Povećanje proizvodnosti bušotine X-1 ugradnjom linearno pogonjene dubinske sisaljke

Mandić, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:911450

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO – GEOLOŠKO – NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

POVEĆANJE PROIZVODNOSTI BUŠOTINE X-1 UGRADNJOM LINEARNO POGONJENE DUBINSKE SISALJKE

Diplomski rad

Matej Mandić

N-266

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu Diplomski rad
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

POVEĆANJE PROIZVODNOSTI BUŠOTINE X-1 UGRADNJOM LINEARNO POGONJENE DUBINSKE SISALJKE

MATEJ MANDIĆ

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb
Zavod za naftno inženjerstvo

Sažetak

Veća proizvodnja nafte iz bušotine X-1 ostvarena je zamjenom dosadašnjeg načina podizanja kapljevine metodom plinskog lifta. Izradom indikatorske krivulje utvrđena je mogućnost većih pridobivih količina nafte. S ciljem optimizacije pridobivanja nafte, povećanja energetske učinkovitosti te smanjenja troškova održavanja na proizvodnoj bušotini X-1, obavljen je kapitalni remont opreme te je ugrađena linearno pogonjena dubinska sisaljka (engl. *Linear Rod Pump,* LRP). Nakon navedenih aktivnosti, proizvodni parametri pokazuju znatno povećanje proizvodnje uz nepromijenjen udio vode u kapljevini.

Ključne riječi: plinski lift, indikatorska krivulja, LRP, povećanje proizvodnosti

Diplomski rad sadrži: 40 stranica, 11 slika, 8 tablica i 12 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Vladislav Brkić, docent RGNF-a
2. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a
3. Dr. sc. Lidia Hrnčević, izv. prof. RGNF-a

Datum obrane: 21.02.2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

PRODUCTION CAPACITY INCREASE OF X-1 WELL THROUGH THE INSTALLMENT OF AN LRP UNIT

MATEJ MANDIĆ

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

Abstract

Greater oil production from the X-1 well was achieved by replacing the existing artificial lift method, the gas lift. By producing an indicator curve, the possibility of higher recoverable amounts of oil was determined. With a view of optimizing oil recovery, increasing energy efficiency and reducing maintenance costs at the production well X-1, capital overhaul of equipment was implemented, and linear rod pump was installed. After the above mentioned activities, production parameters show a significant increase in production, with unchanged water cut.

Keywords: gas lift, indicator curve, linear rod pump, production increase

Thesis contains: 40 pages, 11 figures, 8 tables and 12 references

Original in: Croatian

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

Supervisor: Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

Reviewers: 1. Assistant Professor Vladislav Brkić, PhD

2. Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD

3. Associate Professor Lidia Hrnčević, PhD

Date of defense: February 21st, 2019., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I

POPIS TABLICA II

POPIS KORIŠTENIH KRATICA III

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA III

1. UVOD 1

2. PROIZVODNJA KAPLJEVINE METODOM PODIZANJA PLINSKIM LIFTOM 2

2.1. Općenito o metodi podizanja plinskim liftom 2

2.2. Proizvodna oprema bušotine X-1 opremljene plinskim liftom 3

2.3. Proizvodne količine na bušotini X-1 6

3. IZRAČUN PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINE X-1 7

3.1. Proračun indikatorske krivulje za bušotinu X-1 7

4. UGRADNJA DUBINSKE SISALJKE NA KLIPNIM ŠIPKAMA 11

4.1. Kapitalni remont opreme 11

4.2. Podzemna oprema 11

4.2.1. Uzlazne cijevi (tubing) 12

4.2.2. Klipne šipke 12

4.2.3. Dubinska sisaljka 12

4.2.4. Sidreni paker (anker) 13

4.2.5. Dubinski odvajač plina 13

5. LINEARNI SUSTAV PODIZANJA FLUIDA DUBINSKOM SISALJKOM 16

5.1. Odabir odgovarajućeg LRP uređaja 18

5.2. Izračun kapaciteta dubinske sisaljke 20

5.3. Proizvedena količina kapljevine iz bušotine X-1 nakon ugradnje dubinske sisaljke 21

5.4. Nadzemna oprema bušotine X-1 23

5.4.1. LRP uređaj *23*

5.4.2. Erupcijski uređaj *26*

5.4.3. Brtvenica glatke šipke *26*

5.4.4. Nadzemni dio priključnog naftovoda *27*

5.5. Bušotinski radni prostor 29

6. VOĐENJE PROCESA I UPRAVLJANJE 33

7. ZAKLJUČAK 39

8. LITERATURA 40

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Proizvodna oprema bušotine X-1 za proizvodnju metodom plinskog lifta 5

Slika 3-1. Indikatorska krivulja bušotine X-1 10

Slika 4-1. Sastav ugrađene proizvodne opreme u bušotini X-1 15

Slika 5-1. Prikaz površinskog dijela opreme bušotine X-1 nakon ugradnje LRP uređaja .. 16

Slika 5-2. Proizvodni rezultati prije i nakon ugradnje dubinske sisaljke 22

Slika 5-3. Prikaz glavnih dijelova LRP uređaja 24

Slika 5-4. Prikaz tehničkog stanja nadzemnog dijela bušotine X-1 nakon ugradnje LRP sustava 28

Slika 5-5. Shematski prikaz bušotinskog radnog prostora bušotine X-1 na kojoj je ugrađen LRP 29

Slika 5-6. Razvodni ormar i LRP regulator na bušotini X-1 31

Slika 6-1. Kontroler s LCD prikazom i tipkama 34

Slika 6-2. Prikaz dinamograma na nadzorno – upravljačkom regulatoru 36

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Konstrukcija kanala bušotine X-1 3

Tablica 2-2. Sastav proizvodne opreme u bušotini X-1 4

Tablica 2-3. Mjerenja proizvodnosti bušotine X-1 6

Tablica 3-1. Potrebni podaci za izradu indikatorske krivulje bušotine X-1 8

Tablica 3-2. Proračun indikatorske krivulje za bušotinu X-1 9

Tablica 4-1. Sastav ugrađene proizvodne opreme 14

Tablica 5-1. Glavna svojstva izabranog modela LRP uređaja 19

Tablica 5-2. Mjerenja proizvodnje dubinskom sisaljkom pogonjenom LRP uređajem na bušotini X-1 21

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

API - Američki naftni institut (*engl. American Petroleum Institute*)

DPA - dozirno - pumpni agregat

DUS - dubinska usadna sisaljka

LRP - linearno pogonjena dubinska sisaljka (*engl. Linear Rod Pump*)

TS - transformatorska stanica

RO - razvodni ormar

KRO - kapitalni remont opreme

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
D_v	m	nominalni vanjski promjer cijevi
P_t	bar (10^5 Pa)	dinamički tlak u tubingu na ušću bušotine
P_c	bar (10^5 Pa)	dinamički tlak u prstenastom prostoru na ušću bušotine
Q_{uk}	m^3/dan	proizvodnja kapljevine
Q_n	m^3/dan	proizvodnja nafte
Q_v	m^3/dan	proizvodnja vode
W_{uk}	%	udio vode u proizvedenoj kapljevini
Q_k^{max}	m^3/dan	maksimalno davanje bušotine
P_d	bar (10^5 Pa)	dinamički tlak na dnu bušotine
P_s	bar (10^5 Pa)	statički tlak na dnu bušotine
J	m^3/dan/bar	indeks proizvodnosti
A_p	m^2	površina poprečnog presjeka klipa
S_p	m	efektivna duljina hoda klipa
N	min^{-1}	broj hodova u minuti
η	%	faktor iskoristivosti (volumetrijska učinkovitost)

1. UVOD

Redovita aktivnost svih naftnih kompanija je neprekidna kontrola rada postojećih naftnih i plinskih bušotina praćenjem njihove proizvodnosti. Cilj je ostvariti maksimalno moguću proizvodnju fluida na temelju geološko – fizikalnih karakteristika ležišta, konstrukcije bušotine i ugrađene proizvodne opreme. Česta je pojava da su pojedina ležišta nedovoljno iskorištena zbog krivih početnih ulaznih podataka prilikom projektiranja rada bušotine. Jedna od mogućih grešaka je pogrešan izbor metode umjetnog podizanja kapljevine, što može rezultirati nedovoljnim proizvodnim količinama, nepotrebnim kapitalnim troškovima i troškovima održavanja bušotine, te negativnim utjecajem na ležište kao što je brže zavodnjavanje ležišta.

U diplomskom radu prikazan je sustavan pristup zamjene metode umjetnog podizanja kapljevine na bušotini X-1 u svrhu povećanja proizvodnosti. U radu je objašnjena ranije korištena metoda umjetnog podizanja kapljevine plinskim liftom, te je izrađena analiza mogućih proizvodnih parametara bušotine uz pomoć indikatorske krivulje. Zbog ostvarivanja veće depresije na ležište i samim time veće proizvodnosti bušotine izabrana je metoda podizanja kapljevine dubinskim sisaljkama. U tu je svrhu, u bušotini X-1 obavljen kapitalni remont opreme (KRO), odnosno postojeća proizvodna oprema je zamijenjena dubinskom sisaljkom na klipnim šipkama. Kako bi se što bolje optimizirao proces pridobivanja kapljevine dubinskom sisaljkom, odabran je uređaj pogonskog mehanizma klipnih šipki korištenjem linearnog pogona tzv. LRP uređaj (engl. *Linear Rod Pump*). Jednostavnost izvedbe, manji operativni troškovi, bolje iskorištavanje ležišnog potencijala samo su neki od prednosti LRP uređaja, te na taj način čini kvalitetnu zamjenu, dugo godina korištenom sustavu dubinskih sisaljki na klipnim šipkama uz pogon njihalice. Velika korist od korištenja LRP uređaja je mogućnost jednostavnog i autonomnog daljinskog upravljanja bušotinom spajanjem na komunikacijski nadzorni i upravljački sustav što je također opisano u diplomskom radu.

Nakon izmjene sustava mehaničkog podizanja kapljevine, na bušotini X-1 obavljena su hidrodinamička mjerenja uz pomoć pokretnog mjernog separatora i dubinskog manometra, te su uspoređeni rezultati mjerenja prije i nakon obavljenog kapitalnog remonta opreme.

2. PROIZVODNJA KAPLJEVINE METODOM PODIZANJA PLINSKIM LIFTOM

Metodom podizanja kapljevine utiskivanjem plina, kojim se olakšava stupac kapljevine, tj. metodom plinskog lifta na bušotini X-1 nije iskorišten potencijal ležišta te nisu ostvareni zadovoljavajući rezultati proizvodnje.

2.1. Općenito o metodi podizanja plinskim liftom

Sve metode umjetnog podizanja kapljevine iz ležišta imaju istu namjenu, a to je održavanje niskog dinamičkog tlaka na dnu bušotine P_d, kako bi ležišni fluidi ostvarivali dotok u bušotinu i bili pridobiveni na površinu.

