



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Велибор Карановић

**Развој модела утицаја чврстих честица
на рад контактних парова клип-
цилиндар хидрауличких компоненти**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, (2015)



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Велибор В. Карановић
Ментор, МН:	Стеван Станковски
Наслов рада, НР:	Развој модела утицаја чврстих честица на рад контактних парова клип-цилиндар хидрауличких компоненти
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	Нови Сад, Војводина
Година, ГО:	2014
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	
Научна област, НО:	Индустријско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Мехатроника – хидраулика, одржавање, трибологија
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Хидраулички системи, контаминација, дијагностика, трибо-парови
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека ФТН, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У докторској дисертацији је разматран утицај чврстих честица микронских размера на критичне радне перформансе контактнoг пара клип-цилиндар као типа контакта који је најзаступљенији у хидрауличким компонентама. Према концептуалном моделу је изведена експериментална инсталација на којој, за различите концентрације чврстих честица и одређени број радних циклуса је испитиван интензитет хабања, пад притиска и величина запреминских губитака – протицања кроз зазор. Над скупом прикупљених експерименталних података је извршена анализа и моделовање функција које описују понашање посматраних величина.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Иван Бекер, ванр. проф. Члан: др Дарко Кнежевић, ванр. проф. Члан: др Миодраг Хаџистевић, ванр. проф. Члан: др Митар Јоџановић, доц. Члан, ментор: др Стеван Станковски, ред. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Word printed document
Contents code, CC :	Ph. D. Thesis
Author, AU :	Velibor Karanović
Mentor, MN :	Stevan Stankovski
Title, TI :	Development of a solid particle influence model on performance of piston-cylinder contacting pairs for hydraulic components
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Novi Sad, Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	
Scientific field, SF :	Industrial Engineering
Scientific discipline, SD :	Mechatronics – power hydraulics, maintenance, tribology
Subject/Key words, S/KW :	Power hydraulic systems, contamination, diagnostics, tribo-couples
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	This doctoral dissertation analyzes the influence of microscale solid particles on the the critical operational performances of the most common type of tribo-couples in power hydraulic components. According to the conceptual model, experimental installation was made. For different solid particles concentration levels and predefined number of working cycles, experimental installation was used to examine intensity of wear, pressure drop and volumetric efficiency – fluid loss trough the clearance. On the basis of experimental data set was carried out analysis and modeling of functions that describe the behavior of the observed parameters.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Ivan Beker, Ph. D., proffesor
	Member: Darko Knežević, Ph. D., proffesor
	Member: Miodrag Hadžistević, Ph. D., proffesor
	Member: Mitar Jocanović, Ph. D., proffesor
	Member, Mentor: Stevan Stankovski, Ph. D., proffesor
	Menthor's sign

Sadržaj

	Popis korišćenih skraćenica	i
	Popis korišćenih oznaka i njihovih mernih jedinica	ii
	Popis slika	iv
	Popis tabela	xii
1.	Uvod	1
2.	Opis problema i predmet istraživanja	3
2.2	Cilj istraživanja.....	6
2.3	Pregled vladajućih shvatanja u oblasti.....	7
2.4	Sažet prikaz strukture rada.....	9
3.	Čistoća radnog fluida i njegov značaj za održavanje hidrauličkog sistema	11
3.1	Održavanje hidrauličkih sistema.....	11
3.2	Čistoća radnog fluida.....	13
3.2.1	Vrste kontaminacije u hidrauličkim sistemima.....	13
3.2.2	Kontaminacija radnog fluida čvrstim česticama.....	19
3.2.3	Vrste čvrstih čestica.....	22
3.2.4	Definisanje čistoće radnog fluida.....	26
3.2.4.1	Interpretacija veličine čestice.....	28
3.2.4.2	Definisanje klase čistoće ulja.....	29
4.	Prikaz mehanizama habanja i drugih poremećaja izazvanih delovanjem čvrstih čestica	34
4.1	Abrazivno habanje.....	35
4.1.1	Abrazivnost čvrstih čestica.....	42
4.2	Erozivno habanje.....	47
4.3	Ostale vrste poremećaja rada komponenata izazvanih čvrstim česticama.....	53
5.	Analiza karakterističnih kontaktnih parova u hidrauličkim komponentama	57
5.1	Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod pumpi i motora	57
5.1.1	Klipno-aksijalne pumpe i motori.....	57

5.1.2	Klipno-radijalne pumpe i motori.....	60
5.1.3	Krilne pumpe i motori.....	63
5.1.4	Zupčaste pumpe i motori.....	65
5.1.5	Zavojne pumpe i motori.....	68
5.2	Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod cilindara.....	69
5.3	Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod ventila.....	71
5.3.1	Ventili za razvođenje hidrauličkog fluida.....	72
5.3.2	Ventili za regulaciju pritiska.....	73
5.3.3	Ventili za regulaciju protoka.....	75
5.3.4	Nepovratni ventili.....	77
5.4	Analiza zastupljenosti pojedinih tipova kontakata.....	78
5.5	Karakteristike cilindričnog kontaktnog para.....	80
6.	Eksperimentalno istraživanje.....	91
6.1	Eksperimentalna instalacija.....	91
6.2	Ispitni model komponente.....	95
6.3	Procedura eksperimentalnog ispitivanja.....	98
6.4	Plan eksperimenta.....	99
6.5	Oprema za merenje karakterističnih veličina u eksperimentu.....	103
6.6	Prikaz i analiza eksperimentalnih rezultata.....	107
6.6.1	Eksperimentalni rezultati o izmerenom broju čvrstih čestica.....	107
6.6.2	Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima zazora.....	118
6.6.3	Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima zapreminskog isticanja fluida kroz zazor.....	129
6.6.4	Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima gubitka mase.....	141
6.6.5	Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima pada pritiska.....	152
7.	Razmatranje modela uticaja čvrstih čestica na ispitivani kontaktni par klip-cilindar.....	155
7.1	Definisanje hipotetičkih modela za statističku proveru postojanja zavisnosti između čvrstih čestica i pada pritiska, odnosno isticanja fluida kroz zazor....	155
7.2	Uslovi primene regresione analize.....	156

7.3	Rezultati statističke analize.....	157
7.4	Analiza promene zazora i isticanja fluida.....	165
7.4.1	Analiza promene kritičnih zazora.....	165
7.4.2	Analiza isticanja fluida kroz zazor.....	170
8.	Zaključak.....	178
9.	Literatura.....	182
10.	Prilozi.....	189

Popis korišćenih skraćenica

ACFTD	-	Air Cleaner Fine Test Dust
AISI	-	American Iron and Steel Institute
APC	-	Automatic particle counter
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
CETOP	-	Comité Européen des Transmissions Oléohydrauliques et Pneumatiques
DIS	-	Draft International Standard
FPRC	-	Fluid Power Research Center
FT-IR	-	Fourier transform infrared spectroscopy
GOST	-	Государственный Стандарт
ISO	-	International Standard Organization
MIL STD	-	United States Military Standard
MTD	-	Medium Test Dust
NAS	-	National Aerospace Standard
NAVAIR	-	Naval Air Systems Command
NBR	-	Nitril Butadiene Rubber (Kaučuk)
NIST	-	National Institute of Standards and Technology
SAE	-	Society of Automotive Engineers
SUS	-	Sa unutrašnjim sagorevanjem
TAN	-	Total Acid Number
OECD	-	Organisation for Economic Co-operation and Development

Popis korišćenih oznaka i njihovih mernih jedinica

Oznaka veličine	Jedinica mere	Naziv veličine
A	- m^2	- Površina
b	- mm	- Dubina bočne pukotine
d_b	- mm	- Dubina brazde nastele zadiranjem abrazivne čestice u habajuću površinu
e	- mm	- Vrednost ekscentriciteta
E	- N/mm^2	- Jangov modul
E_h	- kg	- Masa pohabanog elementa
E_k	- J	- Kinetička energija
F_i	- N	- Sila
F_n	- N	- Sila koja deluje u normalnom pravcu na posmatranu površinu
H_v	- VHN	- Tvrdoća materijala
K_{ab}	- -	- Koeficijent abrazivnog habanja
K_c	- -	- Koeficijent otpornosti materijala na pucanje
K_f	- -	- Koeficijent korekcije za proračun protoka kroz radijalni zazor
K_v	- -	- Odnos prosečnih vrednosti protoka kroz zazor
K_z	- -	- Odnos veličina zazora na početku i kraju testa
L	- mm	- Dužina
m	- kg	- Masa
M_i	- Nm	- Obrtni moment
η	- mm^2/s ; cSt	- Kinematski viskozitet
p	- N/m^2 ; Pa ; bar	- Pritisak

Q	-	$m^3/sec; l/min$	-	Protok
q ili ΔQ	-	ml/min	-	Vrednost protoka kroz zazor (otkap)
R^2	-	-	-	Koeficijent determinacije
s	-	mm	-	Nominalni zazor
σ	-	-	-	Standardna devijacija
T	-	$^{\circ}C$	-	Temperatura
v	-	m/s	-	Brzina
v_{ep}	-	m/s	-	Brzina kretanja erozivne čestice pre udara
V_h	-	mm^3	-	Zapremina pohabanog materijala
β	-	-	-	Beta faktor
β_{ep}	-	$^{\circ}$	-	Ugao udara erozivne čestice
ε	-	-	-	Relativni ekscentricitet
η	-	$Pa*s$	-	Dinamički viskozitet
Θ	-	$^{\circ}$	-	Napadni ugao abrazivne čestice

Popis slika

	Naziv slike	Br. strane
Slika 3.1	- Dijagram "kade".	- 13
Slika 3.2	- Prikaz odnosa troškova održavanja i troškova filtriranja u zavisnosti od klase čistoće mineralnog ulja (troškovi održavanja/troškovi filtriranja) u odnosu na zahtevanu čistoću ulja.	- 14
Slika 3.3	- Prikaz lokacija izvora kontaminacije hidrauličkog sistema i lokacija gde se vrši izdvajanje kontaminanata.	- 16
Slika 3.4	- Rastvorljivost vazduha u tečnostima.	- 17
Slika 3.5	- Uticaj sadržaja vode na proračunati vek trajanja ležaja.	- 18
Slika 3.6	- Efikasnost čistog (levo) i kontaminiranog (desno) hidrauličkog pogona bagera (<i>Catepillar</i>).	- 21
Slika 3.7	- Karakteristični oblici čvrstih čestica: a) višegaona; b) sferična; c) elipsoidna; d) tanjirasta; e) porozna; f) zvezdasta; g) štapičasta; h) klinasta; i) vlasasta.	- 23
Slika 3.8	- Definisavanje veličine čestice.	- 28
Slika 3.9	- Označavanje klase čistoće prema: a) starom i, b) novom ISO 4406 standardu.	- 31
Slika 3.10	- Snimci uzoraka različitih klasa čistoće: a) ISO 16/14/11, b) ISO 17/15/12, c) ISO 19/17/14, d) ISO 22/20/17.	- 32
Slika 4.1	- Prikaz abrazivnog mehanizma habanja sa dva tela u kontaktu (slika gore) i tri tela u kontaktu (slika dole).	- 36
Slika 4.2	- Prikaz mikro-mehanizama abrazivnog habanja.	- 37
Slika 4.3	- Tipičan model abrazivnog habanja sa penetrantom koničnog oblika.	- 38
Slika 4.4	- Efekti kotrljanja (a) i klizanja (b) abrazivne čestice kod kontakta tri tela i c) posledice delovanja abrazivnih čestica.	- 39

Slika 4.5	- Čestica koja kliže (a) i čestica koja se kotrlja (b) i njihovi odgovarajući dijagrami koeficijenta trenja.	- 40
Slika 4.6	- Šematski prikaz sila koje deluju na abrazivnu česticu.	- 41
Slika 4.7	- Abrazivni model habanja krutih materijala.	- 42
Slika 4.8	- Uticaj tvrdoće i krtosti čestice na njenu abrazivnost.	- 44
Slika 4.9	- Ilustracija konceptata ekvivalentne sfere koji se primenjuju kod određivanja veličine čestice.	- 45
Slika 4.10	- Odnos između zapremina abrazivnog habanja i srednje vrednosti prečnika abrazivnih čestica, pri opterećenju od 2 kg, dužini puta od 6 m i brzini kretanja 0.5 m/s.	- 46
Slika 4.11	- Prikaz funkcije zavisnosti veličine abrazivnog habanja od vrednosti napadnog ugla čestice.	- 47
Slika 4.12	- SEM snimak čestica nastalih abrazijom: a) krupne čestice obliha ivica, b) sitne čestice oštih ivica.	- 47
Slika 4.13	- Mehanizmi erozije: a) abrazija pri malom uglu udara, b) zamor materijala izazvan udarima čestica koje imaju malu brzinu kretanja, c) plastična deformacija materijala usled udara čestica koje se kreću srednjim brzinama i imaju veliki ugao udara u kontaktnu površinu, d) rasprskavanje usled pucanja naprsline.	- 48
Slika 4.14	- Uticaj ugla udara erozivnih čestica u kontaktnu površinu i veličine habanja za plastične i krte materijale.	- 50
Slika 4.15	- Uticaj veličine čestica na intenzitet erozivnog habanja gde je kao eroziv korišćen karbid silicijuma koji ima brzinu pre udara 152 m/s.	- 51
Slika 4.16	- Izgled trajektorije čestica različitih veličina pri strujanju fluida kroz cevovod.	- 51
Slika 4.17	- Uticaj viskoznosti fluida na promenu ugla udara erozivne čestice.	- 52
Slika 4.18	- Uticaj strujanja fluida na kretanje erozivnih čestica.	- 53
Slika 4.19	- Tri osnovna tipa čestične blokade.	- 53

Slika 4.20	- Statička čestična blokada – slučaj 1.	-	54
Slika 4.21	- Statička čestična blokada – slučaj 2.	-	54
Slika 4.22	- Dinamička čestična blokada.	-	54
Slika 4.23	- Raspodela veličina čestica koje su se zadržale u zazoru veličine 30 μm .	-	55
Slika 4.24	- Promena intenziteta potrebne sile za pomeranje klipa.	-	55
Slika 4.25	- Prikaz procesa stvaranja obliteracionih naslaga.	-	56
Slika 5.1	- Prikaz kontakata između različitih izvedbi klipova i cilindara, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.	-	58
Slika 5.2	- Prikaz kontakata između različitih izvedbi sabirnih ploča i doboša, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.	-	59
Slika 5.3	- Prikaz kontakata između kuglastog rukavca klipa i ležišta koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.	-	59
Slika 5.4	- Prikaz kontakata između klizne papučice (ležišta) i zakrenute ploče, odnosno klipa i zakrenute ploče, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.	-	60
Slika 5.5	- Prikaz kontakata između klipa i cilindra, koji se koriste u klipno-radijalnim pumpama i motorima.	-	61
Slika 5.6	- Prikaz kontakata između potpornog elementa, klipa i rotora odnosno statora, koji se koriste u klipno-radijalnim pumpama i motorima.	-	62
Slika 5.7	- Prikaz sfernog zgloba, koji se koristi u klipno-radijalnim pumpama i motorima.	-	62
Slika 5.8	- Prikaz kontakata između krilca i statora (a), odnosno rotora (b) kada je krilce postavljeno u statoru.	-	63
Slika 5.9	- Prikaz kontakata između krilca i žljeba.	-	64
Slika 5.10	- Prikaz kontakata između rotora sa krilcima i bočne ploče (Eaton Vickers).	-	65
Slika 5.11	- Prikaz kontakata između zubaca u zahvatu kod	-	66

	zupčastih pumpi sa spoljšnjim i unutrašnjim ozubljenjem.	
Slika 5.12	- Primer kontakta zupčanika, statora i bočnih ploča (Bosch Rexroth).	67
Slika 5.13	- Profil zavojnih vretena (a), i prikaz međusobnih kontakata kod vijčane pumpe (b).	69
Slika 5.14	- Prikaz kontaktnih površina klipa sa cilindrom (a) i klipnjače sa prednjim poklopcem cilindra odnosno brisačem (b).	70
Slika 5.15	- Prikaz razvodnih ventila sa različitim oblikom radnih elemenata.	73
Slika 5.16	- Prikaz ventila pritiska sa različitim radnim elementima.	75
Slika 5.17	- Prikaz trogranog ventila za regulaciju protoka (a) i raspodeljivača protoka (b) sa karakterističnim kontaktnim parom (<i>Festo</i>).	76
Slika 5.18	- Prikaz kontakata radnih elemenata kod različitih konstrukcionih izvedbi nepovratnog ventila.	78
Slika 5.19	- Prikaz zastupljenosti pojedinih tipova kontakata kod hidrauličkih komponenata.	79
Slika 5.20	- Konstrukcione varijante radnih elemenata komponenata sa cilindričnim kontaktnim parom.	82
Slika 5.21	- Prikaz različitih varijanti konstrukcija klipa sa odgovarajućom raspodelom pritiska duž kontaktnih površina klipa.	84
Slika 5.22	- Prikaz primene različitih veličina aksijalnih zazora kod hidrauličkih ventila.	86
Slika 5.23	- Pozicije klipa u cilindru i karakteristični parametri.	88
Slika 5.24	- Različite varijante proticanja fluida kroz zazor.	90
Slika 6.1	- Konceptualni model eksperimenta.	92
Slika 6.2	- Šema eksperimentalne instalacije.	93
Slika 6.3	- Izgled eksperimentalne instalacije u laboratoriji – 1.	94

Slika 6.4	- Izgled eksperimentalne instalacije u laboratoriji – 2.	-	95
Slika 6.5	- Izgled razvodnog ventila i funkcionalni simbol.	-	96
Slika 6.6	- Radne faze razvodnog ventila: a) kada je ventil u neutralnom položaju; b) kada je ventil u radnom položaju.	-	97
Slika 6.7	- Prikaz procedure eksperimentalnog ispitivanja.	-	98
Slika 6.8	- Prikaz procedure održavanja klase čistoće radnog fluida na potrebnom nivou.	-	99
Slika 6.9	- Struktura menja karakterističnih parametara tokom eksperimenta.	-	101
Slika 6.10	- Odnos minimalne i maksimalne veličine radijalnog zazoru i veličine čvrstih čestica.	-	102
Slika 6.11	- Multi-Handy 3010 sa mernim priključnim elementima.	-	104
Slika 6.12	- Integralno rešenje uređaja za potrebe <i>in-line</i> i <i>off-line</i> ispitivanja čistoće ulja.	-	105
Slika 6.13	- Viskozimetar tipa KITIWAKE za merenje viskoznosti radnog fluida.	-	105
Slika 6.14	- a) Analitička vaga i b) tehnička vaga.	-	106
Slika 6.15	- Koordinatna merna mašina <i>Contura G2</i> .	-	106
Slika 6.16	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 μm za ventil RV1.	-	109
Slika 6.17	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 6 μm za ventil RV1.	-	109
Slika 6.18	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 μm za ventil RV1.	-	110
Slika 6.19	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 μm za ventil RV1.	-	110
Slika 6.20	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 μm za ventil RV2.	-	112
Slika 6.21	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće	-	112

	hidrauličkog ulja za čestice od 6 μm za ventil RV2.	
Slika 6.22	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 μm za ventil RV2.	- 113
Slika 6.23	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 μm za ventil RV2.	- 113
Slika 6.24	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 μm za ventil RV3.	- 115
Slika 6.25	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 6 μm za ventil RV3.	- 115
Slika 6.26	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 μm za ventil RV3.	- 116
Slika 6.27	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 μm za ventil RV3.	- 116
Slika 6.28	- Prikaz lokacija merenih vrednosti prečnika klipnih (d_i) i cilindarskih (D_i) prstenova koji obrazuju posmatrane zazor.	- 118
Slika 6.29	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radijalnih zazora Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 za ventil RV1.	- 119
Slika 6.30	- Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 ventila RV1.	- 121
Slika 6.31	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radijalnih zazora Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 za ventil RV2.	- 123
Slika 6.32	- Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 ventila RV2.	- 124
Slika 6.33	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radijalnih zazora Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 za ventil RV3.	- 126
Slika 6.34	- Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 ventila RV3.	- 127
Slika 6.35	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za ventil RV1.	- 130
Slika 6.36	- Prikaz promene teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV1.	- 133
Slika 6.37	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za	- 134

	ventil RV2.		
Slika 6.38	- Grafički prikaz promene teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV2.	-	136
Slika 6.39	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za ventil RV3.	-	138
Slika 6.40	- Grafički prikaz promene teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV3.	-	140
Slika 6.41	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV1.	-	142
Slika 6.42	- Snimci mikrostrukture klipa i tela ventila.	-	143
Slika 6.43	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV2.	-	146
Slika 6.44	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV3.	-	149
Slika 6.45	- Uporedni prikaz izmerenih vrednosti pada pritiska pri različitim stepenima kontaminacije i radnom protoku od 5,8 l/min za sva tri ventila.	-	152
Slika 6.46	- Uporedni prikaz funkcija normalne raspodele za vrednosti pada pritiska za sva tri ventila.	-	153
Slika 7.1	- Fitovane krive koje opisuju promenu veličine zazora Z_2 za sva tri ventila.	-	166
Slika 7.2	- Fitovane krive koje opisuju promenu veličine zazora Z_3 za sva tri ventila.	-	168
Slika 7.3	- Fitovane krive koje opisuju promenu veličine protoka kroz zazor Z_3 za sva tri ventila.	-	171
Slika 7.4	- Grafički prikaz tendencije rasta razlika između izmerenih i proračunatih vrednosti protoka kroz zazor za sva tri ventila.	-	173
Slika 7.5	- Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV1.	-	175
Slika 7.6	- Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-	-	176

proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV2.

