Dizajn i kontrola rada sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama primjenom programskog paketa QRod 3.1

Vidoš, Boris

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:588280

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

DIZAJN I KONTROLA RADA SUSTAVA PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA QROD 3.1

Diplomski rad

Boris Vidoš

N 320

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

DIZAJN I KONTROLA RADA SUSTAVA PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA QROD 3.1

BORIS VIDOŠ

Rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Primjena sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama i danas predstavlja jednu od najčešće korištenih metoda mehaničkog podizanja kapljevine. Napretkom tehnike i tehnologije stvoreni su preduvjeti za povećanje učinkovitosti i profitabilnosti rada sustava, ali je osnovni način rada ostao ne promijenjen. To je glavni razlog zbog kojega je potrebno ostvariti kvalitetan dizajn i kontrolu rada samog sustava. Ovaj diplomski rad dat će pregled dizajna i kontrole rada sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama primjenom programskog paketa QRod 3.1. Prikazat će se primjena programskog paketa QRod 3.1 za dizajn sustava podizanja kapljevine, kao i primjena programa za određivanje i rješavanje stvarnih problema prilikom rada sustava na eksploatacijskim naftnim bušotinama.

Ključne riječi: dubinska crpka, niz klipnih šipki, dizajn sustava pridobivanja kapljevine, programski paket QRod 3.1, kontrola rada crpke

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 2 tablice, 22 slike i 19 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf

Ocjenjivači: Dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor RGNf
Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNf
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNf

Datum obrane: 12.02.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DESIGN AND CONTROL OF SUCKER ROD PUMPING SYSTEM USING THE QROD 3.1 SOFTWARE

BORIS VIDOŠ

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

Abstract

To this day, the sucker-rod pumping method is one of the most frequently used artificial lift methods. With the advancement of technology, conditions for a more efficient and profitable pumping system were established. However, the basic rod-sucker pumping working principles are still the same. This is the main reason why better sucker-rod pumping system control and design are required. This thesis provides an overview of a design and control sucker rod pumping system using the QRod 3.1 software. The QRod 3.1 software is used to design a new sucker-rod pumping system as well as for detecting and solving real problems that may occur in the field while pumping.

Keywords: downhole pump, rod string, control and design of sucker rod pumping system, QRod 3.1 software

Thesis contains: 35 pages, 2 tables, 22 figures and 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD

Reviewers: Associate Professor Vladislav Brkić, PhD
Assistant Professor Borivoje Pašić, PhD
Assistant Professor Sonja Koščak Kolin, PhD

Date of defense: February 12, 2021 at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Velika zahvala dragom mentoru, izv. prof. dr. sc. Vladislavu Brkiću, na pomoći, strpljenju i savjetima tijekom izrade ovog rada te nesebičnom davanju u prenošenju znanja svojim studentima.

Na prvom mjestu, hvala mojim roditeljima i dragom Bogu na daru života. Hvala mojoj sestri, obitelji i kumovima što su mi uvijek bili oslonac za vrijeme trajanja moga studija.

Mojim kolegama i prijateljima, Ivanu, Karlu, Domagoju, Mati, Lei i Ireni, hvala na prijateljstvu, predanosti, strpljivosti i uzajamnom pomaganju. Čvrsto vjerujem kako sam u vama našao prijatelje za cijeli život.

Hvala mojoj salezijanskoj obitelji, a na poseban način don Tihomiru i don Danijelu, svojom ste me prisutnošću i odgojem uvijek poticali da postanem pošten građanin i dobar kršćanin.

Također, veliko hvala i svim ostalim meni bliskim ljudima koji su na bilo koji način doprinijeli završetku moga studija i izradi ovog diplomskog rada.

"Sve mogu u Onome koji me jača!" Fil 4,13

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... **I**

POPIS TABLICA ..... **II**

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA ..... **III**

POPIS KORIŠTENIH KRATICA ..... **IV**

1. UVOD **1**

2. SUSTAV PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA **2**

2.1. Površinski pogonski sustav dubinske crpke **4**

2.2. Oprema ušća bušotine **6**

2.3. Niz klipnih šipki **6**

2.4. Dubinska crpka **8**

2.5. Primjena dinamometarskih zapisa u analizi rada sustava **10**

2.6. Prednosti i nedostatci sustava podizanja kapljevine pomoću klipnih crpki **13**

3. PROGRAMSKI PAKET QUICK ROD – QROD 3.1 ..... **15**

3.1. Osnovni princip rada programskog paketa QRod 3.1 ..... **15**

3.2. Korisničko sučelje programskog paketa QRod 3.1 ..... **16**

3.3. Alati unutar programskog paketa QRod 3.1 ..... **18**

4. DIZAJN SUSTAVA PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA QROD 3.1 ..... **19**

4.1. Dizajn sustava podizanja kapljevine na eksploatacijskoj naftnoj bušotini X **19**

4.2. Primjer proračuna gubitaka fluida kroz zazor dubinske crpke **26**

4.3. Usporedba predviđenog dizajna sustava s mjerenim podatcima **31**

5. ZAKLJUČAK **33**

6. LITERATURA **34**

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz zastupljenosti mehaničkih metoda pridobivanja kapljevine u svjetskoj proizvodnji 2
Slika 2-2. Sustav dubinske crpke s klipnim šipkama 3
Slika 2-3. Shematski prikaz konvencionalne njihalice 5
Slika 2-4. Tipska nadzemna oprema ušća bušotine 6
Slika 2-5. Dijelovi dubinske crpke 8
Slika 2-6. Shematski prikaz ciklusa rada dubinske crpke 10
Slika 2-7. Prikaz teoretskog dinamograma 11
Slika 2-8. Prikaz stvarnog dinamograma 12
Slika 3-1. Korisničko sučelje programa QRod 3.1 16
Slika 3-2. Prikaz izlaznih podataka dizajna sustava 17
Slika 4-1. Ulazni podatci za dizajn sustava 20
Slika 4-2. Prikaz podataka u zadanim opcijama programa 22
Slika 4-3. Odabir broja hodova klipa dubinske crpke 22
Slika 4-4. Korisničko sučelje s prikazom izlaznih podataka dizajna sustava 23
Slika 4-5. Numerički prikaz rezultata dizajna sustava 24
Slika 4-6. Dijagram momenta torzije sustava 25
Slika 4-7. Dinamogram opterećenja na površini i razini crpke 25
Slika 4-8. Shematski prikaz proklizavanja crpke 27
Slika 4-9. Dizajn sustava za eksploatacijsku naftnu bušotinu Y 29
Slika 4-10. Kalkulator za proračun proklizavanja crpke 30
Slika 4-11. Usporedba predviđenih i mjerenih podataka sustava na eksploatacijskoj naftnoj bušotini Z 31
Slika 4-12. Prikaz preklapanja predviđenog i stvarnog dinamograma sustava 32

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. API klasifikacija kombiniranog niza klipnih šipki 21
Tablica 4-2. Preporuka za odabir zazora crpke 27

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica		Opis
	SI	US	
C	m	in	zazor crpke
D	m	in	nominalni promjer crpke
L	m	in	duljina klipa crpke
μ	Pa·s	cP	viskoznost fluida
P	Pa	psi	diferencijalni pad tlaka na klipu crpke
p_{tub}	Pa	psi	tlak u tubingu iznad crpke
p_{usis}	Pa	psi	tlak na usisu crpke
SPM	hod/min	spm	broj hodova klipa u minuti

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Oznaka	Opis
AL (engl. *Artificial lift*)	mehanička metoda podizanja kapljevine
ALRDC (engl. *Artificial Lift Research and Development Council)*	Vijeće za istraživanje i razvoj mehaničkih metoda pridobivanja kapljevine u SAD-u
API (engl. *American Petroleum Institute*)	Američki naftni institut
BHP (engl. *Bottom-hole Pressure*	tlak na dnu bušotine
CCWConv (engl. *CCWConv – Counter-Clockwise Conventional*)	konvencionalni tip njihalice s rotacijom obrnutom od smjera kazaljke na satu
CWConv (engl. *CWConv – Clockwise Conventional*)	Konvencionalni tip njihalice s rotacijom u smjeru kazaljke na satu
ESP (engl. *Electrical Submersible Pump*)	električna uronjiva crpka (EUC)
GL (engl. *Gas Lift*)	plinski lift
PCP (engl. *Progressive Cavity Pumps*)	vijčaste crpke
PL (engl. *Plunger Lift*)	klipni lift
SRP (engl. *Sucker Rod Pump*)	Dubinska uronjena crpka s klipnim šipkama (DUCsKŠ)

1. UVOD

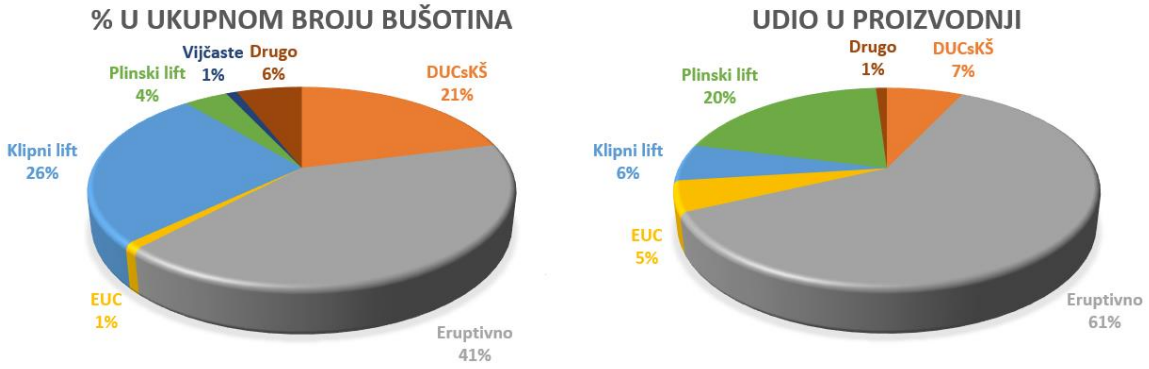
Cjelokupni postupak pridobivanja ugljikovodika iz ležišta na površinu zahtjeva primjenu kompleksne i detaljne metodologije rada koja se naziva proizvodno, odnosno naftno-plinsko inženjerstvo. Dvije su osnovne metode pridobivanja kapljevine: eruptivna i mehanička metoda podizanja. Ako je prirodna energija ležišta dostatna za svladavanje svih otpora protjecanju u proizvodnom sustavu od dna bušotine do ušća, to predstavlja eruptivnu metodu podizanja. Za slučaj kada prirodna energija ležišta nije dovoljna za njen eruptivni rad ili eruptivni način rada ne pruža željenu, očekivanu količinu fluida koji se pridobiva, potrebno je primijeniti neku od mehaničkih metoda podizanja (engl. *artificial lift method*). Više od 90 % svih proizvodnih naftnih bušotina proizvodi zahvaljujući primjeni neke od mehaničkih metoda podizanja fluida (Weatherford, 2015). Neke od metoda mehaničkog podizanja s najvećom primjenom u proizvodnoj praksi su: dubinske crpke s klipnim šipkama (engl. *SRP – Sucker Rod Pump*), plinski lift (engl. *GL – Gas lift*), klipni lift (engl. *PL – Plunger lift*), električne uronjive crpke (engl. *ESP – Electrical Submersible Pump*) te mlazne crpke (engl. *jet pump*).

Ovim diplomskim radom pojasnit će se i obuhvatiti cjelokupan sustav i proces pridobivanja kapljevine primjenom dubinske crpke s klipnim šipkama. Pri tome će se istaknuti prednosti i nedostatci samog sustava, kao i njegov opis. Ponudit će se jednostavno i brzo rješenje za dizajniranje te kontrolu rada sustava dubinske crpke s klipnim šipkama primjenom programskog paketa QRod 3.1 (engl. *Quick Rod 3.1*). Programski paket QRod 3.1 u vlasništvu je kompanije Echometer (engl. *Echometer Company Ltd.*), a glavna mu je svrha da omogući vrlo brzo dizajniranje i kontrolu rada samog sustava, uz primjenu svih najmodernijih tehnologija u industriji (Rowlan et al., 2013).

Programski paket QRod 3.1 je brzi alat s kojim se mogu korigirati i kontrolirati pojedini parametri rada dubinske crpke čime bi se postigao učinkovitiji rad sustava te pokušao izbjeći remontni zahvat na zamjeni iste.