Plinski lift je metoda podizanja fluida neprekidnim ili povremenim utiskivanjem plina pod relativno visokim tlakom u prstenasti prostor bušotine na odgovarajućoj razini, odnosno dubini na kojoj su smješteni plinski ventili. Utiskivanjem plina smanjuje se gradijent tlaka stupca kapljevine iznad točke utiskivanja, te se na taj način kapljevina podiže do površine. Za razliku od neprekidnog utiskivanja plina, povremeno plinsko podizanje koristi se kod bušotina manjeg davanja, te kada je potrebno postići veću dubinu utiskivanja. U slučaju povremenog plinskog lifta, plin se povremeno, u određenim vremenskim razmacima i relativno velikim količinama, utiskuje kroz prstenasti prostor bušotine u proizvodni niz cijevi (engl. *tubing*) te zahvaća stupac kapljevine akumuliran iznad radnog ventila. Pomoću vremenskog upuštača (*engl. timer*), plin se u određenim ciklusima utiskuje u prstenasti prostor (Zelić, 1977).

Prednosti plinskog lifta su: niska početna kapitalna ulaganja u podzemnu proizvodnu opremu, niski troškovi održavanja, te široka primjena u okolnostima u kojima korištenje sisaljki nije prihvatljivo. Na bušotinama s izraženom problematikom utoka pijeska, stvaranja kamenca, povećanog plinskog faktora, te na bušotinama s velikim otklonom od vertikale, primjenjuje se plinski lift, što prikazuje veliku fleksibilnost upotrebe ovakve metode podizanja fluida.

Glavni nedostatci plinskog lifta su: veliki inicijalni troškovi u nadzemnom dijelu sustava, odnosno ulaganja u kompresorsku stanicu, te izvor ekonomski povoljnog plina za podizanje fluida (Zelić, 1977).

2.2. Proizvodna oprema bušotine X-1 opremljene plinskim liftom

Duljina kanala odabrane bušotine X-1 iznosi 2420 metara. Mehanički čep ugrađen je na dubini 2237 metara. Skretanje kanala bušotine je na 1200 metara, a horizontalni otklon iznosi L = 300 m, na vertikalnoj dubini od 2100 m (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015).

U tablici 2-1. prikazana je konstrukcija kanala bušotine X-1.

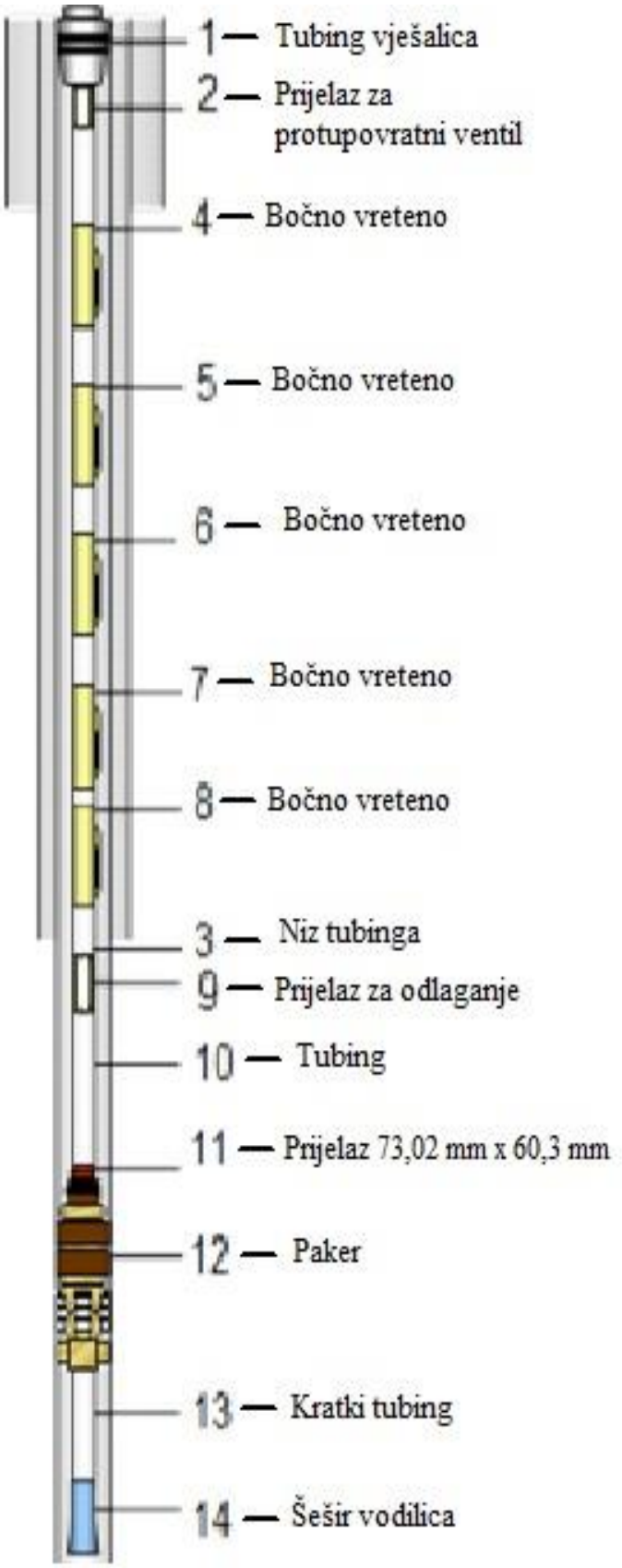
Tablica 2-1. Konstrukcija kanala bušotine X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015)

Kolona	Navoj	Nominalni vanjski promjer		Jedinična masa		Kvaliteta čelika	Dubina ugradnje		Cement
		D_v (mm)	D_v (inch)	kg/m	lb/ft		od – do (m)		do (m)
Uvodna	API	339,70	$13^3/_8$"	70,90	48,0	H-40	0,00	151,40	vrh
Tehnička	API	244,50	$9^5/_8$"	59,54	40,0	J-55	0,00	1075,0	vrh
Proizvodna	API	139,70	$5^1/_2$"	25,51	17,0	J-55	0,00	2365,0	1000 m od ušća
Proizvodni tubing	EU	73,02	$2^7/_8$"	9,58	6,5	N-80Q	0,00	2128,92	

Sastav proizvodne opreme ugrađene u bušotini X-1 prikazan je u tablici 2-2. i na slici 2-1.

Tablica 2-2. Sastav proizvodne opreme u bušotini X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015)

Pozicije na slici 2-1.	Proizvodna oprema	Duljina (m)	Dubina (m)
1.	Tubing vješalica		
2.	Prijelaz za protupovratni ventil 60,3 mm × 73,02 mm		
3.	Niz tubinga	2128,92	
4.	Bočno vreteno		360,51
5.	Bočno vreteno		473,96
6.	Bočno vreteno		559,46
7.	Bočno vreteno		625,16
8.	Bočno vreteno		709,66
9.	Prijelaz za odlaganje	0,29	2129,21
10.	Tubing	9,14	
11.	Prijelaz 73,02 mm × 60,3 mm	0,25	
12.	Paker R-3	2,10	2139,3
13.	Kratki tubing	1,74	
14.	Šešir vodilica	0,40	2142,85



Slika 2-1. Proizvodna oprema bušotine X-1 za proizvodnju metodom plinskog lifta (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2015)

2.3. Proizvodne količine na bušotini X-1

Tijekom dvije godine proizvodnje bušotine X-1 obavljena su mjerenja proizvodnih parametara. Prosječna dnevna proizvodnja kapljevine u navedenom vremenskom razdoblju iznosila je 19,80 m^3 kapljevine, dok se udio vode (*engl. water cut*) u proizvedenoj kapljevini povećao od 33% na 45%. U tablici 2-3. prikazane su količine ukupne dnevne proizvodnje kapljevine, udio vode u ukupnoj proizvodnji, te tlakovi na uzlaznoj cijevi (tubingu) i u prstenastom prostoru na ušću bušotine (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Tablica 2-3. Mjerenja proizvodnosti bušotine X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Redni broj mjerenja	P_t bar	P_c bar	Q_{uk} m^3/dan	Q_n m^3/dan	Q_v m^3/dan	W_{uk} %
1.	8,5-9,5	42	19,98	12,487	7,493	37,5
2.	8,5-10	42	20,28	13,578	6,702	33,0
3.	11-16	41	18,29	11,771	6,519	35,6
4.	10-12,5	41	18,03	10,089	7,941	44,0
5.	9-15	41-42	17,88	9,544	8,336	46,6
6.	12-18	38	19,54	11,302	8,238	42,2
7.	11-13	40	19,52	11,318	8,202	42,0
8.	8-13,5	39	21,86	11,994	9,866	45,1
9.	9-17	39-40	21,34	11,542	9,798	45,9
10.	7,5-15,5	38-39	21,2	11,586	9,614	45,3

gdje su:

P_t = dinamički tlak u tubingu na ušću bušotine, bar

P_c = dinamički tlak u prstenastom prostoru na ušću bušotine, bar

Q_{uk} = proizvodnja kapljevine, m^3/dan

Q_n = proizvodnja nafte, m^3/dan

Q_v = proizvodnja vode, m^3/dan

W_{uk} = udio vode u proizvedenoj kapljevini, %

3. IZRAČUN PROIZVODNOG POTENCIJALA BUŠOTINE X-1

Proračun i izrada indikatorske krivulje za bušotinu X-1 obavljeni su prema podacima dobivenim proizvodnjom kapljevine metodom plinskog lifta.

3.1. Proračun indikatorske krivulje za bušotinu X-1

Nakon razdoblja proizvodnje plinskim liftom, bušotina X-1 je odabrana za proračun potencijalnih proizvodnih kapaciteta i moguću veću dnevnu proizvodnju koja bi se ostvarila promjenom metode umjetnog podizanja kapljevine. Proračun obuhvaća zamjenu postojećeg plinskog podizanja s ugradnjom dubinske sisaljke na klipnim šipkama. Osim toga, na bušotini X-1 planirana je ugradnja linearno pogonjene dubinske sisaljke s pripadnim LRP uređajem kao relativno novim površinskim sustavom koji ima brojne prednosti nad sustavom pogonjenim njihalicom.

Kako bi se utvrdila maksimalna proizvodnost sustava linearno pogonjene dubinske klipne sisaljke kod postojećih uvjeta potrebno je izraditi indikatorsku krivulju.

Proizvodnost bušotine se prikazuje indeksom proizvodnosti koji predstavlja moguće davanje bušotine u ovisnosti o određenoj depresiji na ležište. Grafički prikaz indeksa proizvodnosti je indikatorska krivulja.

Metodu za izračun indeksa proizvodnosti prvi je prikazao Vogel (1968). Navedena metoda primijenjena je za proračunavanje indikatorske krivulje naftne bušotine X-1.

Za izračun indikatorske krivulje potrebno je poznavati sljedeće parametre:

- davanja bušotine,
- pripadajući dinamički tlak na dnu bušotine, te
- statički tlak na dnu bušotine.

