131   |
| 6    | 0              | 1              | 0              | 0              | 320                                      | 1,6           | 50,8                                | 118   |
| 7    | 0              | 0              | 10             | 0              | 1303                                     | 31            | 50,8                                | 179   |
| 8    | 0              | 0              | 6              | 0              | 1050                                     | 32            | 50,8                                | 173   |
| 9    | 0              | 0              | 3              | 0              | 875                                      | 30            | 50,8                                | 171   |
| 10   | 0              | 0              | 0              | 10             | 1225                                     | 7,6           | 50,8                                | 137   |
| 11   | 0              | 0              | 0              | 6              | 825                                      | 11            | 50,8                                | 134   |
| 12   | 0              | 10             | 0              | 10             | 1255                                     | 14,5          | 50,8                                | 152   |
| 13   | 0              | 10             | 0              | 10             | 635                                      | 16            | 17,066                              | 164   |

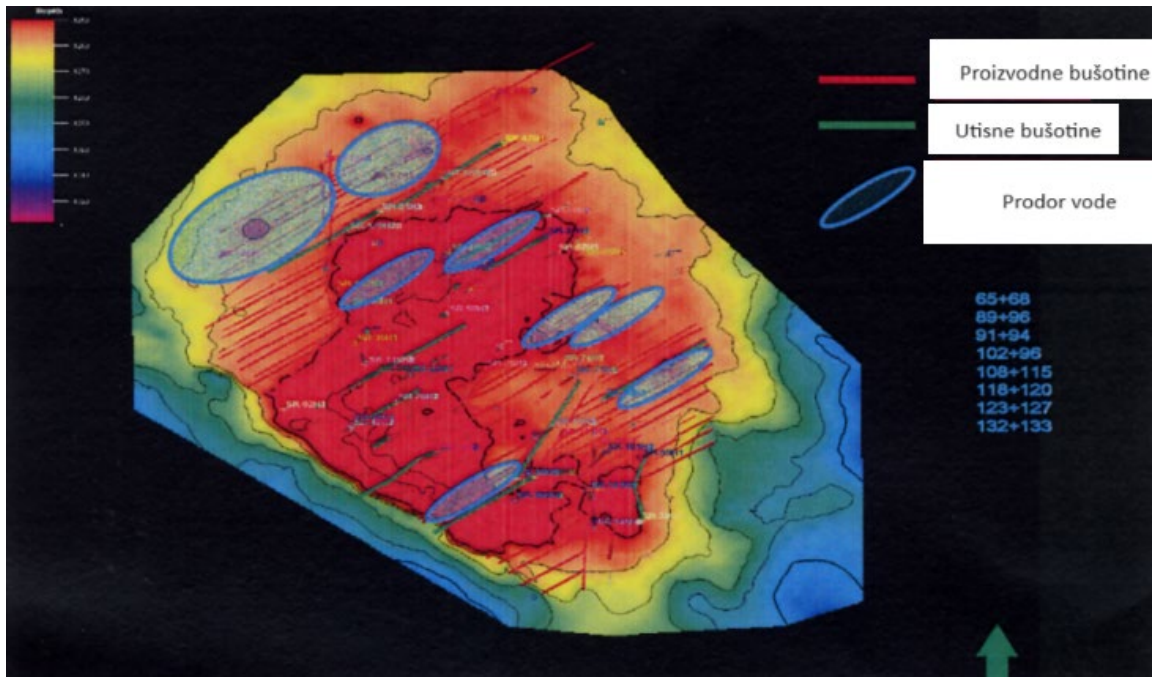
Drugi test pokazao je različito ponašanje bušotine u usporedbi s prethodnim. Glavni kanal davao je najveću količinu vode (65% udjela vode u pridobivenom fluidu). Udio vode u L<sub>3</sub> smanjio se s 43% na 7,6%. Preostali lateralni kanali (L<sub>1</sub> i L<sub>2</sub>) imali su sličan udio vode kao u prethodnom testu. Jednak doprinos protoka iz lateralnih kanala promijenio se u drugom testu. Pokazalo se da glavni kanal i L<sub>2</sub> dominiraju udjelom vode u odnosu na L<sub>1</sub> i L<sub>3</sub>.

Nove bušotine koje su uvedene u proizvodnju nakon prvog pojedinačnog testa lateralnih cijevi mogle su promijeniti putanje toka vode, što je utjecalo na pojedinačne performanse lateralnih kanala. Nakon pregleda rezultata testiranja, odlučeno je zatvoriti lateralne kanale s visokim udjelom vode (glavni kanal i L<sub>2</sub>) i potpuno otvoriti preostale lateralne kanale. L<sub>1</sub> i L<sub>3</sub> imaju sličan tlak na dnu bušotine tijekom protoka, pa neće biti problema s dominacijom protoka kada su oba kanala potpuno otvoreni. Rezultati testa nakon intervencije pokazali su povećanje proizvodnje nafte s 270 m<sup>3</sup> po danu na 635 m<sup>3</sup> uz smanjenje udjela vode s 58% na 16%. Rezultati pokazuju da se dugoročna poboljšanja mogu postići i održati primjenom inteligentnog opremanja bušotina.