2. SUSTAV PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA

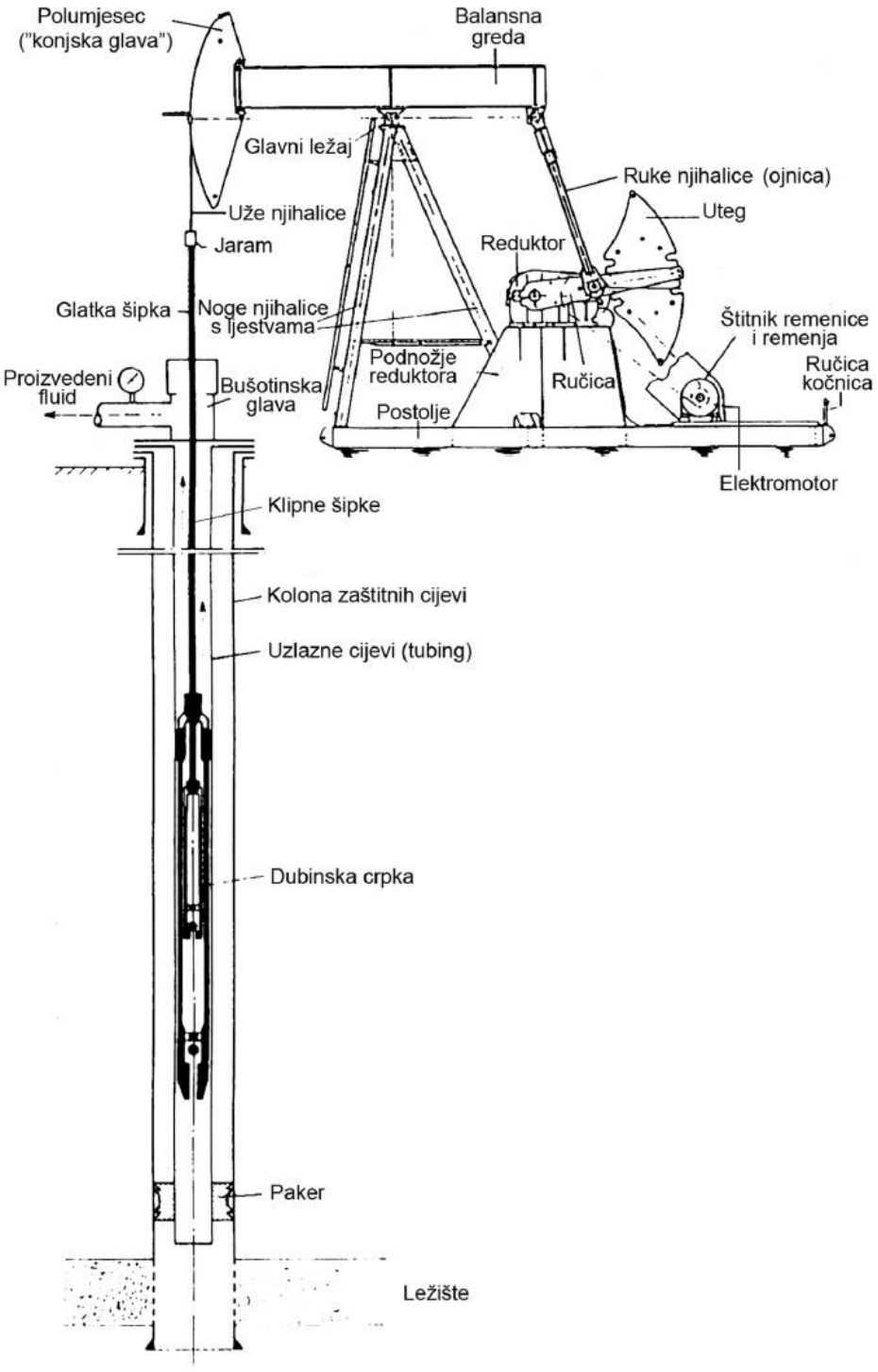
Sustav podizanja kapljevine uz primjenu dubinske crpke s klipnim šipkama predstavlja najstariju i najzastupljeniju metodu mehaničkog pridobivanja kapljevine, kako u svijetu tako i u Republici Hrvatskoj (Brkić, 2019). Prema podatcima Vijeća za istraživanje i razvoj mehaničkih metoda pridobivanja kapljevine (engl. *ALRDC – Artificial Lift Research and Development Council*), sustav podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama i danas igra značajnu ulogu na globalnoj razini (Takacs, 2015). Slika 2-1 prikazuje zastupljenost pojedine mehaničke metode pridobivanja kapljevine u ukupnom broju bušotina, kao i udio u ukupnoj svjetskoj proizvodnji.



Slika 2-1. Prikaz zastupljenosti mehaničkih metoda pridobivanja kapljevine u svjetskoj proizvodnji (ALRDC, 2019)

U Republici Hrvatskoj, od ukupnog broja danas aktivnih i opremljenih bušotina, 42 % bušotina opremljeno je sustavom dubinske crpke s klipnim šipkama. Preostali udio aktivnih bušotina odnosi se na one bušotine koje proizvode eruptivno (24 %) te plinskim liftom (34 %) (Brkić, 2019). Neophodna pretpostavka za rješavanje svih problema pri dizajniranju, analizama i kontroli rada sustava dubinske crpke s klipnim šipkama je dobro poznavanje komponenti sustava. Sustav se sastoji od: pogonskog dijela, površinskog sustava pogona crpke, niza klipnih šipki te same dubinske crpke. Uz pravilno definiranje i poznavanje svakog pojedinog dijela sustava, neophodno je zbog njihove povezanosti

dizajnirati jedan dio neovisno o drugima. Na slici 2-2 prikazan je cjelovit detaljan prikaz sustava dubinske crpke s klipnim šipkama.



Slika 2-2. Sustav dubinske crpke s klipnim šipkama (Zelić i Čikeš, 2006)

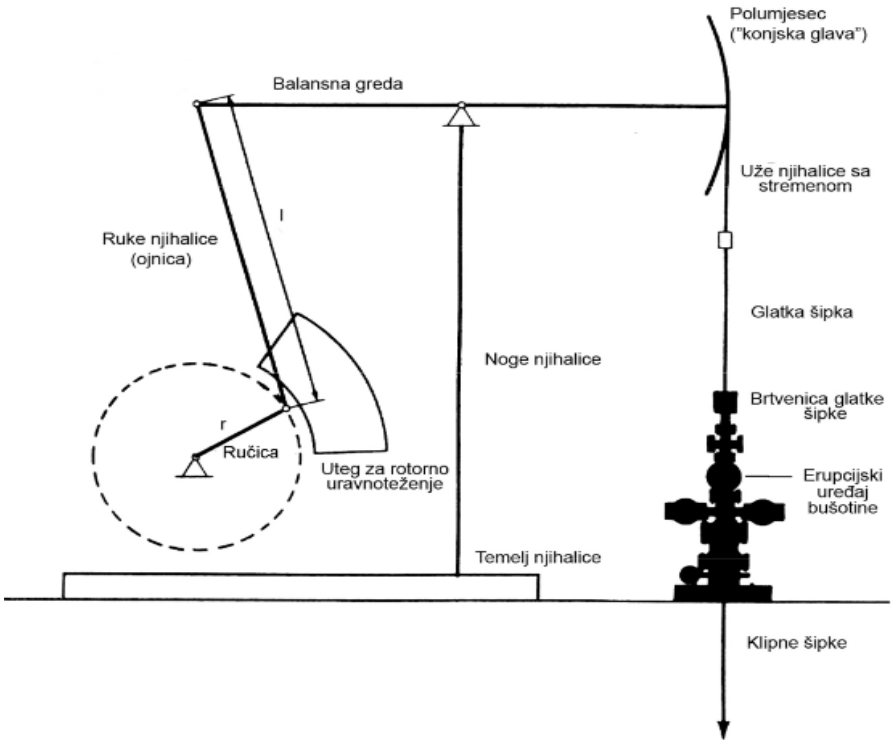
2.1. Površinski pogonski sustav dubinske crpke

Uloga pogonskog sustava je prijenos energije od pogonskog motora do niza klipnih šipki. Kako bi se to ostvarilo, potrebno je rotacijsko kretanje osovine pogonskog motora promijeniti u nastupno-povratno kretanje klipnih šipki. U vidu je potrebno imati prilagođavanje brzine kretanja kako bi bila povoljna za pogon dubinske crpke. Promjena brzine vrtnje ostvaruje se u zupčaničkom reduktoru, dok se pomoću ostatka sustava ostvaruje promjena smjera kretanja i uravnoteženja njihalice. Osnovna zadaća pogonskog motora je da osigura dovoljno energije da uz mehaničku transformaciju omogući zadovoljavajuće podizanje kapljevine. To znači da treba predavati dovoljnu snagu na izlaznoj osovini (Matanović i Moslavac, 2011). Za pogon se mogu primijeniti motori s unutrašnjim izgaranjem (kao gorivo koriste dizel ili plin) ili elektromotori. Odabir vrste pogonskog motora uvelike ovisi o njegovoj sveukupnoj učinkovitosti i ekonomičnosti, kao i o dostupnosti goriva te cijeni električne energije (Zelić i Čikeš, 2006). Učestala je praksa da se za pogon dubinske crpke odabiru elektromotori, prvenstveno zbog njihove prilagodljivosti automatizaciji sustava. Potpuno automatiziran i funkcionalan sustav omogućava daljinsku kontrolu (engl. *remote control*), odnosno pokretanje i zaustavljanje rada cijelog sustava u realnom vremenu (engl. *real time start-stop system*) (API, 1996).

Direktnu vezu između klipnih šipki i površinskog pogonskog sustava predstavlja polirana šipka (engl. *polished rod*). Polirana šipka prolazi kroz uvodnu brtvenicu (engl. *stuffing box*), a fluid koji se podiže prolazi kroz cjevovod spojen na križnu ("t") (engl. *tee*) prirubnicu na ušću bušotine (Matanović i Moslavac, 2011). Polirana šipka povezana je s "konjskom glavom" (engl. *horse head*) pomoću čeličnog užeta (kabela) (Galov lanac) te tako osigurava vertikalno podizanje, odnosno spuštanje polirane šipke, klipnih šipki i cilindra crpke (Zelić i Čikeš, 2006). Pravilnim dizajniranjem ovog dijela sustava smanjuje se mogućnost nepotrebnog trošenja polirane šipke zbog trenja u uvodnoj brtvenici.

Balansna greda učvršćena je u blizini svog centra gravitacije na potpornje (engl. *sampson post*) pomoću glavnog ležaja. Kretanje balansne grede ostvaruje se pomoću "ruke njihalice" (ojnice) kojoj energiju i rotaciju predaje koljenasta osovina. Udaljenost od koljenaste osovine do ležaja ojnice definira se kao duljina hoda polirane (glatke) šipke. Većina njihalica konstruirana je tako da ima dva ili tri moguća položaja za ležaj ojnice, a u skladu s tim i dvije ili tri moguće duljine hoda polirane šipke (Nind, 1964). Shematski prikaz

ovakve konvencionalne izvedbe njihalice u sklopu sustava za podizanje kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama prikazan je na slici 2-3.



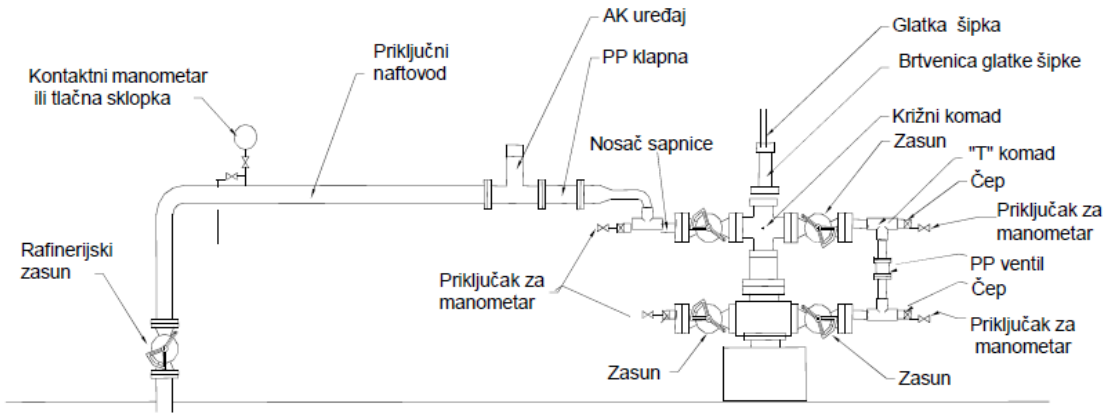
Slika 2-3. Shematski prikaz konvencionalne njihalice (Rischmuller i Meler, 1989)

Jedan od najvažnijih aspekata pri koncipiranju sustava njihalice predstavlja pravilno dimenzioniranje protuutega odnosno uravnoteženja njihalice. Praktički sav rad kod podizanja fluida pri radu dubinske crpke ostvaruje se kod kretanja klipa prema gore. Tijekom tog dijela ciklusa cjelokupno opterećenje fluidom i klipnim šipkama mora se ubrzati prema gore od stanja mirovanja, uz kretanje za duljinu jednog hoda i zaustaviti na kraju hoda. Pri kretnju prema dolje, kada se opterećenje fluidom prenosi na tubing, klipne šipke zbog mase i gravitacije djeluju kao pokretačka sila cijelog sustava. Ako ne postoji sustav pravilnog uravnoteženja opterećenja kod kretanja prema gore i prema dolje, dolazi do jakog oštećivanja sustava prijenosa i pogonskog sustava. S obzirom na pogonski motor, pri podizanju fluida potrebna je velika snaga, dok će kod kretanja prema dolje pogonski stroj biti pokretan od strane prijenosa (to će dovesti do toga da se pogonski stroj kreće većom brzinom kod kretanja prema dolje nego kod kretanja prema gore). Sa stajališta sustava prijenosa, pri kretanju prema gore ostvaruje se prevelik moment torzije (engl. *torque*).

Protuuteg osigurava jednoliku distribuciju opterećenja te smanjivanje vršnih vrijednosti momenata torzije. Služi zapravo kao spremnik energije kod kretanja prema dolje; kada je potreba za energijom mala; koju zbog efekta zamašnjaka oslobađa pri kretanju prema gore, čime preuzima dio rada potrebnog za podizanje klipnih šipki i slojnog fluida (Matanović i Moslavac, 2011).

2.2. Oprema ušća bušotine

Na slici 2-4 prikazana je tipska nadzemna oprema ušća bušotine s dubinskom crpkom. Osim dijelova ušća bušotine (erupcijski uređaj s ventilima i manometrima), glavna značajka sustava jest priključni naftovod koji služi za transport proizvedenog fluida od ušća bušotine prema mjernoj i sabirnoj stanici kao tzv. spoj tubing-casing tj. spoj prstenastog prostora s tubingom radi prolaza izdvojenog plina s dna bušotine kako bi se povećala učinkovitost rada crpke.