Prilikom izrade indikatorske krivulje za bušotinu X-1 korišteni su izmjereni podaci prikazani u tablici 2-3., a vrijednosti parametara potrebnih za proračun indikatorske krivulje prikazani su u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Potrebni podaci za izradu indikatorske krivulje bušotine X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Bušotina	X-1
Davanje bušotine, Q_k(m^3/dan)	21,2
Dinamički tlak na dnu bušotine, P_d (bar)	148,4
Statički tlak na dnu bušotine, P_s (bar)	193,5

Jednadžba indikatorske krivulje prema Vogelu (1968) glasi:

$$\frac{Q_k}{Q_k^{max}} = 1 - 0{,}2 \times \left(\frac{P_d}{P_s}\right) - 0{,}8 \times \left(\frac{P_d}{P_s}\right)^2 \qquad (3\text{-}1)$$

gdje je:

Q_k – davanje bušotine, m^3/dan

Q_k^{max} – maksimalno davanje bušotine, m^3/dan

P_d – dinamički tlak na dnu bušotine, bar

P_s – statički tlak na dnu bušotine, bar

Uvrštavanjem mjernih podataka iz tablice 3-1. u Vogelovu jednadžbu indikatorske krivulje dobiva se vrijednost maksimalnog davanja bušotine izražena u m^3/dan.

$$\frac{Q_k}{Q_k^{max}} = 1 - 0{,}2 \times \left(\frac{148{,}4}{193{,}5}\right) - 0{,}8 \times \left(\frac{148{,}4}{193{,}5}\right)^2$$

$$\frac{Q_k}{Q_k^{max}} = 1 - 0{,}2 \times 0{,}767 - 0{,}8 \times 0{,}5882$$

$$\frac{Q_k}{Q_k^{max}} = 1 - 0{,}1534 - 0{,}47056$$

$$\frac{Q_k}{Q_k^{max}} = 0{,}37604$$

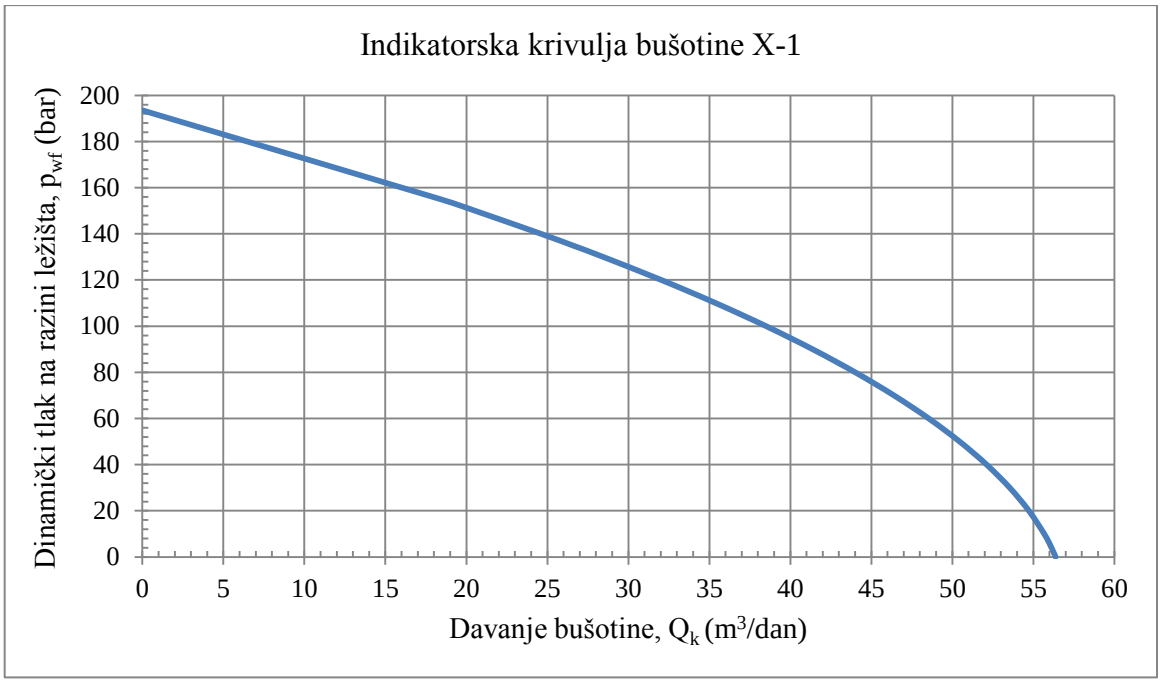
$$Q_k^{max} = \frac{21{,}2}{0{,}37604}$$

$$Q_k^{max} = 56{,}377 \text{ m}^3\text{/dan}$$

Tablica 3-2. Proračun indikatorske krivulje za bušotinu X-1

$P_d(bar)$	P_d/P_s	0,2× (P_d/P_s)	$(P_d/P_s)^2$	0,8×(P_d/P_s)	Q_k/Q_k^{max}	Q_k (m^3/dan)
193,5	1	0,2	1	0,8	0	0
155	0,801034	0,160207	0,641655	0,513324	0,326469	18,40537
150	0,775194	0,155039	0,600925	0,48074	0,364221	20,53368
140	0,723514	0,144703	0,523473	0,418778	0,436519	24,60963
135	0,697674	0,139535	0,48675	0,3894	0,471065	26,55726
130	0,671835	0,134367	0,451362	0,361089	0,504544	28,44466
120	0,620155	0,124031	0,384592	0,307674	0,568295	32,03878
110	0,568475	0,113695	0,323164	0,258531	0,627773	35,39198
100	0,516796	0,103359	0,267078	0,213662	0,682978	38,50428
90	0,465116	0,093023	0,216333	0,173067	0,73391	41,37566
80	0,413437	0,082687	0,17093	0,136744	0,780569	44,00612
70	0,361757	0,072351	0,130868	0,104695	0,822954	46,39568
60	0,310078	0,062016	0,096148	0,076918	0,861066	48,54432
50	0,258398	0,05168	0,066769	0,053416	0,894905	50,45205
40	0,206718	0,041344	0,042732	0,034186	0,92447	52,11886
30	0,155039	0,031008	0,024037	0,01923	0,949763	53,54477
20	0,103359	0,020672	0,010683	0,008546	0,970782	54,72976
10	0,05168	0,010336	0,002671	0,002137	0,987527	55,67384
5	0,02584	0,005168	0,000668	0,000534	0,994298	56,05553
0	0	0	0	0	1	56,377

Na osnovu proračuna davanja bušotine iz tablice 3-2. pri određenim vrijednostima dinamičkog tlaka na dnu bušotine, za bušotinu X-1 je kreirana indikatorska krivulja prikazana na slici 3-1. iz koje se može odrediti dnevno davanje bušotine X-1, za određenu depresiju.



Slika 3-1. Indikatorska krivulja bušotine X-1

Koristeći parametre iz tablice 3-1. računa se indeks proizvodnosti prema jednadžbi (Čikeš, 2015):

$$J = \frac{Q_k}{P_s - P_d} \tag{3-2}$$

J – indeks proizvodnosti, m^3/dan/bar

Q_k – davanje bušotine, m^3/dan

P_d – dinamički tlak na dnu bušotine, bar

P_s – statički tlak na dnu bušotine, bar

$$J = \frac{21{,}2}{193{,}5 - 148{,}4}$$

$$J = 0{,}47 \text{ m}^3\text{/dan/bar}$$

Dobiveni indeks proizvodnosti pokazuje da će se proizvodnost bušotine povećati za 0,47 m^3/dan za svako povećanje depresije, odnosno smanjenje dinamičkog tlaka na dnu bušotine za jedan bar.

4. UGRADNJA DUBINSKE SISALJKE NA KLIPNIM ŠIPKAMA

S ciljem optimizacije pridobivanja nafte (kapljevine), povećanja energetske učinkovitosti te smanjenja troškova održavanja na proizvodnoj bušotini X-1 ugrađena je oprema za podizanje ležišnog fluida korištenjem dubinskih sisaljki.

4.1. Kapitalni remont opreme

Kapitalni remont opreme podrazumijeva zamjenu proizvodne opreme u cilju promjene načina podizanja kapljevine. Tijekom izvođenja kapitalnog remonta opreme (KRO) obavljaju se sljedeće aktivnosti (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- bušotina je ugušena slojnom vodom,
- obavljena je demontaža erupcijskog uređaja, te je deaktiviran paker,
- ugrađen je preventerski sklop,
- izvađena je postojeća proizvodna oprema (plinski ventili),
- bušotina je pročišćena do dna,
- ugrađena je nova proizvodna oprema (dubinska sisaljka na klipnim šipkama),
- obavljena je demontaža preventerskog sklopa, aktiviran anker te montiran erupcijski uređaj,
- ugrađena je dubinska sisaljka na klipnim šipkama.

4.2. Podzemna oprema

Po završetku pripremnih radova, vađenja postojeće proizvodne opreme i pročišćavanja proizvodne kolone, u bušotinu se ugrađuje proizvodna oprema koja je prikazana u tablici 4-1. i na slici 4-1.

Za podzemno opremanje bušotine X-1 koristi se sljedeća oprema (Zelić i Čikeš, 2006):

- uzlazne cijevi (tubing),
- glatka šipka,
- klipne šipke,
- dubinska sisaljka,
- sidreni paker (anker),
- dubinski odvajač plina (plinsko sidro).

4.2.1. Uzlazne cijevi (tubing)

Za podizanje kapljevine pomoću dubinskih sisaljki upotrebljavaju se uzlazne cijevi izrađene prema API standardima, promjera 73,02 mm ($2^{7}/_{8}$") i 60,3 mm ($2^{3}/_{8}$"), u kvaliteti N-80 i J-55, te NU (*engl. Non-Upset*) i EU (*engl. External-Upset*) tipova spojnica. NU spojnica bez ojačanja ima deset koraka okruglog navoja na 25,4 mm (1") duljine, a čvrstoća spojnice je manja od čvrstoće tijela cijevi. EUE tip spojnice s vanjskim ojačanjem ima osam okruglih navoja na 25,4 mm (1") duljine, te je kod nje čvrstoća spojnice veća od čvrstoće tijela cijevi. Uzlazne cijevi su prilikom rada izložene promjenljivim naprezanjima. Sile koje djeluju na uzlazne cijevi su vlastita težina i tlak stupca kapljevine, a u slučaju loma klipnih šipki i težina preostalih klipnih šipki u uzlaznim cijevima (Matanović i Moslavac, 2011).

4.2.2. Klipne šipke

Klipne šipke služe za vezu pogonskog sustava s klipom dubinske sisaljke. Izrađuje se prema API standardu od visoko kvalitetnog čelika otpornog na kiseline. U bušotini se primjenjuju klipne šipke duljine 7,62 m (25 ft) i promjera: 15,88 mm ($^{5}/_{8}$"), 19,05 mm ($^{3}/_{4}$"), 22,22 mm ($^{7}/_{8}$"). Kako bi se smanjilo opterećenje tereta na klipne šipke i uštedjelo na materijalu proračunava se odgovarajuća kombinacija promjera klipnih šipki u ovisnosti o dubini ugradnje i promjeru dubinske sisaljke, odnosno o količini kapljevine koja se crpi. Pri odabiru kombinacije promjera nužno je zadovoljiti uvjet da stvarno naprezanje u šipkama bude u granicama dozvoljenih naprezanja (Matanović i Moslavac, 2011).

4.2.3. Dubinska sisaljka

Dubinske sisaljke rade na sljedećem principu: prilikom kretanja klipa prema dolje neposredno do dna hoda, tlačni ventil je otvoren i fluid se kreće prema gore i ulazi u klip sisaljke, dok je usisni ventil zatvoren i preuzima na sebe cijelo opterećenje fluida u tubingu. Pri kretanju klipa prema gore tlačni ventil se zatvara, a usisni ventil otvara i omogućava utok fluida iz ležišta u cilindar sisaljke. Nakon toga se proces ponavlja i dopušta pretakanje fluida iz sisaljke kroz tlačni ventil u tubing sve do površine. Sve se to odvija u jednom hodu pogonskog motora na površini koji pokret prenosi pomoću glatke šipke, te u nastavku pomoću klipnih šipki. Usisni i tlačni ventili rade na principu kuglice i sjedišta (Zelić i Čikeš, 2006).