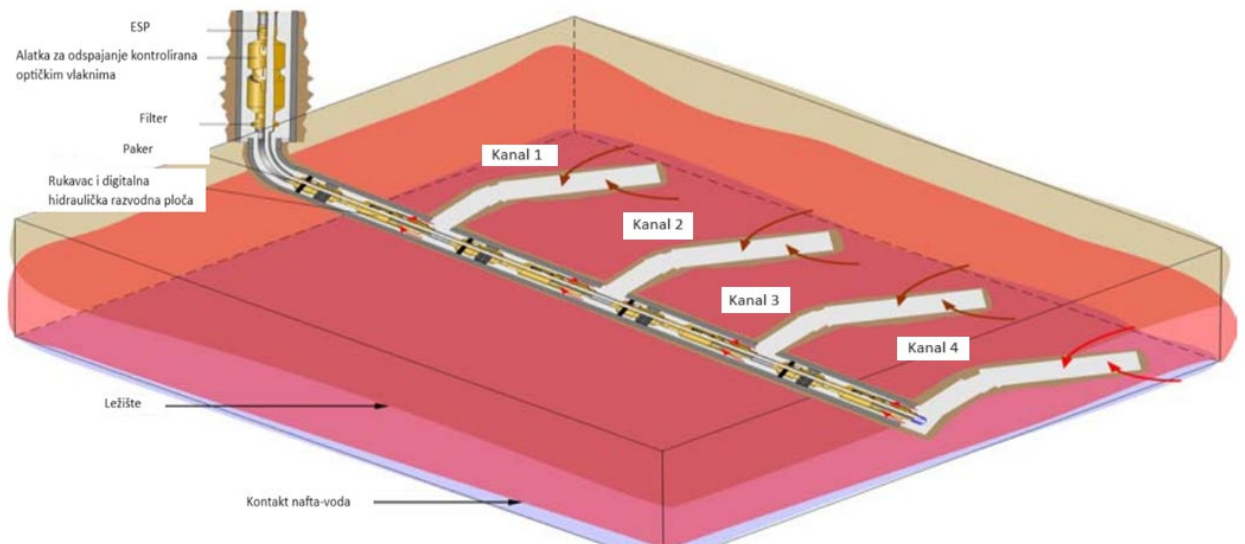
#### *3.2.4.2. Primjer iz prakse (polje Shuaiba, Oman)*

Shuaiba je eksploatacijsko polje koje uključuje multilateralne proizvodne i utisne bušotine. Bušotina "X" se nalazi u središnjem dijelu polja (Slika 3-7.) završena je u siječnju 1999. godine i u početku bušotina je proizvodila 1500 m<sup>3</sup>/d slojnog fluida s niskim udjelom vode. Neto proizvodnja je počela opadati, a udio vode počeo je rasti, dosežući udio veći od 95% vode u pridobivenom slojnom fluidu. Godine 2001., bušotina je zatvorena zbog visokog udjela vode. U srpnju 2002., u bušotini je proveden remont, te je inteligentno opremljena dodavanjem regulacijskih ventila za protok (Slika 3-8.).





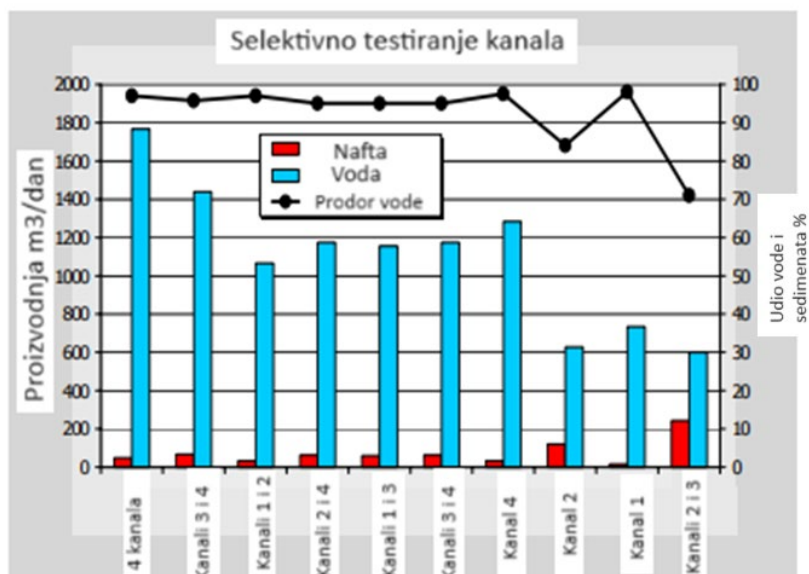
Slika 3-7. Polje Shuaiba, Oman (Al-Khodhori, 2003)



Slika 3-8. Inteligentno opremljena bušotina "X" (Al-Khodhori, 2003)

Proizvodnja je započela u bušotini na nekoliko dana (radi čišćenja), a nakon toga testirana su sva četiri lateralna kanala. Svi su kanali testirani manipulacijom regulacijskih ventila

(Slika 3-9.). Utvrđeno je da većina proizvodnje nafte dolazi iz kanala 2 i 3, dok kanali 1 i 4 proizvode visoku količinu vode. Odlučeno je staviti bušotinu u pogon s otvorenim kanalima 2 i 3, što je rezultiralo proizvodnjom nafte većom od 150 m<sup>3</sup>/dan.