Slika 2-4. Tipska nadzemna oprema ušća bušotine (Brkić, 2019)

2.3. Niz klipnih šipki

Klipne se šipke izrađuju od punog profila okruglog presjeka visokokvalitetnih čelika i služe za prijenos energije (snage) od površinskog pogonskog uređaja (njihalice) do dubinske crpke. Prema API specifikaciji 11B (engl. *API Spec. 11B – American Petroleum*

Institute Specification 11B) duljina im se kreće od 7,62 m (25 ft) do 9,144 m (30 ft), s ojačanim muškim navojima (engl. *thread*) na kraju i dijelom kvadratnog oblika radi zahvata ključevima prilikom procesa navrtanja i odvrtanja (Brown, 1980).

Prema najnovijim izmjenama API specifikacije 11B, konstrukcija tijela klipnih šipki prema promjeru dana je u pet osnovnih izvedbi (Takacs, 2015):

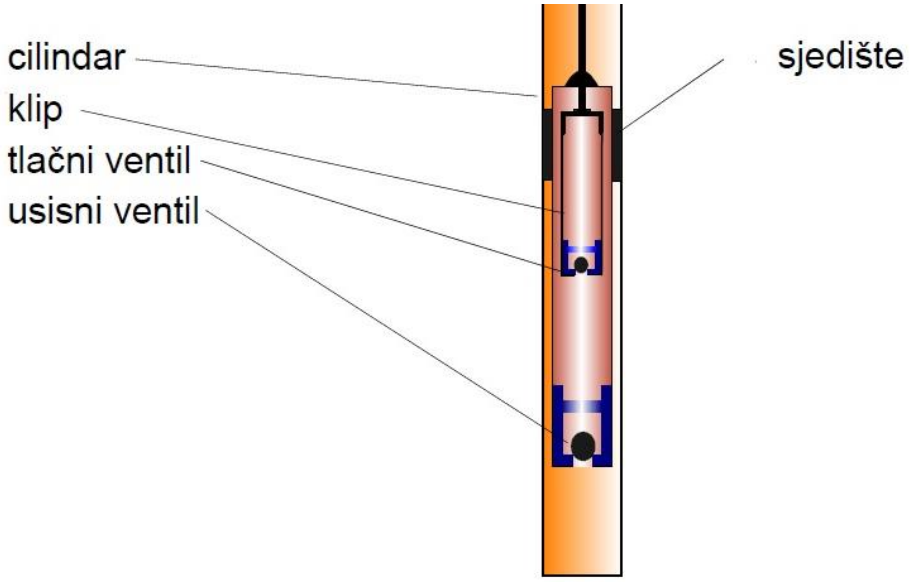
- 15,9 mm (5/8 in);
- 19,0 mm (3/4 in);
- 22,2 mm (7/8 in):
- 25,4 mm (1 in);
- 28,6 mm (1 1/8 in).

Prema API – standardu razlikuju se tri glavne kategorije, odnosno klase, klipnih šipki s odgovarajućim vrijednostima naprezanja koje šipke mogu podnijeti: klasa C, klasa K te klasa D. U praksi se najčešće upotrebljavaju klipne šipke klase D, posebice u dubljim bušotinama, odnosno pri većim opterećenjima, dok se u korozivnim uvjetima, tj. pri sadržaju ugljikovog dioksida (CO_2), vodikovog sulfida (H_2S) u pridobivenom fluidu koriste klipne šipke klase K (Zelić i Čikeš, 2006). U posljednjih nekoliko godina dostignuta su određena unaprjeđenja u postupku izrade tijela i navoja klipnih šipki. Ponajprije, ova unaprjeđenja se odnose na postupak posebne toplinske obrade (engl. *heat treating*) kako bi se poboljšala otpornost klipnih šipki na koroziju. Također, postignuta je bolja izvedba dvostrukih vanjskih muških navoja (engl. *pin-and-pin*) (Perić, 2007) na krajevima tijela klipnih šipki, te je implementiran postupak valjanja čelika (engl. *steel rolling*) što je dovelo do stvaranja veće otpornosti navojnih spojeva (Takacs, 2015).

Kada se crpke ugrađuju na dubinu veću od oko 1070 m (3500 ft), obično je poželjno primijeniti kombinirani niz klipnih šipki, tj. onaj koji se sastoji od šipki različitih promjera. Šipke najmanjeg promjera smještaju se u donjem dijelu niza, odmah iznad klipa jer je tamo vlačno opterećenje najmanje. Na vrhu niza primjenjuju se šipke najvećeg promjera jer je tu vlačno opterećenje najveće (Matanović i Moslavac, 2011).

2.4. Dubinska crpka

Osnovna zadaća dubinske crpke je da omogući ulazak fluida iz ležišta u proizvodni niz i podigne dotekli fluid do površine. Kako bi to mogla ostvariti svaka se dubinska crpka sastoji od četiri glavna dijela: kućišta (cilindra) ili radne komore, klipa, nepomičnog (usisnog) ventila (engl. *standing valve*) te putujućeg (tlačnog) ventila (engl. *traveling valve*) (Matanović i Moslavac, 2011). Na slici 2-5 prikazana je dubinska crpka s njenim jasno naznačenim glavnim dijelovima.



Slika 2-5. Dijelovi dubinske crpke (Brkić, 2019)

Prema konstrukciji i načinu ugradnje, dubinske se crpke mogu podijeliti na (Mandić i Peharda, 1988):

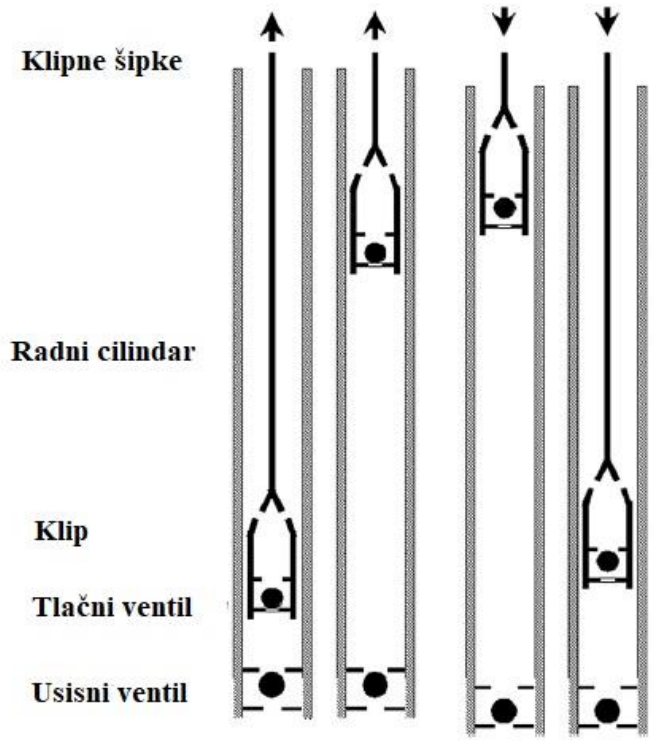
- **usadne crpke** – ugrađuju se na nizu klipnih šipki te odsjedaju na sjedište (petu) crpke koje je ugrađeno na nizu tubinga;
- **tubing crpke** – najprije se na nizu tubinga ugrađuje cilindar crpke s usisnim ventilom, a zatim se na nizu klipnih šipki ugrađuje klip s tlačnim ventilom.

U literaturi se navodi i postojanje trećeg tipa dubinskih crpki pod nazivom casing crpke (engl. *casing* – niz zaštitnih cijevi). Casing crpke predstavljaju u biti vrstu usadnih crpki, ali mnogo većeg promjera. Ugrađuju se unutar niza zaštitnih cijevi, bez primjene

tubinga te omogućuju mnogo veću proizvodnju zbog većeg poprečnog presjeka klipa. Njihova primjena u praksi predstavlja više iznimku nego pravilo (Brown, 1980; Zelić i Čikeš 2006).

Glavna prednost usadnih crpki u odnosu na tubing crpke je ta što je moguće jednostavno i brzo vađenje same crpke na površinu na nizu klipnih šipki. Na taj se način, u slučaju kvara crpke štedi vrijeme i novac na njenoj zamjeni. Glavni nedostatak je činjenica da zbog ugradnje unutar tubinga, crpke imaju manji promjer cilindra, a samim time i manju količinu fluida koju mogu proizvesti (Nind, 1964). Najrašireniju primjenu u praksi imaju usadne crpke sa sjedištem na vrhu. Takvom izvedbom postiže se brtvljenje neposredno ispod točke gdje se fluid istiskuje u uzlazne cijevi (engl. *tubing*), što sprječava odlaganje pijeska i drugih nečistoća između cilindra i unutarnje stijenke tubinga (Zelić i Čikeš, 2006).

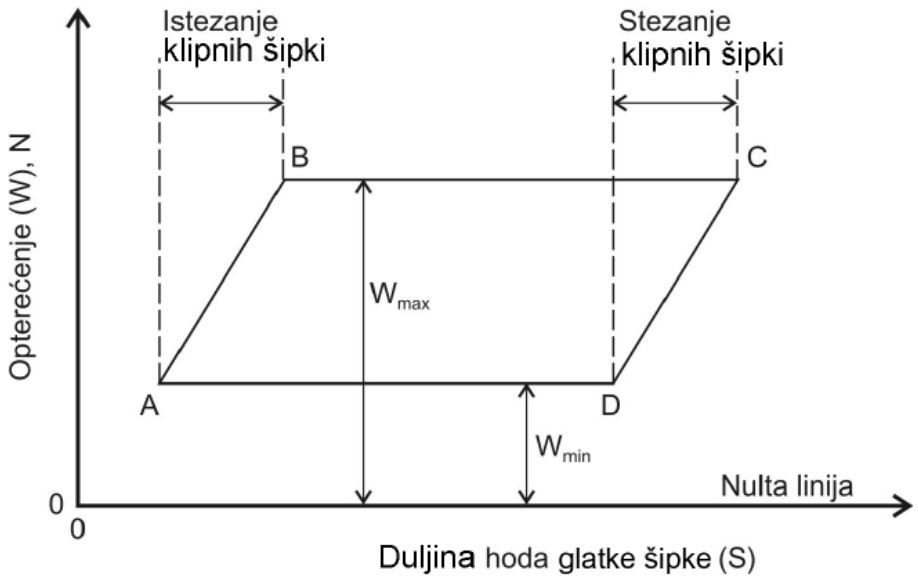
Na slici 2-6 prikazan je shematski ciklus rada dubinske crpke. Usisni ventil odsjeda na peti cilindra, dok se tlačni ventil nalazi na peti klipa. Oba ventila rade na principu sjedišta (pete) i kuglice. Pri kretanju klipa prema gore, fluid koji se nalazi unutar klipa i proizvodnog niza (tubinga), drži putujući (tlačni) ventil zatvorenim te se fluid iznosi prema površini. Ovakvo kretanje klipa uzrokuje stvaranje podtlaka iznad nepomičnog (usisnog) ventila, koji se zato otvara i dozvoljava utok fluida iz ležišta. Pri kretanju prema dolje, klip pada kroz tubing ispunjen fluidom. Zbog toga se otvara tlačni ventil, a usisni ventil zatvara, ali se opterećenje fluidom prenosi s klipa na proizvodni niz cijevi (tubing). Ovo premještanje opterećenja s klipa (klipnih šipki) na tubing značajan je čimbenik kod određivanja djelotvornosti rada klipa. Potrebno je naglasiti kako se najveći dio pridobivanja nafte ostvaruje pri kretanju klipa prema gore, a pri silaznom kretanju izlazi samo onaj dio slojnog fluida koji istiskuju klipne šipke.