Slika 7.7 - Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV3. - 177

Popis tabela

	Naziv tabele	Br. strane
Tabela 2.1	- Preporuke za čistoću radnog fluida prema ISO 4406/1999, pojedinih proizvođača hidrauličke opreme.	- 4
Tabela 3.1	- Veličine čvrstih čestica.	- 23
Tabela 3.2	- Poreklo kontaminanata u vidu čvrstih čestica.	- 24
Tabela 3.3	- Primeri standarda koji se koriste (ili su se koristili) u cilju definisanja klase čistoće radnog fluida.	- 26
Tabela 3.4	- Odnos veličine čestica po starom ACFTD i novom MTD postupku kalibracije.	- 28
Tabela 3.5	- Interpretiranje veličine čestica mernim uređajima.	- 29
Tabela 3.6	- Broj čvrstih čestica u 100 ml uzorka po klasama definisanim prema ISO 4406-87 i ISO 4406-99.	- 30
Tabela 3.7	- Prikaz količine čvrstih čestica koja za određenu klasu čistoće ulja prođe kroz sistem na godišnjem nivou.	- 32
Tabela 4.1	- Grupe faktora koji utiču na intenzitet habanja radnih elemenata u toku eksploatacije tehničkog sistema.	- 35
Tabela 4.2	- Vrste habanja.	- 35
Tabela 4.3	- Tvrdća materijala po Moh-ovoj i Vickers-ovoj skali.	- 43
Tabela 5.1	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod klipno-aksijalnih pumpi i motora.	- 60
Tabela 5.2	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod klipno-radijalnih pumpi i motora.	- 63
Tabela 5.3	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod krilnih pumpi i motora.	- 65
Tabela 5.4	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod zupčastih pumpi i motora.	- 68

Tabela 5.5	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod vijčanih pumpi i motora.	- 69
Tabela 5.6	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod cilindara.	- 71
Tabela 5.7	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod razvodnih ventila.	- 73
Tabela 5.8	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod ventila pritiska.	- 75
Tabela 5.9	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod ventila protoka.	- 76
Tabela 5.10	- Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod nepovratnog ventila.	- 78
Tabela 5.11	- Prikaz vrsta kontakata kod hidrauličkih komponenti.	- 79
Tabela 5.12	- Vrednosti zazora kod hidrauličkih komponenata sa cilindričnim kontaktnim parom.	- 85
Tabela 6.1	- Plan eksperimentalnog ispitivanja.	- 99
Tabela 6.2	- Prikaz broja merenja karakterističnih parametara tokom eksperimenta.	- 102
Tabela 6.3	- Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindara za ventil RV1.	- 120
Tabela 6.4	- Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RV1.	- 122
Tabela 6.5	- Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindara za ventil RV2.	- 125
Tabela 6.6	- Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RV2.	- 125
Tabela 6.7	- Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindara za ventil RV3.	- 128
Tabela 6.8	- Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RV3.	- 128

Tabela 6.9	-	Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za ventil RV1.	-	131
Tabela 6.10	-	Razlike između teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV1.	-	132
Tabela 6.11	-	Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za ventil RV2.	-	135
Tabela 6.12	-	Razlike između teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV2.	-	136
Tabela 6.13	-	Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za ventil RV3.	-	139
Tabela 6.14	-	Razlike između teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV3.	-	140
Tabela 6.15	-	Relativni odnos masene potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV1.	-	144
Tabela 6.16	-	Maseni gubitak tela i klipa ventila RV1, iskazan u vidu generisanog broja čestica.	-	145
Tabela 6.17	-	Relativni odnos masene potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV2.	-	147
Tabela 6.18	-	Maseni gubitak tela i klipa ventila RV2, iskazan u vidu generisanog broja čestica.	-	148
Tabela 6.19	-	Relativni odnos masene potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV3.	-	150
Tabela 6.20	-	Maseni gubitak tela i klipa ventila RV3, iskazan u vidu generisanog broja čestica.	-	151
Tabela 6.21	-	Uporedni prikaz gubitka mase za sva tri ventila.	-	151
Tabela 6.22	-	Vrednosti standardne devijacije za sva tri ventila.	-	153
Tabela 7.1	-	Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	-	157

Tabela 7.2	- Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 157
Tabela 7.3	- Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 157
Tabela 7.4	- Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 158
Tabela 7.5	- Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 158
Tabela 7.6	- Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 158
Tabela 7.7	- Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 158
Tabela 7.8	- Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 159
Tabela 7.9	- Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 159
Tabela 7.10	- Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 160
Tabela 7.11	- Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 160
Tabela 7.12	- Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za	- 160

	rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	
Tabela 7.13	- Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 161
Tabela 7.14	- Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 161
Tabela 7.15	- Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 162
Tabela 7.16	- Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 162
Tabela 7.17	- Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 163
Tabela 7.18	- Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 163
Tabela 7.19	- Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.	- 164
Tabela 7.20	- Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.	- 164
Tabela 7.21	- Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.	- 165
Tabela 7.22	- Vrednosti odnosa (K_z) početne i krajnje vrednosti zazora za sva tri ventila.	- 165
Tabela 7.23	- Vrednosti koeficijenta determinacije kod fitovanja vrednosti zazora Z_2 različitim funkcijama za sva tri	- 166

	ventila.	
Tabela 7.24	- Vrednosti koeficijenta determinacije kod fitovanja vrednosti zazora Z_3 različitim funkcijama za sva tri ventila.	- 168
Tabela 7.25	- Vrednosti odnosa (K_v) početne i krajnje vrednosti protoka kroz zazor Z_3 za sva tri ventila.	- 170
Tabela 7.26	- Vrednosti koeficijenta determinacije kod fitovanja vrednosti protoka kroz zazor Z_3 različitim funkcijama za sva tri ventila.	- 171
Tabela 7.27	- Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radijalni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV1 i klasu čistoće ulja NAS 11.	- 174
Tabela 7.28	- Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radijalni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV2 i klasu čistoće ulja NAS 10.	- 175
Tabela 7.29	- Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radijalni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV2 i klasu čistoće ulja NAS 9.	- 176

1 Uvod

Prenos energije od njenog izvora do potrošača oduvek je predstavljao problem koji je naročito došao do izražaja onog momenta, kada su pronađeni izvori energije kao što su motori sa unutrašnjim sagorevanjem i elektromotori. Suština problema tehničkih sistema je uvek u pronalaženju sredstva koje će sa što manje gubitaka preneti energiju od izvora do potrošača, pri čemu treba imati u vidu da je često potrebno u toku prenosa transformisati energiju, kako bi bila što prikladnija za korišćenje. Danas postoji niz sredstava pomoću kojih, sa određenim stepenom iskorišćenja, može da se prenosi i transformiše energija jednog energetskog izvora (zupčasti elementi, frikcioni elementi, elektro-elementi, fluidi). Jedan od takvih sistema koji koriste fluid kao medijum za prenos i transformaciju energije, jeste hidraulički pogonski sistem.

Hidraulički sistemi, kao tehnički sistemi za prenos i transformaciju energije, koriste radni fluid u tečnom agregatnom stanju (najčešće mineralno ulje, ali mogu da se koriste i sintetičke tečnosti, emulzije ili voda), i veoma su zastupljeni u savremenim automatizovanim tehničkim sistemima. Kao osnovni oblik energije u hidrauličkim sistemima se koristi potencijalna energija izražena preko pritiska. Preko pritiska se ostvaruju radne sile (F_i) i momenti (M_i) u izvršnim uređajima (hidrauličkim cilindrima i motorima) što je omogućeno zahvaljujući određenim, izrazito povoljnim osobinama koje hidraulički sistemi imaju u odnosu na druge pogonske sisteme:

- povoljan odnos zapremine konstrukcije sistema i raspoložive snage,
- jednostavna zaštita od preopterećenja,
- automatizovanost i sinhronizovanost velikog broja operacija pri visokim opterećenjima,
- kontinualno upravljanje i regulacija radnim parametrima pod visokim opterećenjem itd.

Pored prednosti, kao i kod svakog drugog, postoje i određeni nedostaci koji ograničavaju upotrebu hidrauličkih sistema. U najznačajnije nedostatke se ubrajaju:

- problem zaptivanja – isticanja ulja (interno ili eksterno),
- pretvaranje strujne energije fluida u toplotu i
- čistoća, odnosno filtriranje ulja.

Zaptivanje kao problem, postoji od kada i sistemi za transport fluida ili prenos energije pomoću fluida. Interno ili eksterno isticanje fluida pod pritiskom preko dozvoljenih granica, ima kao posledicu smanjenje radnih performansi hidrauličkog sistema (smanjenje zapreminskog koeficijenta iskorišćenja, povećanje pada pritiska, smanjenje radnih brzina, itd),

dotatno generisanje toplote u sistemu i smanjenje pouzdanosti [13], [22]. Kod hidrauličkih komponenti se koriste tri principa za rešavanje ovog problema [89]:

- princip **bekontaktnog zaptivanja** (primeri: kod razvodnog ventila – radijalni prostor između klipa i tela ventila; kod zupčaste pumpe – prostor između čeonu površine zuba i statora; kod klipno-radijalne pumpe – radijalni prostor između klipa i cilindra),
- princip **kontaktog zaptivanja** (primeri: kod krilne pumpe – kontakt između krilca i statora; kod zupčaste pumpe – kontakt između zubaca koji su u sprezi; kod klipno-aksijalne pumpe – kontakt između doboša i sabirne ploče),
- princip zaptivanja **trećim elementom – zaptivačem** (primeri: postavljanje gumenog (najčešće od NBR – nitril-butadien guma), zaptivača između tela ventila i podnožne ploče, postavljanje usečnog prstena kod nastavnog priključka za cevovod, postavljanje zaptivnog elementa na klipu hidrauličkog cilindra).

Pretvaranje strujne u toplotnu energiju, poput zaptivanja, predstavlja problem od kada se fluidni sistemi koriste za transformaciju energije. U hidrauličkim sistemima, zbog savladavanja lokalnih i linijskih otpora pri proticanju fluida kroz komponente, dolazi do prelaska energije strujanja u toplotnu energiju čemu dodatno doprinosi viskoznost radnog fluida, tj. svojstvo fluida da se suprotstavlja kretanju. Kako je tehnološki razvoj fluidnih sistema napredovao (naročito sa aspekta povećanja veličina radnog pritiska i protoka u hidrauličkim sistemima zarad veće produktivnosti), tako je i pojava energetske gubitaka zbog povećanja vrednosti pada pritiska kao posledice savladavanja otpora bivala sve izraženiji problem. Tradicionalno rešavanje ovog problema, predstavlja ugradnja hladnjaka što iziskuje ulaganje dodatne količine energije kako bi se količina toplote u sistemu održala u okviru tolerisanih granica. S obzirom na to da je danas energetska efikasnost jedna od tema broj jedan kada su tehnički sistemi u pitanju, teži se ka tome da se ovi energetski gubici svedu na minimalnu meru i tako se eliminiše, odnosno smanji, upotreba hladnjaka ili potencijalnih kritičnih mesta, na kojima dolazi do transformacije strujne energije u toplotnu, gde god je to moguće [111].

Problem koji, takođe značajno utiče na efikasnost i pouzdanost hidrauličkih sistema i koji u suštini predstavlja tematiku ove doktorske disertacije, jeste **problem uticaja čistoće radnog fluida na rad komponenti ugrađenih u sistem**. Problemi koji se javljaju kao posledica stepena zaprljanosti radnog fluida detaljno su izloženi u narednom poglavlju.

2 Opis problema i predmet istraživanja

Tačan uticaj čistoće radnog fluida na rad hidrauličkog sistema je teško odrediti zbog velikog broja uticajnih faktora i različitosti primene hidrauličkih sistema. Mnoge renomirane firme kao i druge ustanove koje se bave izradom, održavanjem i testiranjem hidrauličkih sistema i opreme, na bazi sopstvenog iskustva iz prakse i eksperimentalnih istraživanja, tvrde da kontaminacija radnog fluida predstavlja uzrok pojave otkaza okvirno u 70-80% slučajeva [8], [64], [78]. U prilog ovim tvrdnjama idu i naučna istraživanja sprovedena u proteklih 50-ak godina koja su imala za cilj njihovo naučno dokazivanje i u kojima se eksplicitno daju rezultati različitih testova komponenti i sistema, u uslovima kontaminacije radnog fluida čvrstim česticama [33], [34], [48], [52], [56], [67], [92], [96], [97], [103], [106]. Zahtevi za povećanjem preciznosti upravljanja kao i energetske efikasnosti hidrauličkih sistema su usloveli su povećanje vrednosti radnog pritiska i smanjenje veličine zazora između pokretnih radnih elemenata hidrauličkih komponenti. Upravo ovim smanjenjem zazora zarad povećanja efikasnosti sistema, do izražaja dolazi štetan uticaj, prvenstveno kontaminanata u vidu čvrstih čestica. Uticaj čestica različitih veličina, oblika i sastava, putem abrazivnog i erozivnog habanja, povećanja koeficijenta trenja, pojavom obliteracije ili izazivanjem mehaničke blokade [22], [60] može potpuno ili delimično ugroziti funkcionalnost hidrauličke komponente. U skladu sa ovim činjenicama, proizvođači hidrauličkih sistema i opreme konstantno unapređuju konstrukciju komponenti i sistema, metode i procedure testiranja istih kao i uređaje pomoću kojih se prate karakteristike radnog fluida u eksploataciji.

Iako se zna da kontaminanti mogu da budu destruktivni po komponente hidrauličkog sistema, pa i sam radni fluid, još uvek ne postoji internacionalno prihvaćen metod, odnosno test za objektivno određivanje tolerancije pojedinih komponenti na kontaminante [53]. U javnosti nema dostupnih studija koje se odnose na utvrđivanje stepena, odnosno intenziteta trošenja radnih elemenata hidrauličkih komponenti, u zavisnosti od stepena kontaminacije i drugih relevantnih radnih parametara sistema. Iz tog razloga, međunarodna organizacija za standardizaciju je polovinom 2013. godine pokrenula projekat izrade standarda ISO 12669 za određivanje potrebne čistoće hidrauličkog sistema [43].

Ono što je za sada poznato stručnoj i naučnoj javnosti, jesu činjenice da kontaminanti u vidu tečnog, gasovitog, a naročito čvrstog agregatnog stanja, imaju veoma značajan uticaj na funkcionalnost i radni vek hidrauličke komponente / sistema. Zatim, poznato je da postoje i preporuke proizvođača hidrauličke opreme o dozvoljenim nivoima kontaminacije u vidu kodnog broja (po ISO, NAS, SAE i dr. standardima), ali koje variraju od proizvođača do proizvođača (tabela 2.1) i da još uvek ne postoji opšte prihvaćen i standardizovan metod utvrđivanja tolerancije komponenti na kontaminante, kao ni zavisnosti pouzdanosti istih u odnosu na kontaminaciju radnog fluida. Dodatnu kompleksnost u određivanju takvog metoda (testa) unosi različitost aplikativnih primena hidrauličkih sistema, gde se bitno razlikuju radni

uslovi od aplikacije do aplikacije. Iz tih razloga često se pribegava ne optimalnim, tj. strožijim zahtevima za klasom čistoće radnog fluida što naravno značajno utiče na radni vek opreme (u pozitivnom smislu), ali i na povećanje ukupnih troškova poslovanja, a pre svega u sektoru za održavanje.

Prema prikazanom u tabeli 2.1, može se videti da različiti proizvođači daju različite preporuke čistoće ulja, ali i da kod pojedinih postoje opšte preporuke što nikako ne može da rezultira optimizovanim radnim vekom hidrauličkog sistema u celini (uključujući radni vek fluida, komponenti, a naročito sistema za filtriranje), kao ni optimizovanim troškovima. Ovde, takođe treba napomenuti da su preporučene klase čistoće radnog fluida u tabeli 2.1, iskazane tročlanim kodnim brojem u skladu sa aktuelnim standardom ISO 4406/99 [44] što nije uvek slučaj u praksi, gde se dešava da kod pojedinih proizvođača klasa čistoće radnog fluida bude iskazana po nekom od starih standarda (ISO 4406/1987, NAS 1638 ili drugi) što dodatno unosi komplikacije u razumevanje materije.

Tabela 2.1 Preporuke za čistoću radnog fluida prema ISO 4406/1999, pojedinih proizvođača hidrauličke opreme [35], [38], [40], [45].