Slika 3-9. Selektivno testiranje kanala (Al-Khodhori, 2003)

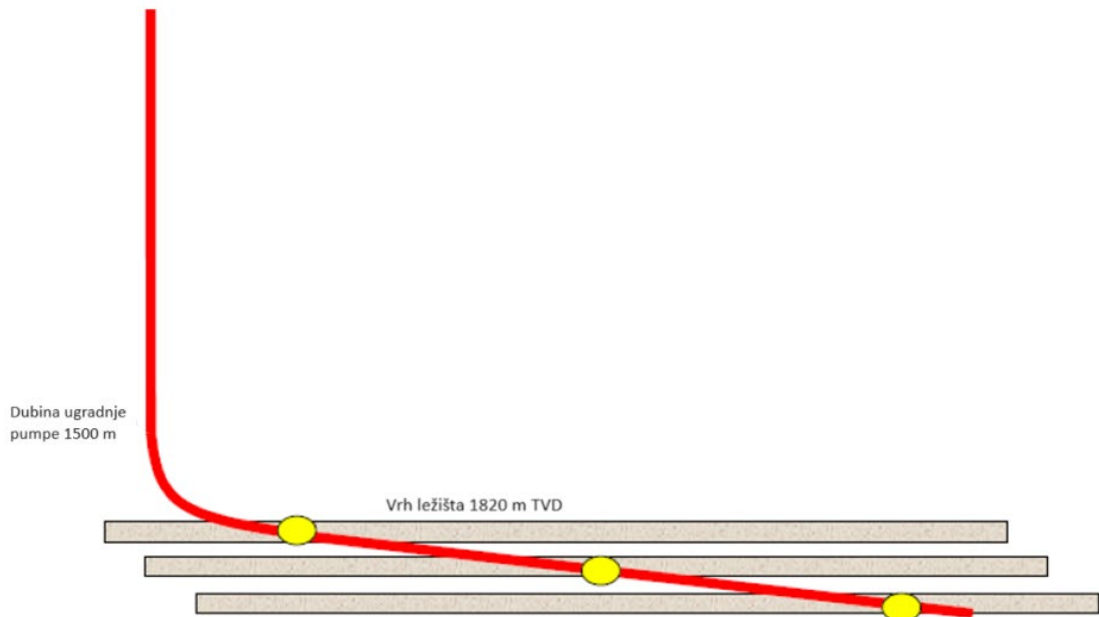
### 3.3. Poboljšanje performansi bušotine korištenjem električne uronjive pumpe u kombinaciji s inteligentnim opremanjem

Uređaji za inteligentno opremanje bušotine mogu predstavljati nadopunjujuću tehnologiju koja doprinosi učinkovitosti rada električne uronjive pumpe (engl. *Electrical Submersible Pump - ESP*). Vrijednost ove kombinacije proizlazi iz mogućnosti regulacije proizvodnje iz određenih zona u kojima je uočen proboj vode ili plina.

Jedan od izazova prilikom kombiniranja inteligentnog opremanja s ESP-om je upravljanje kontrolnim vodovima u bušotini jer raspoloživi prostor između proizvodnog niza i zaštitnih cijevi mora biti podijeljen između kontrolnih vodova uređaja u bušotini i kabela ESP-a (Ali i Shafiq, 2008). Rješenje za to je korištenje sustava s više priključaka koji se sastoji od dijeljenja kontrolnih linija između dva ili više uređaja i upotrebe jednog kabela za ESP i uređaja za opremanje, za prijenos podataka i napajanje.

### 3.3.1. Primjer u praksi

U konkretnom primjeru horizontalna bušotina prodire kroz višeslojno ležište s tri izolirana sloja. Najgornji sloj je na dubini od 1830 metara stvarne uspravne dubine (TVD). Svaki sloj daje jednaku količinu fluida, ali s različitim postotkom vode: 2% za gornji sloj, 12% za srednji i 30% za donji (Slika 3-10.).



**Slika 3-10.** Proizvodnja pomoću horizontalne bušotine iz tri zone ležišta (Konopczynski et al., 2002)

Bez ESP-a, bruto proizvodnja iznosi  $510 \text{ m}^3/\text{d}$  s udjelom vode od 15,3%. Kada se instalira ESP (35 stupnjeva, 180 KS i dodatno smanjenje tlaka od 70 bara), proizvodnja se povećava na  $1200 \text{ m}^3/\text{d}$  s udjelom vode od 14,5%. Pretpostavlja se da do proboja vode dolazi u najnižoj zoni. S vremenom bruto proizvodnja iznosi  $1150 \text{ m}^3/\text{d}$ , s postotkom vode od 33,7%. Neto stopa proizvodnje nafte je  $750 \text{ m}^3/\text{d}$ . Implementacijom inteligentnog opremanja s mogućnošću zatvaranja najniže zone putem uređaja za regulaciju protoka, bruto proizvodnja se smanjuje na  $930 \text{ m}^3/\text{d}$  uz udio vode od 7,4%, ali s neto proizvodnjom nafte od  $860 \text{ m}^3/\text{d}$  (povećanje od  $110 \text{ m}^3/\text{d}$  u usporedbi s prethodnim slučajem). Dodatna korist je eliminacija  $300 \text{ m}^3$  dnevno vode koja se treba obraditi i zbrinuti na odgovarajući način, što predstavlja dodatan trošak.

### 3.4. Rizici i pouzdanost

Potražnja za poboljšanjima i nadogradnjama radi razvoja pouzdanijih inteligentnih sustava za opremanje bušotina kontinuirano potiče nova istraživanja. Istraživači koji se bave ovim istraživanjem uglavnom su usmjereni na fazu dizajna, koristeći tehnike i alate kako bi poboljšali dugovječnost sustava (Naldrett i Ross, 2006).