Promjer i duljina dubinske sisaljke određen je prema unaprijed definiranim količinama davanja bušotine.

U bušotinu X-1 ugrađena je dubinska sisaljka API oznake 25-200-RWAM-24-5 (-2) gdje oznake znače:

- 25 – oznaka za vanjski promjer uzlaznog niza koji je 73,02mm ($2^{7}/_{8}$"),
- 200 – oznaka za promjer metalnog klipa koji iznosi 50,8 mm (2"),
- RWAM – oznaka za tip sisaljke: Usadna sisaljka, nepokretan cilindar s tankom stijenkom, sidrenje na vrhu, mehanički sklop za sidrenje,
- 24 – oznaka za duljinu cilindra koja iznosi 731,52 cm (24 ft),
- 5 – oznaka za duljinu klipa koja iznosi 152,4 cm (5ft),
- -2 – oznaka za zazor između cilindra i klipa koji iznosi 0,0508 mm (0,002").

4.2.4. Sidreni paker (anker)

Kod podizanja kapljevine pomoću dubinskih sisaljki u bušotinama dolazi do savijanja uzlaznih cijevi što dovodi do povećanog trenja spojnica klipnih šipki o unutarnju stjenku uzlaznih cijevi. Stoga se pri dnu niza uzlaznih cijevi ugrađuje sidreni paker (anker), čime se postiže manje trošenje klipnih šipki i uzlaznih cijevi te veća djelotvornost crpljenja. Pri kretanju klipa prema dolje, cijelo opterećenje fluidima podnosi tubing, dok se pri kretanju prema gore dio opterećenja prebacuje na klip i klipne šipke te za posljedicu ima skraćenje tubinga, što bi za neusidreni tubing bilo štetno, te dovelo do gubitka hermetičnosti i puknuća (Matanović, Moslavac, 2011). Prilikom opremanja bušotine X-1 korišten je vadivi paker veličine 45A4 i promjera 139,7 mm ($5^{1}/_{2}$") za raspon zaštitnih cijevi jedinične mase 23,06 kg/m (15,5 lb/ft) – 29,76 kg/m (20 lb/ft) (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

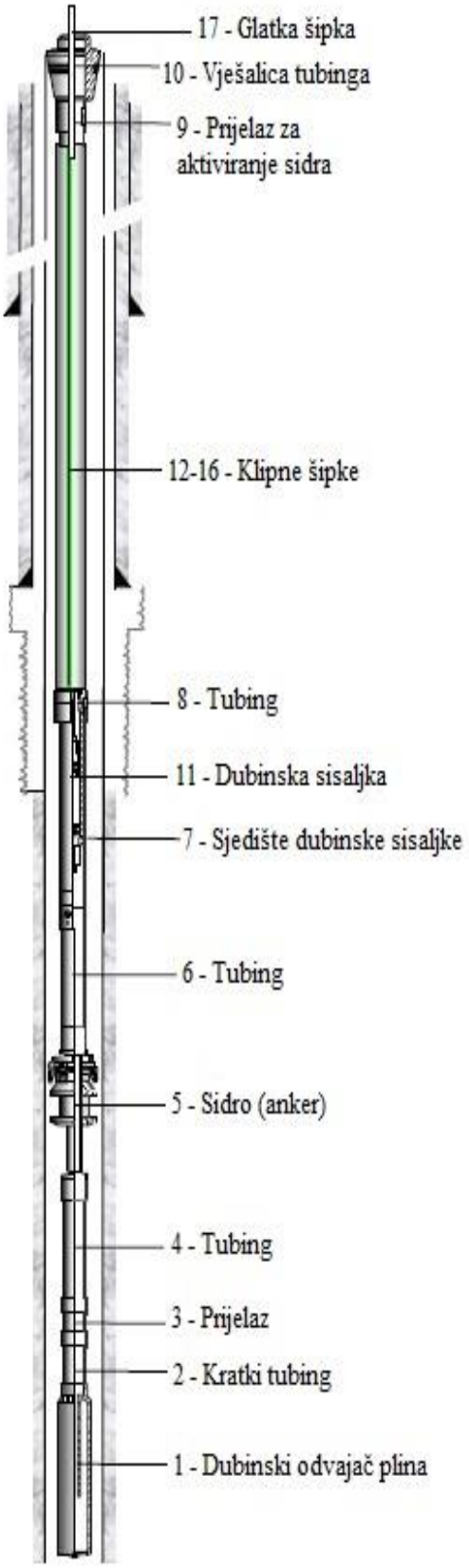
4.2.5. Dubinski odvajač plina

Dubinski odvajač plina se ugrađuje na samom dnu niza uzlaznih cijevi i služi za odvajanje plinovite faze od kapljevine i sprječavanje dotoka plina u dubinsku sisaljku, odnosno za povećanje njene volumetrijske djelotvornosti. Odvojeni plin odvodi se u prstenasti prostor te kroz spoj između uzlazne i zaštitne cijevi u priključni naftovod. Danas u praksi postoji više oblika konstrukcije plinskih sidara kao što su: prirodno ili uronjeno

plinsko sidro, jednodijelno plinsko sidro, plinsko sidro s pakerom te tanjurasto i vijčano plinsko sidro (Zelić i Čikeš, 2006).

Tablica 4-1. Sastav ugrađene proizvodne opreme (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Pozicije na slici 4-1.	Oprema	Kom.	Duljina (m)	Dubina (m)
1.	Dubinski odvajač plina	1	8,51	1238,23
2.	Kratki tubing 60,3 mm ($2^3/_8$")	1	0,55	1229,72
3.	Prijelaz 60,3 mm × 73,02 mm	1	0,17	1229,17
4.	Tubing 73,02 mm ($2^7/_8$") EU	1	9,37	1229,00
5.	Sidro (anker) NP-1, 139,7 mm ($5^1/_2$")	1	1,26	1219,63
6.	Tubing 73,02 mm ($2^7/_8$") EU	1	9,56	1218,37
7.	Sjedište dubinske usadne sisaljke	1	0,19	1208,81
8.	Tubing 73,02 mm ($2^7/_8$") EU	128	1208,30	1208,62
9.	Prijelaz za aktiviranje sidra NP-1 88,9 mm × 73,02 mm	1	0,12	0,32
10.	Vješalica tubinga 88,9 mm	1	0,20	0,20
11.	DUS- 25-200-RWAM-24-5 (-2)	1		1210,96
12.	Klipne šipke 15,88 mm ($^5/_8$") s centralizerima	3	22,40	1210,96
13.	Klipne šipke 15,88 mm ($^5/_8$")	21	160,00	1188,56
14.	Klipne šipke 19,05 mm ($^3/_4$")	66	501,60	1028,56
15.	Klipne šipke 22,22 mm ($^7/_8$")	68	518,16	526,96
16.	Klipna kratka šipka 22,225 mm ($^7/_8$") (L = 0.60 m) + rotirajući centralizer (L = 0,30 m)	1	0,90	8,80
17.	Glatka šipka 32 mm ($1^1/_4$")	1	7,90	7,90



Slika 4-1. Sastav ugrađene proizvodne opreme u bušotini X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

5. LINEARNI SUSTAV PODIZANJA FLUIDA DUBINSKOM SISALJKOM

U ovom poglavlju je opisana ugradnja linearnog sustava podizanja fluida dubinskom sisaljkom ili LRP uređaj. LRP uređaj je strojni mehanizam koji omogućava pretvaranje kružnog gibanja pogonskog motora u linearno gibanje klipa dubinske sisaljke i klipnih šipki. Izgled trenutnog stanja bušotine X-1 nakon KRO i ugradnje LRP uređaja prikazan je na slici 5-1.

Slika 5-1. Prikaz površinskog dijela opreme bušotine X-1 nakon ugradnje LRP uređaja

LRP sustav upravlja radom bušotine preko naprednog, vektorski upravljanog, pretvarača frekvencije i napona čime omogućuje izravnu kontrolu te upravljanje magnetskim tokom motora. Na taj način sustav iskorištava rotaciju motora unatrag te pruža mogućnost servo pozicioniranja pogona, kako bi izravno kontrolirao glatku šipku koristeći zupčasti prijenos zubna letva – zupčanik. Takvo rješenje pruža brojne pogodnosti eliminirajući velike mehaničke inercije (Beck et al., 2006). LRP sustav se postavlja izravno na bušotinu. Glatka šipka prolazi kroz kanal unutar cijevi, a pričvršćena je konvencionalnom brtvenicom. Sustav je pogonjen indukcijskim motorom, pričvršćen s mehanizmom zubna letva - zupčanik preko reduktora te pomiče zubnu letvu u ciklusima dolje – gore. Na zubnu letvu je pričvršćena glatka šipka, a na nju niz klipnih šipki i dubinska sisaljka. Na ovaj način je omogućen tok fluida kroz uzlazne cijevi do ušća bušotine i dalje do sabirno - otpremnog sustava. Zubna letva se podmazuje pri svakom ciklusu uranjanjem u uljnu posudu.

Radi postizanja visoke učinkovitosti sustava bez korištenja masivnih utega, koji se koriste u konvencionalnim sustavima, koriste se linijsko-regenerativni pogon i motor visokih performansi. Budući da je jednostavan za transport, LRP sustav se lako može premjestiti i koristiti na drugim bušotinama. Ugradnja LRP sustava je brza i jednostavna, pa jedinice mogu biti ugrađene i potpuno operativne u roku od nekoliko sati. Brzina uronjene sisaljke u bušotini može se preciznije kontrolirati zbog niske inercije mehanizma i konstantnog odnosa između motora i brzine glatke šipke. Brzina klipa sisaljke se vrlo brzo smanjuje prije udara u tekućinu, prigušujući tako štetne utjecaje udarnih opterećenja na klip, sisaljku i šipku. Nakon kontakta s tekućinom brzina klipa sisaljke se povećava kako bi se povećala količina pridobivanja. Sustav može raditi na brzinama manjim od 1 hod/min bez zaustavljanja motora, čime se osigurava optimalna proizvodnja fluida (Beck et al., 2006).

Optimizacija rada linearnog sustava za podizanje kapljevine pomoću dubinskih sisaljki pri zadanim uvjetima, koji se odnose na količinu pridobivanja kapljevine, dubinu ležišta, količinu plina u nafti i na fizikalno - kemijske značajke kapljevine, izvodi se (Beck et al., 2006):

- promjenom broja hodova i duljine hoda glatke šipke na zubnoj letvi,
- promjenom promjera klipa dubinske sisaljke,
- promjenom dubine ugradnje dubinske sisaljke,
- primjenom dubinskog odvajača plina ili pješčanog filtra.

Osnovne značajke linearnog sustava podizanja fluida dubinskom sisaljkom i prijenosa podataka za kontrolu i praćenje rada bušotine su (Beck et al., 2006):

- podzemno proizvodno opremanje bušotine je identično kao kod proizvodnje fluida njihalicom, a nadzemno opremanje se razlikuje u tome što se umjesto njihalice ugrađuje sustav koji se sastoji od montažnog postolja koje se instalira na prirubnicu erupcijskog uređaja, elektromotora, glatke šipke i zupčastog prijenosa kojim se kružno gibanje motora pretvara u linearno gibanje glatke šipke, a samim time i klipnih šipki(za razliku od njihalice koje imaju prijenos remenicama);
- sustav ima mogućnost potpuno autonomnog upravljanja radom bušotine (lokalno instalirani upravljački uređaji);
- sustav ima mogućnost praćenja parametara rada sisaljke (*engl. downhole card, surface card*);
- sustav može imati bežični prijenos podataka do kontrolne stanice (mjerna, sabirna ili otpremna stanica, kontrolni toranj);
- jednostavne je i lagane konstrukcije s malim dimenzijama;
- jednostavan transport i montaža;
- jeftino održavanje i ušteda energije;
- tihi rad i sigurnost za okoliš.