Proizvođač	Tip sistema	Komponenta	Preporučena čistoća radnog fluida
Parker Hannifin	Sistemi niskog radnog pritiska, gde dug životni vek opreme nije kritičan	Ventili protoka, cilindri	20/18/15
	Statični i mobilni sistemi srednjeg radnog pritiska i kapaciteta (najšira grupa)	Zupčaste pumpe i motori	19/17/14
	Sistemi visokog kvaliteta i pouzdanosti	Klipne pumpe i motori, razvodni ventili, ventili pritiska	18/16/13
	Visoko-sofisticirani sistemi i hidrostatičke transmisije	Proporcionalni ventili	17/15/12
	Sistemi visokog radnog pritiska, servo-sistemi	Industrijski servo-ventili	16/14/11
Eaton Vickers	Sistemi radnog pritiska do 210 bar	Razvodni ventili, ugradni ventili, cilindri, zupčasti motori	20/18/15
		Zupčaste pumpe, radijalni klipni motori	19/17/15
		Krilne pumpe, konstantnog kapaciteta, ventili pritiska, ventili protoka, krilni motori	19/17/14
		Klipne pumpe konstantnog kapaciteta, krilne pumpe promenljivog kapaciteta	18/16/14
		Proporcionalni ventili, aksijalni klipni motori	18/16/13

Proizvođač	Tip sistema	Komponenta	Preporučena čistoća radnog fluida
		Klipne pumpe promenljivog kapaciteta	17/15/13
		Servo-ventili	16/14/11
Eaton Vickers	Sistemi radnog pritiska preko 210 bar	Cilindri	20/18/15
		Razvodni ventili, ventili pritiska, ventili protoka, ugradni ventili, zupčasti motori	19/17/14
		Zupčaste i krilne pumpe konstantnog kapaciteta, krilni motori, radijalni klipni motori	18/16/13
		Klipne pumpe konstantnog kapaciteta, krilne pumpe promenljivog kapaciteta	17/15/13
		Proporcionalni ventili, aksijalni klipni motori	17/15/12
		Klipne pumpe promenljivog kapaciteta	16/14/12
		Servo-ventili	15/13/10
Sauer Danfoss	-	Proporcionalni ventili	21/19/16
	-	Klipne pumpe i motori, zupčaste pumpe i motori	22/18/13
	-	Logički i elektro-hidraulički ventili	18/16/13
Bosch Rexroth AG	Hidraulički sistemi i komponente sa malom osetljivošću na kontaminante		21/18/14
	Opšti hidraulički sistemi		19/17/13
	Hidraulički sistemi radnog pritiska preko 160 bar sa proporcionalnim ventilima		17/15/11
	Hidraulički sistemi radnog pritiska preko 160 bar sa servo-ventilima		15/13/10
	Hidraulički sistemi veoma osetljivi na kontaminante		13/12/8

U skladu sa prethodno pomenutim standardima treba znati da se za svaki od njih koriste odgovarajuće procedure, odnosno standardi (ACFTD – *Air Cleaner Fine Test Dust* – stari – ISO 4402/1991 i MTD – *Medium Test Dust* – novi – ISO 11171/1999 odnosno ISO 11171/2010) za kalibraciju uređaja za praćenje kontaminacije sistema [41], [42], koji su sve više prihvaćeniji u praksi održavanja hidrauličkih sistema, a u nekim slučajevima i obavezni, naročito ako su u pitanju visokoproduktivni i skupi tehnički sistemi (hidraulika za avione, podmornice, svemirske tehnologije, sistemi za raketno navođenje, itd). Pomenute procedure kalibracije uređaja za praćenje kontaminacije, u tesnoj su vezi i sa procedurama testiranja filterskih elemenata što proširuje listu potrebnih kompetencija projektanta, ali i korisnika hidrauličkih sistema kako bi odabir odgovarajućih filterskih elemenata za određen sistem/komponentu bio pravilan.

2.2 Cilj istraživanja

Cilj ovog rada je da se za definisani kontaktni par koji je najprisutniji u hidrauličkim komponentama, ispita uticaj različitih koncentracija čvrstih čestica, kao kontaminanata sadržanih u uljnoj masi, na rad kontaktnog para. Utvrđen je odnos kritičnih radnih performansi (ograničeno na veličinu pada pritiska i zapreminska isticanja) sistema i klase čistoće radnog fluida, pri konstantnim režimima rada (pritisk, temperatura i protok). U skladu sa pomenutim ciljem, istraživanje obuhvata:

- sistematsku analizu karakterističnih kontakata radnih elemenata hidrauličkih komponenti,
- teorijsku analizu mehanizama habanja koji direktno zavise od količine i veličine čvrstih čestica u masi radnog fluida koja protiče kroz zazor između kontaktnog para,
- izvođenje eksperimenta i akviziciju podataka, na bazi čije analize će se pokušati ustanoviti model uticaja kontaminanata na rad posmatranog kontaktnog para,
- diskusiju dobijenih rezultata, izvođenje zaključka i razmatranje daljeg razvoja modela uticaja čvrstih čestica na radne performanse karakterističnog kontaktnog para.

Istraživanje pomenutih međuzavisnosti izvršiće se na eksperimentalnoj instalaciji, tj. na fizičkom modelu kojim se simuliraju realni uslovi rada hidrauličkog sistema. Za potrebe eksperimenta definišaće se određeni radni parametri (vrednosti pritiska, protoka i temperature), a količina kontaminanata u vidu čvrstih čestica menjaće se od preporučenih (koje su najčešće korišćene u praksi) do veličina na gornjoj granici dozvoljenih vrednosti.

Na osnovu prethodnih razmatranja i u skladu sa postavljenim ciljem istraživanja definisane su sledeće hipoteze:

H1 – Čvrste čestice kao kontaminanti značajno utiču na rad hidrauličkih komponenta kod kojih je prisutan mehanizam beskontaktnog zaptivanja.

H2 – U zavisnosti od stepena kontaminacije i radnih parametara (pritisk, protok, temperatura, viskoznost radnog fluida, veličina radijalnog zazora) moguće je pretpostaviti stepen habanja kontaktnih parova klip-cilindar.

H3 – Čvrste čestice u uljnoj masi utiču na povećanje energetske gubitaka u hidrauličkim komponentama.

Od metoda za ostvarivanje postavljenog cilja koristiće se:

- Analitička metoda – kao i kod svakog pristupa izučavanju bilo koje složene pojave, tako će i u ovom radu biti primenjena analitička metoda (tj. analiza *sadržaja*) u svrhu teorijskog i praktičnog rastavljanja problema istraživanja na činioce kako bi se problem što bolje razumeo. Osim analize *sadržaja*, kod provere dobijenih eksperimentalnih rezultata, koristiće se *komparativna analiza*. Za obradu podataka prikupljenih merenjem u okviru eksperimenta koristiće se *statistička* i *grafička* analiza.
- *Sintetička metoda* – kojom će se, na osnovu obrade prikupljenih podataka u eksperimentu, izvesti zaključci i ocena o posmatranoj problematici.

- *Metoda eksperimenta* – koristi se kao osnovna metoda kojom se na bazi zapažanja i logike razrađuju hipoteze koje se po analogiji sa drugim sličnim pojavama dokazuju, tj. proveravaju. Metoda eksperimenta će se sprovoditi više puta pod različitim uslovima, tj. variranjem uticajnih faktora. Metoda omogućava da se iz niza pojedinačnih činjenica verifikuje postavljena hipoteza.
- *Induktivno – Deduktivna metoda* – kojom se donose određeni zaključci o uticaju klase čistoće i radnih uslova na intenzitet procesa habanja radnih komponenata kao i hidraulički sistem u celini.

2.3 Pregled vladajućih shvatanja u oblasti

S obzirom na veliku potrebu današnjice da sistem uvek bude operativan, visoko produktivan, maksimalno efikasan i sa veoma niskom stopom otkaza, akcenat se stavlja na održavanje tehničkog sistema što ukazuje i činjenica da se u razvijenim zemljama na održavanje industrijske opreme troše značajna sredstva [3], [54]. Pod pretpostavkom da je sistem pravilno projektovan, pravilno podešen i održavan i da su ugrađene komponente od odgovarajućeg materijala, otkazi mogu nastupiti uglavnom usled degradacije radnih elemenata ili fizičko-hemijskih karakteristika radnog fluida [60]. Degradacioni procesi su veoma kompleksne prirode i predstavljaju rezultat sinergetskog dejstva više faktora (nivo kontaminacije sistema, brzina kontaminiranja, radni uslovi okoline, frekventnost i stepen variranja radnih parametara sistema, itd).

Poznato je da kontaminacija sistema značajno utiče na intenzitet degradacionih procesa, gde se posebno izdvaja uticaj čvrstih čestica [1], [30], [58], [56]. U zavisnosti od karakterističnih parametara (oblik, veličina, količina, tvrdoća, brzina kretanja, itd), čvrste čestice utiču na pojavu određenih mehanizama habanja (abrazija, erozija, zamor materijala, itd) kontaktnih površina radnih elemenata [26], kao i katalizacije hemijskih reakcija pri kojima nastaju jedinjenja velike molekularne mase koja opet u sadejstvu sa čvrstim česticama dovode do stvaranja naslaga koje remete pravilno funkcionisanje hidrauličkih komponenata (filterski elementi, regulacioni elementi: mlaznice, prigušnice, itd) [26], [105]. Problemi kontaminacije rešavaju se pravilnim projektovanjem hidrauličkog sistema, gde se posebna pažnja posvećuje definisanju osetljivosti sistema na kontaminante i izboru odgovarajućeg stepena filtriranja, odnosno izdvajanja nečistoća iz sistema. Kod proizvođača hidrauličke opreme postoje različiti pristupi određivanja osetljivosti sistema/komponenti na kontaminante što se vidi u tabeli 2.1, gde se za iste komponente preporučuju različite klase čistoće hidrauličkog ulja. Osetljivost sistema na čvrste čestice se određuje prema najmanje tolerantnoj komponenti na nečistoće koja je ugrađena u hidraulički sistem. Najmanje tolerantnim komponentama se smatraju one koje imaju veoma male zapore između kontaktnih površina radnih elemenata (komponente proporcionalne i servo- hidraulike).

Prema Omega teoriji [26] Fitch interpretira osetljivost komponente na tri nivoa: Omega, Gama i Zeta. Omega nivo – objašnjava koeficijent osetljivosti kontaminanta (čvrstih čestica) koji zavisi od veličine i koncentracije čvrstih čestica u uljnoj masi. Gama nivo – odražava efekte uticaja ulja kao maziva na Omega životni vek komponente uzimajući u razmatranje debljinu mazivog filma i vrstu kontakta između dodirnih površina. Zeta nivo – predstavlja korekcionni faktor koji se dobija kao odnos razlika između ispitivanja abrazivnosti

čvrstih čestica dobijenih u realnom i eksperimentalnom sistemu. Ovo je jedina teorija koja se u istraživačkim radovima [30], [34], [48], [50], [98] javno pominje u pogledu istraživanja osetljivosti hidrauličkih komponenti na kontaminante i koja nakon neuspelog pokušaja usvajanja kao standardnog postupka ispitivanja osetljivosti komponenti nije dalje razrađivana i dopunjavana. Moguće je da ista, jeste usvojena od strane pojedinih proizvođača hidrauličke opreme i u internim okvirima usklađivana sa aktuelnim trendovima na polju hidraulike, ali je činjenica da se novija istraživanja na tu temu ljubomorno čuvaju. Da je problem utvrđivanja osetljivosti hidrauličkih komponenata/sistema i dalje aktuelan, svedoči i projekat koji je prošle (2013-te) godine pokrenut od strane internacionalne organizacije za standardizaciju (ISO), a koji ima za cilj izradu standarda ISO 12669 za određivanje potrebne klase čistoće hidrauličkog sistema [43].

Do sada, kao najbolje rešenje za predviđanje otkaza, bez obzira na osetljivost komponente/sistema na kontaminante ili zahtevanu klasu čistoće hidrauličkog ulja je pokazao model održavanja po stanju koji primenjuje tehničku dijagnostiku. Održavanje po stanju je zasnovano na činjenici da će većina elemenata mašine ispoljiti nekakav vid upozorenja (alarma) pre sopstvenog otkaza i pod time podrazumeva kontinualno praćenje kritičnih radnih parametara sistema na pažljivo odabranim lokacijama, čija promena u odnosu na propisane vrednosti može da ukaže na trend pojave stanja u otkazu. Očitavanje ovih simptoma, zahteva sprovođenje jedne od dijagnostičkih metoda ispitivanja bez razaranja kao što su analiza maziva, analiza vibracija i merenje površinske temperature – termografija. Najbolje rezultate daje dijagnostika koja kombinuje pomenute metode, međutim, s obzirom na troškove kadrova i opreme za vršenje dijagnostike, njihova primena mora da bude pažljivo analizirana i optimizovana u cilju opravdavanja uloženi sredstava. U slučaju hidrauličkih sistema, najveću primenu, od prethodno pomenutih metoda dijagnostike stanja, ima analiza maziva, tj. hidrauličkog ulja. Hidrauličko ulje kao radni element sistema, jeste nosilac informacija o stanju celokupnog sistema sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Stoga, analiza ulja na bazi pravilno definisanog programa praćenja, predstavlja veoma efektivan metod monitoringa stanja hidrauličkih sistema koji obezbeđuje rane, upozoravajuće znake potencijalnih problema koji vode ka otkazu i zastoju hidrauličkog sistema [82]. Analiza ulja uključuje širok spektar tehnika koje se konstantno razvijaju kako bi se omogućio što kvalitetniji monitoring stanja ne samo hidrauličkih, već i svih ostalih tehničkih sistema koji koriste maziva ulja (SUS motori, reduktori, turbine, kompresori). Među najčešće korišćene metode za analizu stanja ulja se ubrajaju:

- merenje količine čestica i vode,
- analitička ferografija,
- spektroskopija,
- ispitivanje viskoznosti,
- ukupni kiselinski broj (TAN) i dr.

Fitch je u svom radu [27] izložio na šta sve treba da se obrati pažnja i kako da se postavje ograničenja (referentne vrednosti) kritičnih mernih parametara koji mogu da ukažu na pojavu stanja u otkazu. U slučaju dostizanja kritičnih vrednosti nekog od praćenih parametara

pravovremeno se planira i vrši adekvatna akcija u cilju sprečavanja da dođe do otkaza, odnosno zastoja sistema.

Iako se ovaj pristup pokazao dobrim, problem je što se njime uvek posmatra klasa čistoće celokupne mase ulja unutar hidrauličkog sistema, čime se za isti postavljaju najoštriji zahtevi u pogledu potrebne čistoće. Takvo uopštavanje ne rezultuje aplikacijama koje obezbeđuju optimalan životni vek hidrauličkih komponenti, najniže troškove eksploatacije, odnosno održavanja hidrauličkog sistema i rad sistema bez otkaza. Činjenica je da se čestice različitih veličina mogu dovesti u vezu sa habanjem kontaktnih površina radnih elemenata, pri čemu je sasvim sigurno da na mehanizam habanja utiču samo one čestice koje uđu u zazor zajedno sa uljem koje kroz njega protiče. Drugi, ništa manje značajan problem jeste određivanje frekvencije merenja kao i tehnike kojom će se vršiti nadgledanje stanja sistema. Oba pomenuta faktora, značajno utiču na ukupne troškove održavanja. Ako se pravilno odrede, i dosledno primenjuju, troškovi i vreme održavanja mogu da budu značajno sniženi, a pouzdanost sistema povećana.

Dodatno, fenomenu habanja, osim koncentracije čvrstih čestica u uljnoj masi, doprinose i razlike između radnih uslova i konstrukcije današnjih hidrauličkih komponenti i onih od pre 20-ak godina. Naime, novije komponente rade sa većim vrednostima radnih pritisaka, većim vrednostima radnih protoka, manjih su gabaritnih dimenzija, manjih vrednosti zazora što uslovljava razvoj novih i kvalitetnijih materijala, ali i oblika površina radnih elemenata i novih formulacija radnih fluida koji im omogućuju ove prednosti. Stoga, problemi vezani za posmatranje uticaja čvrstih čestica na degradacione procese u hidrauličkim sistemima, kao i filtriranje radnog fluida su veoma aktuelni i pružaju široke mogućnosti za istraživanje.

2.4 Sažet prikaz strukture rada

U uvodnom delu pored prednosti hidrauličkih sistema, predstavljeni su i njihovi nedostaci koji se mogu smatrati osnovnim, kada je u pitanju prenos energije pomoću fluida pod pritiskom. Posebno je istaknut problem čistoće radnog fluida koji je u drugom poglavlju, uz navode adekvatne stručne i naučne literature, obrazložen.

U skladu sa opisom problema i pregledom dosadašnjih istraživanja i dostignuća u ovoj oblasti, definisani su ciljevi i metodološki pristup realizaciji postavljenih ciljeva u ovoj disertaciji.

U trećem poglavlju predstavljeni su postojeći vidovi kontaminacije radnog fluida sa posebnim naglaskom na kontaminante čvrstog agregatnog stanja, koji se prema dosadašnjim istraživanjima tretiraju kao najštetniji. U ovom poglavlju dati su klasifikacija čvrstih čestica kao i prikaz njihovog potencijalnog porekla i uticaja koji vrše na elemente hidrauličkog sistema. S obzirom na to da se u okviru održavanja hidrauličkih sistema, kontaminaciji radnog fluida mora posvetiti posebna pažnja, veoma je bitno znati i razumeti standarde i interpretaciju sadržaja čvrstih čestica u radnom fluidu, što je takođe predstavljeno na jasan i razumljiv način u okviru ovog poglavlja.

Četvrto poglavlje detaljno opisuje mehanizme štetnog delovanja čvrstih čestica prisutnih u radnom fluidu. Pored osnovnih mehanizama habanja, abrazivnog i erozivnog, dat je i prikaz drugih negativnih uticaja (čestična blokada, obliteracija), koji mogu smanjiti funkcionalnost hidrauličke komponente, a samim tim i sistema u celini.

U petom poglavlju urađena je analiza i prikaz najzastupljenijih tipova kontaktnih parova hidrauličkih komponenti, kod kojih je prisutan mehanizam beskontaktnog zaptivanja. Određivanjem najzastupljenije grupe kontaktnih parova (klip-cilindar) istraživanje je usmereno na određenu grupu, u kontekstu analize uticaja čvrstih čestica kao kontaminanata na rad tog tipa kontaktnog para. Pored pomenutog, dat je prikaz osnovnih karakteristika ovog para, u pogledu oblika, veličine zazora, i modela proticanja kroz radijalne zazorove ovog tipa kontaktnog para.

U šestom poglavlju opisano je eksperimentalno istraživanje i prezentovani su eksperimentalni rezultati. Na početku je opisana eksperimentalna instalacija, kao i model ventila sa odgovarajućim kontaktnim parom, na kojem je vršeno ispitivanje uticaja određene koncentracije čvrstih čestica. Zatim, jasno i razumljivo je predstavljen plan eksperimentalnog ispitivanja. U nastavku su dati grafički i tabelarni prikazi značajnih eksperimentalnih rezultata, praćeni sa tekstualno opisanim zapažanjima i analizama prikazanih rezultata.

U prvom delu sedmog poglavlja izvršena je statistička provera postavljenih hipotetičkih modela nad skupom eksperimentalnih podataka, a dobijeni rezultati ove provere su usmerili dalji tok analize. U skladu sa eksperimentalnim rezultatima, u drugom delu poglavlja, postupkom “fitovanja” metodom najmanjih kvadrata, određene su funkcije (modeli) promene veličine kritičnih zazora, kontaktnog para klip-cilindar, u zavisnosti od broja odrađenih radnih ciklusa i klase čistoće ulja. S obzirom na to da su u svim eksperimentima primećena značajna odstupanja eksperimentalnih rezultata od proračunatih vrednosti isticanja hidrauličkog fluida kroz zazor, određene su okvirne vrednosti korekcionog koeficijenta koji bi trebalo pridodati postojećem teorijskom modelu.

U osmom poglavlju su izvedeni zaključci doktorske disertacije. Na kraju poglavlja, date su smernice budućih istraživanja na ovom polju.