Neki od uobičajenih rizika u inteligentnim sustavima opremanja bušotina uključuju neuspjeh vezan uz vodove na bušotinskoj glavi i neuspjeh održavanja integriteta bušotine te neuspjeh vezan uz instalaciju kabela/vodova u bušotinu. Dugoročni problemi sustava uključuju eroziju kabela koji su izloženi proizvodnim intervalima i perforacijama, temperaturne učinke na elektroniku, trošenje i kidanje, te kvar pokretnih dijelova. Stoga je potrebno razviti postupke i podržavajući kontrolni softver kako bi se osigurala optimalna uporaba sustava (Lake, 2007). Na temelju pregleda prethodnih iskustava, neki od izazova s kojima se suočavaju sustavi za inteligentno opremanje bušotina su:

- nesigurnost povezana s cijenom nafte i plina predstavlja izazov za planiranje financijskih aspekata projekta inteligentnog opremanja bušotine;
- zahtjevi za dugotrajnim radom bušotine i stručnim osobljem ključni su tijekom instalacije i testiranja inteligentnih sustava opremanja bušotine;
- troškovi inteligentnih opremanja bušotina u zrelih ležištima su visoki, predstavljajući financijski izazov;
- odabir stručnog tima, primjena ispravnih postupaka i upotreba odgovarajuće opreme ključni su za uspješnu implementaciju inteligentnih sustava opremanja bušotina;
- nedostatak alata za procjenu ležišta ograničava mogućnosti učinkovitog modeliranja inteligentnog sustava opremanja bušotina;
- identifikacija potencijalnih i prikladnih bušotina za inteligentno opremanje;
- pouzdanost mjernih pretvornika i regulacijskih ventila u bušotini.

#### 4. EKONOMSKA PROCJENA

U naftnoj i plinskoj industriji, svaki projekt trebao bi biti ekonomski isplativ da bi se proveo, a procjena vrijednosti projekta preduvjet je za njegov uspjeh. Bez jasnog razumijevanja potencijalne vrijednosti primjenjene tehnologije, industrija nije u mogućnosti odlučiti zašto i gdje primijeniti tu tehnologiju. Stoga je nužno procijeniti vrijednost tehnologije inteligentnog opremanja bušotine i njezinih specifičnih primjena.

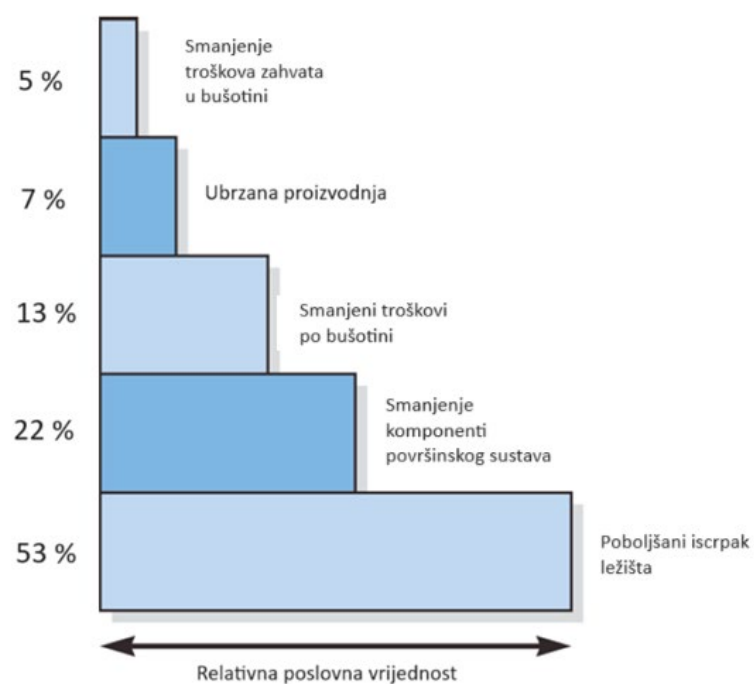
Operativni troškovi (engl. *Operational Expenditure - OPEX*) predstavlja kontinuirane troškove poslovanja. U naftnoj i plinskoj industriji, OPEX se uglavnom odnosi na troškove intervencija, radova u bušotini i održavanja, testiranja i mjerenja te troškove zaposlenika. Inteligentno opremanje bušotina ima potencijal dodati milijune eura neto sadašnjoj vrijednosti bušotine smanjenjem ili eliminacijom potreba za zahvatima u bušotini, s obzirom da su troškovi bušenja i radova u bušotini vrlo visoki, pogotovo u okruženjima poput udaljenih lokacija na moru ili dubokih odobalnih područja. Također, treba razmotriti odgođene probleme povezane s obustavom proizvodnje i smanjenjem diskontne stope u isto vrijeme kada se operativni troškovi bušotine povećavaju sa stopom inflacije (Yadav i Surya, 2012). Troškovi povezani sa zahvatima u bušotini mogu se podijeliti u četiri glavne vrste: operativni troškovi, troškovi prilika, troškovi rizika i troškovi odgođene (izgubljene) proizvodnje (Yadav i Surya, 2012).

U konvencionalnim opremanjima, zahvati u bušotini su često izvođene operacije, a uključuju troškove prestanka rada bušotine, opreme za zatvaranje, radnih fluida, stručnog osoblja itd. Također obuhvaća mobilizaciju i demobilizaciju postrojenja i opreme. Troškovi radova u bušotini mogu varirati od manje od 50 000 eura na poljima s niskom proizvodnjom nafte, dok na odobalnim postrojenjima troškovi mogu biti i do 10 milijuna eura (Pari et al., 2009). Osim toga, testiranje bušotine moguće je u bilo kojem trenutku bez dodatnih troškova kada je ona inteligentno opremljena. Testiranje sa zahvatom u bušotini može koštati u rasponu od 100 000 do 10 milijuna eura u bušotinama u dubokom moru (Pari et al., 2009) Troškovi prilika uključuju troškove nastale upotrebom bušotinskih platformi, postrojenja i druge opreme u remontnim operacijama, koje bi inače bile bolje iskorištene u operacijama generiranja prihoda (kao što su bušenje i opremanje novih bušotina) (Yaday i Surya, 2012). Postoje brojni rizici po okoliš kod industrijskih operacija povezanih s bušotinskim fluidima koji sadrže toksične tvari, emisijama H<sub>2</sub>S-a u ležištima prirodnog plina, iznenadnim erupcijama na istražnim bušotinama ili drugim nesrećama koje mogu utjecati na okoliš i