Slika 2-6. Shematski prikaz ciklusa rada dubinske crpke (Takacs, 2015)

2.5. Primjena dinamometarskih zapisa u analizi rada sustava

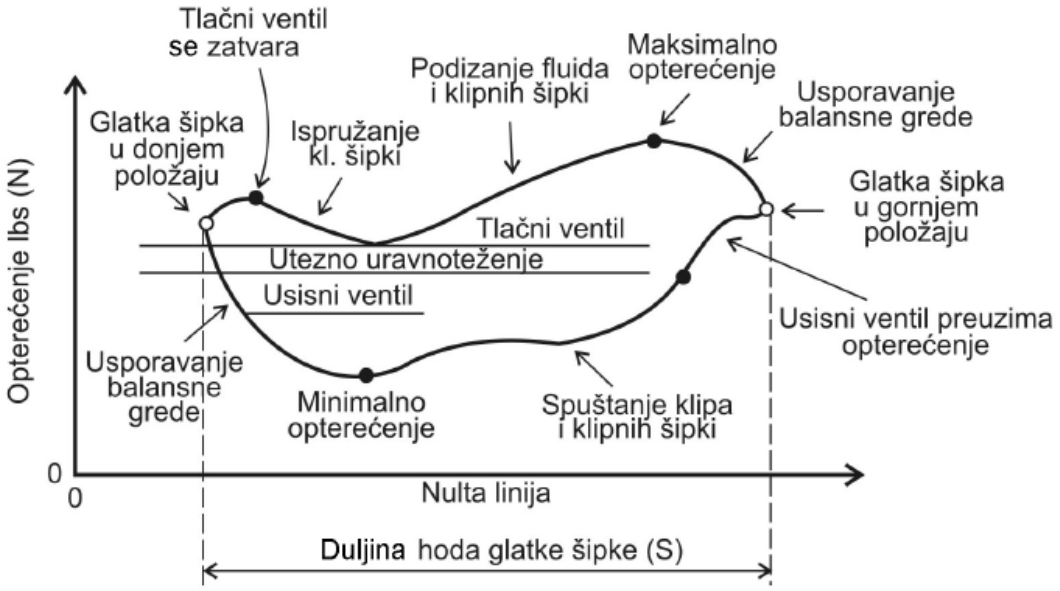
Za mjerenje sila koje djeluju uzduž osi glatke šipke (glatka šipka je vitalna sveza između opreme na površini i opreme u bušotini) upotrebljava se mjerni instrument – dinamometar (Josić, 1993). Dinamometar predstavlja vrlo vrijedan alat za analizu učinkovitosti rada sustava dubinske crpke s klipnim šipkama. Zapisi težinskih opterećenja (engl. *loads*) mogu biti mjereni na površini (u sklopu sustava glatke šipke) ili na dubini crpke posebnim uređajem koji se naziva dinamograf. U oba slučaja opterećenja se bilježe i promatraju u odnosu na dobavu te vrijeme crpljenja (engl. *loads vs. displacement; loads vs. pumping time*), za vrijeme jednog cijelog ciklusa crpljenja (Takacs, 2015). Pravilnom interpretacijom takvih zapisa (dinamograma) mogu se donijeti zaključci o radu dubinske crpke, radi li crpka dobro ili ima nepravilnosti u radu, kao što su propuštanje tlačnog ili usisnog ventila, zaglava klipa, slabo punjenje crpke, lom klipnih šipki, zapunjenost cilindra plinom i dr. (Mandić i Peharda, 1988).



Slika 2-7. Prikaz teoretskog dinamograma (Zelić i Čikeš, 2006)

Prema teoretskom dinamogramu prikazanom na slici 2-7, može se primijetiti kako iz točke A, gdje počinje kretanje glatke šipke prema gore, postoji postupni prijelaz opterećenja klipnih šipki i fluida, jer se zbog opterećenja klipa šipke istežu. U točki B šipke su maksimalno istegnute prema opterećenju koje vlada u njima. Od točke B do točke C klip podiže stupac fluida u nizu tubinga i fluid izlazi na površinu. Ta duljina predstavlja pravi hod klipa dubinske crpke. U točki C započinje hod glatke šipke prema dolje. Od točke C do D dolazi do stezanja niza klipnih šipki zbog rasterećenja. Do rasterećenja dolazi jer se otvara tlačni ventil i cijela težina stupca fluida u tubingu sada prelazi na usisni ventil te samim time i na tubing. U točki D je završetak stezanja klipnih šipki i sada fluid iz cilindra crpke kroz tlačni ventil ulazi u prostor iznad klipa. U točki A klip je u donjem položaju, zatvara se tlačni ventil i klip započinje hod prema gore. Otvara se usisni ventil i fluid za klipom ulazi u cilindar crpke i ciklus se ponavlja.

Karakterističan primjer dinamograma dobiven pri stvarnim uvjetima prikazan je na slici 2-8, a na njemu je pojašnjena funkcionalnost sustava pri punom radnom ciklusu.



Slika 2-8. Prikaz stvarnog dinamograma (Zelić i Čikeš, 2006)

Prva primjena dinamometara u analizi rada bušotine datira još iz 30-ih godina 20. stoljeća. Od toga vremena došlo je do znatnih postignuća kako u izvedbi samih uređaja tako i u načinu i kvaliteti interpretacije mjerenih podataka. U početku, interpretacije su bile većinom kvalitativne te su uvelike ovisile o sposobnosti i iskustvu osobe koja je iste provodila. Danas je interpretacija mjernih podataka evoluirala u sofisticiranu, vrlo pouzdanu analizu koja nam omogućuje konstantan nadzor nad radom bušotine. Upravo je pravilna interpretacija mjerenih podataka od najvećeg značaja za proizvodne inženjere koji nastoje povećati profitabilnost bušotine koja proizvodi zahvaljujući sustavu dubinske crpke s klipnim šipkama (Takacs, 2015). Također, danas je moguć i prijenos bušotinskih podataka u realnom vremenu do istih korisnika (inženjera). Rad dubinske crpke moguće je analizirati na temelju iscrtanog dinamograma na razini crpke na temelju mjerenih opterećenja uz pomoć ugrađenih senzora (Brkić, 2019).

Osim interpretacije podataka dobivenih mjerenjima, proizvodnim inženjerima danas je dostupna široka lepeza programskih paketa, koji im omogućuju vrlo jednostavnu analizu i dizajniranje rada sustava dubinske crpke s klipnim šipkama. Jedan takav programski paket, QRod 3.1, bit će detaljno opisan u nastavku ovog diplomskog rada.

2.6. Prednosti i nedostatci sustava podizanja kapljevine pomoću klipnih crpki

Sustav podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama, kao i drugi sustavi mehaničkog podizanja kapljevine, imaju određene prednosti u odnosu na druge metode, ali i određene nedostatke (Takacs, 2015).

Prednosti sustava:

- ova metoda podizanja je poznata radnom osoblju širom svijeta, sustav je jednostavan za voditi i analizirati;
- moguće je dizajnirati sustav relativno lako, čak i na samom terenu gdje se bušotina nalazi;
- proizvodnja pod određenim (povoljnim) uvjetima moguća je do kraja životnog vijeka bušotine, tj. do njenog napuštanja;
- kapacitet dobave odnosno proizvodnje se može lako prilagoditi promjenama parametara (broj hodova, duljina hoda) te se daljinskim upravljanjem može brzo prekinuti ili započeti rad sustava;
- sustav može raditi i pridobivati kapljevinu i u bušotinama s vrlo niskim tlakom na dnu (engl. *BHP – Bottom Hole Pressure*);
- prstenasti prostor dozvoljava vrlo jednostavnu primjenu inhibitora korozije i kamenca (engl. *scale*);
- komponente sustava i zamjenski dijelovi su standardizirani te lako dostupni.

Nedostatci sustava:

- prisutnost slobodnog plina (engl. *free gas*) na usisu crpke drastično smanjuje učinkovitost sustava (smanjuje davanje bušotine i uzrokuje mehaničke probleme kod crpke);
- dubina s koje je moguće pridobivati kapljevinu je ograničena ponajviše zbog mehaničkih karakteristika niza klipnih šipki;
- kod bušotina čiji je kanal kontrolirano (engl. *deviated*) ili prirodno (engl. *crooked*) zakrivljen dolazi do povećanja trenja između tubinga i klipnih šipki, što uzrokuje mehanička oštećenja (Perić, 2007) te je potrebna primjena centralizera na šipkama;
- niz klipnih šipki treba biti takav da je zaštićen od korozije i mehaničkih oštećenja, što u suprotnom dovodi do vrlo ranog oštećenja niza;

- ako se s pridobivenim fluidom pridobiva i pijesak, vrlo brzo dolazi do oštećenja crpke;
- potrebno je voditi veliku brigu i vršiti redovnu kontrolu brtvenice (engl. *stuffing box*) polirane (glatke) šipke, koja prilikom nepropisnog rukovanja i samim trošenjem može predstavljati opasnost za okoliš ako dođe do propuštanja fluida po bušotinskom radnom prostoru;
- površinski dio sustava zauzima veliku površinu te nije pogodan za postavljanje u naseljenim mjestima.

3. PROGRAMSKI PAKET QUICK ROD – QROD 3.1

Programski paket QRod 3.1 predstavlja u svijetu najšire korišteni besplatni program, koji služi za dizajn i predviđanje učinkovitosti rada sustava proizvodnje kapljevine primjenom dubinske crpke s klipnim šipkama. QRod je dostupan kao računalni program za besplatnu instalaciju na računalo ili kao online kalkulator na web stranici kompanije Echometer. Glavni cilj programskog paketa QRod 3.1 je da omogući korisniku pomoć prilikom dizajniranja sustava podizanja. To se postiže tako da se u dizajn implementiraju sva najmodernija dostupna tehnološka dostignuća. Mijenjanjem pojedinačnih parametara, kao što su sidrenje tubinga (engl. *tubing anchor*), promjena duljine hoda klipa ili promjera crpke, prikazuje se trenutačna promjena izlaznih podataka. Program nudi mogućnost odabira za unos ili ispis podataka na engleskom i španjolskom jeziku (Rowlan et al., 2013).

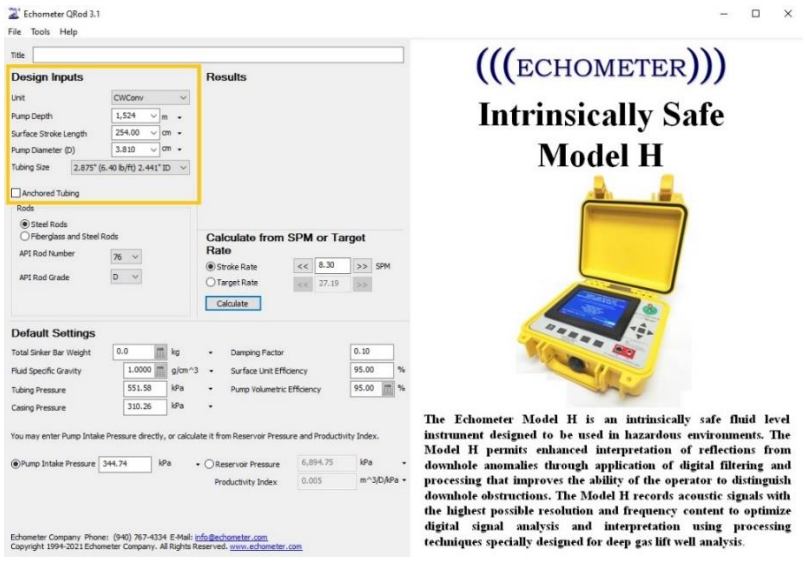
3.1. Osnovni princip rada programskog paketa QRod 3.1

Programski paket QRod 3.1 može se predstaviti kao simulator kretanja površinskog pogonskog sustava odnosno klasificiran je kao program za dizajniranje i kontrolu rada sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama. Programski paket QRod vrši matematičku simulaciju kinetičkog gibanja glatke šipke za danu duljinu hoda odabranog površinskog sustava te tako definira granična opterećenja na površini. Težina stupca fluida koju crpka ostvaruje na dno niza klipnih šipki koristi se za određivanje graničnih opterećenja na dnu niza klipnih šipki (na razini crpke). Proračun opterećenja na dnu program vrši na osnovu očekivanog tlaka usisa crpke, specificirane veličine klipa, vertikalne dubine ugradnje crpke, tlaka u tubingu te gustoće fluida u tubingu. Na osnovu podataka o opterećenju pumpe (engl. *pump load*) i gibanju glatke šipke, program rješava parcijalnu diferencijalnu valnu jednadžbu (engl. *partial differential wave equation*) opisujući gibanje niza klipnih šipki kako bi predvidio opterećenja na površini, kao i brzinu gibanja klipa te njegov položaj. Za odabrani tip površinskog pogonskog postrojenja, moment torzije i karakteristike protuutega program određuje iz predviđenih opterećenja površinskog dinamograma te položaja glatke šipke (Jennings, 1994).

Za sustav podizanja kapljevine crpkom s klipnim šipkama, poznavanje dubine na kojoj se crpka ugrađuje i željene količine koja će se pridobivati je jako bitno. Primarni parametri dizajna sustava su: duljina hoda klipa, površina poprečnog presjeka klipa te broj hodova. Ova tri parametra predstavljaju glavne (primarne) parametre čijim se prilagođavanjem postiže željeni dizajn cijelog sustava. Neki od izazova dizajniranja sustava mogu biti: smanjenje potrebne količine energije koja se utroši u procesu podizanja, smanjenje opterećenja niza ili jednostavan proračun količine fluida koju je crpkom moguće pridobiti. Unos sekundarnih parametara kod dizajna sustava može značiti potrebu da se uvjeti rada prilagode nekoj određenoj situaciji ili da se postigne bolje poklapanje s podatcima dobivenim mjerenjem dinamometrom (poklapanje dinamograma). Programski paket QRod 3.1 ima veliki broj sekundarnih parametara koji uključuju: tip površinskog postrojenja, odabir kvalitete i sastava niza klipnih šipki, usisni tlak crpke, tlak u tubingu te specifičnu gustoću fluida (Jennings, 1994). Primarni cilj programskog paketa QRod 3.1 je postizanje što točnijeg dizajna sustava koristeći minimalnu količinu dostupnih ulaznih podataka, što u konačnici omogućava i kvalitetnu kontrolu rada sustava podizanja kapljevine (Hein et al., 2015).