5.1. Odabir odgovarajućeg LRP uređaja

Osnovni ulazni podaci (*engl. input parameters*) potrebni za odabir LRP sustava i određivanja njegovih značajki su (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- željeno davanje bušotine,
- dinamička razina kapljevine u prstenastom prostoru,
- tlak na uzlaznim cijevima (tubingu),
- gustoća nafte,
- gustoća vode,
- relativna gustoća plina (zrak=1,0).

Na osnovu ulaznih podataka izračunava se (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- kapacitet dubinske sisaljke,
- maksimalno opterećenje glatke šipke,
- maksimalno naprezanje klipnih šipki,
- minimalno naprezanje klipnih šipki,
- maksimalni zakretni moment,
- potrebna snaga elektromotora.

LRP je projektiran i izrađen prema tehničkoj dokumentaciji proizvođača Unico. Odabrani model za bušotinu X-1 je „LRP model L760Z-286E-086“ sa svojstvima prikazanim u tablici 5-1.

Tablica 5-1. Glavna svojstva izabranog modela LRP uređaja (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Redni broj	Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
1.	Snaga elektromotora	44,7	kW
2.	Maksimalni zakretni moment	8609,4	Nm
3.	Minimalan broj hodova u minuti	1,4	min^{-1}
4.	Maksimalan broj hodova u minuti	24	min^{-1}
5.	Maksimalna nosivost glatke šipke	7298	kg
6.	Maksimalna duljina hoda glatke šipke	2,184	m
7.	Maksimalno naprezanje klipnih šipki	8537	N/m^2

5.2. Izračun kapaciteta dubinske sisaljke

Jednadžba za proračun stvarne dobave dubinske klipne sisaljke glasi (Zelić i Čikeš, 2006):

$$Q_k = 1440 \times A_p \times S_p \times N \times \eta \qquad (5\text{-}1)$$

gdje su:

Q_k – kapacitet dubinske sisaljke, m^3/dan,

A_p – površina poprečnog presjeka klipa, m^2,

S_p – efektivna duljina hoda klipa, m,

N – broj hodova u minuti, min^{-1},

η – faktor iskoristivosti (volumetrijska učinkovitost), %

Volumetrijska učinkovitost je iznimno važan čimbenik pri projektiranju, koji je nepoznat prije stvarnog uspostavljanja proizvodnje. Volumetrijska učinkovitost može značajno varirati zbog utjecaja mnogih čimbenika: svojstva fluida koji se proizvodi, tipa dubinske sisaljke, površinskih uvjeta pri proizvodnji, te utjecaja plina na proizvodnju. Posebno je značajan utjecaj plina, pa će ležišta s plinovitim ili pjenušavim režimom protjecanja ostvarivati volumetrijske učinkovitosti od 25% do 50%. Proizvodnja uz dobro odvajanje plina na dnu bušotine ostvarivat će se uz volumetrijsku učinkovitost od 50% do 70%. Za sustave s dobrim odjeljivanjem plina i dubokim uranjanjem dubinske sisaljke, volumetrijska učinkovitost je od 70% do 80%, dok je za naftne bušotine s malim udjelom plina i dubokim uranjanjem sisaljke moguće ostvariti i 100%-tnu volumetrijsku učinkovitost (Matanović i Moslavac, 2011).

Nakon odabira dubinske sisaljke, LRP uređaja, određivanja dubine postavljanja dubinske sisaljke na temelju izmjerenog dotoka i razine kapljevine u prstenastom prostoru, moguće je izračunati kapacitet dubinske sisaljke. U proračunu efektivne duljine hoda klipa uzeta je u obzir činjenica da je ugrađen sidreni paker (anker), zbog čega ne dolazi do dodatnog istezanja tubinga. Također u proračunu je uzeta operativna brzina od 9 hodova u minuti i faktor iskoristivosti od 85%.

Ulazni podaci za proračun kapaciteta dubinske sisaljke:

A_p = 0,002027 m^2

S_p = 1,7697 m

N = 9

η = 0,85

$$Q_k = 1440 \times 0{,}002027 \times 1{,}7697 \times 9 \times 0{,}85$$

$$Q_k = 39{,}51 \text{ m}^3\text{/dan}$$

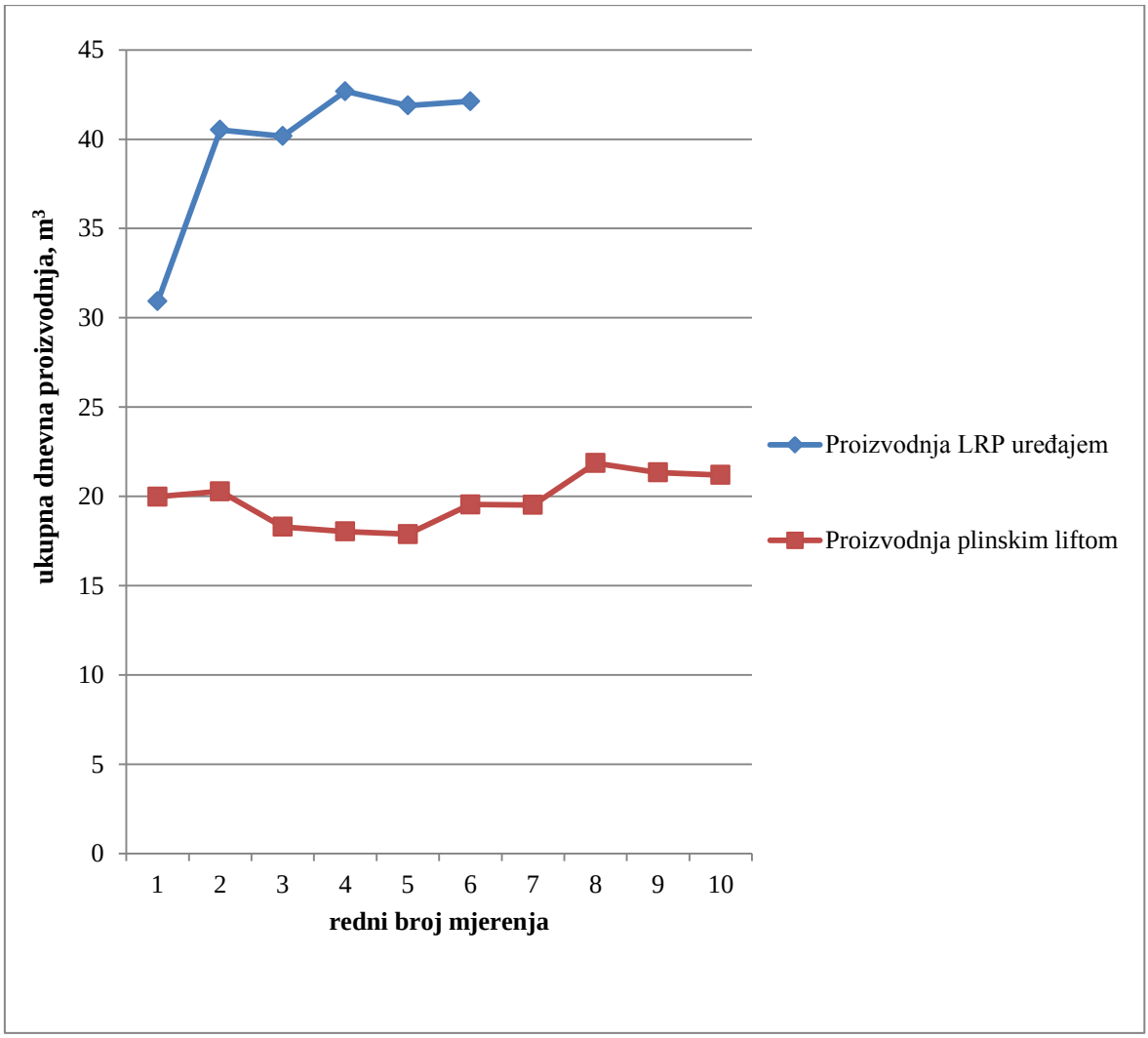
5.3. Proizvedena količina kapljevine iz bušotine X-1 nakon ugradnje dubinske sisaljke

Prikaz proizvodnih podataka bušotine X-1 nakon ugradnje sustava linearno pogonjene dubinske klipne sisaljke je prikazan u tablici 5-2.

Tablica 5-2. Mjerenja proizvodnje dubinskom sisaljkom pogonjenom LRP uređajem na bušotini X-1 (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2018)

Redni broj mjerenja	P_t bar	P_c bar	Q_{uk} m^3/dan	Q_n m^3/dan	Q_v m^3/dan	W_{uk} %
1.	9-13	3	30,92	16,826	14,094	45,6
2.	13-13,5	3	40,58	20,379	20,201	49,8
3.	10-14	2	40,17	19,015	21,155	52,7
4.	15	2	42,68	21,023	21,657	50,7
5.	12-14	3	41,89	20,5261	21,364	51
6.	11-12	2	42,12	20,555	21,565	51,2

Usporedba prethodne proizvodnje plinskim liftom s proizvodnjom linearno pogonjenom dubinskom sisaljkom prikazana je na slici 5-2.



Slika 5-2. Proizvodni rezultati prije i nakon ugradnje dubinske sisaljke

Na slici 5-2. vidljivo je znatno povećanje ukupne dnevne proizvodnje kapljevine iz bušotine X-1 nakon ugradnje linearno pogonjene dubinske sisaljke.

5.4. Nadzemna oprema bušotine X-1

Nadzemnu opremu bušotine X-1 čine (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

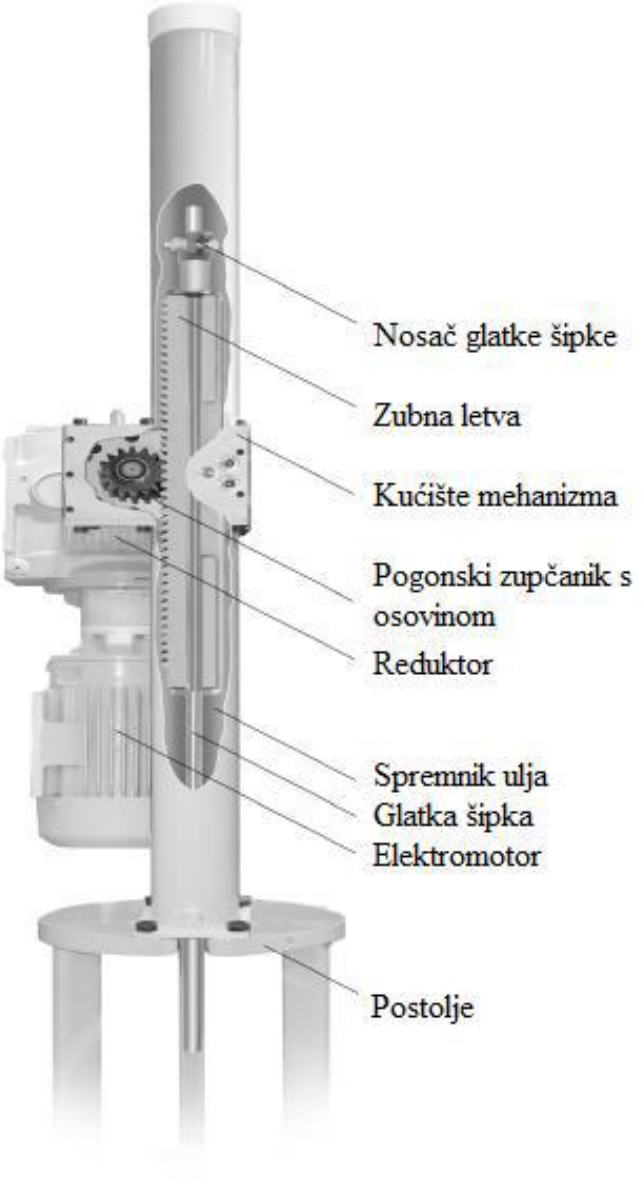
1. linearni sustav podizanja fluida dubinskom sisaljkom, LRP uređaj,
2. erupcijski uređaj,
3. brtvenica glatke šipke,
4. nadzemni dio priključnog naftovoda,

5.4.1. LRP uređaj

LRP je uređaj koji omogućuje podizanje kapljevine iz ležišta tako što s površine osigurava naizmjenično vertikalno kretanje niza klipnih šipki i klipa dubinske sisaljke (Beck et al., 2006). To je strojni mehanizam koji omogućava pretvaranje kružnog gibanja pogonskog motora u linearno gibanje klipa dubinske sisaljke i klipnih šipki.