isplativost projekta. Također postoji rizik gubitka ili oštećenja bušotine uzrokovan neuspjelim zahvatom u bušotini. Tehnologija inteligentno opremljenih bušotina doprinosi smanjenju operativnih i troškova usklađenosti s okolišnim propisima tijekom svih faza eksploatacije ugljikovodika (istraživanje, bušenje, proizvodnja, transport i skladištenje). Trošak odgođene proizvodnje uključuje vremensku vrijednost novca odgođenih prihoda zbog prekida proizvodnje tijekom određenog razdoblja.

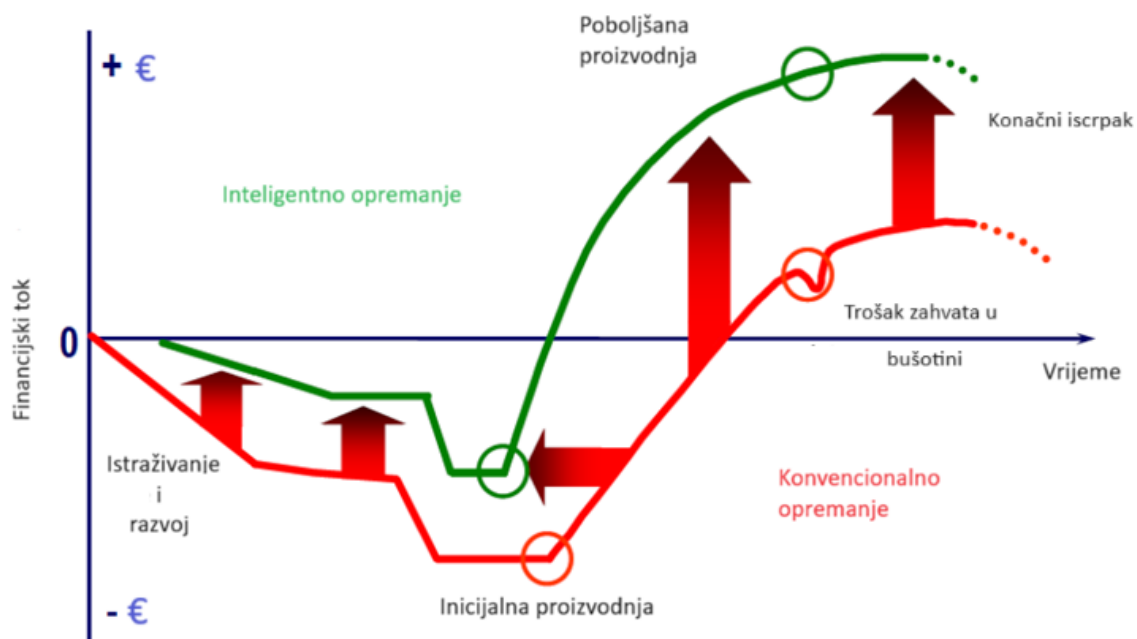
Kapitalni troškovi (engl. *Capital Expenditures - CAPEX*) su sva ulaganja u projektu. U naftnom poslovanju, CAPEX obuhvaća sve izdatke utrošene na: bušenje i opremanje bušotine te površinski sustav. Upotreba sustava za inteligentno opremanje bušotina omogućuje veću kontrolu nad svakom bušotinom, što rezultira većom ukupnom proizvodnjom. To znači da je potrebno manje bušotina za postizanje iste ciljane proizvodnje. Smanjenje broja bušotina rezultira smanjenjem CAPEX-a jer troškovi bušenja predstavljaju glavninu CAPEX-a. U nekim slučajevima, primjenom inteligentnog opremanja moguće je korištenje bušotine istovremeno kao utisne i proizvodne, što dovodi do smanjenja ulaganja.

Inteligentno opremljene bušotine ubrzavaju proizvodnju i povećavaju konačni iscrpak fluida iz ležišta. Smanjenje troškova za provođenje zahvata u bušotini nije glavna prednost inteligentno opremljenih bušotina. Slika 4-1 prikazuje relativne vrijednosti različitih aspekata primjene inteligentno opremljenih bušotina. Povećanje proizvodnje i konačnog iscrpka predstavlja otprilike 60% ukupne dodane vrijednosti primjenom inteligentnog opremanja bušotine.



**Slika 4-1.** Dodana vrijednost korištenjem sustava inteligentnog opremanja bušotina (Sakowski et al., 2005 )

Kada se sve sažme, poboljšanje neto financijskog toka korištenjem tehnologije inteligentnog opremanja bušotina prikazano je na Slici 4-2.