3 Čistoća radnog fluida i njegov značaj za održavanje hidrauličkih sistema

Danas su proizvodni tehnološki sistemi daleko kompleksnije strukture nego što su bili i uz to mnogo su manje tolerantni prema pojavi otkaza, kako bi odgovorili na mnoštvo zahteva (ekonomski, bezbednosni, energetska, ergonomski, itd) koji se pred iste postavljaju, a opet koji nisu ništa manje značajni nego što je to suštinsko vršenje funkcije za koju je sistem namenjen. Projektovanje rezervnih proizvodnih kapaciteta koji se uključuju u slučaju neplaniranog zastoja usled pojave stanja u otkazu i velikih zaliha rezervnih delova, odavno se smatra prevaziđenom, nepotrebnom i neopravdanom praksom [68]. Time se značajno povećava pritisak na funkciju održavanja s obzirom na to da se u velikoj meri spušta prag tolerancije prema otkazu kao prihvatljivom faktoru, ali i opravdavaju sredstva uložena u obuku kadrova kao i nabavku neophodnih tehnološki veoma naprednih uređaja i instrumenata koji omogućavaju praćenje stanja u radu tako kompleksnih proizvodno-tehnoloških sistema.

U cilju povećanja stepena automatskog rada, povećanja produktivnosti, pouzdanosti, energetske efikasnosti, povećanja stepena zaštite radnika i okoline, ostvarenja ušteda u pogledu iskorišćenog materijala i prostora, stare konstrukcije tehničkih sistema se neprestano usavršavaju. Problemi održavanja istih postaju složeniji, naročito kod visokoproduktivnih i investiciono visoko vrednih sistema, od kojih se traži potpuna proizvodna sposobnost i ekonomičan rad tokom celokupnog eksploatacionog veka.

Za hidraulički sistem, kao i mnoge druge tehničke sisteme, može se reći da su karakteristične faze projektovanja, montaže, eksploatacije i održavanja. Vek korišćenja hidrauličkog sistema i svih pojedinačnih komponenti unutar njega, zavisi od aktivnosti u toku sve četiri pomenute faze. Ukoliko se pođe od logične pretpostavke da je sistem ispravno projektovan, izrađen od komponenti odgovarajućih karakteristika i kvaliteta, da se koristi hidraulički fluid u skladu sa zahtevima komponenti, a rukovanje je usklađeno sa projektovanim mogućnostima, sledi suštinski zaključak da vek korišćenja hidrauličkog sistema i komponenti, zavisi od aktivnosti u toku održavanja.

3.1 Održavanje hidrauličkih sistema

Jedan od najvažnijih doprinosa koje hidraulički sistemi ostvaruju, svakako jeste njihova sposobnost da omoguće povećanje snage i produktivnosti opreme, bez povećanja kompleksnosti ili dimenzija iste. **Naravno, ovakav doprinos ne može da bude ostvaren bez proporcionalnog povećanja radnog pritiska, a posledično, povećanja radne temperature i pojave otkaza pojedinih elemenata sistema.**

Ako se usvoji pretpostavka da je sistem ispravno projektovan, izrađen odgovarajućim postupcima montaže odgovarajućih komponenti, da je rukovanje usklađeno sa projektovanim

mogućnostima, sledi da uzroci pojave otkaza mogu biti, a najčešće i jesu postepeni degradacioni procesi koji su posledica mehanizama habanja, zamora materijala ili kontaminacije i trošenja radnog fluida u eksploataciji. U mnogim naučnim i stručnim radovima i publikacijama, kontaminacija radnog fluida se ističe kao glavni “neprijatelj” održavaoca hidrauličkih sistema [9], [22], [63], [76]. U publikaciji Parker-a [11], ali i nekih drugih renomiranih proizvođača hidrauličkih komponenti, navodi se da je oko 80% otkaza usledilo zbog problema sa radnim fluidom. Glavni razlog zašto je to tako, jeste to što radni fluid cirkuliše kroz ceo hidraulički sistem i što u odnosu na ostale elemente sistema, predstavlja komponentu koja ima više funkcija. Dakle, osim osnovne uloge tj. prenosa energije, radni fluid ima zadatak da:

- izvrši podmazivanje,
- preuzima i emituje toplotu kada je to potrebno,
- štiti od korozije,
- obezbedi zaptivanje,
- izdvaja vazduh i spreči pojavu penjenja,
- formira stabilne ili nestabilne emulzije (zavisno od aplikacije) i vrši razdvajanje ulja i vode, itd.

Kao što se vidi iz prethodno nabrojanog, radni fluid ima veoma širok spektar funkcija koje treba da obezbedi tokom eksploatacije. Održati stanje ulja tokom eksploatacije, u kojem ono može da zadovolji sve zahteve, jeste najveći problem, naročito ukoliko postoje odstupanja od propisanih radnih uslova tehničkog sistema.

Generalno gledano u okviru eksploatacije tehničkih, odnosno hidrauličkih sistema mogu se razlikovati tri stanja: rad sistema u okviru projektovanih radnih karakteristika, rad sistema izvan okvira projektovanih radnih karakteristika (kvazi-radno stanje) i otkaz hidrauličkog sistema.

Rad hidrauličkog sistema u okviru projektovanih radnih karakteristika predstavlja stanje koje se odgovarajućim režimom eksploatacije i posebno održavanjem nastoji što duže održati.

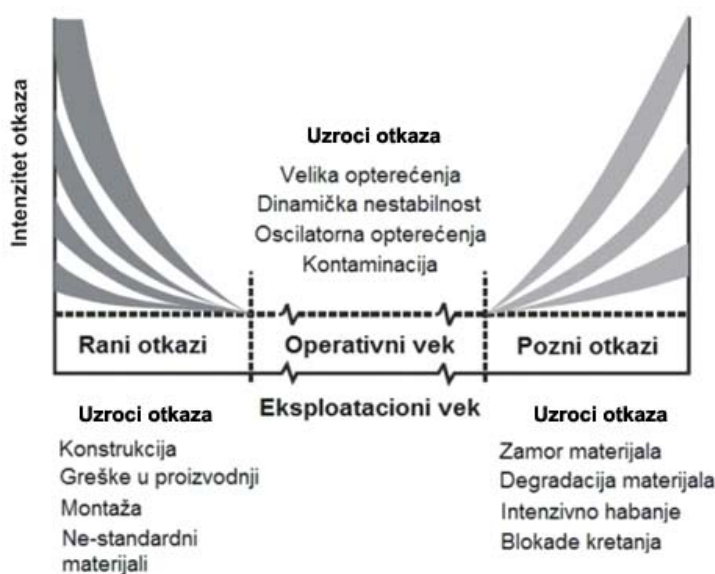
Stanje hidrauličkog sistema kod koga su njegovi radni parametri izvan projektovanih granica, može da se svrsta u kategoriju poremećaja. Pod tim pojmom se podrazumeva radno sposoban sistem, ali sa stanjem u kojem ne mogu da se postignu projektovane radne karakteristike: sila (F_i) i brzina kretanja klipa cilindra (v_i), odnosno moment rotacije (M_i) i broj obrtaja motora (n_i).

Stanje hidrauličkog sistema u otkazu se odnosi na stanje sistema kod koga nije moguće da se obavi nikakva radna funkcija. Uzrok otkaza hidrauličkog sistema kao celine je jedna ili više komponenti koje se nalaze u stanju otkaza. Nakon detekcije uzročnika otkaza pristupa se sprovođenju korektivnih mera.

Dakle hidraulički ili bilo koji drugi tehnički sistem, može da se nađe u jednom od prethodno opisana tri radna stanja. Naravno, u skladu sa modernim trendovima industrijske

produkcije, u interesu je održati sistem potpuno funkcionalnim tokom njegovog eksploatacionog veka [57]. Zato savremena strategija održavanja tehničkih sistema, bazirana je na sveobuhvatnom uvođenju preventivnih mera, u svakodnevnu praksu, sa osnovnim očekivanjem i potrebom da se pouzdanost i raspoloživost proizvodne opreme uvećaju proporcionalno naporima i aktivnostima koje se sprovedu kroz implementirani program održavanja.

Upotrebn (eksploatacioni) vek tehničkih sistema može se interpretirati dijagramom “kade” koji se dobija superpozicijom tri funkcije koje opisuju: rani otkazi (dečije bolesti), slučajni otkazi (normalan rad) i pozni otkazi (zastarevanje / istrošenost) – slika 3.1. Pored prikaza dijagrama kade, na slici 3.1 su dati i neki od faktora za koje se smatra da najviše doprinose pojavi otkaznih stanja u karakterističnim fazama eksploatacije.



Slika 3.1. Dijagram kade [28].

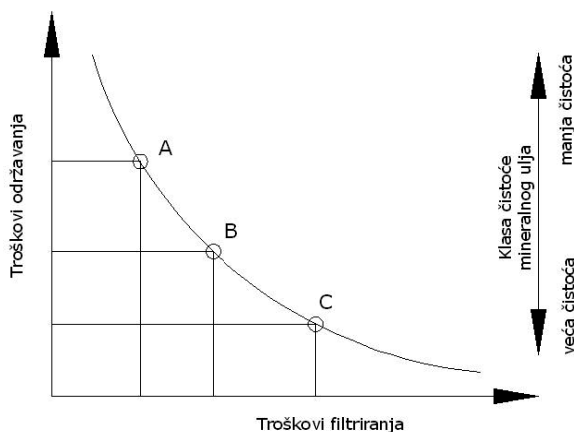
Svaki od pomenutih uzroka opisan je odgovarajućom krivom u dijagramu, koja predstavlja distribuciju otkaza za određen vremenski period eksploatacije tehničkog sistema, iskazanog u radnim satima, ciklusima itd. Ove krive su od velike pomoći kada se trebaju identifikovati mehanizmi koji dovode do pojave stanja u otkazu.

3.2 Čistoća radnog fluida

3.2.1 Vrste kontaminacije u hidrauličkim sistemima

Kontaminanti predstavljaju bilo kakav oblik materije ili energije, koji imaju izraženo nepovoljan (intenzivno destruktivan) uticaj na integritet sistema kada njihov sadržaj, tj. koncentracija pređe dozvoljeni, odnosno tolerisani nivo. Njihov uticaj može da bude uzrok pojave potpunih ili nepotpunih (kvazi-) otkaza u vidu pojave habanja, korozije, blokade, hemijske razgradnje, deformisanja, itd.

U skladu sa prethodno navedenim, **kontaminacija** radnog fluida hidrauličkog sistema predstavlja smanjenje čistoće fluida (povećanjem koncentracije kontaminanata u posmatranoj zapremini radnog fluida), pri čemu dolazi do promene njegovog elementarnog sastava i svojstava. Zato svaki fluid ili komponenta hidrauličkog sistema, a ujedno i sam hidraulički sistem, poseduju prag tolerancije u odnosu na svaku grupu kontaminanata posebno. Treba napomenuti da su kontaminanti, u sva tri agregatna stanja, uvek u izvesnoj meri prisutni u hidrauličkom fluidu i da potpunu čistoću fluida nije moguće postići. Osim gornjeg praga tolerancije, postoji i tzv. donji prag tolerancije, ispod kojeg nije poželjno prečišćavati radni fluid, isključivo zbog povećanih troškova filtriranja (slika 3.2).



Slika 3.2 Prikaz odnosa troškova održavanja i troškova filtriranja u zavisnosti od klase čistoće mineralnog ulja (troškovi održavanja/troškovi filtriranja), u odnosu na zahtevanu čistoću ulja:

- *A* – mala čistoća ulja/mali troškovi filtriranja/veliki troškovi održavanja;
- *B* – optimalna čistoća ulja/optimalni troškovi filtriranja i održavanja;
- *C* – visoka čistoća ulja/veliki troškovi filtriranja/mali troškovi održavanja).

Prepoznavanjem kontaminanata (posebno čvrstih čestica) radnog fluida, kao uzroka pojave habanja i najmanje tolerantne komponente (koja je najčešće i najskuplja – pumpe), u hidrauličkom sistemu FPRC (Fluid Power Research Center) je uložio velike napore da uvede koncept određivanja i testiranja osetljivosti pumpi na kontaminante [10]. Iako nije bio odmah prihvaćen [5], 15 godina kasnije donosi se nacrt standarda ISO/DIS 9632 [51] kojim se omogućava komparacija rada različitih konstrukcija pumpi konstantnog kapaciteta u normalnim radnim uslovima i radnim uslovima koji dovode do otkaza (kao što su prodor ili generisanje velikih čestica u sistemu) pumpe. Ohrabreni uspehom povodom prihvatanja i kasnije standardizacije *Multy-pass* testa (ISO 4572:1981) koji se koristi za merenje performansi filtera, pokušalo se i sa uvođenjem omega teorije, tj. faktora kojim se definiše osetljivost pumpe [49], [24]. Takozvani omega faktor – Ω (koeficijent ostljivosti pumpe na kontaminante), tesno je povezan sa beta faktorom – β (koeficijent filtriranja koji se dobija sprovođenjem *Multy-pass* testa), tako da u slučaju niske vrednosti omega faktora što podrazumeva da je komponenta veoma tolerantna na nečistoće, potrebno je obezbediti filter sa odgovarajućom, nižom vrednošću beta faktora, kako bi pumpa bila adekvatno zaštićena. Iako zvuči sasvim logično, ovaj koncept je naišao na veoma jak opozicioni stav [5]. Narednih

godina omega teorija nije razrađivana i nije zabeležen nijedan naučni / stručni rad koji se na takav način bavio konceptom određivanja tolerantnosti hidrauličkih komponenti i sistema na kontaminante. Ovo ne znači da pojedini proizvođači hidrauličkih komponenti i sistema, nisu usvojili koncept omega teorije koji su razvijali, testirali i dopunjavali prema svojim potrebama, kako bi se od strane istih proizvođača, mogle uopšte davati neke preporuke po pitanju čistoće radnog fluida. Problem je što svaki proizvođač „na svoj način” postavlja zahteve (što pokazuju i razlike u preporučenim klasama čistoće radnog fluida datim u tabeli 2.1), jer kao što je ranije pomenuto, ne postoji odgovarajući međunarodni standard koji definiše način određivanja stepena tolerantnosti.

Kada se govori o kontaminantima u hidrauličkim sistemima, misli se na materije koje mogu da budu u **čvrstom, gasovitom i tečnom** agregatnom stanju. Takođe, kontaminanti se mogu kvalifikovati kao slobodni, rastvoreni u emulzionom ili suspendovanom stanju i pri tome se ponašaju katalitički, reaktivno ili mogu da budu potpuno inertni na hemijske procese koji se odigravaju unutar sistema.

Kontaminiran fluid u hidrauličkom sistemu dovodi do:

- ubrzanja procesa degradacije fizičko-hemijskih svojstava radnog fluida,
- ubrzanog habanja komponenti sistema i pojave njihovog otkaza,
- poremećaja u radu sistema koji nisu izazvani otkazom komponenata.

Kontaminacija, stoga ima nepovoljan uticaj na funkcionisanje i radni vek hidrauličkog sistema i zato treba težiti ka njenom smanjivanju do mere koja može da se toleriše za potrebe aplikacije i njen predviđeni eksploatacioni vek.

Nijedan radni fluid nije u potpunosti čist, tj. nije moguće proizvesti fluid koji apsolutno neće sadržati neki od kontaminanata, već su kontaminanti u izvesnoj meri uvek prisutni [74], [88]. Shodno ovoj činjenici, a u cilju obezbeđenja pravilnog funkcionisanja hidrauličkog sistema i dostizanja što dužeg radnog veka istog, potrebno je definisati pragove tolerancije u odnosu na sadržaj svakog kontaminanta posebno, za svaku komponentu. Ukoliko je sadržaj određenog kontaminanta iznad definisanog praga, dolazi do raznih nepovoljnih uticaja na hidraulički sistem.

Količina kontaminanata u radnom fluidu hidrauličkog sistema predstavlja funkciju vremena, zatim izlaganja sistema, tj. fluida izvorima kontaminacije (okruženja sa velikim stepenom vlage, prašine, radne zone sa visokom temperaturom, itd.), i neefikasnosti elemenata za uklanjanje, odnosno sprečavanje ulaska kontaminanata u sistem (filteri i zaptivni elementi) (slika 3.3). Kontaminacija hidrauličkog fluida prema izvoru, može da se podeli na:

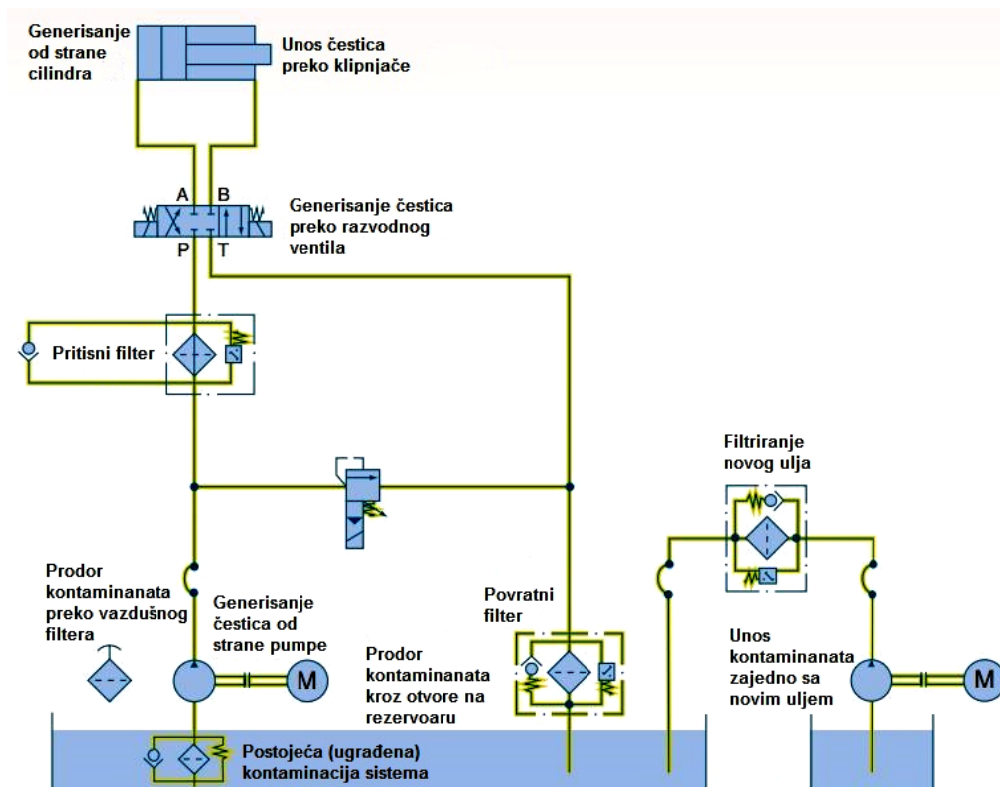
- eksternu – iz okoline i
- internu – habanjem kontaktnih površina hidrauličkih komponenti.

Eksterna kontaminacija predstavlja prodor kontaminanata iz okoline, najčešće preko usisnog otvora vazduha na rezervoaru, radnih elemenata hidrauličkog sistema (klipnjače cilindra, zaptivni elementi hidrauličkog motora, itd.), kao i posledicu procesa montaže i

demontaže prilikom ugradnje ili održavanja hidrauličkih komponenata. Unos kontaminanata u hidraulički sistem se dešava takođe i prilikom sipanja novog ulja u rezervoar.

Interna kontaminacija predstavlja generisanje kontaminanata od strane samog sistema, gde su to najčešće produkti procesa habanja kontaktnih površina radnih elemenata usled neodgovarajuće vrednosti viskoziteta ulja, ekstremnih vrednosti radnih parametara (pritisak, protok i temperatura), hemijskih reakcija (npr. hidroliza, oksidacija...), itd.