Glavni strojarski dijelovi LRP-a su (slika 5-3.):

- postolje,
- elektromotor,
- glatka šipka,
- spremnik ulja,
- reduktor,
- pogonski zupčanik s osovinom,
- zubna letva,
- nosač glatke šipke,
- kućište mehanizma.



Slika 5-3. Prikaz glavnih dijelova LRP uređaja (Beck et al., 2006)

A) Postolje

Postolje LRP-a nosi kompletnu nadgradnju i određuje uzdužnu i poprečnu geometriju LRP-a u odnosu na centar bušotine, te se instalira izravno na prirubnicu erupcijskog uređaja.

B) Elektromotor

LRP se pogoni pomoću trofaznih asinkronih elektromotora. Snaga elektromotora ovisi o količini fluida koji će proizvoditi i dubini ugradnje sisaljke, odnosno o efektivnoj

visini dizanja kapljevine. Ponekad, uglavnom na malim naftnim poljima, moguće je za pogon LRP koristiti plinski motor, koji kao pogonsko gorivo koristi plin iz prstenastog prostora bušotine. Uključivanje i isključivanje elektromotora te kontrola promjenjive brzine LRP uređaja obavlja se iz elektrorazvodnog ormarića na bušotinskom krugu (Beck et al., 2006).

C) Glatka šipka i nosač glatke šipke

Glatka šipka, ili često nazivana polirana šipka, prolazi kroz kanal na zubnoj letvi i pričvršćena je na njenom vrhu s nosačem glatke šipke. Zubnu letvu pokreće pogonski zupčanik, a njegovo kružno gibanje se prenosi na zubnu letvu, koja se linearno giba i ujedno pomiče glatku šipku (Beck et al., 2006). Ona preuzima najveću nosivost i izložena je najvećim opterećenjima. Glatka šipka je idealnog okruglog presjeka i idealne glatkoće, izrađena od hladno vučenog visokokvalitetnog čelika s poliranom vanjskom površinom radi boljeg brtvljenja u glavi erupcijskog uređaja bušotine gdje je izložena trenju. Postoje i glatke šipke izrađene od fiberglasa koje se upotrebljavaju u korozivnim uvjetima te šuplje glatke šipke koje se upotrebljavaju u uvjetima kada je kroz njih potrebno utiskivati kemijska sredstva radi sprječavanja procesa korozije ili utiskivanja lakše nafte kako bi se lakše podigla teško pokretljiva nafta. Promjer, duljina i kvaliteta materijala od kojeg je izrađena glatka šipka su određeni API normom (Matanović i Moslavac, 2011). Na bušotini se koristi glatka šipka promjera 31,75 mm ($1^1/_4$") i duljine 7,925 m (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

D) Spremnik ulja

U spremniku je ulje koje je potrebno za konstantno podmazivanje zubne letve i pogonskog zupčanika kako bi se spriječilo trenje i zagrijavanje prilikom kretanja zubne letve. Donji dio zubne letve se tijekom silaznog dijela hoda uranja u ulje (Beck et al., 2006).

E) Reduktor

Reduktor služi za prijenos snage s pogonskog motora, kao i redukciju broja okretaja pogonskog motora na broj okretaja izlaznog vratila. Regulacija broja hodova sisaljke obavlja se zbog postizanja željenog kapaciteta.

F) Pogonski zupčanik s osovinom i zubnom letvom

Kružno gibanje motora se uz pomoć pogonskog zupčanika i zubne letve pretvara u linearno gibanje glatke šipke. Zahvatom pogonskog zupčanika u nazubljenu letvu ostvaruje se kretanje glatke šipke, klipnih šipki i dubinske sisaljke. Ovo kretanje je elektronski kontrolirano te samim tim funkcionalnije u odnosu na upravljanje radom njihalice (Beck et al., 2006).

G) Kućište mehanizma

Kućište mehanizma je malih dimenzija i zajedno s postoljem se može postaviti na bilo koju lokaciju. Kućište je lagano za transport i montažu te se bojanjem prilagođava okolini.

5.4.2. Erupcijski uređaj

Erupcijski uređaj se sastoji od pokrovne prirubnice, križnog komada, brtvenice glatke šipke, spoja između uzlazne i zaštitne cijevi te bočnih zasuna na križnom komadu i prstenastom prostoru bušotine. Na križnom komadu nalaze se i priključci za manometar (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

5.4.3. Brtvenica glatke šipke

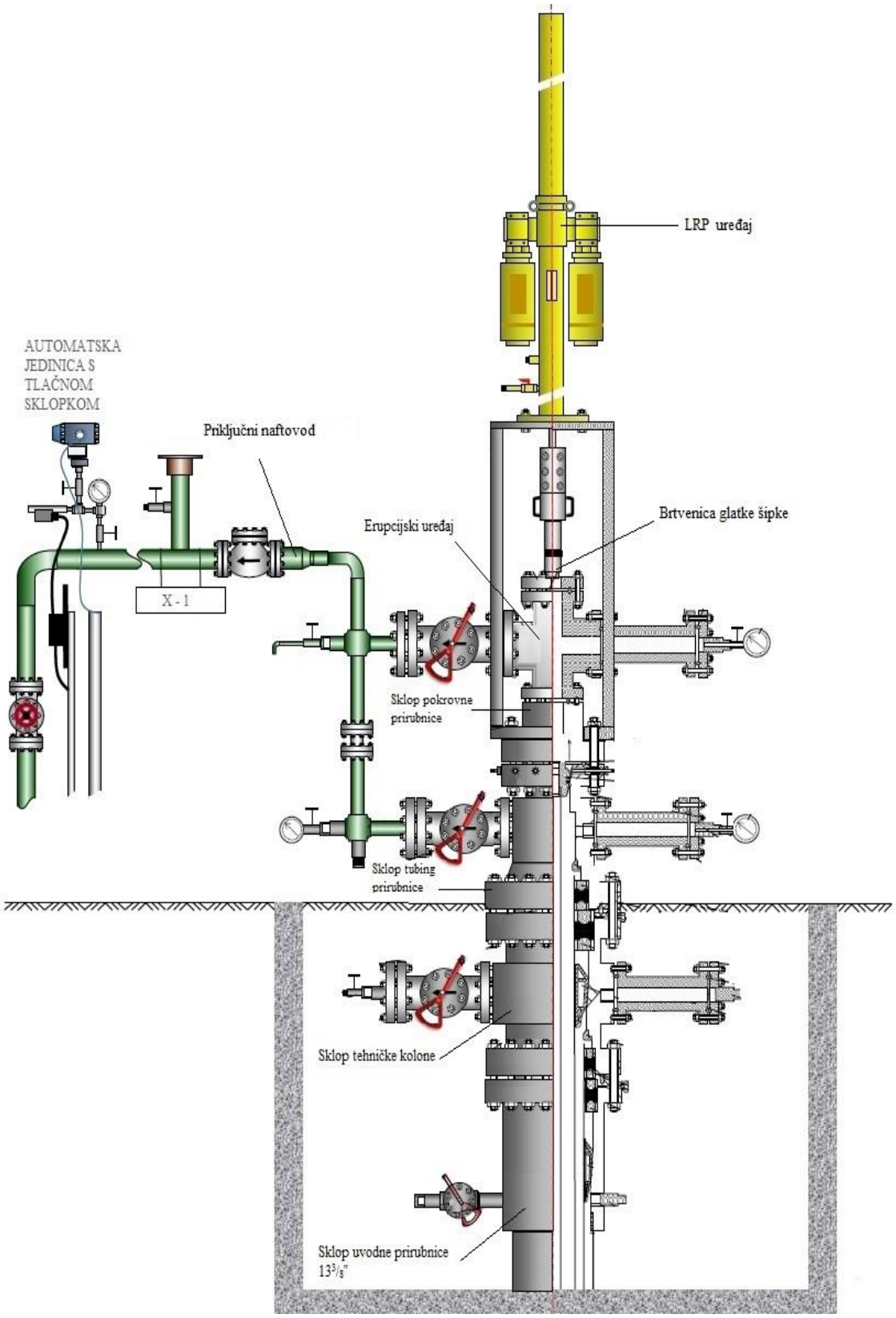
Brtvenica glatke šipke se nalazi na vrhu erupcijskog uređaja kroz koji prolazi glatka šipka. Brtvenica, uz glatku šipku, omogućava hermetičnost spoja i ne dozvoljava propuštanje pridobivenog fluida izvan zatvorenog sustava.

Redovnom kontrolom, dotezanjem i blagovremenom zamjenom brtvećih dijelova, osigurava se sigurnost pridobivanja fluida (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

5.4.4. Nadzemni dio priključnog naftovoda

Priključni naftovod je izrađen od bešavnih čeličnih cijevi vanjskog promjera 88,9 mm ($3^1/_2$"), debljine stjenke 4,8 mm, kvalitete čelika Grade B, prema normi API 5L. Sva zaporna armatura izvedena je u klasi 300, što odgovara maksimalnom radnom tlaku od 50 bar. Na nadzemnom dijelu naftovoda postavljen je protupovratni ventil, uređaj za ubacivanje čistača parafina (AK), priključci za kontaktni manometar ili tlačnu sklopku i priključak za doziranje kemikalija (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Izgled nadzemnog dijela bušotine X-1 s pripadnom opremom prikazan je na slici 5-4.