**Slika 4-2.** Poboljšanje u financijskom toku korištenjem tehnologije inteligentnog opremanje (Sakowski et al., 2005)



## 5. ZAKLJUČAK

Kroz godine, primijenjene su različite tehnike i oprema za opremanje bušotina i proizvodnju ugljikovodika iz ležišta nakon bušenja. Također, povećana je potražnja za metodama koje povećavaju proizvodnju, smanjuju prodor neželjenih fluida poput vode i plina i smanjuju troškove zbog zahvata u bušotinama. To je dovelo do razvoja tehnologije inteligentnog opremanja bušotina. Inteligentno opremanje bušotina jedna je od najvažnijih inovacija u naftnoj i plinskoj industriji tijekom posljednjih desetljeća. Kao što je prije spomenuto, inteligentno opremljena bušotina je bušotina opremljena posebnim sustavima u bušotini koji omogućavaju daljinsko praćenje i upravljanje bušotinom radi optimizacije proizvodnje i povećanja iscrpka fluida iz ležišta. Vrijednost inteligentnog opremanja bušotina proizlazi uglavnom iz sposobnosti aktivnog upravljanja protokom pomoću ICV-ova ili ICD-ova, modificiranjem "konfiguracije" bušotine putem sustava praćenja i regulacije. Ovi sustavi pružaju pouzdanost i fleksibilnost, ali najvažnija karakteristika ove tehnologije je njena sposobnost prilagodbe promjenama uvjeta u bušotini, bilo da su te promjene dio planirane strategije iskorištavanja ležišta ili su neplanirani događaji. Treba napomenuti da je inteligentno opremanje bušotina ključna komponenta strategije iskorištavanja ležišta i postizanja većeg iscrpka fluida iz ležišta pomoću maksimalne kontrole i praćenja u stvarnom vremenu te selektiranjem željenih zona iz kojih će se proizvoditi. Također, ova tehnologija opremanja može pomoći operatorima da donesu pravu odluku u pravo vrijeme smanjujući razine nesigurnosti. U naftnoj i plinskoj industriji, tvrtke uvijek pažljivo prate kretanje na tržištu i razvoj novih tehnologija. To je rezultiralo neizvjesnom budućnosti tehnologije inteligentnog opremanja bušotina, jer primjena izrazito ovisi o cijeni nafte.

Unatoč značajnim prednostima koje inteligentno opremanje pruža u usporedbi s konvencionalnim opremanjem, ne može se smatrati savršenim rješenjem jer još uvijek nije sposobno automatski rješavati svaku situaciju bez ljudske intervencije. U budućnosti, tehnologija inteligentnog opremanja treba postići nekoliko ciljeva kako bi je tvrtke prihvatile i više koristile. Ti ciljevi ogledaju se u razvoju sustava za samoregulaciju te sprječavanje zahtjeva za rutinskim kontrolama/zahvatima, te postizanje pouzdanosti sustava od 95% operativnosti 10 godina nakon instalacije (Vidar et al., 2011). Smanjenje rizika, smanjenje ukupnih početnih troškova i brže vrijeme instalacije s poboljšanom funkcionalnošću također predstavljaju izazove za ovu tehnologiju.

Na kraju, glavne prednosti sustava inteligentnog opremanja bušotina su:

- poboljšanje proizvodnje;
- korist u operacijama poboljšanja iscrpka fluida iz ležišta (engl. *Enhanced Oil Recovery - EOR*);
- pružanje nadzora i kontrole nad radom bušotine i proizvodnjom;
- smanjenje udjela vode i plina u pridobivenom fluidu;
- automatska regulacija protoka pomoću ventila;
- smanjenje rizika od nesreća osoblja, s obzirom da je potreba za njihovim prisustvom na bušotinskom radnom prostoru smanjena;
- mjerenje u stvarnom vremenu i prijenos podataka o karakteristikama ležišta za bolje upravljanje ležištem;
- smanjenje ili eliminacija dodatnih bušotina, površinskih objekata i zahvata u bušotini;
- selektivna proizvodnja iz ležišta;
- smanjenje operativnih troškova.

Glavni nedostaci sustava inteligentnog opremanja bušotina su:

- skup i kompliciran postupak ugradnje i instalacija opreme;
- potrebno je značajno vrijeme i stručnost za instalaciju i testiranje sustava inteligentnog opremanja bušotina;
- poteškoće u predviđanju cijena nafte i plina;
- teško je pronaći stručnjake za rad s ovim sustavima, jer je tehnologija relativno nova.

## 6. LITERATURA

- 1) AADNOY, B.S. and HARELAND, G., 2009, September. Analysis of inflow control devices. In SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition. OnePetro.
- 2) AAKRE, H., HALYORSEN, B., WERSWICK, B. and MATHIESEN, V., 2013, March. Smart well with autonomous inflow control valve technology. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference (pp. SPE-164348). SPE.
- 3) AL QUDAIHY, D.S., AL QAHTANI, H.B., SUNBUL, A.H., HEMBLING, D. and SALERNO, G., 2006, November. The evolution of advanced well completions results in enhanced well productivity and recovery in Saudi Aramco's Offshore Fields. In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition? (pp. SPE-103621). SPE.
- 4) AL-ARNAOUT, I.H., AL-BUALI, M.H., AL-MUBARAK, S.M., AL-DRIWEESH, S.M., ZAREEF, M.A. and JOHANSEN, E.S., 2008, November. Optimizing Production in Maximum Reservoir Contact Wells with Intelligent Completions and Optical Downhole Monitoring System. In Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (pp. SPE-118033). SPE.
- 5) ALI, M.A. and SHAFIQ, M., 2008, May. Integrating ESPs with Intelligent Completions: Options, Benefits and Risks. In SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition (pp. SPE-120799). SPE.
- 6) AL-KHALIFA, M.T., MISHKHES, A.T., BARUAH, K.N. and AL-OTAIBI, N.M., 2013, May. Smart well completion utilization to optimize production in MRC well-a case study. In SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition (pp. SPE-168108). SPE.
- 7) AL-KHELAIWI, F.T., BIRCHENKO, V.M., KONOPCZYNSKI, M.R. and DAVIES, D.R., 2010. Advanced wells: a comprehensive approach to the selection between passive and active inflow-control completions. *SPE Production & Operations*, 25(03), pp.305-326.
- 8) AL-KHODHORI, S.M., 2003, June. Smart well technologies implementation in PDO for production & reservoir management & control. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference (pp. SPE-81486). SPE.
- 9) BELLARBY, J., 2009. Well completion design. Elsevier.
- 10) BERNT, S.A. and GEIR, H., 2009. Analysis of inflow control devices. paper SPE, 122824.
- 11) BIXENMAN, P.W., TOFFANIN, E.P. and SALAM, M.A., 2001, September. Design and Deployment of an intelligent Completion with Sand Control. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-71674). SPE.
- 12) BOURGOYNE, A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E. and YOUNG, F.S., 1986. Applied drilling engineering (Vol. 2, p. 514). Richardson: Society of Petroleum Engineers.
- 13) CARVAJAL, G.A., BOISVERT, I. and KNABE, S., 2014, April. A Smart Flow for SmartWells: Reactive and Proactive Modes. In SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition. OnePetro.
- 14) CULLICK, A.S. and SUKKESTAD, T., 2010, March. Smart operations with intelligent well systems. In SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition (pp. SPE-126246). SPE.