3.2. Korisničko sučelje programskog paketa QRod 3.1

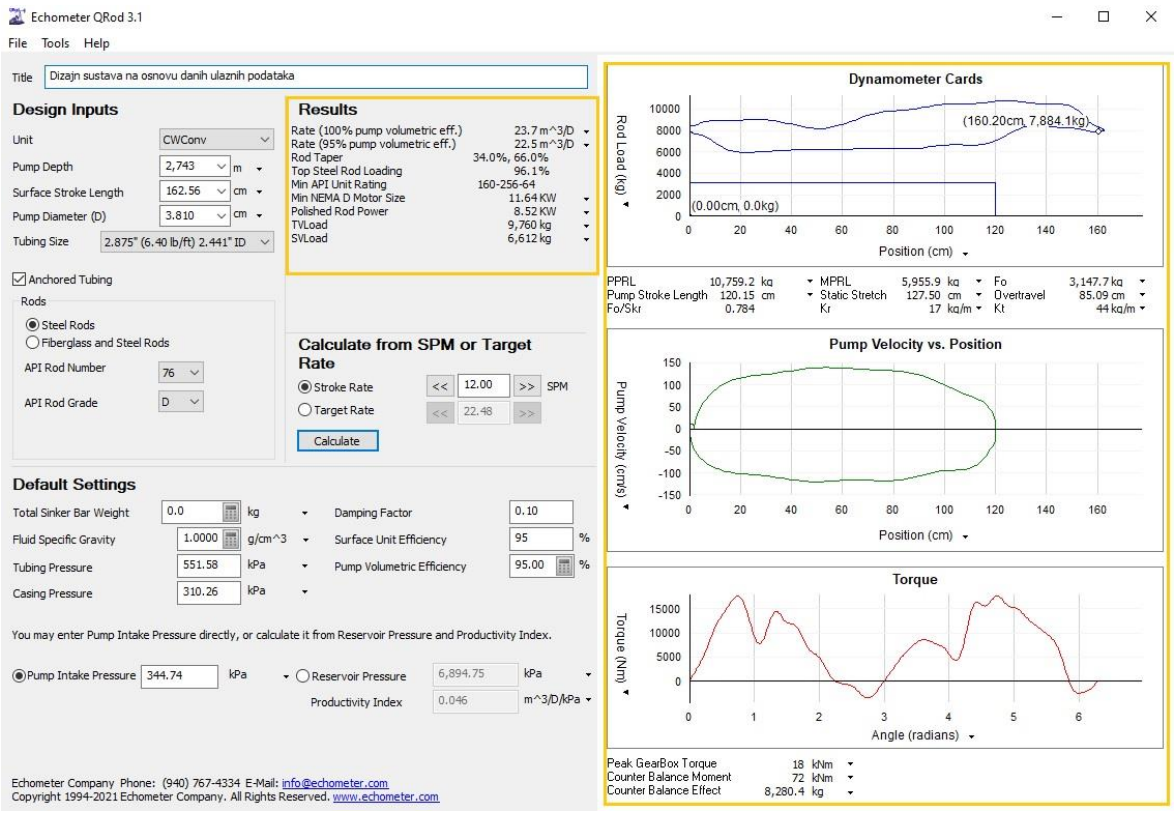
Na slici 3-1 prikazano je korisničko sučelje programskog paketa QRod 3.1.



Slika 3-1. Korisničko sučelje programa QRod 3.1 (Echometer, 2015)

Nakon pokretanja programa otvara se novi prozor koji se sastoji iz dva glavna dijela. Na lijevom dijelu programskog sučelja nalazi se radni dio programa, koji omogućuje korisniku unos ulaznih podataka. Budući da je programski paket QRod 3.1 besplatan za korištenje, kompanija Echometer koristi desni dio korisničkog sučelja u svrhu reklamiranja svojih drugih, komercijalnih proizvoda.

Kao što je već ranije spomenuto, program omogućava rad u sučelju na engleskom ili španjolskom jeziku. Ulazne podatke moguće je unositi i u anglosaksonskom sustavu mjernih jedinica, kao i u međunarodnom (SI) sustavu mjernih jedinica. Program također dozvoljava pretvorbu jednog sustava u drugi unutar samog sučelja programa (Rowlan et al., 2013). Na slici 3-2 prikazan je izgled programskog sučelja nakon unosa ulaznih podataka te odabranog dizajna i načina rada sustava.



Slika 3-2. Prikaz izlaznih podataka dizajna sustava

Izlazni podatci dobiveni na osnovu unosa minimalnog broja ulaznih podataka prikazani su unutar narančasto označenih kartica. Kartica rezultati (engl. *results*) daje

detaljan opis i karakteristike dizajna sustava, dok kartica prikazana na desnoj strani nudi grafički prikaz izlaznih podataka.

Predviđeni dinamogrami opterećenja na površini sustava, kao i na razini crpke, prikazani su zahvaljujući proračunu promatranom kroz jedan cijeli ciklus rada sustava. Prikazan je i dijagram odnosa brzine kretanja klipa crpke u odnosu na njegov položaj, kao i dijagram momenta torzije (Jennings, 1994).

3.3. Alati unutar programskog paketa QRod 3.1

Najnovija verzija programskog paketa QRod 3.1 osim osnovnog cilja da omogući dizajn sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama, posjeduje nekoliko dodatnih alata koji služe za rješavanje specifične problematike koja se javlja pri radu sustava (Rowlan et al., 2013):

- **kalkulator za proračun gubitaka kroz zazor klipa dubinske crpke** (engl. *slippage losses*) (Perić, 2007) – kalkulator koristi zazor između cilindra crpke i njenog klipa kako bi definirao odnos između učinkovitosti crpke i predviđene proizvodnje dobivene u programskom paketu QRod 3.1;
- **kalkulator za proračun duljine teške klipne šipke** (engl. *sinker bar length calculator*) – definira duljinu teške klipne šipke ovisno o promjeni promjera ili dubine ugradnje dubinske crpke;
- **kalkulator za proračun specifične težine (gustoće) fluida u tubingu**;
- **usporedba dizajna s mjerenim podatcima** – QRod 3.1 omogućuje učitavanje DYN datoteke (engl. *DYN file*) koja je nastala zapisom mjerenje dinamometra smještenog na glatkoj šipki te usporedbu mjerenih i programom predviđenih opterećenja na površini.

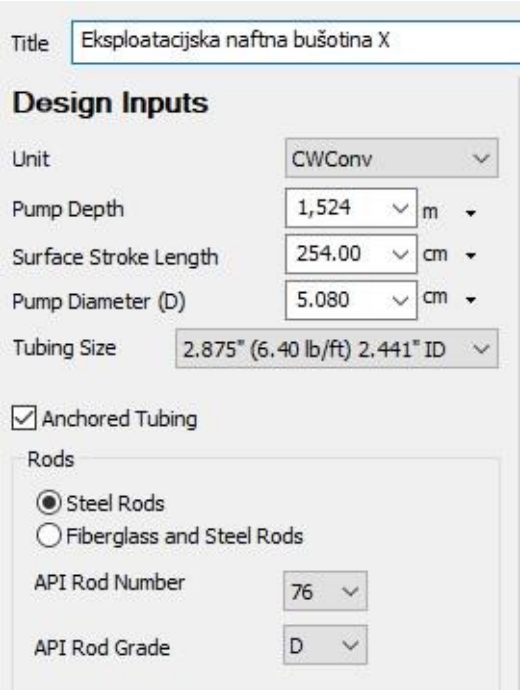
4. DIZAJN SUSTAVA PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA QROD 3.1

Detaljan postupak prilikom dizajna sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama primjenom programskog paketa QRod 3.1 bit će prikazan u nastavku ovog diplomskog rada na primjeru nekoliko bušotina.

4.1. Dizajn sustava podizanja kapljevine na eksploatacijskoj naftnoj bušotini X

Za primjer dizajna sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama korišteni su realni podatci osigurani od strane kompanije Echometer koja je ujedno i vlasnik licence programskog paketa QRod 3.1. Pretpostavka je kako eksploatacijska naftna bušotina X proizvodi s punim kapacitetom crpke, bez prisutnosti plina te kako nema nikakvih propuštanja kroz ventile crpke.

Dizajn sustava započet je unošenjem ulaznih podataka karakterističnih za eksploatacijsku naftnu bušotinu X. Dubinska crpka ugrađena je na dubini od 1 524 m (5000 ft) s duljinom hoda glatke šipke na površini od 2,54 m (100 in). Promjer crpke iznosi 5,08 cm (2 in), a ugrađena je u niz usidrenog tubinga nominalnog promjera 7,3025 cm (2,875 in). Tlak u tubingu iznosi 5,52 bar (80 psi), dok je usisni tlak crpke 3,45 bar (50 psi). Ulazni podatci su prikazani na slici 4.1.



Slika 4-1. Ulazni podatci za dizajn sustava

Nakon unosa poznatih ulaznih podataka za dizajn sustava podizanja kapljevine, pristupa se odabiru karakteristika za površinski pogonski sustav. Programski paket QRod 3.1 nudi odabir jednog od četiri najpoznatija tipa njihalice. Za ovaj primjer odabrana je primjena konvencionalne njihalice s rotacijom u smjeru kazaljke na satu (engl. *CWConv – Clockwise Conventional*) koja se koristi i u Republici Hrvatskoj. Osim konvencionalnog tipa, moguće je još odabrati i konvencionalni tip njihalice s rotacijom obrnutom od smjera kazaljke na satu (engl. *CCWConv – Counter-Clockwise Conventional*), njihalicu s uravnoteženjem preko ručica i utega ispred postolja (MarkII tip njihalice) te njihalicu sa zračnim uravnoteženjem.

Nakon odabira tipa njihalice, pristupa se odabiru niza klipnih šipki. Radi bolje raspodjele opterećenja primjenjuje se kombinirani (engl. *tapered*) niz klipnih šipki, gdje se šipke većeg promjera nalaze pri vrhu niza, a šipke manjeg promjera pri dnu niza klipnih šipki. Za ovaj primjer odabran je kombinirani niz klipnih šipki klasificiran kao 76 API D.

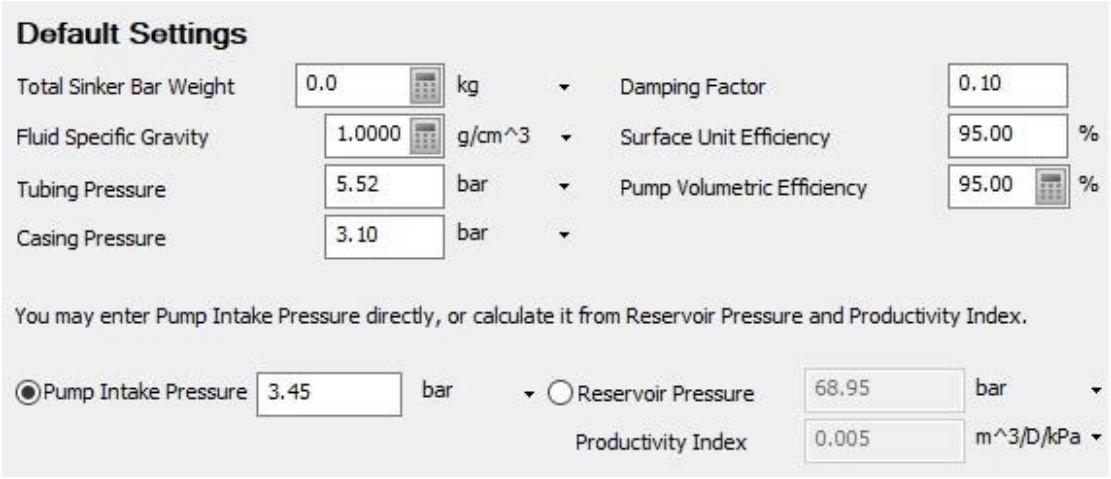
U tablici 4-1 prikazan je postupak odabira kombiniranog niza klipnih šipki prema službenoj API klasifikaciji.

Tablica 4-1. API klasifikacija kombiniranog niza klipnih šipki (API, 1996)

API broj niza	1 1/4''	1 1/8''	1''	7/8''	3/4''	5/8''
[mm] >	32	29	25	22	19	16
55						+
65					+	+
66					+	
75				+	+	+
76				+	+	
77				+		
86			+	+	+	
87			+	+		
88			+			
97		+	+	+		
98		+	+			
99		+				
108	+	+	+			
109	+	+				

API broj niza klipnih šipki predstavljen je odnosom u 1/8", dakle klipna šipka nominalnog promjera 1" (25 mm) nosi broj 8. Za dizajn ovog sustava odabrane su čelične klipne šipke kvalitete D te API broja 76. To znači da će se kombinirani niz klipnih šipki sastojati od niza klipnih šipki promjera 7/8" (22 mm) na vrhu niza te niza klipnih šipki promjera 3/4" (19 mm) na dnu niza. Programski paket QRod 3.1 će kao rezultat odabira kombiniranog niza klipnih šipki ponuditi rješenje u vidu postotnog udjela oba odabrana promjera niza, u ukupnom nizu. Ukupni postotak pojedinog niza određuje se na temelju odabranog promjera dubinske crpke. Na ovaj način osigurat će se ravnomjerna raspodjela opterećenja na vrhu obje sekcije niza te se ovakav pristup smatra najboljim za postizanje uravnoteženog dizajna sustava (Rowlan et al., 2013).

Na slici 4-2 prikazana je kartica s podatcima i opcijama unaprijed zadanim u opcijama programskog sučelja.