Bilo da su kontaminanti ušli u sistem spolja ili da su generisani unutar sistema, isti će cirkulisati kroz ceo sistem. Ovi kontaminanti koji inače izazivaju habanje delova komponenti i uređaja, kao i degradaciju svojstava hidrauličkog fluida se uklanjaju filtriranjem. Određen broj čvrstih čestica koje ostanu u sistemu, dospevaju do zazora u komponentama i uzrokuju habanje radnih (kontaktnih) površina.



Slika 3.3 Prikaz lokacija izvora kontaminacije hidrauličkog sistema i lokacija gde se vrši izdvajanje kontaminanata [17].

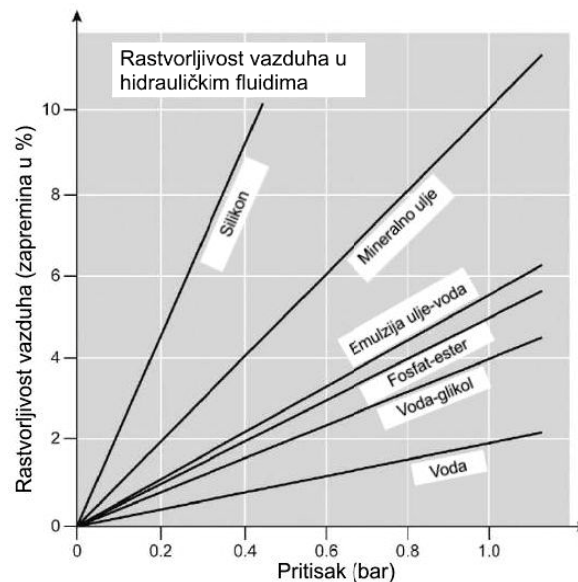
Kontaminacija vazduhom

Vazduh kao kontaminant u hidrauličkom sistemu (tj. fluidu), može da bude prisutan u:

- rastvorenom ili
- nerastvorenom stanju.

Rastvoreni vazduh ne predstavlja veliki problem, dok je u takvom stanju. U slučaju nerastvorenog vazduha kada fluid protiče kroz komponente, dolazi do promene pritiska koji vrši kompresiju vazduha i za posledicu ima generisanje velike količine toplote koja razara

aditive, ali i bazno ulje. Osim pomenutog, nerastvoren vazduh predstavlja uzrok nepravilnog kretanja radnih elemenata (hidrauličkih cilindara, motora, itd.), smanjuje sposobnost podmazivanja, povećava nivo buke, izaziva penjenje i pojavu kavitacije ulja, itd. U slučaju rastvorenog vazduha ako količina istog pređe određeni nivo, javlja se izraženo negativan uticaj na količinu rada koju ostvaruje dati sistem. Mineralna hidraulička ulja mogu u sebi da imaju oko 10 % rastvorenog vazduha pri atmosferskom pritisku i sobnoj temperaturi (slika 3.4). Koeficijent rastvorljivosti zavisi od svojstava tečnosti i gasa. Rastvorljivost vazduha u tečnostima nižeg viskoziteta je veća nego kod tečnosti koje imaju više vrednosti viskoziteta. Više vrednosti gustine tečnosti ili povećanje radne temperature, utiče na smanjenje koeficijenta rastvorljivosti.



Slika 3.4 Rastvorljivost vazduha u tečnostima [58].

Količina rada koju ostvaruje hidraulički sistem se zasniva na maloj kompresibilnosti radnog fluida koja se iskazuje Bulk-ovim modulom. Međutim, povećanjem količine rastvorenog vazduha u fluidu koji je 20 000 puta kompresibilniji u odnosu na tečnosti, Bulkov modul se smanjuje, pa je zato potrebno uložiti mnogo veću količinu rada kako bi se pored tečnosti komprimovao i vazduh prisutan u istoj, čime se smanjuje stepen korisnog rada sistema. Prisutan vazduh u bilo kojoj formi, predstavlja potencijalan izvor oksidacije u tečnostima. Oksidacija predstavlja složeni proces polimerizacije koji je naročito intenzivan pri povišenim radnim temperaturama, i koji ima za posledicu formiranje lakova i taloga (polarni produkti velike molekularne težine koji su slabo rastvorljivi u ulju), ubrzano trošenje aditiva, razgradnju baznog ulja, promenu boje ulja, povećanje viskoznosti, ubrzavanje procesa korozije metalnih površina, itd. Hemijske reakcije procesa oksidacije se udvostručuju kada se temperatura ulja u rezervoaru koja u optimalnim radnim uslovima obično iznosi oko 60 – 65 °C, uveća za svakih 10 °C.

Kontaminacija vodom

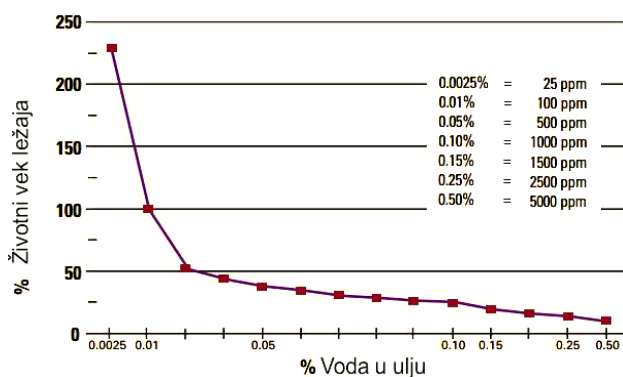
Voda kao kontaminant, posebno kod sistema koji koriste mineralna ulja, deluje negativno na uljno punjenje, izaziva koroziju hidrauličkih komponenti, dovodi do ispiranja aditiva, itd. Poznato je da su mineralna ulja hidroskopska i da stoga imaju sklonost ka vezivanju sa vodom u određenom procentu. Sklonost vezivanja ulja sa vodom povećava se sa porastom temperature ulja, ali isto tako sa povećanjem radne temperature dolazi do povećanja isparavanja vode. Voda u ulju može da bude prisutna u vidu:

- slobodne vode,
- rastvorene vode, i
- emulzije (voda u ulju).

Sa promenom temperature sistema i okoline, voda u sistem ulazi kao vodena para. Isti proces se odigrava u hidrauličkom sistemu, skladišnom rezervoaru, kontejneru ili bilo kojoj drugoj posudi koja “diše” sa promenom temperature okoline. Nakon kondenzacije u vazдушnom prostoru rezervoara, prvo dolazi do spajanja sitnih kapi u krupne, koje zatim padaju u ulje. Vodene kapi, zbog veće vrednosti gustine, padaju na dno posude i ostaju u tom stanju (kao slobodna voda) sve dok se ne stvore odgovarajući uslovi (promena temperature, pritiska, kretanje fluida) kada dolazi do mešanja ulja i vode.

Prisustvo vode uzrokuje smanjenje viskoznosti (što je glavni razlog smanjenja nosivosti mazivog filma zbog čega radni elementi komponenata tada vrše funkciju u graničnim uslovima podmazivanja) i u sadejstvu sa povećanom temperaturom i prisustvom vazduha stvara kisela jedinjenja u ulju (što se reflektuje povećanjem TAN – Total Acid Number vrednosti), usled čega dolazi do stvaranja taloga i pojačanog korozionog dejstva ulja na hidrauličke komponente.

Voda u hidrauličkom ulju ima posebno negativan uticaj na vek korišćenja ležajeva pumpi i hidrauličkih motora. Negativni uticaj vode na smanjenje veka korišćenja ležajeva je značajan naročito kod klipno-aksijalnih pumpi i on se ilustruje dijagramom (slika 3.5) na kome je prikazan uticaj sadržaja vode na smanjenje veka korišćenja kotrljajućih ležajeva. Kao bazni sadržaj vode definisana je veličina od 0,01% (100 ppm) i tada se kod proračunatog opterećenja i definisanog broja obrtaja postiže 100% životnog veka kotrljajućeg ležaja.



Slika 3.5 Uticaj sadržaja vode na proračunati vek trajanja ležaja [100].

Sa stanovišta tolerancije mineralnih hidrauličkih ulja u odnosu na dozvoljen sadržaj vode, treba imati u vidu da zavisi od hemizma baznog ulja i kompozicije paketa aditiva, te da se stvarno kreće od 0,03 do 0,2%.

Obzirom da su čvrste čestice, kao kontaminanti, i njihov uticaj na rad hidrauličkog sistema, predmet istraživanja ove disertacije, oni će biti detaljno razmatrani u posebnom podpoglavlju koje sledi.

3.2.2 Kontaminacija radnog fluida čvrstim česticama

Kao vrsta kontaminanata sa najdestruktivnijim dejstvom kao što je prethodno spomenuto, jesu čvrste čestice i zato će najviše prostora, u ovoj disertaciji, biti posvećeno upravo njima.

Kontaminanti u vidu čvrstih čestica koji, inače predstavljaju opasnost za sve upravljačke, tj. radne elemente, kao i integritet radnog fluida, mogu se naći u različitim veličinama i oblicima. Identifikacija čvrstih čestica koje se javljaju u hidrauličkom ili bilo kojem drugom tribološkom sistemu, podrazumeva definisanje njihovih fizičkih svojstava: strukture, tvrdoće, oblika, veličine i distribucije čestica po veličini.

Sve čestice koje se nalaze u radnom fluidu, mogu proizvesti negativne efekte na sledeće načine:

- habanje (trošenje) površina sa kojima dolaze u kontakt,
- ometanje kretanja radnih / upravljačkih elemenata komponenti ili fluida,
- katalizaciono delovanje na degradaciju, odnosno reformulaciju radnog fluida ili aditiva.

Dva specifična mehanizma habanja koja nastaju usled prisustva čvrstih čestica u radnom fluidu, pored promene geometrije površine, za posledicu imaju i generisanje novih čvrstih čestica koje se zatim, radnim fluidom raznose po celom sistemu jesu:

- abrazija sa tri tela u kontaktu i
- erozija.

Slučaj graničnog podmazivanja, podrazumeva dve površine koje su u kontaktu prilikom kretanja jedne površine u odnosu na drugu. U ovim uslovima rada čestice koje se nalaze u radnom fluidu, nisu izložene kontaktnim površinama. Zato se u ovom slučaju javlja abrazivno habanje dva tela (vrhova neravnina jedne i druge površine) u kontaktu. Kada su površine pri relativnom kretanju razdvojene slojem uljnog filma, čestice prisutne u fluidu mogu doći u kontakt sa obe površine. Ovakvi radni uslovi podrazumevaju slučaj mehanizma abrazivnog habanja sa tri tela u kontaktu, pod uslovom da je prisutna i odgovarajuća vrednost normalnog opterećenja površina.

Drugi značajan mehanizam habanja izazvan prisustvom čvrstih čestica u fluidu, jeste eroziono habanje. Svaka čestica, prisutna u radnom fluidu koji se kreće, ima određenu kinetičku energiju,

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3.1)$$

gde je: E_k – kinetička energija, m – masa čestice, v – brzina čestice,

koju u momentu udara u neku površinu gubi, tačnije ona se pretvara u rad koji ima za posledicu nastanak deformacija u vidu pukotina (krti materijali) ili brazda (meki materijali) u materijalu, kao i nastanak novih čestica. Naravno, ne treba zaboraviti da se deo te energije pretvara i u toplotnu.

Štetnost mehanizama habanja uzrokovanih prisustvom čvrstih čestica, generalno zavisi od nekoliko bitnih faktora:

- karakteristika (oblik, veličina, tvrdoća, žilavost) i količine čestica prisutnih u fluidu,
- orijentacije i topografije površina koje se habaju, uključujući strukturu i tvrdoću,
- karakteristika radnog fluida (viskoznost, podmazujuća svojstva, aditivi),
- radnih uslova sistema (pritisak, protok, temperatura, vlaga, itd.).

Pod ometanjem kretanja fluida ili radnih elemenata komponenti podrazumeva se određeni vid blokade, odnosno poremećaja rada sistema koji vodi ka delimičnom ili potpunom otkazu komponente/sistema. Postoje dva osnovna vida ovog poremećaja, a to su:

- blokada kliznih površina (između elemenata koji imaju međusobno translatorno ili rotaciono kretanje) i
- blokada površina kroz koje protiče radni fluid (mlaznice, prigušnice, filteri, itd.).

Poslednji tip negativnog efekta koji je rezultat prisustva čvrstih čestica u radnom fluidu, jeste kataliza. Kataliza predstavlja proces promene brzine hemijske reakcije uz obavezno prisustvo katalizatora, tj. materije koja smanjuje energiju aktivacije reakcionog sistema, odnosno ubrzava postizanje termodinamičke ravnoteže. Čestice kao katalizator iako učestvuju u hemijskoj reakciji, posle hemijske reakcije ostaju nepromenjene što znači da se katalizator ne troši, niti menja u smislu hemijskog sastava.

Hemijski proces koji značajno utiče na svojstva radnog fluida (naročito ako je to mineralno ulje), a samim tim i radne performanse hidrauličkog sistema, jeste oksidacija. Uslovi koji promovišu proces oksidacije u hidrauličkom sistemu su:

- prisustvo kiseonika (aeracija),
- mehanički agitatori,
- visoki radni pritisci,
- visoke radne temperature i
- katalizatori (voda i metalne čestice).

Među ekstremno aktivne katalizatore u oksidacionim hemijskim reakcijama, se ubrajaju gvožđe i bakar. Tokom oksidacionog procesa, osim što dolazi do degradacije radnog

fluida i aditiva, dolazi i do stvaranja tankih deponitnih naslaga na svim radnim površinama kao i razgradnje elastomernih zaptivki zbog konstantne degradacije radnog fluida i gubitka njegove kompatibilnosti sa materijalom zaptivke.

Pomenuti metalni katalizatori, osim procesa oksidacije pospešuju i proces polimerizacije fluida, pri kojem dolazi do stvaranja produkata koji imaju veliku molekularnu masu. Čak i kada su inhibitori oksidacije prisutni u novom ulju, oni se brzo potroše ako su prisutni katalizatori u velikim količinama. Dakle, produkti ovih reakcija formiraju mnoštvo jedinjenja koji uzrokuju:

- degradaciju fizičkih i hemijskih svojstava radnog fluida,
- povećanje viskoziteta radnog fluida,
- stvaranje kiselina koje korozivno deluju na metale i agresivno na zaptivke,
- formiranje lepljive mase (laka) koja se taloži na radnim površinama komponenti ili blokira filtere,
- formiranje mulja, koji se taloži na mestima poput dna rezervoara, priključnih mesta koja su orijentisana na dole.

Svi kontaminanti zajedno, imaju veoma veliki spektar negativnih uticaja koji za krajnji rezultat, pored navedenih imaju smanjenje eksploatacionog veka, ali i efikasnosti hidrauličke opreme što se da videti sa slike 3.6.



Slika 3.6 Efikasnost čistog (levo) i kontaminiranog (desno) hidrauličkog pogona bagera (Catepillar).

Potencijalni izvori kontaminacije čvrstim česticama u toku rada hidrauličkog sistema (neki od ovde pobrojanih mogu se videti na slici 3.3):

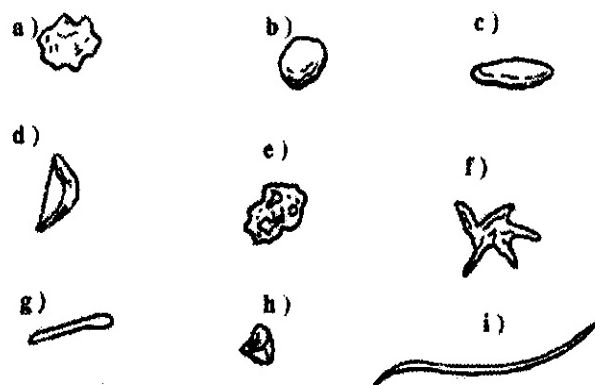
- nov hidraulički fluid – fluid koji već ima kontaminaciju nivoa većeg od dozvoljenog,

- kontaminacija prilikom sipanja hidrauličkog fluida u rezervoar – čvrste čestice nataložene na spoljnoj površini rezervoara ulaze u sistem zajedno sa fluidom,
- usled loše zaptivenih spoljnih površina rezervoara, dolazi do oscilacija nivoa fluida u rezervoaru, pri čemu u sistem ulazi nefiltriran vazduh, kontaminiran vlagom i čvrstim česticama iz okoline,
- korozioni slojevi sa unutrašnjih površina čeličnih rezervoara ili farba ukoliko je rezervoar ofarban neadekvatnom farbom sa unutrašnje strane,
- nezadovoljavajuće zaptivena spojna mesta hladnjaka ili pukotine nastale na zidovima rashladnog tela,
- kontaminacija ulja čvrstim česticama nastalim kao posledica habanja komponenata sistema,
- korozija izazvana prisustvom vode u ulju ili njegovom hemijskom degradacijom,
- kontaminacija sitnim komadićima materijala zaptivača kojima su zaptivene pumpe, motori i cilindri,
- loše zaptivena spojna mesta usisnog cevovoda,
- kontaminacija česticama preko površine klipnjače cilindra, itd.

3.2.3 Vrste čvrstih čestica

Čvrste čestice prisutne u radnom fluidu hidrauličkog pogonskog sistema, mogu se razvrstati prema [88]:

- obliku (slika 3.7),
- sastavu materijala na: organske i neorganske,
- veličini na: velike, srednje, sitne (tabela 3.1),
- vrsti materijala na: bakarne, čelične, olovne, kalajne, itd. (tabela 3.2),
- tvrdoći na: meke i tvrde,
- hemijskom sastavu na: neutralne i agresivne,
- rastvorljivosti u ulju na: rastvorljive i nerastvorljive,
- električnoj provodljivosti na: provodljive, neprovodljive i neutralne.



Slika 3.7 Karakteristični oblici čvrstih čestica: a) višegaona; b) sferična; c) elipsoidna; d) tanjirasta; e) porozna; f) zvezdasta; g) štapičasta; h) klinasta; i) vlasasta [88].

U tabeli 3.1 koja sledi su date vrednosti veličina nekih od čestica koje se javljaju u hidrauličkom sistemu.

Tabela 3.1 Veličine čvrstih čestica [88].

Čvrsta supstanca	Veličina (μm)
Mulj	do 2
Pigmenti boja	0.1 do 4
Blato	2 do 20
Talk	do 10
Fini pesak	20 do 200
Grubi pesak	200 do 2000
Šljunak	preko 2000
Produkti habanja	> 0.5
Cement	3 do 100

Kod ocene veličine čestica, materijala različitog agregatnog stanja, treba imati u vidu da se:

- a) uopšteno, čestice u odnosu na veličinu mogu se svrstati u sledeća područja:
 - jonsko područje 0 do 0.002 μm ;
 - molekularno područje 0.002 do 0,1 μm ;
 - područje submikro veličina 0.1 do 1 μm ;
 - područje mikro veličina 1 do 25 μm ;
 - područje makro veličina preko 25 μm ;
- b) čestice, prisutne u hidrauličnim fluidima, mogu se podeliti na:
 - mikro čvrste čestice – do 3 μm ;
 - najfinije čvrste čestice – 3 do 5 μm ;
 - fine čvrste čestice – 5 do 20 μm ;

- grube čvrste čestice – 20 do 50 μm ;
- pljavština – preko 50 do 100 μm .

Da bi se lakše identifikovali elementi koji se intenzivno habaju tokom eksploatacije hidrauličkog sistema, formira se tabela u kojoj je dat prikaz vrsta materijala od kojih su izrađeni elementi sistema (tabela 3.2). Koncentracija određenog materijala u radnom fluidu se utvrđuje spektrometrijskom analizom.