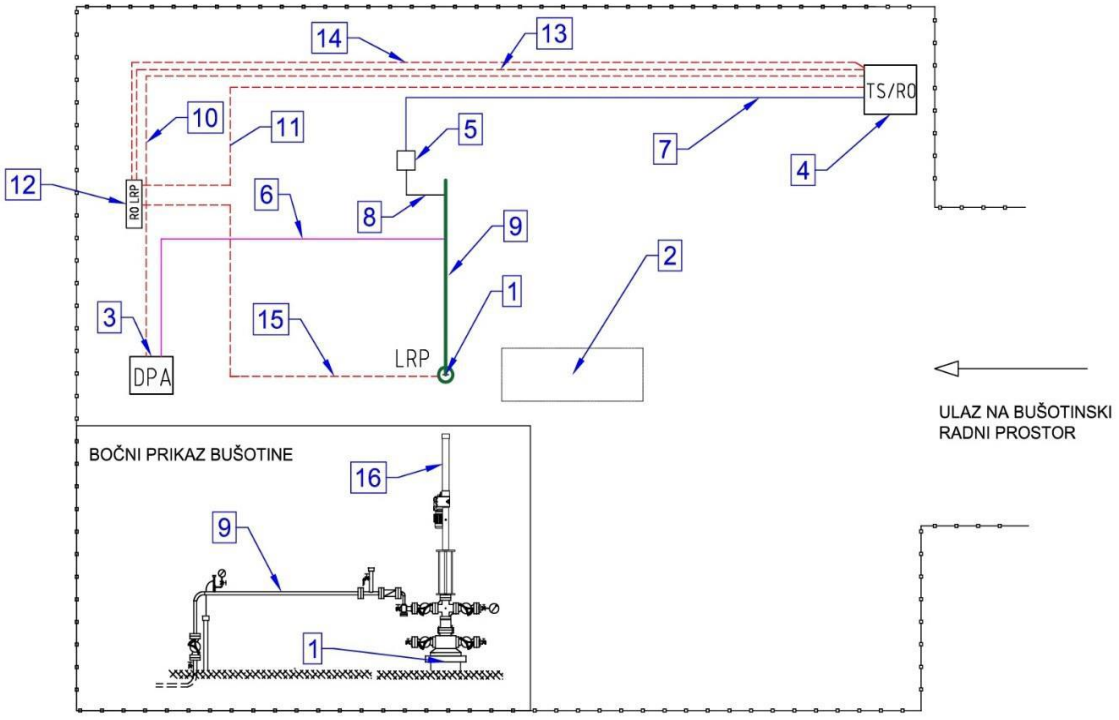
Slika 5-4. Prikaz tehničkog stanja nadzemnog dijela bušotine X-1 nakon ugradnje LRP sustava (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

5.5. Bušotinski radni prostor

Na bušotinskom krugu bušotine X-1 također se nalaze (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- trafostanica ili rasklopni električni ormarić,
- uređaj za doziranje kemikalija.

Na slici 5-5. prikazan je bušotinski radni prostor bušotine X-1 s pripadnom opremom.



1 - BUŠOTINA
2 - TEMELJ ZA REMONTNO POSTROJENJE
3 - AGREGAT ZA DOZIRANJE KEMIKALIJA (DPA)
4 - TRANSFORMATORSKA STANICA (TS) ili RAZVODNI ORMAR (RO)
5 - TLAČNA SKLOPKA
6 - DOVOD KEMIKALIJA IZ UREĐAJA ZA DOZIRANJE U BUŠOTINU I PRIKLJUČNI CJEVOVOD
7 - EL. KABEL TLAČNE SKLOPKE
8 - SPOJ TLAČNE SKLOPKE S PRIKLJUČNIM CJEVOVODOM
9 - PRIKLJUČNI NAFTOVOD
10 - EL. KABEL NAPAJANJA DPA IZ TS ili RO
11 - EL. KABEL NAPAJANJA ELEKTROMOTORA LRP UREĐAJA IZ TS ili RO
12- RPC ORMAR
13 - EL. KABEL SIGNAL RADA LRP UREĐAJA u TS ili RO
14 - EL. KABEL NAPAJANJA KOMUNIKACIJSKE OPREME IZ TS ili RO
15 - EL. KABEL NAPAJANJA ELEKTROMOTORA LRP UREĐAJA IZ RPC ormara
16 - LRP

Slika 5-5. Shematski prikaz bušotinskog radnog prostora bušotine X-1 na kojoj je ugrađen LRP (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017)

Na bušotinskom radnom prostoru bušotine X-1 izgrađeni su temelji dimenzija 2,5 x 1,5 m za smještaj razvodnog ormara: frekvencijskog pretvarača i LRP regulatora, elektroenergetske i instrumentacijske opreme razvodnog ormara (RO) X-1 te razvodnog ormara komunikacijske opreme. Unutar bušotinskog radnog prostora bušotine X-1 izgrađeni su i kabelski rovovi za polaganje elektroenergetskih, signalnih i komunikacijskih kabela te traka uzemljivača (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Ugradnjom linearnog sustava podizanja fluida dubinskom sisaljkom na proizvodnoj bušotini X-1 stvorio se zahtjev za ugradnjom adekvatnog tehničko – tehnološkog rješenja elektroenergetskih instalacija. Na bušotinskom radnom prostoru bušotine X-1 nalazi se transformatorska stanica TS X-1 10/0,4kV, 100kVA. Napajanje linearnog sustava podizanja ostvareno je iz novog razvodnog ormara RO X-1 koji je spojen kabelom na transformatorsku stanicu (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Linearni sustav podizanja opremljen je svojim razvodnim ormarom u kojem je smješten kontroler i frekvencijski pretvarač, koji upravljaju radom elektromotora. Razvodni ormar linearnog sustava podizanja smješten je odmah do RO X-1 i spojen je kabelom, koji prolazi kroz zaštitnu cijev u temelju (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Kabeli od razvodnog ormara linearnog sustava podizanja do elektromotora položeni su u zemlju. S obzirom na to da se koristi frekvencijski pretvarač, koji generira pulsno-širinski napon, moguća je pojava smetnji koje je potrebno minimalizirati primjenom oklopljenog kabela. Kabelski izvodi iz zemlje su dodatno mehanički zaštićeni cijevima i pričvršćeni na nosač ormara, a na strani elektromotora uz nosač konstrukcije na bušotinskoj glavi (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Novi niskonaponski razvodni ormar RO X-1 prilagođen je potrebama postojećeg stanja, tj. izvod od dozirno-pumpnog agregata (DPA) je već prethodno bio spojen na transformatorsku stanicu, pa nije potrebno njegovo spajanje u razvodni ormar.

U razvodnom ormaru nalazi se priključak za mjerne pretvornike tlaka i temperature. Ormar je opremljen ključem i bravom, kako bi se onemogućio neovlašten pristup sklopnim elementima. Uzemljenje nosača novih ormara povezano je na postojeće uzemljenje na bušotinskom radnom prostoru. Izgled razvodnog ormara te LRP regulatora na bušotini X-1 prikazan je na slici 5-6.

Slika 5-6. Razvodni ormar i LRP regulator na bušotini X-1

U svrhu unapređenja rada dubinske sisaljke, tj. potrošene električne energije, koja se uzima iz mreže, na šipku dubinske sisaljke se dograđuje linearni prijenos sa elektromotorom znatno niže snage u odnosu na potencijalni elektromotor njihalice. Upotrebom frekvencijskog pretvarača unutar kontrolera LRP-a, moguće je energiju spuštanja šipke spremiti u istosmjerni međukrug frekvencijskog pretvarača, a u slučaju da ta energija izazove povišenje napona u istosmjernom međukrugu, višak će se potrošiti na kočnom otporniku (Beck et al., 2006). Taj dio energije se neće koristiti iz mreže, te se na taj način dobiva ušteda u potrošnji električne energije.

Energetski rezultati ugradnje linearnog sustava podizanja su (Beck et al., 2006):

- nema vraćanja energije, odnosno preuzeta energija je jednaka potrošenoj;
- struja pokretanja elektromotora praktički je jednaka radnoj struji (bez pretvarača je 6 do 7 puta veća od nazivne struje elektromotora);
- reaktivna snaga koju uzima elektromotor iznosi 10% snage koju uzima bez pretvarača te nije potrebna ugradnja kondenzatora za kompenzaciju. Reaktivne struje opterećuju vodove i transformatore i na njima stvaraju radne gubitke.

6. VOĐENJE PROCESA I UPRAVLJANJE

Prilikom rada bušotine opremljene linearnim sustavom podizanja fluida dubinskim sisaljkama s klipnim šipkama, cilj je postići takvu brzinu pridobivanja fluida koja je jednaka pritoku fluida u bušotinu. Takvu brzinu pridobivanja bez regulacije brzine pridobivanja nije moguće postići, zbog toga što se obujamski protok fluida koji pritječe iz ležišta u bušotinu stalno mijenja, a obujam sisaljke je stalno isti. Ako je kapacitet sisaljke manji od pritoka fluida u bušotinu tada se, zbog djelovanja tlaka stupca kapljevine u bušotini, gubi pridobiva količina fluida (manji pritok iz ležišnog sloja).

U slučaju prekapacitirane sisaljke pojavljuju se učestali hidraulički udari na klipne šipke i povećana je potrošnja električne energije. Hidraulički udari su posljedica slučaja kada je obujamski kapacitet sisaljke veći od obujamskog protoka pridobivenog fluida. Tada između klipa i površine fluida u cilindru ostaje prazan prostor, koji se ispunjava plinom. Prilikom kretanja klipa prema dolje, budući da je plin stlačiv, tlačni ventil se ne otvara sve dok ne detektira „udar“ u površinu fluida. U trenutku netom prije otvaranja tlačnog ventila, klipne šipke se drastično naprežu (djelovanje velike sile), dok se prilikom otvaranja naprezanje naglo smanji. Ta pojava traje manje od sekunde, ali uzrokuje znatno povećanje istrošenosti podzemne opreme te smanjivanje njezina vijeka trajanja. Učestalom pojavom hidrauličkih udara može doći do oštećenja ventila dubinske sisaljke, pucanja njezina cilindra ili oštećenja spojnica i tijela klipnih šipki. Ukoliko se razina fluida u tubingu ne poveća, hidraulički udari će se nastaviti. Povećanje razine fluida u bušotini može se postići na više načina: zaustavljanjem dubinske sisaljke na neko vrijeme, smanjivanjem broja hodova u minuti, smanjivanjem hoda klipa ili ugradnjom dubinske sisaljke manjeg obujamskog kapaciteta (Sanchez et al., 2007). U svakom slučaju, kako bi se izbjegle te neželjene pojave na lokaciji bušotine X-1, na kojoj je ugrađen linearni sustav podizanja fluida korištenjem dubinske sisaljke, također je ugrađen i sustav autonomnog nadzora i upravljanja radom te bušotine, čiji su sastavni elementi: lokalni programabilni logički kontroler sa sučeljem (slika 6-1), LCD prikaz praćenih parametara te tipke za izmjenu parametara i lokalno upravljanje, frekvencijski pretvarač elektromotora LRP uređaja kao izvršni element upravljanja djelovanjem na kojemu se mijenja brzina crpljenja i hod klipa dubinske sisaljke, te svi potrebni površinski i dubinski senzori koji će davati ulazne parametre za regulaciju rada linearnog sustava pridobivanja dubinskom klipnom

sisaljkom (osjetnici opterećenja-dinamometri, senzori pozicije, dubinski senzor položaja, te opcionalno dodatni dubinski senzori tlaka, temperature i vibracija klipne šipke).