Slika 4-2. Prikaz podataka u zadanim opcijama programa

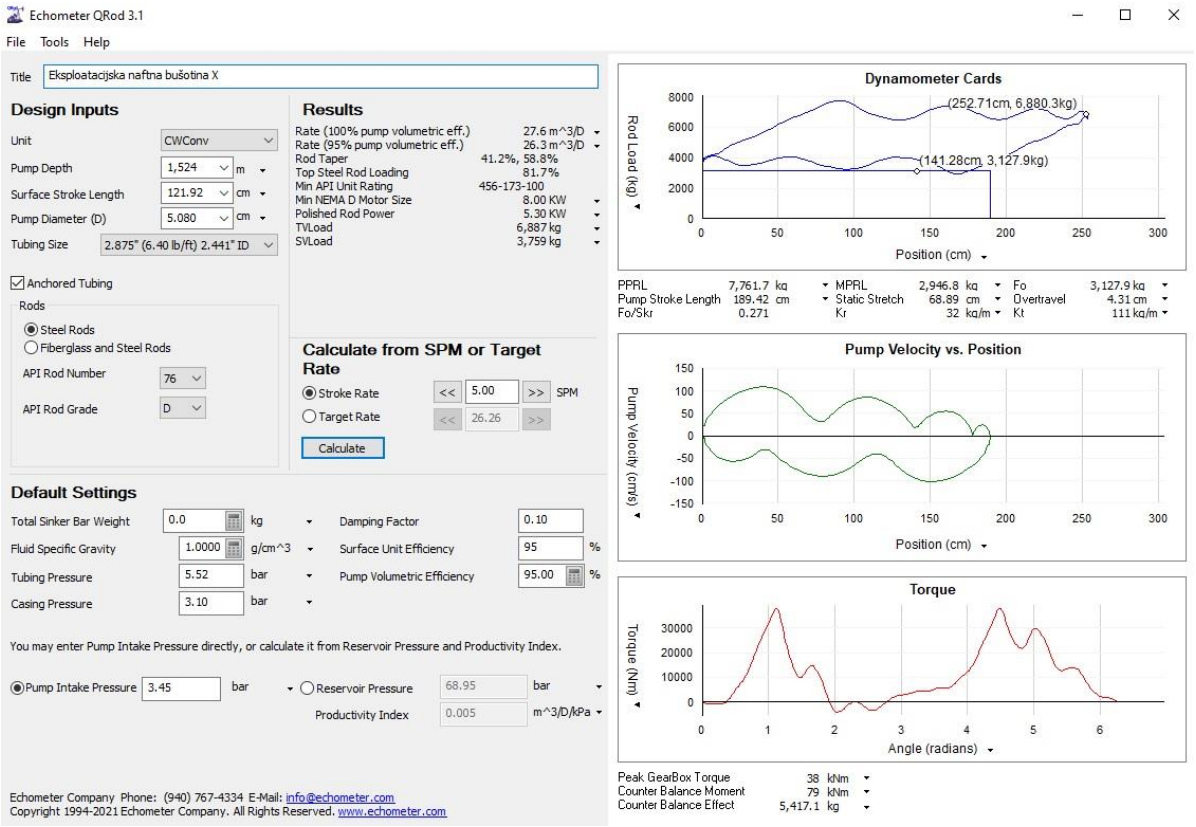
Nakon unosa ulaznih podataka u karticu dizajna, potrebno je u zadanim opcijama unijeti nove ili korigirati već postojeće izmjerene podatke o tlakovima unutar niza tubinga i zaštitnih cijevi te definirati tlak na usisu crpke. Također, ako su poznati podatci o volumetrijskoj učinkovitosti crpke ili učinkovitosti pogonskog sustava na površini, iste je moguće definirati u kartici programskog sučelja.

Posljednji korak prilikom dizajna sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama predstavlja odabir željenog broja hodova klipa crpke. Broj hodova klipa crpke izražava se u broju hodova u minuti (engl. *SPM – Strokes per minute*). Pritiskom na tipku izračunaj (engl. *calculate*) programski paket QRod 3.1 daje set izlaznih podataka za sustav koji je dizajniran (slika 4-3). Za ovaj primjer odabran je rad crpke s 5 hod/min (5 SPM).



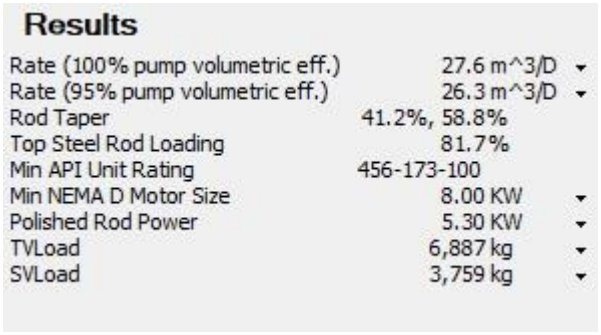
Slika 4-3. Odabir broja hodova klipa dubinske crpke

Na slici 4-4 prikazan izgled korisničkog sučelja programskog paketa QRod 3.1 s prikazom svih parametara novog dizajniranog sustava eksploatacijske naftne bušotine X. Programski paket QRod 3.1 dozvoljava ispis izlaznih podataka u obliku .qrd datoteke ili u PDF obliku.



Slika 4-4. Korisničko sučelje s prikazom izlaznih podataka dizajna sustava

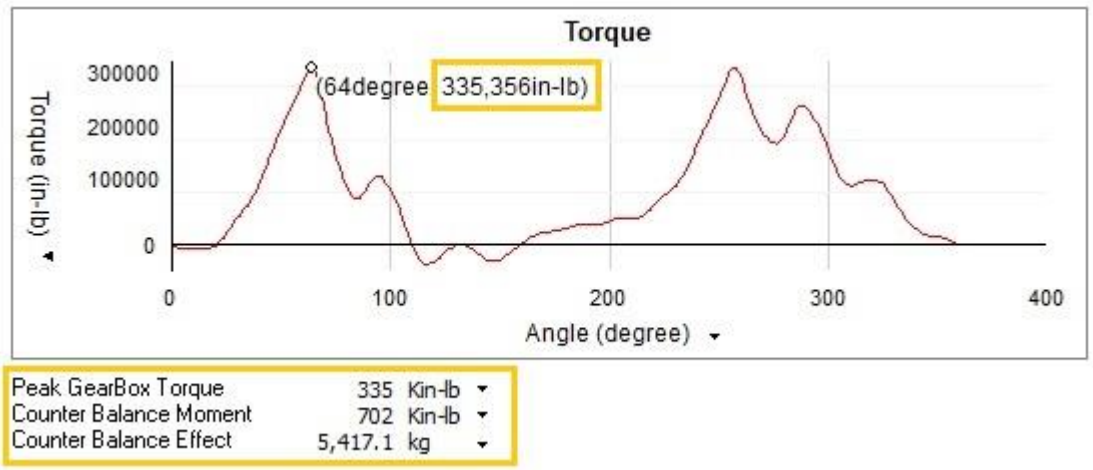
Kartica rezultati (engl. *results*) prikazana je na slici 4-5 te daje uvid u numerički dio dizajna sustava. Sustav pridobivanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama na eksploatacijskoj bušotini X trebao bi (uz pretpostavku volumetrijske učinkovitosti pumpe od 95 %) proizvoditi 26,3 m^3/dan (165,1 bbl/d) kapljevine. Dizajn kombiniranog niza klipnih šipki API 76 D treba se sastojati od 41,2 % klipnih šipki promjera 22 mm (7/8") na vrhu niza te 58,8 % klipnih šipki promjera 19 mm (3/4") na dnu.



Slika 4-5. Numerički prikaz rezultata dizajna sustava

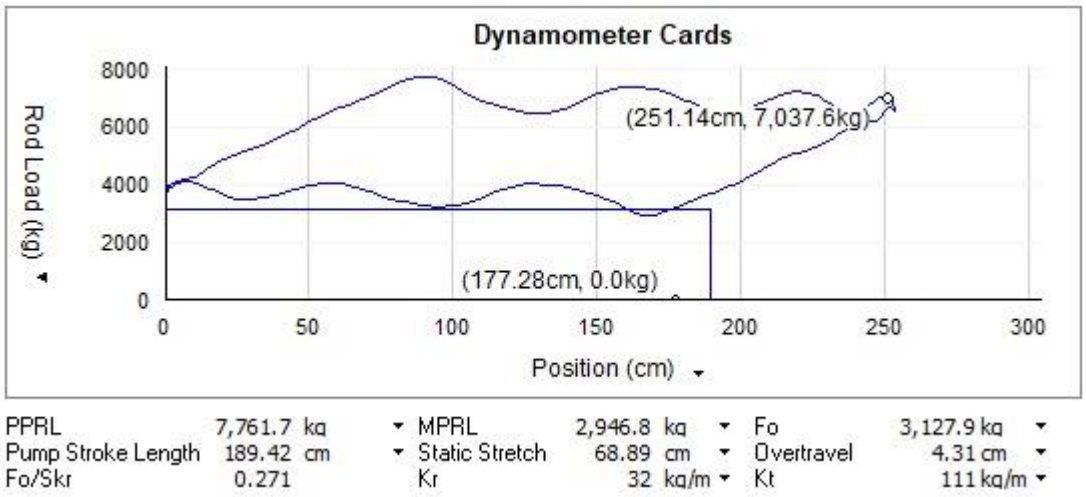
Dizajn površinskog pogonskog sustava (njihalice) dan je API klasifikacijom **456-173-100**. Kako se radi o klasifikaciji Američkog naftnog instituta (engl. *API – American Petroleum Institute*), radi lakšeg razumijevanja i grafički prikaz ovog dijela dizajna sustava bit će prikazan u anglosaksonskim mjernim jedinicama. Prva brojka API klasifikacije površinskog pogonskog sustava – 456 predstavlja maksimalni moment torzije (engl. *peaq torque*) za mjenjačku kutiju (engl. *gearbox*) postrojenja. Brojka je prikazana u tisućama in·lb, te za dani dizajn sustava iznosi 335 kin·lb. Slika 4-6 prikazuje dijagram kretanja momenta torzije za vrijeme rada sustava, kao i podatke o dizajnu protuutega potrebnog za uravnotežen i nesmetan rad sustava. Brojka – 173 predstavlja maksimalno opterećenje kojemu može biti izložen kombinirani sustav klipnih šipki, prikazuje se u stotinama lb (engl. *pound*). Maksimalno opterećenje za dizajnirani sustav moguće je očitati s previđenog površinskog dinamograma sustava te za ovaj sustav iznosi 17 111,7 lb. Treća brojka klasifikacije – 100 odnosi se na maksimalnu duljinu hoda sustava na površini te se prikazuje u in (engl. *inch*). Za dani primjer duljinu hoda odabran je kao ulazni podatak prilikom dizajniranja sustava.

Za pogonski motor površinskog sustava odabran je električni motor minimalne nazivne snage 8 kW (10,73 hp). Upravo ovakva vrsta elektromotora najčešće se koristi za dizajn sustava kod kojih se pri radu javljaju veliki vršni momenti torzije. Dijagram vršnog momenta torzije prikazan je na slici 4-6.



Slika 4-6. Dijagram momenta torzije sustava

Na slici 4-7 prikazan je dinamogram opterećenja sustava na površini i razini crpke dizajniran primjenom programskog paketa QRod 3.1.



Slika 4-7. Dinamogram opterećenja na površini i razini crpke

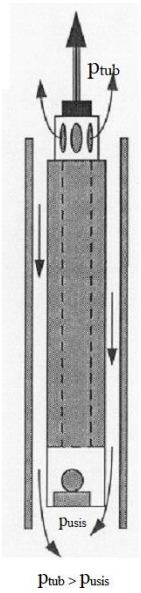
Osim prikaza dijagrama opterećenja, numerički prikaz izlaznih podataka prikazanih ispod samog dijagrama daje uvid u bitne karakteristike dizajna sustava. Jasno su naznačeni maksimalan iznos opterećenja sustava od 7761,7 kg (17 111,7 lb), minimalan iznos opterećenja sustava 2946,8 kg (6496,5 lb) te opterećenje koje će na niz klipnih šipki imati potpuno ispunjena crpka 3127,9 kg (6895,8 lb). Stvarna duljina hoda glatke šipke na površini

iznosit će 189,42 cm (74,57 in), dakle gubi se 27,1 % željene duljine hoda na površini zbog istezanja niza klipnih šipki uzrokovanog vlastitom težinom. To statičko istezanje za ovakav dizajn sustava iznosi 68,89 cm (27,12 in). Na ovakav način stvarna duljina hoda klipnih šipki (klipa) je bitna radi određivanja kapaciteta crpke.

Na primjeru eksploatacijske naftne bušotine X prikazan je vrlo jednostavan, brz i učinkovit način dizajniranja sustava podizanja kapljevine primjenom dubinske crpke s klipnim šipkama u programskom paketu QRod 3.1. Dizajn cijelog sustava podizanja kapljevine konstruiran je uz minimalan broj ulaznih podataka te su pojašnjeni svi parametri prikazani kao rezultat dizajna sustava. U nastavku ovog diplomskog rada prikazat će se primjena programskog paketa QRod 3.1 za rješavanje nekih specifičnih problema koji se u praksi javljaju kod sustava koji su već dizajnirani te aktivno rade. Također, prikazat će se i usporedba predviđenog dizajna sustava s realnim podatcima mjerenim na istoj eksploatacijskoj bušotini.

4.2. Primjer proračuna gubitaka fluida kroz zazor dubinske crpke

Proklizavanje fluida (engl. *pump slippage*) (Perić, 2007) predstavlja količinu fluida koja se gubi kroz zazor između vanjskog promjera klipa i unutarnjeg promjera cilindra dubinske crpke. Proklizavanje se javlja samo prilikom hoda niza klipnih šipki prema gore, kada se tlačni ventil nalazi u svom sjedištu. Razlog tomu je razlika između tlaka u tubingu (p_{tub}) i tlaka na usisu crpke (p_{usis}), odnosno tlak u tubingu je veći od tlaka na usisu crpke (slika 4-8). Proklizavanje fluida povećava se sa povećanjem dubine te brzine crpljenja (Rowlan et al., 2012).