Tabela 3.2 Poreklo kontaminanata u vidu čvrstih čestica [21].

Vrsta materijala	Poreklo			Uticaj	
	Habanjem elemenata sklopa hidrauličkih komponenti	Aditivi	Prodor iz okoline	Izaziva habanje	Izaziva hemijsku degradaciju u ulja
Aluminijum (Al)	Ležajevi, klipovi motora, hladnjaci ulja, delovi kućišta pumpi	-	Masti na bazi aluminijuma, prašina u obliku SiO ₂ (pesak, korund, itd.)	DA	-
Bakar (Cu)	Ležajevi, bočne ploče kod pumpi, čaure, hladnjaci ulja, vođice cilindra	-	-	DA	DA
Barijum (Ba)	-	Inhibitor korozije, disperzantni aditiv	-	-	-
Cink (Zn)	Galvanizovani rezervoari i kućišta, legirani elementi za ležaje	Antihabajući aditiv, inhibitor korozije, antioksidant	-	-	-
Gvožđe (Fe)	Svi delovi hidrauličkih komponenti	-	-	DA	DA
Hrom (Cr)	Ležajevi, klipnjača cilindra, elementi od nerđajućeg čelika	-	-	DA	-
Kalaj (Sn)	Ležajevi, bočne kompezacione ploče kod pumpi, čaure	-	-	-	-
Kalijum (K)	Sredstvo za hlađenje ulja (ako se nađe u jedinjenjima sa borom, molibdenom ili				

Vrsta materijala	Poreklo			Uticaj	
	Habanjem elemenata sklopa hidrauličkih komponenti	Aditivi	Prodor iz okoline	Izaziva habanje	Izaziva hemijsku degradaciju u ulja
	natrijumom)				
Kalcijum (Ca)	-	Deterdžentno-disperzantni aditiv, aditiv za neutralizaciju kiselina	Masti na bazi kalcijuma	-	-
Magnezijum (Mg)	Delovi komponenta izrađenih od legiranih čelika, kućišta	Deterdžentno-disperzantni aditiv	-	DA	-
Molibden (Mo)	Ležajevi, klipni prstenovi	Antihabajući aditiv	-	-	-
Olovo (Pb)	Ležajevi, čaure	-	-	-	-
Srebro (Ag)	Ležajevi	-	-	DA	-
Titanijum (Ti)	Ležajevi, boje sa titanijum-oksidiom	-	-	DA	-
Bor (B)	-	Inhibitor korozije, antihabajući aditiv, antioksidacioni aditiv	-	-	-
Silicijum (Si)	Elastomerni zaptivači kod nekih pumpi, klipovi motora, hladnjaci ulja	Aditivi protiv penjenja	-	DA	-
Fosfor (P)	-	Antihabajući aditiv, inhibitor korozije, antioksidacioni aditiv, EP aditiv	-	-	-
Sumpor (S)	-	EP aditiv	-	-	-
Natrijum (Na)	-	Inhibitor korozije	Prodor vode u sistem	-	-
Materijali za izradu zaptivača	Elastomer	Habanje ili hemijska razgradnja statičkih i dinamičkih zaptivki	Unos čestica prilikom montaže sistema	-	-
	Poliuretan				
	Termoplast				

- Metali
 - Metaloidi
 - Nemetali

3.2.4 Definisanje čistoće radnog fluida

U sklopu održavanja hidrauličke opreme i uspostavljanja odgovarajućeg programa kontrole kontaminacije veoma bitan parametar, jeste stepen čistoće radnog fluida.

Određivanje čistoće radnog fluida se dovodi u vezu sa upotrebom standarda, odnosno standardizovanih instrumenata i metoda merenja, kako bi se utvrdilo stanje sistema u pogledu kontaminacije. Postoji nekoliko standarda kojima se određuje klasa čistoće radnog fluida za hidrauličke sisteme (tabela 3.3).

Tabela 3.3 Primeri standarda koji se koriste (ili su se koristili) u cilju definisanja klase čistoće radnog fluida.

Naziv standarda (godina izlaska)	Opis
SAE 749D (1963)	Jedan od prvih standarda za definisanje stepena čistoće hidrauličkog ulja, koji je bio u upotrebi veoma kratko vreme zbog suviše malog broja klasa čistoće
NAS 1638 (1964)	Zamenio je SAE 749D i predstavlja jedan od najčešće korišćenih standarda (kategorije veličina čestica 5-15, 15-25, 25-50, 50-100, >100 μm)
MIL STD 1246 A (1967) MIL STD 1246 B (1987) MIL STD 1246 C (1994)	Vojni standard za upotrebu kod hidrauličkih sistema u mornarici, vazduhoplovstvu i pešadiji, koji danas nije u upotrebi
CETOP RP 70H (-)	Standard koji je povučen iz upotrebe a nasledio ga je ISO 4406
ISO 4406: 87 (1987) ISO 4406: 99 (1999)	Standard koji pored NAS 1638 ima najveću upotrebu, pri čemu ISO 4406:99 propisuje kalibraciju mernih instrumenata po ISO MTD standardu, dok su se za stari ISO 4406:87 instrumenti kalibrisali po ACFTD standardu (kategorije veličina (stari) >2, >5, >15, (novi) >4, >6, >14)
NAV AIR 10-1A-17 (1989)	Standard američke vojne mornarice za hidrauličke sisteme vazduhoplovnih letelica
GOST 17216:2001 (2001)	Ruski standard za vojnu avio-industriju kojim se čestice po veličini razvrstavaju u intervalu od 0,5 do 200 μm, sličan SAE AS 4059 E
SAE AS 4059 (1988) SAE AS 4059A (1990) SAE AS 4059B (1995) SAE AS 4059C (2000) SAE AS 4059D (2001) SAE AS 4059E (2005) SAE AS 4059F (2013)	Pored NAS 1638 (kojeg je i nasledio) i ISO 4406, i ovaj standard predstavlja jedan od često korišćenih standarda i koji za razliku od ISO 4406 ima klasifikaciju za čestice veličine preko 21 μm (kategorije veličina >4, >6, >14, >21, >38, >70 μm)
Osim navedenih postoje i drugi načini, tj. standardi za utvrđivanje sadržaja čvrstih čestica kao na primer gravimetrija nerastvorljivih čestica u ulju (ISO 4405 ili ASTM D4898-90(2010)e1), analitička ferografija produkata habanja (ASTM D7690-11), FT-IR spektrometrija (ASTM E2412-10) i dr.	

Jedan od standarda nastalih na bazi potrebe za definisanjem klase čistoće radnog fluida, koji je zbog svoje jednostavnosti stekao dobru reputaciju i ima široku upotrebu, jeste

američki standard NAS 1638 (National Aerospace Standard). Ovaj standard je značajno uticao na:

- razvoj sistema za filtriranje hidrauličkih fluida,
- razvoj konstrukcija hidrauličkih komponenti,
- razvoj novih formulacija hidrauličkih fluida,
- razvoj dijagnostičkih metoda,
- razvoj strategije održavanja hidrauličkih sistema i opreme, ali i drugih sistema koji koriste maziva sredstva,
- povećanje eksploatacionog veka hidrauličkih sistema i opreme, i smanjenje troškova održavanja,
- povećanje pouzdanosti i bezbednosti korišćenja hidrauličkih komponenti i sistema.

Njegovi kasniji naslednici, tj. ISO 4406:1987, odnosno ISO 4406:1999 i SAE AS 4059 doprinose, takođe razvoju pomenutih elemenata, ali donekle stvaraju i konfuziju među krajnjim korisnicima hidrauličkih sistema zbog novog načina interpretacije veličine čestica i promene načina kalibrisanja automatskog brojača čestica (APC – Automatic Particle Counter) umesto starim ISO 4402, gde su čestice za kalibraciju generisane prema ACFTD standardu (nije više u upotrebi), sa novim ISO 11171, kod kojeg se čestice generišu prema novom ISO MTD standardu.

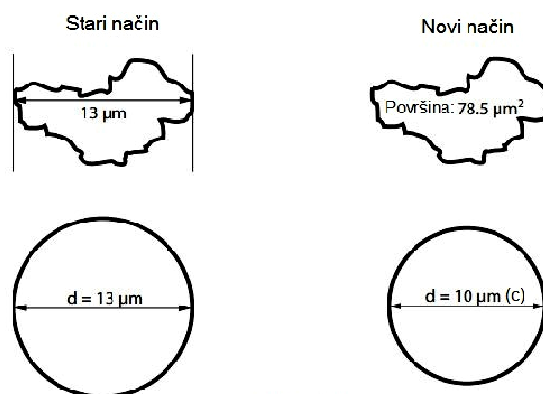
Pored pomenutih automatskih brojača čestica se koristi i mikroskopsko prebrojavanje čestica, koje se sprovodi u skladu sa standardima ISO 4407, SAE ARP-5987 i ASTM F312. Međutim, pošto je ovo metoda koja se sprovodi u laboratorijskim uslovima, zahteva više vremena kao i visok stepen obučenosti laboranta koji vrši ispitivanje. Osim pomenutog, tumačenje rezultata izvršenih testova ne predstavlja problem laborantima, ali zato povezivanje sa mehanizmima nastanka kontaminacije za različite aplikacije, zahteva dodatnu obuku kadrova i znatno poskupljuje cenu usluge. Posmatrajući stvari na ovaj način, sasvim logično rešenje kojim se brzo može doći do analize čistoće hidrauličkog ulja, od strane operatora koji već ima predznanja o uzrocima kontaminacije, jeste automatski brojač čestica. Uređaj kojim se relativno lako rukuje i u veoma kratkom roku dobija pouzdana informacija o stepenu čistoće prema nekom od ranije pomenutih standarda.

Pored APC-a, koji koristi princip difrakcije ili ortogonalne projekcije svetlosnog zraka za određivanje veličine i distribucije čestica u radnom (mazivom) fluidu, u praksi se koristi i princip blokiranja protoka fluida kroz kalibrisanu mrežicu [104]. Ovaj princip merenja čistoće ulja se pokazao veoma praktičnim kod aplikacija gde:

- su prisutne veoma velike čestice koje mogu blokirati mlaznicu APC senzora (aproksimativno veličine oko 100 μm),
- je prisutan vazduh u nerastvorenom stanju,
- se koriste fluidi poput emulzija na bazi vode,
- su ulja tamnijih boja ili ulja zasićena sagorelim produktima, npr. ulja za dizel motore.

2.2.4.1 Interpretacija veličine čestice

Istorijski gledano se koriste dva načina interpretacije veličine čvrstih čestica metodom prebrojavanja pomoću APC-a za hidraulička (i uopšte maziva) ulja. U oba načina čestica se predstavlja kao sfera koju karakteriše prečnik. Prvi način interpretacije jeste prema starom standardu za kalibraciju uređaja, ACFTD (ISO 4402), kod kojeg se za prečnik sfere uzima najduža dimenzija snimljene čestice (slika 3.8 – stari način). Drugi način interpretacije, prema novom standardu za kalibraciju uređaja, ISO MTD (ISO 11171 – ISO 12103 A3), propisuje da prečnik sfere treba da bude ekvivalentan izmerenoj površini snimljene čestice (slika 3.8 – novi način). U drugom slučaju kodni brojevi klase čistoće u indeksu nose oznaku (c) što podrazumeva da je kalibracija vršena prema ISO MTD. Sa ovim izmenama NIST (National Institute of Standards and Technology) je utvrdio da su čestice veličine ispod 10 μm , zapravo veće, odnosno za slučaj čestica preko 10 μm , manje, nego što je to ranije mereno korišćenjem APC-a kalibrisanog prema ACFTD [28].



Slika 3.8 Definisavanje veličine čestice.

U nastavku se daje uporedna tabela (tabela 3.4) vrednosti veličina čestica merenih APC-om prema ACFTD i MTD standardu.

Tabela 3.4 Odnos veličine čestica po starom ACFTD i novom MTD postupku kalibracije [29].

Velikine čestica prema ACFTD (ISO 4402) kalibraciji (μm)	Velikine čestica prema MTD (ISO 11171) kalibraciji ($\mu\text{m}_{(c)}$)
< 1	4
1.0	4.2
2.0	4.6
2.7	5.0
3.0	5.1
4.3	6.0
5.0	6.4
7.0	7.7
10.0	9.8
12.0	11.3

Veličine čestica prema ACFTD (ISO 4402) kalibraciji (μm)	Veličine čestica prema MTD (ISO 11171) kalibraciji ($\mu\text{m}_{(c)}$)
15.0	13.6
15.5	14.0
20.0	17.5
25.0	21.2
30.0	24.9
40.0	31.7
50.0	38.2
100.0	70.0

U tehnici merenja broja čvrstih čestica u određenoj zapremini fluida se prihvaćene korelacije u interpretaciji čvrstih čestica po starom i novom načinu kalibrisanja i njihov odnos je dat u tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Interpretiranje veličine čestica mernim uređajima.

ACFTD (ISO 4402)		MTD (ISO 11171)
2 μm	odgovara	4 μm (c)
5 μm	odgovara	6 μm (c)
15 μm	odgovara	14 μm (c)
25 μm	odgovara	21 μm (c)
50 μm	odgovara	38 μm (c)
100 μm	odgovara	70 μm (c)

3.2.4.2 Definisane klase čistoće ulja

Klasa čistoće fluida u pogledu kontaminacije čvrstim česticama se kvantitativno opisuje dodeljivanjem odgovarajućeg kodnog broja, pri čemu različiti standardi imaju različite kodne brojeve za istu klasu čistoće. S obzirom na to da se u praksi najčešće koriste NAS 1638 – 01, SAE AS 4059F, ISO 4406-87 i ISO 4406-99, za iste će u nastavku biti prikazan način kodiranja.

a) NAS 1638 – 01

Prema ovom standardu se definišu klase čistoća ulja u odnosu na sadržaj čvrstih čestica od 2 do 5 μm , od 5 do 15 μm , od 15 do 25 μm , od 25 do 50 μm , od 50 do 100 μm i preko 100 μm u uzorku od 100 mL ulja. Tablica klasifikacije čistoće ulja po ovom standardu, je data u prilogu broj 1. U odnosu na standard NAS 1638, NAS 1638 – 01 posmatra i čestice veličine od 2 – 5 μm . Veličina čestica je bazirana na merenju APC-a kalibrisanog prema ISO 4402, odnosno starom ACFTD standardu.

Kod definisanja klase čistoće ulja bira se jedinstveni kodni (jednocifreni ili dvocifreni) broj koji se odnosi na broj čestica po ravnomernoj raspodeli određenoj standardom (npr. NAS 10), gde se za svaku narednu klasu broj čestica povećava dvostruko u odnosu na nižu klasu.

b) SAE AS 4059E

Korišćenjem ovog standarda, može se odrediti klasa čistoće i za čestice merene po starom (ISO 4402) i po novom (ISO 11171) načinu interpretacije, u zavisnosti od toga kako je kalibrisan uređaj kojim se meri klasa čistoće. Zato su veličine čestica, da ne bi došlo do konfuzije, razvrstane u slovne grupe A, B, C, D, E i F. Odgovarajući kodni broj iz tabele date u prilogu broj 2, dodeljuje se svakoj slovnoj grupi, a slovna oznaka koja uz sebe ima najveći kodni broj označava klasu čistoće uzorka. Primer kodne oznake 7A – D / 9E / 8F podrazumeva da u uzorku od 100 mL ne sme da bude više od naznačene količine čestica za klasu 7 kod grupa od A do D (tj. čestica koje su: $>4 \mu\text{m}_{(c)}$, $>6 \mu\text{m}_{(c)}$, $>14 \mu\text{m}_{(c)}$ i $>21 \mu\text{m}_{(c)}$), niti više od naznačene količine za klasu 9 grupe E ($>38 \mu\text{m}_{(c)}$), odn. 8 grupe F ($>70 \mu\text{m}_{(c)}$).

c) ISO 4406-87 i ISO 4406-99

Klase čistoće fluida, definisane prema ISO 4406-87 (tabela 3.6 – levi deo tabele) se koriste za definisanje broja čvrstih čestica u 24 kodne grupe za veličine čestica od 5 i 15 μm u uzorku ulja zapremine 100 mL. Stvaranjem tehničkih uslova za merenje manjih čestica uvedeno je prikazivanje čestica i od 2 μm .

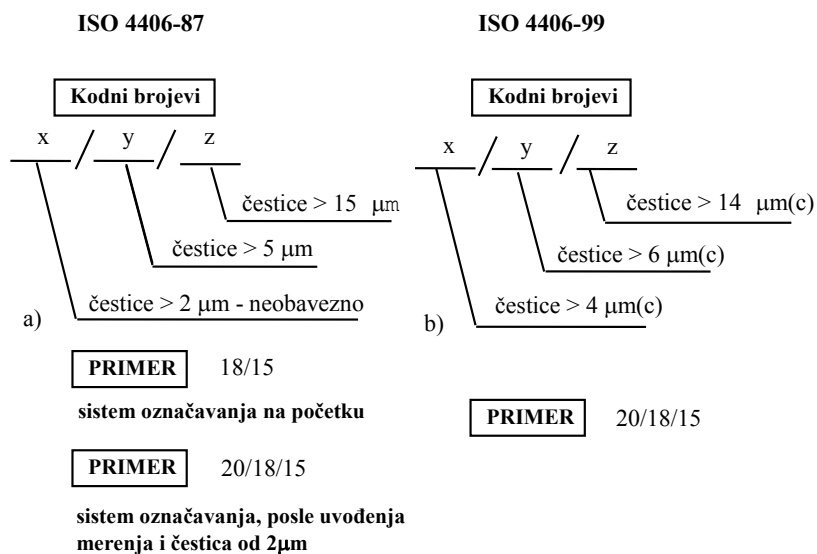
Standardom ISO 4406-99 (tabela 3.6 – desni deo tabele) su određene klase čistoće ulja za 29 kodnih grupa, za čestice od 4, 6 i 14 $\mu\text{m}_{(c)}$ u uzorku ulja zapremine 1 mL.

Tabela 3.6 Broj čvrstih čestica u 100 ml uzorka po klasama definisanim prema ISO 4406-87 i u 1 ml uzorka po klasama definisanim prema ISO 4406-99.

ISO 4406/1987 (stari standard)			ISO 4406/ 1999 (novi standard)		
Broj čestica u 100 ml		Kodni broj	Broj čestica u 1 ml		Kodni broj
najmanje	najviše		najmanje	najviše	
-	-	-	1.300.000	2.500.000	28
-	-	-	640.000	1.300.000	27
-	-	-	320.000	640.000	26
-	-	-	160.000	320.000	25
8.000.000	16.000.000	24	80.000	160.000	24
4.000.000	8.000.000	23	40.000	80.000	23
2.000.000	4.000.000	22	20.000	40.000	22
1.000.000	2.000.000	21	10.000	20.000	21
500.000	1.000.000	20	5.000	10.000	20
250.000	500.000	19	2.500	5.000	19
130.000	250.000	18	1.300	2.500	18
64.000	130.000	17	640	1.300	17
32.000	64.000	16	320	640	16
16.000	32.000	15	160	320	15
8.000	16.000	14	80	160	14
4.000	8.000	13	40	80	13
2.000	4.000	12	20	40	12

ISO 4406/1987 (stari standard)			ISO 4406/1999 (novi standard)		
Broj čestica u 100 ml		Kodni broj	Broj čestica u 1 ml		Kodni broj
najmanje	najviše		najmanje	najviše	
1.000	2.000	11	10	20	11
500	1.000	10	5	10	10
250	500	9	2,5	5	9
130	250	8	1,3	2,5	8
64	130	7	0,64	1,3	7
32	64	6	0,32	0,64	6
16	32	5	0,16	0,32	5
8	16	4	0,08	0,16	4
4	8	3	0,04	0,08	3
2	4	2	0,02	0,04	2
1	2	1	0,01	0,02	1
-	-	-	0,00	0,01	0

Na slici 3.9 je dat primer označavanja prema standardima familije ISO 4406.