- 15) DYER, S., EL-KHAZINDAR, Y., Reyes, A., HUBER, M., RAW, I. and REED, D., 2007. Intelligent completions—A hands-off management style. *Oilfield review*, 19, pp.4-17.
- 16) ELMSALLATI, S.M., DAVIES, D.R., TESAKER, O. and REIME, A., 2005, March. Optimisation of intelligent wells-a field case study. In 7th Offshore Mediterranean Conference.
- 17) ENYEKWE, A.E. and AJIENKA, J.A., 2014, August. Comparative analysis of permanent downhole gauges and their applications. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. OnePetro.
- 18) GAO, C., RAJESWARAN, T. and NAKAGAWA, E., 2007, March. A literature review on smart-well technology. In SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium/Production and Operations Symposium (pp. SPE-106011). SPE.
- 19) HALVORSEN, M., ELSETH, G. and NAEVDAL, O.M., 2012, October. Increased oil production at Troll by autonomous inflow control with RCP valves. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
- 20) HAUGEN, V., FAGERBAKKE, A.K., SAMSONSEN, B. and KROGH, P.K., 2006, April. Subsea smart multilateral wells increase reserves at Gullfaks South Statfjord. In SPE Improved Oil Recovery Conference? (pp. SPE-95721). SPE.
- 21) HEMBLING, D., SUNBUL, A.H. and SALERNO, G., 2007, October. Advanced well completions result in enhanced well productivity and recovery in Saudi Aramco's Offshore Fields. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (pp. SPE-108877). SPE.
- 22) Heriot Watt University (2011). *Production Technology*
- 23) KONOPCZYNSKI, M.R., MOORE, W.R. and HAILSTONE, J.J., 2002, September. ESPs and Intelligent Completions. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro.
- 24) LAKE, L.W., 2007. *Petroleum engineering handbook* (Vol. 5). Society of Petroleum Engineers.
- 25) LEEMHUIS, A.P., BELFROID, S.C. and ALBERTS, G.J.N., 2007, November. Gas coning control for smart wells. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-110317). SPE.
- 26) MATHIESON, D., GIULIANI, C., AJAYI, A. and SMITHSON, M., 2006, September. Intelligent Well Automation—Design and Practice. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-103082). SPE.
- 27) MESHIOYE, O., MACKAY, E., EKEOMA, E. and CHUKUWEZI, M., 2010, July. Optimization of waterflooding using smart well technology. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition (pp. SPE-136996). SPE.
- 28) MUGGERIDGE, A., COCKIN, A., WEBB, K., FRAMPTON, H., COLLINS, I., MOULDS, T. and SALINO, P., 2014. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2006), p.20120320.
- 29) NALDRETT, G. and ASEN, T.I., 2012. Wireless Wellbore-The Way Ahead. *Journal of Petroleum Technology*, 64(05), pp.34-35.
- 30) NALDRETT, G. and ROSS, D., 2006, May. When Intelligent Wells are Truly Intelligent, Reliable, and Cost Effective. In Offshore Technology Conference (pp. OTC-17999). OTC.