Slika 4-8. Shematski prikaz proklizavanja crpke (Rowlan et al., 2012)

Prilikom dizajniranja rada sustava, za odabir zazora dubinske crpke, u praksi najčešće se koristi tzv. "pravilo palca" (engl. *rule of thumb*). Zazor dubinske crpke određuje se na osnovu nominalnog promjera klipa crpke, što je prikazano u tablici 4-2 (Patterson et al., 2007). Preporuka je da se odabire zazor crpke u iznosu od 2 % do 5 % od ukupnog davanja bušotine. Navedena preporuka dana je sa stajališta kako je 2 % do 5 % od ukupnog davanja bušotine dovoljno u svrhu podmazivanja (engl. *lubricaton*) crpke te njen nesmetan rad (Rowlan et al., 2012). Također, zazor predstavlja važnu ulogu i kod prolaska čestica pijeska, premali zazor uzrokovao bi taloženje čestica pijeska te tako izazvati blokadu kretanja klipa i samim time puknuće klipnih šipki (Brkić, 2019).

Tablica 4-2. Preporuka za odabir zazora crpke (Patterson et al., 2007)

Promjer klipa		**Veličina zazora**	
[mm]	**[in]**	**[mm]**	**[in]**
31,75	1,25	0,127	0,005
38,1	1,50	0,1524	0,006
44,45	1,75	0,1778	0,007
50,8	2,00	0,2032	0,008
57,15	2,25	0,2286	0,009

Programski paket QRod 3.1 za odabir zazora dubinske crpke, prilikom dizajna sustava podizanja kapljevine, ne koristi u praksi uobičajeno "pravilo palca". Osluškujući povratne informacije (engl. *feedback*) korisnika početnih verzija programskog paketa QRod, kompanija Echometer je zamijetila značajne gubitke proizvodnog fluida kroz zazor crpke pri dizajnu sustava. Gubitci zbog proklizavanja crpke rasli su s porastom promjera klipa crpke (samim time prema "pravilu palca" i zazor između promjera klipa i unutrašnjeg promjera cilindra crpke je bio veći. Kompanija je posvetila dosta vremena razvoju novog načina rješavanja problema vezanog uz proklizavanje fluida te je u programski paket QRod 3.1 ugradila novi kalkulator za proračun gubitka fluida kroz zazor crpke. Ovaj proračun unutar programskog paketa QRod 3.1 predstavljen je novom empirijskom jednadžbom koja se naziva Pattersonova jednadžba za proračun proklizavanja crpke (engl. *Patterson's Pump Slippage Equation*). Kako se radi o empirijskoj jednadžbi, koja je dobivena na temelju mjerenja na više od 200 eksploatacijskih naftnih bušotina u Sjedinjenim Američkim Državama, radi lakšeg razumijevanja formula će biti prikazana u anglosaksonskim mjernim jedinicama (Rowlan et al., 2012).

$$Slippage = 453 \cdot [(0{,}14 \cdot SPM) + 1] \frac{DPC^{1{,}52}}{L\mu} \tag{4-1}$$

Gdje su:

SPM – broj hodova u minuti [spm]

D – nominalni promjer crpke [in]

P – diferencijalni pad tlaka na klipu crpke [psi]

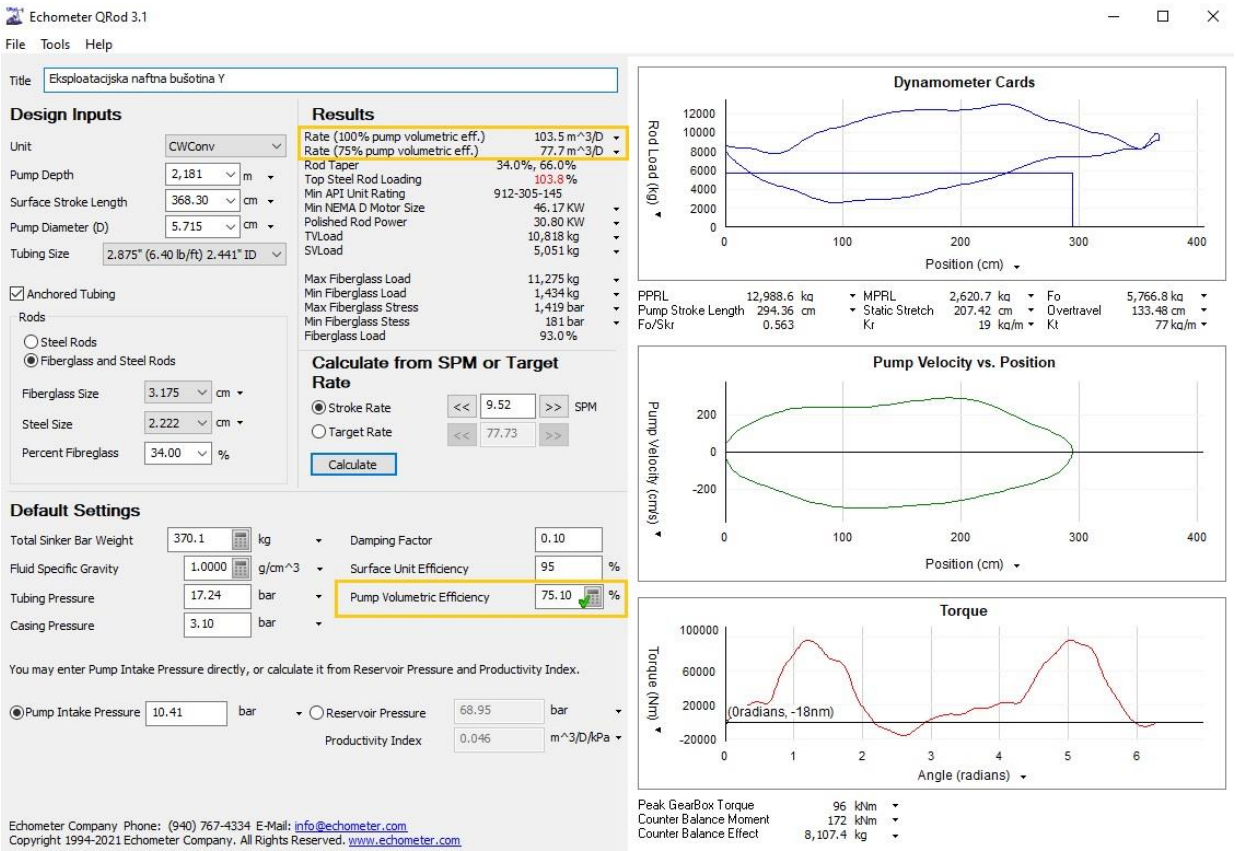
C – zazor (engl. *clearance*) [in]

L – duljina klipa crpke [in]

μ – viskoznost fluida [cP].

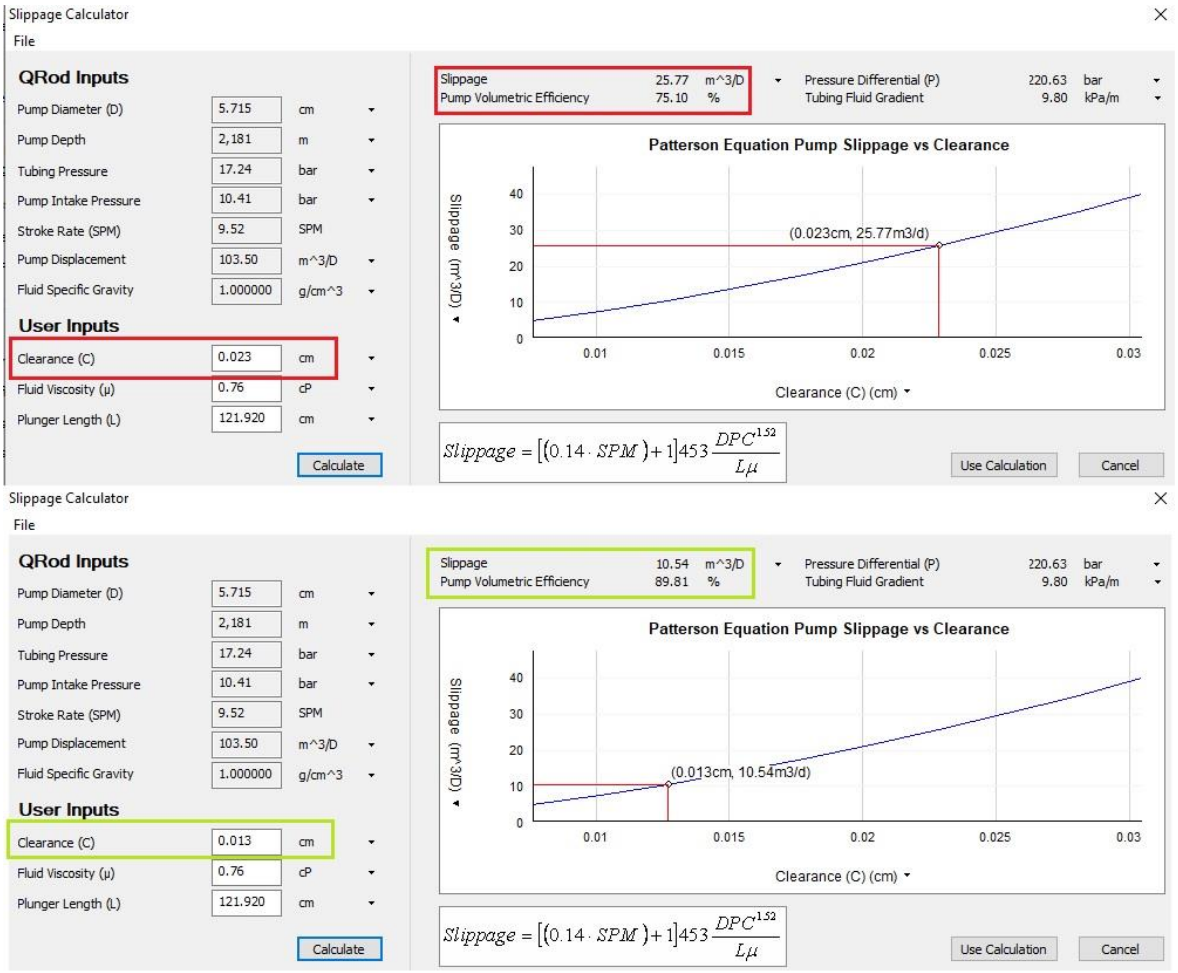
Nedugo nakon dizajna sustava podizanja kapljevine, na eksploatacijskoj naftnoj bušotini Y mjerilo protoka pridobivenog fluida na priključnom naftovodu pokazivalo je znatno manju količinu pridobivenog fluida od one za koju je sustav dizajniran. Karakteristike dizajna cijelog sustava unijete su u programski paket QRod 3.1 (slika 4-9) te je primijećena

znatno smanjena volumetrijska učinkovitost crpke (75,1 %). Umjesto očekivanih 103 m^3/dan (651 bbl/d) bušotina je davala tek 78 m^3/dan (489 bbl/d). Dakle, ukupno 26 m^3/dan (162 bbl/d) pridobivenog fluida se prilikom proizvodnje gubi u sustavu.



Slika 4-9. Dizajn sustava za eksploatacijsku naftnu bušotinu Y

Kako bi se ustanovio uzrok naglog smanjenja davanja bušotine kao i pada učinkovitosti crpljenja dubinske crpke, izvršen je detaljan uvid u sve parametre dizajna sustava. Uvidom u karticu kalkulatora za proračun gubitka fluida kroz zazor crpke (slika 4-10), primjećuje se kako je za dani slučaj eksploatacijske naftne bušotine Y, zazor između cilindra crpke i klipa odabran prema "pravilu palca". Dakle, za promjer klipa crpke od 5,715 cm (2,25 in) odabran je zazor crpke od 0,023 cm (0,009 in). Uz pretpostavku kako je proklizavanje fluida (zbog prevelikog zazora) problem smanjene učinkovitosti crpke, kao i njene proizvodnje, pristupilo je primjeni Pattersonove jednadžbe za proračun proklizavanja fluida. Rezultati takvog dizajna sustava prikazani su na slici 4-10.