Slika 3.9 Označavanje klase čistoće prema: a) starom i b) novom ISO 4406 standardu.

Neke od preporuka za klase čistoće hidrauličkih sistema su date u tabeli 3.7. U poslednjoj koloni iste tabele su date grube vrednosti proračunatih masenih količina čvrstih čestica koje prođu kroz sistem tokom njegovog rada, na godišnjem nivou.

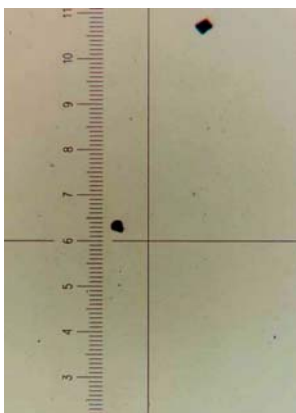
Tabela 3.7 Prikaz količine čvrstih čestica koje za određenu klasu čistoće ulja prođe kroz sistem na godišnjem nivou.

Tip hidrauličkog sistema	Zahtevana klasa čistoće prema ISO 4406-99	Opis	Cirkulacija količine čvrstih čestica kroz sistem na godišnjem nivou (kg/god)
Servo sistem	16/14/11	veoma čisto ulje	5,2*
Proporcionalni sistem	17/15/12	nisko kontaminirano ulje	10,4*
Klasični sistem	19/17/14	ново ulje (ulje pre sipanja u sistem)	41,1*
	22/20/17	veoma kontaminirano ulje	323,5*

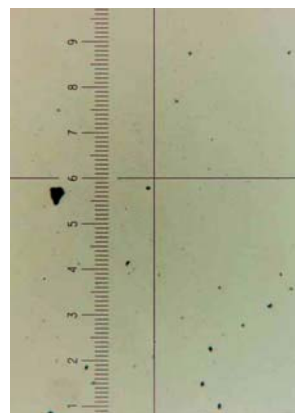
*Podaci su dati za hidraulički sistem protoka $Q = 200$ L/min koji radi jednu smenu dnevno u trajanju od $t = 8$ časova, odnosno 230 radnih dana u godini.

Naravno, ovde treba napomenuti da okruženje u kojem radi hidraulički sistem je veoma raznoliko (industrija cementa, valjaonice bakra i aluminijuma, čeličane, građevinarska industrija, itd.), i u tom smislu osim metalnih čestica u sistemu mogu da se nađu i nemetalne čestice, što naravno utiče na krajnji iznos količine otpadnog materijala koji u toku radne godine procirkuliše kroz sistem. Svejedno, radi se o pojavi velikih količina nečistoća koje, ukoliko se ne kontrolišu, mogu prouzrokovati prevremene otkaze sa veoma velikim stepenom oštećenja radnih elemenata hidrauličkih komponenti.

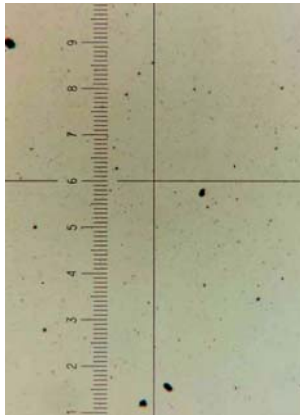
Da bi razlika između pomenutih klasa čistoće u tabeli 3.7, bila jasnija, na slikama 3.10 a, b, c i d su dati prikazi čestica sadržanih u hidrauličkom ulju, snimljenih pod uvećanjem gde jedan podeok iznosi $10 \mu\text{m}$.



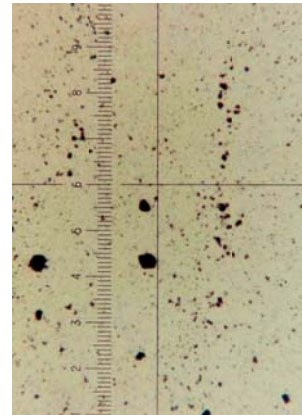
a)



b)



c)



d)

Slika 3.10 Snimci uzoraka različitih klasa čistoće: a) ISO 16/14/11, b) ISO 17/15/12, c) ISO 19/17/14, d) ISO 22/20/17 [47].

U kontekstu primene, svaki od prikazanih standarda za definisanje klase čistoće je podoban, međutim, zbog većeg opsega veličina čestica koje uzima u razmatranje, najkompletniju informaciju, o sadržaju čvrstih čestica u radnom fluidu, daje standard SAE AS 4059.

4 Prikaz mehanizama habanja i drugih poremećaja izazvanih delovanjem čvrstih čestica

Od kada postoje sredstva (alati, sklopovi, mašine, itd.), koja su služila za obavljanje određenih aktivnosti umesto čoveka u cilju vršenja korisnog rada, postoji i pojava trenja (razlog zašto dolazi do gubitka korisne mehaničke energije), a samim tim i **habanja** – trošenja (razlog zbog kojeg je potrebna zamena pohabanih elemenata sklopa) radnih elemenata, koji su se stoga morali povremeno menjati.

Tribologija kao jedna od mlađih naučnih disciplina, interdisciplinarnog karaktera, ima za cilj izučavanje fundamentalnih uzroka pojave trenja i habanja, podmazivanje, i njihovo udruženo dejstvo na strukturu i funkcionisanje dinamičkih mehaničkih sistema. S obzirom na to da, kao što je prethodno rečeno, trenje predstavlja razlog gubitka energije predate sistemu, a habanje razlog zamene radnih elemenata, veoma je bitno razumeti, a zatim i primeniti principe tribologije, kako bi se omogućila veća energetska efikasnost i dug radni vek tehničkog sistema.

Fenomen habanja (trošenja) dobija formalnu definiciju 1968. godine, odlukom OECD-a (Organisation for Economic Co-operation and Development – Organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj) koja glasi: “Habanje je progresivan gubitak materijala sa radne površine tela, javlja se kao rezultat relativnog kretanja po toj površini” [65]. Habanje, dakle, predstavlja normalnu pojavu kod svih površina ili elemenata u kontaktu i međusobnom relativnom kretanju koja se ne može eliminisati, ali se može smanjiti intenzitet i time težiti da se uticaj habanja na stanje površina smanji na minimum. Treba naglasiti da habanje nije karakteristika materijala, već tribosistema [61], pa se zato ne može generalizovati do detalja za svaki sistem. Dosadašnja tribološka istraživanja su pokazala izuzetnu kompleksnost ove problematike ukazivajući na to da su uzroci habanja površina mnogobrojni, pa se teško mogu pojedinačno posmatrati, jer se međusobno superponiraju. Pojedini mehanizmi habanja još uvek nisu dovoljno jasno objašnjeni i razumljivi, s obzirom na to da se u eksploataciji javlja puno uticajnih faktora. Iz tih razloga, konstantno se čine naponi da se mehanizmi habanja razjasne, ali i unaprede tehnička rešenja kojima bi se isti eliminisali ili umanjili što je više moguće. U zadnje vreme, zbog nemogućnosti da se uspostavi tačan i univerzalan model za predviđanje progresije habanja, potencira se uvođenje sistema za monitoring [59], [77], [102]. Monitoring omogućava praćenje stanja sistema i time pravovremenu reakciju, kako bi se predupredila pojava otkaza sistema ili zastoj zbog opravki i remonta što značajno povećava ukupne troškove proizvodnje. Međutim, nedostatak ovog pristupa kao što je ranije rečeno, jeste to što je investicija u opremu i obuku za monitoring veoma visoka.

Habanje hidrauličkih površina komponenata zavisi od nekoliko faktora koji se mogu podeliti u grupe (tabela 4.1).

Tabela 4.1 Grupe faktora koji utiču na intenzitet habanja radnih elemenata u toku eksploatacije tehničkog sistema.

Grupa I	Grupa II	Grupa III
Karakteristike materijala u kontaktu	Karakteristike okoline	Uslovi rada
Struktura materijala	Karakteristike maziva	Vrsta kretanja i sila trenja
Topografija kontaktnih površina	Karakteristike radne okoline (sadržaj vlage, kiseonika, čvrstih čestica, agresivnih fluida)	Vreme trajanja radnih operacija
Fizičko-hemijske karakteristike materijala u kontaktu		Brzina kretanja
		Vrednost radne sile
		Vrednost temperature

Svi navedeni faktori, u toku eksploatacije tehničkog sistema, imaju udruženo dejstvo i doprinose povećanju, odnosno smanjenju intenziteta habanja.

Zavisno od osnovne grupe uzročnika razlikuju se mehaničko, hemijsko i termičko habanje – trošenje (tabela 4.2).

Tabela 4.2 Vrste habanja.

Mehaničko habanje	Hemijsko habanje	Termičko habanje
Abrazivno	Oksidaciona korozija	Visokotemperaturna erozija
Adhezivno	Elektrolitska korozija	Plastično strujanje materijala
Eroziono	Redukciona korozija	
Kavitaciono		
Zamor materijala		
Aeraciono		
Vibraciono		

Sa stanovišta delovanja čvrstih čestica koje se nalaze u hidrauličkom fluidu, dva najinteresantnija vida habanja su: **abrazivno** i **eroziono** habanje.

4.1 Abrazivno habanje

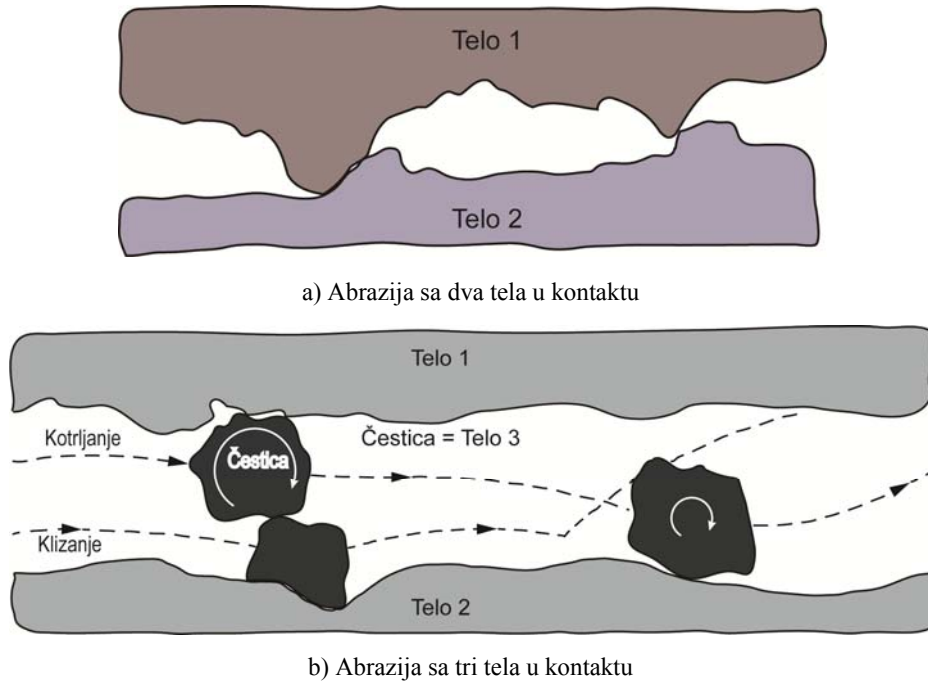
Abrazivno habanje je, generalno gledano, najčešći vid habanja u hidrauličkim sistemima i predstavlja proces, pri kome se materijal troši zahvaljujući delovanju nekoliko mikro-mehanizama habanja. Postojanje abrazivnog procesa se prepoznaje prema jasno vidljivim brazdama koje se rasprostiru u pravcu klizanja ili fino ispoliranim površinama, kao posledica ravnomernog trošenja usled prisustva čvrstih čestica u zazoru (koje mogu da budu slobodne, ili vezane sa jednom, ili obe površine) između kontaktnih površina, ili neadekvatne tvrdoće materijala površina u kontaktu. Prema tome, pod abrazivnim habanjem podrazumevamo različite i mnogobrojne procese zadiranja, rezanja i brazdanja, tj. pretežno trajnih plastičnih deformacija materijala na površini i neposredno ispod nje.

Veliki broj elemenata u hidrauličkim sistemima i sistemima za podmazivanje je pogodan za pojavu mehanizma abrazivnog habanja. Svi elementi sa kontaktnim površinama koje se relativno kreću jedna, u odnosu na drugu i kod kojih se javlja dinamičko proticanje

(isticanje) radnog fluida (maziva, vazduha, vode – koji u sebi sadrže čvrste čestice) kroz zazor, predstavljaju potencijalno mesto abrazivnog habanja, npr. kretanje klipa u cilindru (klipno-aksijalne i klipno-radijalne pumpe i motori, razvodni ventili), klizanje potpornih elemenata po zakretnoj ploči (klipno-aksijalna pumpa/motor sa nagibnom pločom), klizanje krilaca ili zubaca kod krilnih/zupčastih pumpi i motora, itd.).

Kod abrazivnog habanja treba razlikovati dva slučaja (slika 4.1):

- abrazivno habanje dva tela u kontaktu i
- abrazivno habanje tri tela u kontaktu.

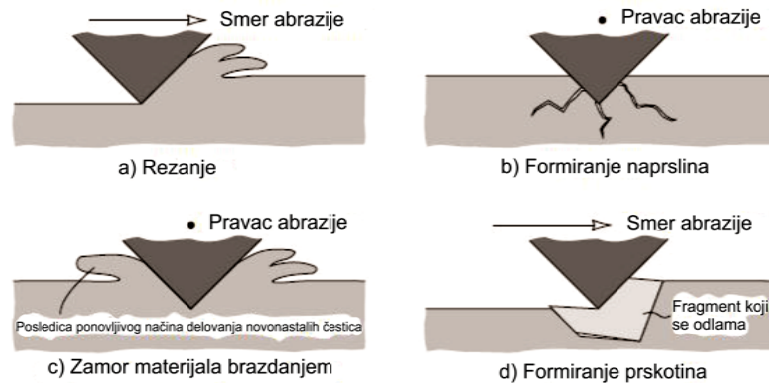


Slika 4.1 Prikaz abrazivnog mehanizma habanja sa dva tela u kontaktu (a) i tri tela u kontaktu (b).

Prvi slučaj abrazivnog habanja nastaje delovanjem tvrdih vrhova neravnina jedne površine po drugoj površini manje tvrdoće (primer delovanja papira za šmirglanje po površini mekšeg materijala). Drugi slučaj koji je mnogo češće prisutan, nastaje mehaničkim delovanjem stranih materijala u obliku sitnih čestica, koje se slobodno kreću u masi radnog fluida i koje kao treće telo deluju na jednu ili obe površine u kontaktu tokom procesa kretanja. Pomenute čestice mogu da budu poreklom iz okoline, a mogu i da nastanu unutar samog tribomehaničkog sistema kao rezultat procesa habanja. U slučaju ako se čestice uklone u jedno od dva osnovna tela, opet se javlja abrazivno habanje sa dva tela u kontaktu.

Pored čestica, za slučaj abrazivnog habanja sa tri tela, mora postojati i određena sila (pritisak, strujanje fluida) koja će primorati čestice da se kreću ka kritičnom mestu (zazoru između dva elementa) što nije slučaj kod abrazivnog habanja sa dva tela u kontaktu. Stoga se abrazivni proces sa tri tela u kontaktu vrši postepeno. Utvrđeno je da je habanje u slučaju tri prisutna tela, deset puta sporije nego habanje u slučaju dva prisutna tela koje se odvija kombinovano sa adhezivnim mehanizmom habanja [87].

Oba pomenuta slučaja abrazivnog habanja se odigravaju zahvaljujući delovanju mikro-mehanizama habanja, a to su [94]: mikro-rezanje, mikro-pucanje, mikro-utiskivanje (rezanje) koje izaziva zamor materijala i mikro-kidanje kristalnih zrna iz strukture materijala (slika 4.2), pri kojima nastaju dve vrste oštećenja u vidu deformacije materijala ili skidanja materijala sa osnovnih površina (stvaranje novih čestica).



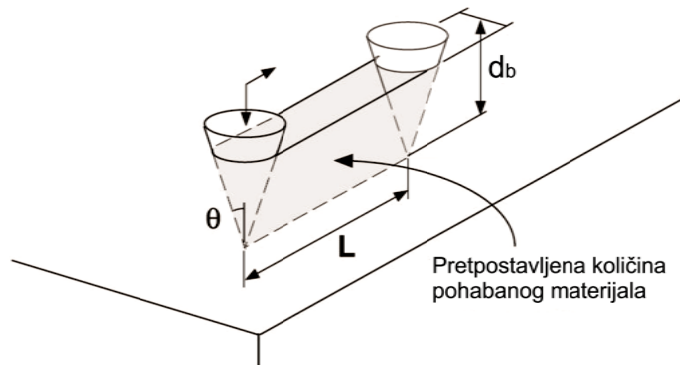
Slika 4.2 Prikaz mikro-mehanizama abrazivnog habanja [94].

Prvi prikaz (slika 4.2 a) predstavlja mehanizam pri kojem dolazi do rezanja (*cutting*) materijala, tako što oštar vrh neravnine druge kontaktne površine ili čestice zadire i skida određeni sloj sa površine mekšeg materijala, u pravcu kretanja. Kada je materijal krh, zadiranjem vrhova neravnina kontaktne površine ili čestice, dolazi do nastanka naprslina (*cracking*) u materijalu (slika 4.2 b). Veličina i dubina naprslina zavise od uslova – opterećenja (pritiska), kontura ivica čestice ili vrha neravnine druge kontaktne površine, brzine kretanja, tvrdoće čestice, krtosti (odnosno žilavosti materijala koji puca). U ekstremnim uslovima dolazi do odlamanja fragmenata, karakteristična pojava kod veoma krhkih materijala kao npr. keramika (slika 4.2 d), koji suštinski postaju nova abrazivna čestica. Frekventno naprezanje u vidu brazdanja (*ploughing*), izazvano čvrstim česticama koje deformišu kontaktnu površinu, mogu da uzrokuju zamor materijala (*fatigue*) – slika 4.2 c, nakon čega dolazi do odlamanja fragmenata sa te površine.

Opšta jednačina, za određivanje količine odstranjenog materijala abrazivnim mehanizmom habanja kod materijala koji mogu da se plastično deformišu (duktilni materijali), iako netačna i dan danas se koristi zbog pogodnosti za analizu. Zasnovana je na modelu kod kojeg se pretpostavlja da abraziv koničnog oblika, zadire u mekši materijal do određene dubine i tako kretanjem u jednom pravcu, uklanja materijal sa kontaktne površine (slika 4. 3).

Bazirano na ovom pretpostavljenom modelu, količinu odstranjenog materijala abrazivnim mehanizmom habanja se može odrediti sledećim izrazom [61]:

$$V_h = d_b^2 \cdot tg\Theta \cdot L \quad (4.1)$$



Slika 4.3 Tipičan model abrazivnog habanja sa penetrantom koničnog oblika [61].