- 31) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019. Offshore Well Completion and Stimulation: Using Hydraulic Fracturing and Other Technologies: Proceedings of a Workshop. National Academies Press.
- 32) NAUS, N.M.J.J., DOLLE, N. and JANSEN, J.D., 2006. Optimization of commingled production using infinitely variable inflow control valves. SPE Production & Operations, 21(02), pp.293-301.
- 33) OLSEN, J.J., HEMMINGSEN, C.S., BERGMANN, L., NIELSEN, K.K., GLIMBERG, S.L. and WALTHER, J.H., 2017. Characterization and erosion modeling of a nozzle-based inflow-control device. SPE Drilling & Completion, 32(04), pp.224-233.
- 34) PARI, M.N., KABIR, A.H., MOTAHHARI, S.M. and BEHROUZ, T., 2009, May. Smart well-Benefits, Types of Sensors, Challenges, Economic Consideration, and Application in Fractured Reservoir. In SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition (pp. SPE-126093). SPE.
- 35) QUANSHU, Z., ZHIMING, W., GANG, Y. and JIANGUANG, W., 2013. Selection and optimization study on passive inflow control devices by numerical simulation. SPE167443.
- 36) RAFIEI, Y., 2016. Real-time well and reservoir management by intelligent well technology. In Conference: Petroleum Engineering seminar at Petroleum and Chemical Engineering department of American University of Beirut.
- 37) RAHIMI, R. and TAHAMI, A., 2010, January. Implementing Smart Solution for Controlling Water Cut in South Pars Gas Field from Environmental Point of View. In SPE Deep Gas Conference and Exhibition. OnePetro.
- 38) RAHMAN, J., ALLEN, C. and BHAT, G., 2012, February. Second-Generation interval control valve (ICV) improves operational efficiency and inflow performance in intelligent completions. In SPE North Africa Technical Conference and Exhibition (pp. SPE-150850). SPE.
- 39) RAZAQ, M.M., HASSAN, A.F. and RADHI, A.A., 2022. Using Smart Completion Technology to Control Water Coning Problems and Increase Oil Recovery in a Southern Iraqi Oilfield. Journal of Petroleum Research and Studies, 12(1 (Suppl.)), pp.88-101.
- 40) REED, D., RAW, I., HUBER, M., REYES, A., EL-KHAZINDAR, Y. and DYER, S. (2012) Intelligent Completions: A Hands-off Management Style, 2nd edition.
- 41) RENPU, W. (2011a). Advanced well completion engineering: 3rd Edition. Gulf professional publishing.
- 42) RENPU, W., (2011b). Oil and gas well corrosion and corrosion prevention. Advanced well completion engineering, pp.617-700.
- 43) REYES, A.R. and ARIAS, J.L., 2004. Challenges and solutions for installing an intelligent completion in offshore deepwater Brazil.
- 44) SAKOWSKI, S.A., ANDERSON, A. and FURUI, K., 2005, April. Impact of Intelligent Well Systems on Total Economics of Field Development. In SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium (pp. SPE-94672). SPE.
- 45) SHAW, J., 2011, November. Comparison of downhole control system technologies for intelligent completions. In SPE Canada Unconventional Resources Conference? (pp. SPE-147547). SPE.

- 46) STEFANOS, T., GAGANIS, S.V., STAMATAKI, S. and GEORGAKOPOULOS, A., 2019., THESIS: Intelligent well completions
- 47) TIRADO, R., HAAPANEN, B. and MACLEOD, J., 2010, December. Using Intelligence to Improve Efficiency in Remote-Oilfield Operations: Case Histories. In SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. OnePetro.
- 48) VASPER, A., 2008. Auto, Natural, or In-Situ Gas-Lift Systems Explained. SPE Production & Operations, 23(01), pp.75-80.
- 49) VIDAR, M., HAAVARD, A., WERSWICK, B. and ELSETH, G., 2011. The autonomous RCP valve-new technology for inflow control in horizontal wells.
- 50) YADAV, V. and SURYA, N., 2012, March. Evaluating the performance of intelligent completions. In SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition (pp. SPE-150408). SPE.
- 51) ZHAO, Y.L., ZHAO, L.B. and JIANG, Z.D., 2006. High temperature and frequency pressure sensor based on silicon-on-insulator layers. Measurement Science and Technology, 17(3), p.519.

#### INTERNET IZVORI

- 52) INTELLIGENT COMPLETIONS, 2000.  
URL:[http://www.advntk.com/pwrijip2003/pwri/final\\_reports/task\\_5/intelligent\\_completions\\_final.htm](http://www.advntk.com/pwrijip2003/pwri/final_reports/task_5/intelligent_completions_final.htm) (13.12.2023.)
- 53) HALLIBURTON, 2021.  
URL:<https://www.halliburton.com/en/completions/well-completions/sand-control/halliburton-equipflow-inflow-control-devices> (28.12.2023.)
- 54) DATACAN, 2023.  
URL:<https://datacan.ca/products/Memory%20Gauges/Piezo%20Pressure%20Gauge/0.75%22%20Piezo> (preuzeto 27.12.2023.)
- 55) OFFSHORE, 2017. Intelligent completions play key role in Brazilian presalt development (05.01.2024.)  
URL:<https://www.offshore-mag.com/drilling-completion/article/16755868/intelligent-completions-play-key-role-in-brazilian-presalt-development>
- 56) ROGTEC, 2017. Tendeka: Launches PulseEight Wireless Completion Technology  
URL:<https://www.rogtecmagazine.com/tendeka-launches-pulseeight-wireless-completion-technology/> (03.01.2024.)
- 57) SCHLUMBERGER, 2021. The Defining Series: Multilateral Wells  
URL:<https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-multilateral-wells> (12.12.2023.)  
WEATHERFORD, 2010. FloReg™ Inflow Control Device (ICD)  
URL:[https://www.weatherford.com/documents/brochure/products-and-services/completions/floreg-inflow-control-device-\(icd\)/](https://www.weatherford.com/documents/brochure/products-and-services/completions/floreg-inflow-control-device-(icd)/) (20.12.2023.)
- 58) SCHLUMBERGER, 2023. Intelligent Completions  
URL:<https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/completions/well-completions/intelligent-completions> (15.12.2023.)
- 59) SCHLUMBERGER, 2023.

URL:<https://www.slb.com/resource-library/tech-report/co/hlwm-installations-tr>  
(07.12.2023.)

60) STATFJORD, 2020. Snorre Tie-in

URL:<https://statfjord.industriminne.no/en/2018/07/09/snorre-tie-in-2/> (05.12.2023.)

## **IZJAVA**

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

Student/studentica – autor

*F. Marinović*

---

*(potpis)*





KLASA: 602-01/24-01/17  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 14.02.2024.

**Filip Marinović, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/17, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 31.01.2024. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### INTELIGENTNO OPREMANJE BUŠOTINA

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Karolina  
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)