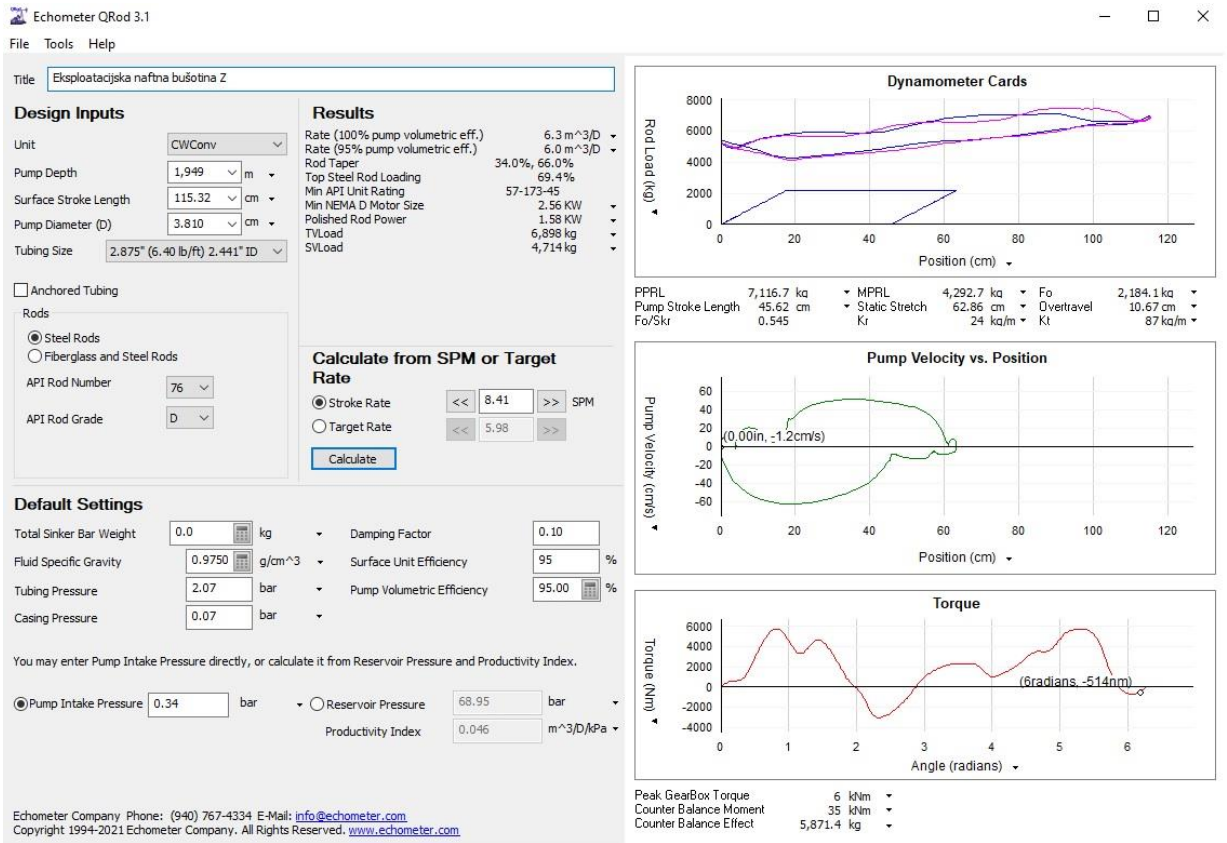


Slika 4-10. Kalkulator za proračun proklizavanja crpke

Na primjeru eksploatacijske naftne bušotine Y može se uočiti jednostavna, kvalitetna i brza primjena programskog paketa QRod 3.1 prilikom detektiranja problema, kao i njegovog rješavanja. Predviđeni novi dizajn sustava, sa zazorom između cilindra crpke i klipa od 0,013 cm (0,005 in) povećava volumetrijsku učinkovitost crpke na 89,81 %. Sukladno tome i davanje naftne bušotine Y bit će veće, jer se na proklizavanje fluida u novom dizajnu sustava gubi 10,2 %. Dakle, gubi se 10,5 m^3/dan (66 bbl/d) u odnosu na prvotni dizajn u kojemu se zbog proklizavanja fluida gubilo 1/4 ukupne proizvodnje sustava (24,9 %).

4.3. Usporedba predviđenog dizajna sustava s mjerenim podatcima

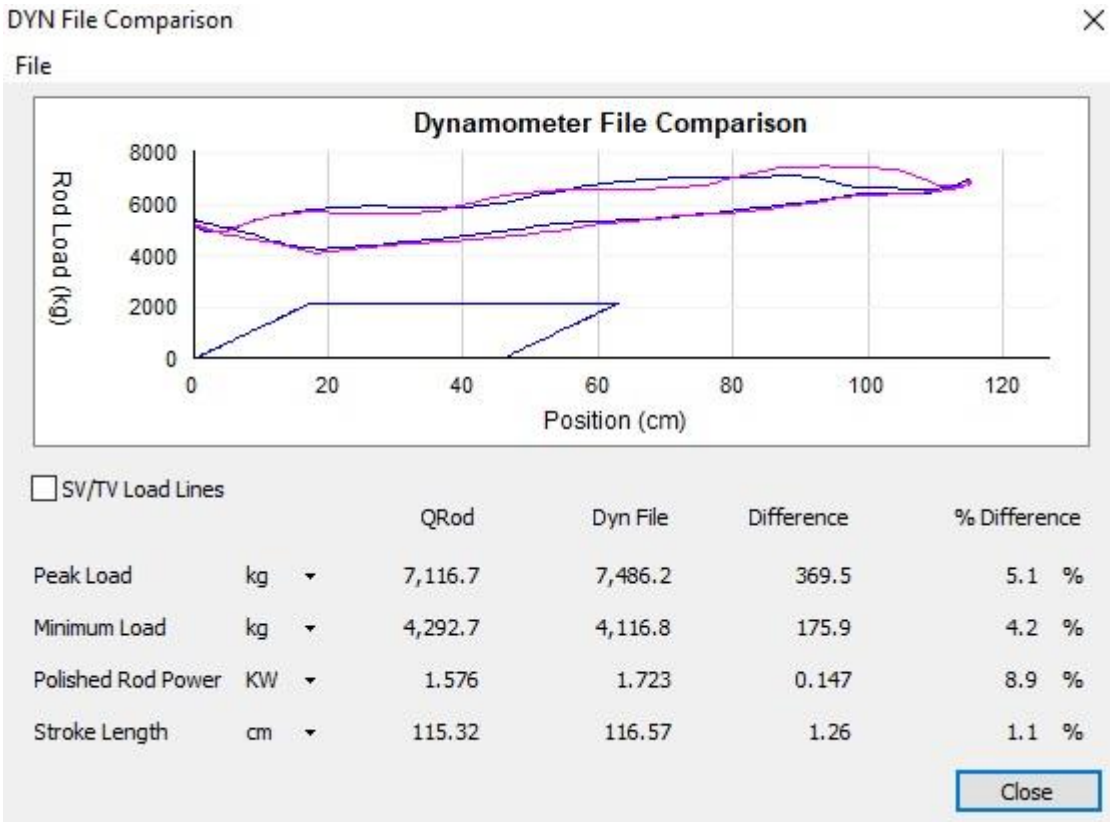
Za eksploatacijsku naftnu bušotinu Z dostupni su mjereni (realni) podatci sustava. Mjerenja dinamometrom na površini, digitalizirana su i spremljena u obliku .dyn datoteke. Dinamogram površinskih opterećenja sustava na eksploatacijskoj naftnoj bušotini Z u kojoj se pridobiva kapljevina sustavom dubinske crpke s klipnim šipkama moguće je učitati u programski paket QRod 3.1. Nakon unosa ulaznih podataka za eksploatacijsku bušotinu Z, pritiskom na naredbu alati (engl. *tools*) na alatnoj traci te zatim na naredbu preklapanje s .dyn datotekom (engl. *Overlay Dyn File*) uspoređeni su predviđeni dinamogram površinskih opterećenja te stvarni (dinamometrom mjereni) dinamogram (slika 4-11).



Slika 4-11. Usporedba predviđenih i mjerenih podataka sustava na eksploatacijskoj naftnoj bušotini Z

Predviđeni dinamogram površinskih opterećenja prikazan je plavom bojom, dok je dinamogram dobiven mjerenjem na samoj bušotini te učitan u programski paket QRod 3.1

prikazan rozom bojom. Na slici 4-12 prikazan je bolji uvid u samo preklapanje dvaju dinamograma, kao i usporedbu predviđenog i stvarnog dizajna sustava. Za slučaj eksploatacijske naftne bušotine Z, predviđeni sustav pridobivanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama primjenom programskog paketa QRod 3.1 nudi poprilično točan dizajn u odnosu na stvarna mjerenja eksploatacijske bušotine. Pogreška prilikom predviđanja dizajna sustava je svedena na minimum i iznosi 5,1 % za maksimalno opterećenje sustava na površini te 4,2 % za maksimalno opterećenje sustava na razini crpke. Duljina hoda niza klipnih šipki predviđenog sustava gotovo je identična mjerenoj duljini hoda na bušotini Z te je razlika svega 1,27 cm (0,5 in), odnosno 1,1 %.



Slika 4-12. Prikaz preklapanja predviđenog i stvarnog dinamograma sustava

5. ZAKLJUČAK

Pridobivanje kapljevine primjenom sustava dubinske crpke s klipnim šipkama i danas predstavlja najčešće korištenu metodu mehaničkog podizanja kapljevine. Napretkom tehnike i tehnologije kroz povijest mijenjao se samo način kontrole i nadzora rada sustava, ali je način i funkcionalnost rada sustava ostala ista. Sustav podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama se i dalje sastoji od istih osnovnih komponenata sustava, ali je tehnološki napredak omogućio kvalitetniju izradu tih komponenata što u konačnici nudi priliku za povećanjem učinkovitosti samog sustava. Upravo je to razlog zbog kojega je poželjno imati način za jednostavan i brz dizajn i kontrolu sustava podizanja kapljevine, kako bi se tehnološki napredak u potpunosti iskoristio te povećala učinkovitost sustava, a time i profitabilnost smanjenjem remontnih zahvata u bušotini.

Cilj ovog diplomskog rada bio je prikazati programski paket QRod 3.1 kao odlično, lako dostupno, brzo i jednostavno rješenje za dizajn i kontrolu sustava podizanja kapljevine dubinskom crpkom s klipnim šipkama. Programski paket QRod 3.1 korisniku nudi veoma učinkovit način za kontrolu rada sustava već postojeće eksploatacijske bušotine ili pak predviđa dizajn sustava za bušotinu na kojoj se razmatra primjena sustava podizanja dubinskom crpkom s klipnim šipkama. Realnim primjerima s eksploatacijskih naftnih bušotina prikazana je mogućnost programskog paketa QRod 3.1 za potpuno novi dizajn sustava podizanja kapljevine unosom minimalnog broja ulaznih podataka koji omogućava dovoljno učinkovit rad sustava. Također, prikazane su dijagnostičke karakteristike samog programa kod određivanja te rješavanja nekih specifičnih problema na eksploatacijskim bušotinama kao što su proklizavanje fluida, smanjena proizvodnja te smanjena učinkovitost rada sustava. Usporedbom predviđenog dizajna sustava sa stvarnim (mjerenim) podatcima sustava prikazana je i velika točnost programa s veličinom pogreške od svega 5 – 6 %. Sve to programski paket QRod 3.1 čini odličnim alatom koji inženjeru proizvodnjesluži za brzu, jednostavnu i preciznu kontrolu ili dizajn sustava čak i na samoj lokaciji bušotine.

6. LITERATURA

1. API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE., 1996. Introduction to Oil and Gas Production. Book one of the vocational training series, Fifth edition. Washington, D. C.: American Petroleum Institute.
2. BROWN, K. E., 1980. The Technology of Artificial Lift Methods, Volume 2a. Tulsa, Oklahoma: PennWell Books.
3. BRKIĆ, V., 2019. Dubinske crpke s klipnim šipkama. Nastavni materijali u Merlinu iz kolegija Proizvodnja nafte i plina 2. u ak. god. 2018./19. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb.
4. HEIN, N. W. Jr., ROWLAN, O. L., MALONE, S., 2015. Rod String Design Software – Well Simulation Using Sandia's Downhole Load Cell. SWPSC.
5. JENNINGS, J. W., 1994. QRod^{TM}, a Practical Beam Pumping Design Program. SWPSC. Lubbock, Texas.
6. JOSIĆ, I., 1993. Priručnik za dubinske sisaljke Axelson. Zagreb: INA – Industrija nafte d.d.
7. MANDIĆ, M., PEHARDA, J., 1988. Tehnologija proizvodnje, sabiranja, pripreme i transporta nafte i plina. Skripta za V stupanj rudarsko-naftne struke. Zagreb: INA-Naftaplin.
8. MATANOVIĆ, D., MOSLAVAC, B., 2011. Opremanje i održavanje bušotina. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb.
9. NIND, T. E. W., 1964. Principles of oil well production. New York: McGraw Hill book company.
10. PATTERSON, J., CHAMBLISS, K., ROWLAN, O. L., CURFEW, J., 2007. Fluid Slippage in Down-Hole Rod-Drawn Oil Well Pumps. SWPSC. ConocoPhillips Company.
11. PERIĆ, M., 2007. Englesko-hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina. Zagreb: INA – Industrija nafte d.d.
12. RISCHMULLER, H., MELER, H., 1989. Oil Production with Subsurface Sucker Rod Pumps. A-2630 Ternitz/Austria: Schoeller-Bleckmann GmbH.
13. ROWLAN, O. L., MCCOY, J. N., LEA, J. F., 2012. Use of the Pump Slippage Equation to Design Pump Clearances. SWPSC. Echometer Company.

14. ROWLAN, O. L., MCCOY, J. N., BECKER, D., SKINNER, K., TAYLOR, C., 2013. Sucker Rod Pumping system design tools for QRod. SWPSC. Echometer Company.
15. TAKACS, G., 2015. Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Amsterdam: Gulf professional publishing.
16. ZELIĆ, M., ČIKEŠ, M., 2006. Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama. Zagreb: INA Industrija nafte d.d.

Web izvori:

17. ALRDC – Artificial Lift Research and Development Council. 2019. Sucker Rod Pumping Workshop. URL: https://alrdc.com/ (30. 12. 2020.)
18. ECHOMETER COMPANY. 2015. Echometer QRod 3.1. URL: https://echometer.com/Software/QRod (13. 01. 2021.)
19. WEATHERFORD. 2015. Artificial-Lift System. URL: https://www.weatherford.com/en/products-and-services/production/artificial-lift-systems/ (29. 12. 2020.)

IZJAVA:

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



Boris Vidoš

KLASA: 602-04/20-01/243
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 27.01.2021.

Boris Vidoš, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/243, UR. BROJ: 251-70-12-20-1 od 03.11.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

DIZAJN I KONTROLA RADA SUSTAVA PODIZANJA KAPLJEVINE DUBINSKOM CRPKOM S KLIPNIM ŠIPKAMA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA QROD 3.1

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Vladislav Brkić, izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić
(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić
(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek
(titula, ime i prezime)