Slika 6-1. Kontroler s LCD prikazom i tipkama

Takav lokalni nadzorno-upravljački regulator, koji je uz pripadne senzore ugrađen na bušotinskom radnom prostoru bušotine X-1 opremljene LRP-om, nadzire bitne parametre navedene bušotine i sukladno njima upravlja radom LRP uređaja. Regulator omogućava (Beck et al., 2006):

- optimalnu proizvodnju uz minimalne kvarove opreme;
- brzo i točno prepoznavanje problema u bušotini;
- povećanje učinkovitosti cijelog sabirnog sustava crpeći iz ležišta točno onoliko koliko je potrebno da bi se iscrpila sva dostupna kapljevina;
- povećanje vijeka trajanja klipnih šipki, dubinske sisaljke i tubinga eliminirajući hidrauličke udare;

- povezivanje na centralni sustav za nadzor i upravljanje te pohranjivanje kartica dinamograma za daljnju analizu;
- podešavanje graničnih opterećenja za izbjegavanje velikih kvarova površinske i podzemne opreme.

Predviđeni lokalni regulator bušotine X-1 opremljene LRP sustavom konstantno prati ponašanje bušotine i u slučaju prekoračenja graničnih vrijednosti pojedinog parametra bušotine, generira alarm i isključuje linearno pogonjenu dubinsku sisaljku.

Uz navedeni lokalni nadzorno - upravljački regulator na bušotinskom radnom prostoru ugrađeni su sljedeći senzori (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- senzor opterećenja na glatkoj šipki - dinamometar koji mjeri opterećenje na glatkoj šipki pomoću kojeg regulator rada simulira dinamogram pri dubini dubinske sisaljke,
- senzor pozicije – ugrađuje se na glatku šipku dubinske sisaljke i mjeri njezinu poziciju pomoću čega se određuje hod glatke šipke,
- senzor brzine vrtnje elektromotora – senzor radi na principu Hallovog efekta, a služi za upravljanje brzinom vrtnje elektromotora korištenjem frekvencijskog pretvarača.

Uz senzor pozicije, nadzorno – upravljački kontroler LRP-a je u stanju analizirati opterećenje i duljinu hoda glatke šipke u vremenu te na temelju toga upravljati bušotinom. Proračun statusa bušotine odvija se u stvarnom vremenu (*engl. real time*) te se upravljanje obavlja tijekom svakog ciklusa, odnosno prema svakom sljedećem snimljenom dinamogramu.

Uslijed kompleksnog ponašanja kolone klipnih šipki, odnosno zbog velikog broja različitih faktora koji djeluju na vremensku funkciju opterećenja glatke šipke (trenje između klipnih šipki i tubinga, mogućnost povećanog trenja zbog zakrivljenosti bušotine, naslage parafina i kamenca, pojava pijeska, vibracije klipnih šipki) pripadajući površinski dinamogram je često nepravilnog i nepredvidivog oblika što istovremeno utječe na točnost generiranja dubinskog dinamograma rada dubinske sisaljke. Zbog navedenih faktora, očitanje površinskih dinamograma nije potpuno točno i pouzdano, odnosno rad dubinske sisaljke može biti drugačiji od rada koji se čini na površini.

Lokalni nadzorno – upravljački regulator ima implementiranu matematičku metodu simulacije sustava dubinske sisaljke s klipnim šipkama. Drugim riječima, regulator LRP

sustava ima ugrađen sustav za dobivanje dinamograma na svim dubinama unutar bušotine (uključujući i dubinu dubinske sisaljke) iz podataka koji se očitavaju na površini (tzv. „*downhole card*“ metoda).

Metoda tzv. „*downhole card*“ optimizacije rada bušotine opremljene dubinskom sisaljkom zasniva se na mjerenju dinamometrom, odnosno na mjerenjima senzora opterećenja koji je instaliran na vrhu glatke šipke u posebno izrađeni uložni blok pri čemu se cjelokupno opterećenje glatke šipke prenosi na dinamometar. Dinamometar mjeri opterećenje na glatkoj šipki tijekom radnog ciklusa pri čemu se, u ovisnosti o radu dubinske sisaljke, dobije tzv. dinamogram. Korištenjem ove metode moguće je egzaktno odrediti dubinske uvjete iz površinskih podataka, odnosno nema više potrebe za „pogađanjem“ uvjeta rada pri dnu bušotine na osnovi površinskih učitavanja ili ugradnjom dubinskih dinamograma (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017). Izgled dinamograma prikazanog na LCD ekranu nadzorno - upravljačkog regulatora prikazan je na slici 6-2.

Slika 6-2. Prikaz dinamograma na nadzorno – upravljačkom regulatoru

Unutar ormara LRP regulatora nalazi se frekvencijski pretvarač koji služi za regulaciju brzine vrtnje elektromotora linearno pogonjene dubinske klipne sisaljke. Regulacija brzine vrtnje elektromotora postiže se regulacijom frekvencije električne energije koja ulazi u motor (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017).

Regulator temeljem interpretacije dubinskog dinamograma i upravljanjem brzinom vrtnje elektromotora putem frekvencijskog pretvarača automatski održava brzinu rada dubinske klipne sisaljke (ili je isključuje na određeno vrijeme) kako bi se održala željena razina punjenja dubinske sisaljke, odnosno kako bi se ujednačila brzina crpljenja sa pritokom fluida iz ležišta u bušotinu. Na taj se način uspješno održava razina kapljevine u tubingu, čime se postiže maksimalno moguće pridobivanje iz ležišta uz produžavanje vijeka trajanja procesne opreme (izbjegavanje hidrauličkih udara) i minimalnu potrošnju električne energije.

Ugrađeni LRP regulator ima mogućnost unosa parametara vremena stajanja bušotine pri detekciji nedovoljnog punjenja dubinske sisaljke. Ako se LRP predugo ostavi u stanju mirovanja, izgubit će se dio pridobive kapljevine zbog protutlaka stupca kapljevine na ležišni sloj. Ako je vrijeme stajanja prekratko, dubinska sisaljka će se previše puta uključiti i isključiti, čime se nepotrebno troši procesna oprema i smanjuje njezin vijek trajanja. Također, za vrijeme spuštanja klipa dubinske sisaljke, netom prije udara klipa u površinu fluida, provest će se prilagodba smanjenja brzine klipa, čime će se smanjiti hidraulički udar na klip i glatku šipku.

Lokalni LRP regulator ima mogućnost programiranja kontrolne logike, jer svaka bušotina ima drugačije parametre pridobivanja. Naime, regulator omogućuje početno zadavanje i naknadna izmjenjivanja parametara proizvodnje.

Regulacija brzine vrtnje elektromotora te određivanje vremena stajanja bušotine ovisi o (Tehnička dokumentacija INA d.d., 2017):

- tlaku u ležištu,
- pritjecanju fluida u bušotinu,
- promjerima tubinga i casinga,
- hodu klipa unutar dubinske sisaljke.

Osim primarnih navedenih senzora, lokalni LRP regulator ima mogućnost prihvata i drugih analognih i digitalnih ulaznih signala (mjerni pretvornici tlaka i temperature). Uz mogućnost prihvata dodatnih ulaznih signala, regulator ima i ugrađeno sučelje za prihvat podataka s analizatora mreže putem koje se nadziru električni parametri na frekvencijskom pretvaraču koji upravlja motorom LRP-a. Ugrađeni regulator ima mogućnost potpuno autonomnog upravljanja radom bušotine na osnovi signala sa pripadnih senzora te je preko svog komunikacijskog sučelja spojen na SCADA (*engl. Supervisory Control And Data Acquistion*) sustav. Navedenim sustavom omogućeno je daljinsko praćenje i korištenje radne stanice, prikupljanje i obrada podataka na bušotini X-1, vizualizacija stanja i mjerenja na bušotini kao i prikupljenih podataka te prikaz alarma, kvarova, događaja i trendova te izrada izvješća na zahtjev dežurnog operatera (Pande et al., 2010).

7. ZAKLJUČAK

Raniji način podizanja kapljevine plinskim liftom ugrađenim u bušotinu X-1 nije uspio u potpunosti iskoristiti potencijal raskrivenog ležišta. Na dnu ležišta održavao se visok dinamički tlak, što je rezultiralo malom ostvarenom depresijom i slabim davanjem bušotine. Izračunom indeksa proizvodnosti za bušotinu X-1 i izradom indikatorske krivulje, uvidjela se mogućnost proizvodnje većih količina kapljevine. Indikatorskom krivuljom prikazan je mogući potencijal ležišta gdje bi se, uz promjenu mehaničke metode pridobivanja kapljevine, mogla postići veća depresija na ležište i samim time veće davanje bušotine za čak 2-3 puta u odnosu na postojeću metodu podizanja (plinski lift).

Na temelju takvih izračuna pokrenut je kapitalni remont opreme bušotine kojim se postojeća proizvodna oprema zamjenila s novom, odnosno promijenio se sustav mehaničkog podizanja kapljevine s plinskog lifta na dubinske sisaljke s klipnim šipkama. Kako bi se postigla što veća energetska učinkovitost i optimalna proizvodnost bušotine uz minimalna povećanja udjela vode u kapljevini, ugradio se linearni sustav upravljanja dubinskom sisaljkom, tj. LRP uređaj.

Sa svojim prednostima u autonomnom nadzoru i upravljanju proizvodnjom, jednostavnom građom i montažom, te mogućnosti praćenja parametara rada sisaljke u realnom vremenu izbor LRP uređaja slijedio je kao prihvatljivo rješenje. Ugradnjom LRP uređaja postignut je veći stupanj učinkovitosti sustava podizanja kapljevine dubinskim sisaljkama.

Podaci mjerenja na bušotini X-1 nakon ugradnje linearno pogonjene dubinske sisaljke dokazuju da su izračuni u svrhu većeg iskorištavanja potencijala ležišta bili točni. Iscrpak kapljevine u prosjeku se povećao za 2 puta, a udio vode u ukupnoj kapljevini ostao je približno isti.

8. LITERATURA

1. Čikeš, M., 2015., Proizvodno inženjerstvo nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. Matanović, D., Moslavac, B., 2011., Opremanje i održavanje bušotina. Zagreb: AREA d.o.o.
3. Pande, A., Morrison, M., Bristow, R., 2010., Oilfield automation using intelligent well technology, SPE 135657
4. Perić, M., 2007., Englesko-Hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.
5. Sanchez, J.P., Festini, D., Bel, O., 2007., Beam pumping system optimization through automation, SPE 108112
6. Tehnička dokumentacija INA d.d. 2015., Pojednostavljeni rudarski projekt ugradnje opreme za plinsko podizanje kapljevine na bušotinskom radnom prostoru bušotine X-1
7. Tehnička dokumentacija INA d.d. 2017., Pojednostavljeni rudarski projekt ugradnje linearnog sustava podizanja fluida dubinskom sisaljkom na bušotinskom radnom prostoru bušotine X-1; Mjerenja s bušotine X-1 (plinski lift)
8. Tehnička dokumentacija INA d.d. 2018., Mjerenja s bušotine X-1 (LRP)
9. Vogel, J.V. 1968. Inflow performance relationship for solution-gas drive wells, Journal of Petroleum Technology (January 1968) 83-92
10. Zelić, M., 1977., Tehnologija pridobivanja nafte i plina eruptiranjem i gasliftom, Zagreb, INA Industrija nafte d.d, Naftaplin
11. Zelić, M., Čikeš, M., 2006., Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama, Zagreb, INA Industrija nafte d.d, Naftaplin

Internet izvori:

1. Beck, T., Anderson, R.,Peterson, R., MacDonald, M., Linear rod pump apparatus and method, URL: http://www.google.com/patents/US8152492 (25.11.2018.)

Izjava

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

_____

Matej Mandić