S obzirom na to da se za kontakte sa pojavom plastične deformacije može pretpostaviti da je normalna sila (F_n) u kontaktu jednaka tvrdoći (H_v) materijala koji se haba, realna površina kontakta ($\pi \cdot (d_b \cdot \text{tg}\Theta)^2$) / 2 se može izraziti na sledeći način:

$$\frac{\pi \cdot (d_b \cdot \text{tg}\Theta)^2}{2} = \frac{F_n}{H_v} \quad (4.2)$$

Zamenom jednačine (4.2) u jednačinu (4.1), za količinu odstranjenog materijala habanjem se dobija sledeći izraz:

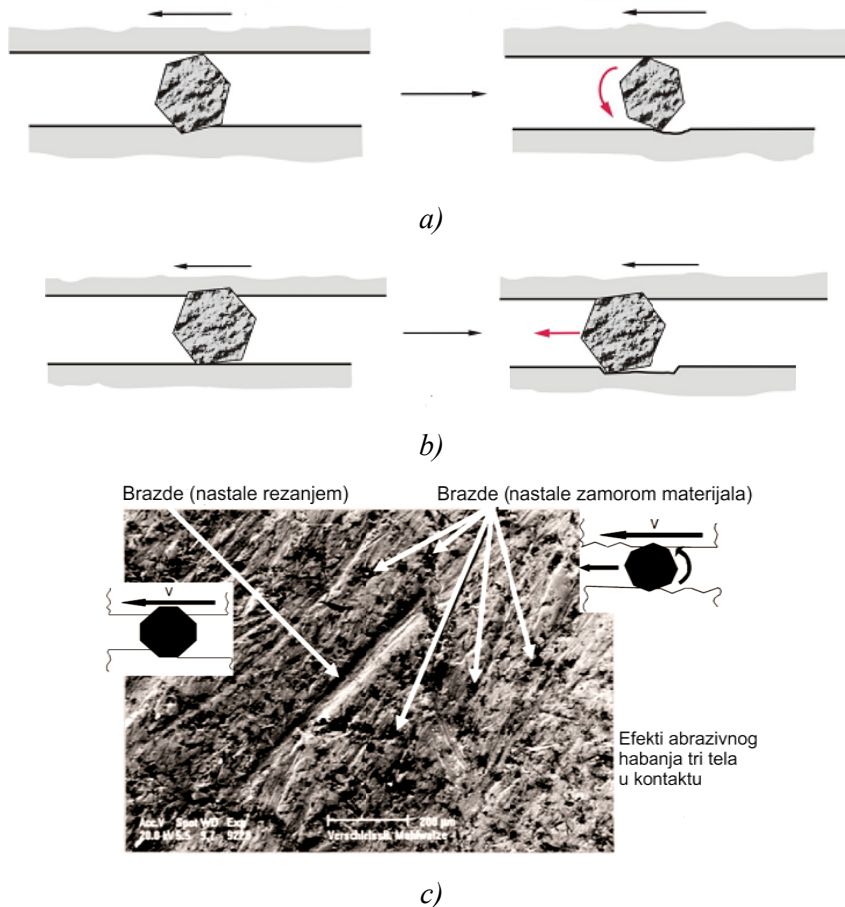
$$V_h = \frac{2 \cdot F_n \cdot L}{\pi \cdot \text{tg}\Theta \cdot H_v} \quad (4.3)$$

Obično se formula (4.3), za habajuće procese sa dva i tri tela u kontaktu daje u opštijem obliku:

$$V_h = K_{ab} \frac{F_n \cdot L}{H_v} \quad (4.4)$$

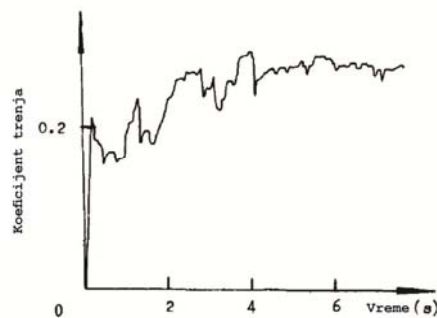
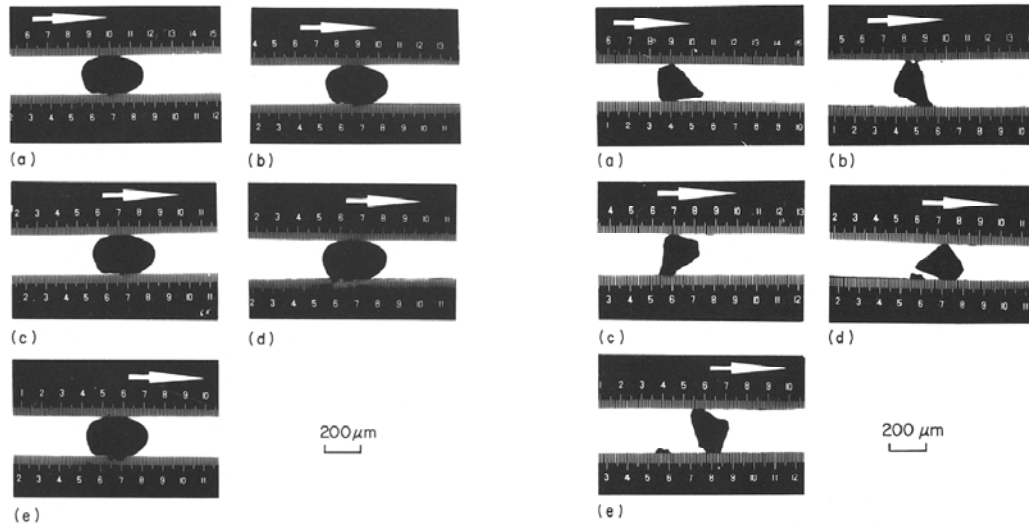
gde je K_{ab} koeficijent abrazivnog habanja koji predstavlja odnos zapremine materijala koji je odstranjen sa površine abrazivnim habanjem i nominalne zapremine nastalog žleba na pohabanoj površini, a zavisi od plastičnosti materijala koji se haba, čvrstoće smicanja u kontaktu i oblika abrazivne čestice (vrha neravnine).

Kod abrazivnog habanja metala [84], koeficijent K_{ab} se kreće između 10^{-4} i 10^{-1} , zavisno od kontaktnih uslova i karakteristika materijala što znači da nije konstantna vrednost. Treba imati na umu da su vrednosti K_{ab} faktora veće za slučaj abrazivnog habanja sa dva tela u kontaktu što se objašnjava time da kada postoji habanje sa tri tela u kontaktu, abrazivne čestice se slobodno kreću i zbog toga ne moraju uvek izazvati značajna oštećenja. Na primer, čestice se mogu kotrljati po površini (slika 4.4 a), umesto da se kližu i zadiru u površinu, praveći brazde (slika 4.4 b). Takođe, promena vrednosti faktora K_{ab} zavisi od veličine čestice, pa je za veće čestice veća i vrednost ovog faktora.

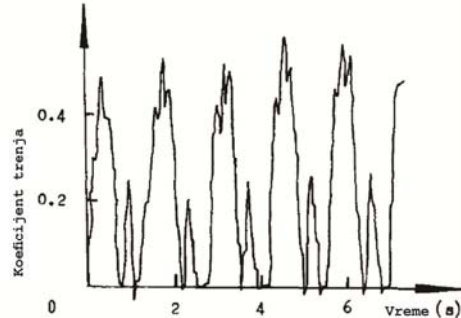


Slika 4.4 Efekti kotrljanja (a) i klizanja (b) abrazivne čestice kod kontakta tri tela [55], c) posledice delovanja abrazivnih čestica.

U prilog prethodno spomenutom, Fang [19] pokazuje da pored tvrdoće materijala, morfologije čestice, hrapavosti površine, opterećenja itd., modeli kretanja čvrstih čestica, takođe igraju veoma bitnu ulogu kod abrazije sa tri tela u kontaktu. Kod čestica koje klizu po kontaktnoj površini mnogo više učešća ima proces mikro-rezanja usled kojeg nastaje najveća količina habajućeg materijala, dok kod čestica koje se kotrljaju dolazi do plastične deformacije površine bez većeg odstranjivanja materijala sa kontaktne površine [18] (slika 4.4 c). Modeli kretanja čvrstih čestica su određeni vrednošću opterećenja i sile trenja, vrstom materijala abrazivne čestice i tvrdoćom materijala tela u kontaktu. U istom radu, autori su sprovedli eksperiment kako bi ustanovili koliki koeficijent trenja se javlja u slučajevima klizanja i kotrljanja čvrste čestice, i za određene uslove (brzina kretanja jednog tela iznosi 0.6 mm/s; normalna sila 5.74 N; dužina kretanja 12 mm), testiranja su odredili da se koeficijent trenja kod kotrljajućih čestica menja sa promenom kontura čestica i dostiže vrednosti u opsegu od 0.035 do 0.165, a kod kliznih čestica od 0.106 do 0.313 (slika 4.5).



a)



b)

Slika 4.5 Čestica koja kliže (a) i čestica koja se kotrlja (b) i njihovi odgovarajući dijagrami koeficijenta trenja [18].

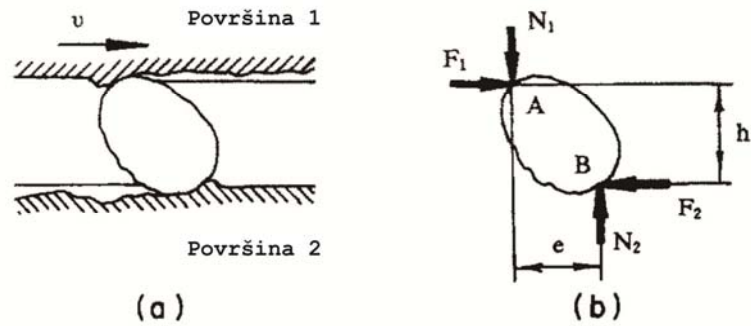
Osim pomenutog Fang i ostali, pretpostavljaju da moment za posmatranu tačku A ili B (slika 4.6) koji se dobija kao proizvod sile F_l i odstojanja h (gde je h – veličina zazora), teži da česticu prevede u stanje rotacije, dok moment uzrokovan normalnom silom N i odstojanjem e se odupire uspostavljanju rotacionog kretanja. Uslovno kada je:

$$F \cdot h > N \cdot e, \quad (4.5)$$

čestica se kotrlja, a kada je:

$$F \cdot h \leq N \cdot e, \quad (4.6)$$

čestica se kliže.



Slika 4.6 Šematski prikaz sila koje deluju na abrazivnu česticu [18].

Pošto je prema definiciji, koeficijent trenja $\mu = F / N$, kada se izraz ubaci u prethodne dve jednačine dobija se da je:

- $\mu_s \leq e / h$ – za klizanje čestice i
- $\mu_r > e / h$ – za kotrljanje čestice.

U slučaju habanja krtoq materijala nastaju čestice, uglavnom kao posledica lomova površinskih struktura uzrokovanih inicijalnim i progresivnim pukotinama u materijalu. Stoga je habanje krtoq materijala zavisno od njihove otpornosti na pucanje. Model habanja krtoq materijala je prikazan na slici 4.7, u kojem se pretpostavlja, da se čestice generišu progresijom bočnih pukotina koje sežu ka kontaktnoj površini.

Ako je progresija pukotine izazvana rezidualnim naprezanjem, dužina pukotine c je definisana silom koja normalno deluje na površinu F_n , koeficijentom otpornosti na pucanje materijala K_c , tvrdoćom materijala H_v i Jangovim modulom E u sledećem izrazu [61]:

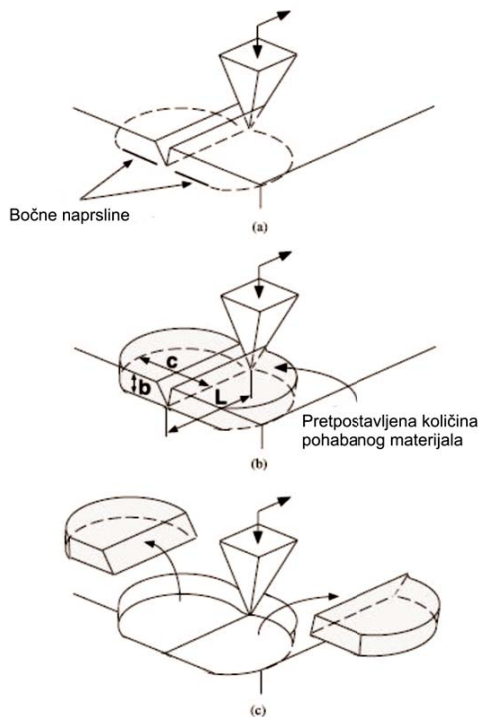
$$c = \alpha_1 \cdot \left(\frac{F_n^{5/8}}{K_c^2 \cdot H_v^{1/8}} \right) \cdot \left(\frac{E}{H_v} \right)^{3/5} \quad (4.7)$$

gde parametar α_1 zavisi od oblika abraziva i određuje se kalibracijom na materijalu čije su karakteristike pucanja poznate.

Dubina bočne pukotine b se određuje pomoću sledećeg izraza:

$$b = \alpha_2 \cdot \left(\frac{F_n}{H_v} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{E}{H_v} \right)^{2/5} \quad (4.8)$$

gde je α_2 konstanta koja ne zavisi od materijala.



Slika 4.7 Abrazivni model habanja krtih materijala [61].

Bazirano na ovim pretpostavkama, količina odstranjenog materijala sa kontaktne površine, abrazivnim habanjem se može odrediti sledećim izrazom:

$$V_h = \alpha_3 \cdot \left(\frac{F_n^{\frac{9}{8}}}{K_c^2 \cdot H_v^{\frac{5}{8}}} \right) \cdot \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{4}{5}} \cdot L \quad (4.9)$$

gde je L dužina klizanja i α_3 konstanta koja zavisi od materijala, a koja je određena kalibracijom na materijalu sa poznatim karakteristikama pucanja.

4.1.1 Abrazivnost čvrstih čestica

Gubitak materijala ne zavisi samo od tvrdoće mekše, habajuće površine, već i od tvrdoće drugog kontaktnog tela kao i od tvrdoće čestice. U velikom broju slučajeva tvrdoća habajućeg materijala je najmanje 20% niža od tvrdoće čvrste čestice koja u tom slučaju, izaziva intenzivno habanje površinskog sloja [85]. Veoma sporo abrazivno habanje se javlja kada su tvrdoća čestica i habajućeg materijala jednake.

Metalne čestice nastale habanjem komponentata tokom eksploatacije, po pravilu, znatno su tvrđe od materijala površine sa koje su izdvojene. Delići izdvojeni adhezivnim, ali i abrazivnim habanjem metalnih površina, usled plastičnih deformacija i termičkog efekta pretrpe znatne izmene u svojoj metalurškoj strukturi, u procesu sličnom kaljenju i mogu značajno da povećaju tvrdoću. Znatno veću tvrdoću od metala od kojeg potiče imaju i njegovi oksidi, sulfidi i drugi produkti različitih hemijskih reakcija.

U situacijama kada su podmazujući kontakti podložni kontaminaciji čvrstim česticama je uobičajena praksa da se zaštiti element koji je skuplji, tako što se na njega nanosi tvrda prevlaka ili koristi termička obrada (tipično osovina se radi tako da bude najmanje 3 puta tvrđa od ležaja). Međutim, ovo povećanje razlike u tvrdoći ne rezultira uvek smanjenjem habanja dela koji ima veću tvrdoću [12], [86]. Ako se abrazivne čestice delimično utisnu u mekšu površinu, mogu se ponašati kao oštri vrhovi koji zadiru u drugu (tvrđu) površinu i koji prave ozbiljna oštećenja u vidu brazdi.

Mnoge industrijske kompanije su razvile komparativne testove kako bi odredile otpornost na habanje ili dejstvo abrazivnih čestica. Takođe, mnoge su laboratorije vršile istraživanja u ovoj oblasti, ali još uvek ne postoji standardizovan test za ispitivanje abrazivnog mehanizma habanja kod tri tela u kontaktu koji se podmazuje. Naravno, zbog ekonomskih razloga (visoke cene koštanja) i dugog vremena trajanja testa, ovakva vrsta ispitivanja se ne sprovodi na mašinama koje koriste maziva sredstva za podmazivanje svojih podsklopova.

Da bi slika o tvrdoći materijala koji mogu da se nađu u vidu čestica u hidrauličkom sistemu bila jasnija, u tabeli 4.3 su prikazane vrednosti tvrdoće po Moh-ovoj i Vickers-ovoj skali. Kvarc (SiO_2 – prisutan u pesku) kao najčešći oblik prirodnog minerala koji se može naći u hidrauličkom radnom fluidu sa prosečnom tvrdoćom oko 1180 VHN (Vickers Hardness Number), predstavlja glavni uzrok pojave abrazivnog habanja s obzirom na to da tvrdoća legura čelika, korišćenih za izradu osetljivih delova hidrauličkih komponenata, imaju tvrdoću oko 800 VHN.

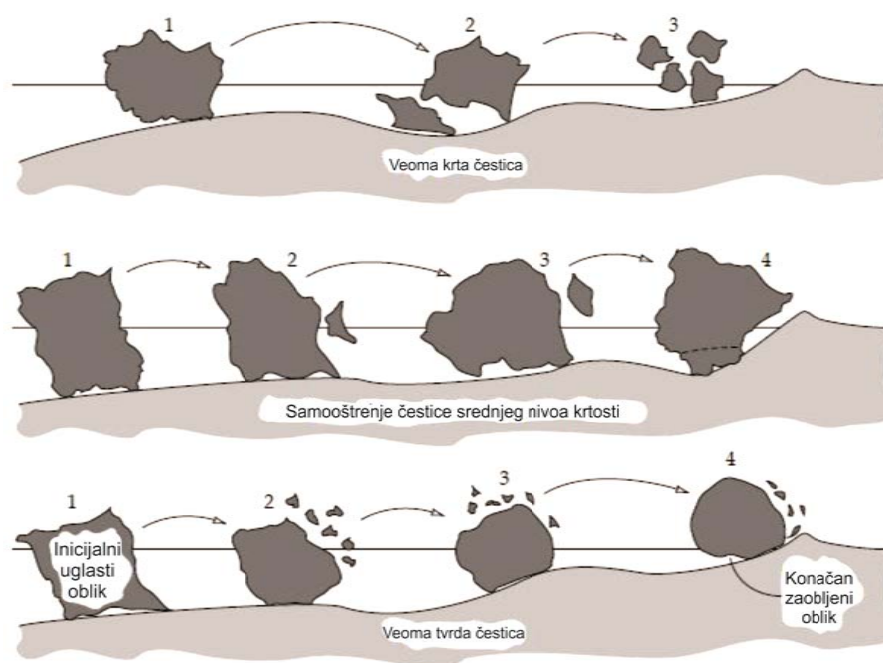
Tabela 4.3 Tvrdoća materijala po Moh-ovoj i Vickers-ovoj skali [94].

Mineral	Tvrdoća minerala	
	po Mohu	po Vickersu
Talk	1	23
Legure aluminijuma	1-3	23-157
Bronza	1-4	23-315
Gips	2	36-76
Kalcit	3	109-172
Oksid bakra	3,5-4	229-315
Fluorit	4	190-250
Vitrinit	4-5	294
Apatit	5	566-850
Čestice u kamenolomu	5-9	535-2035
Ortoklas (Feldspar)	6	714-795
Hematit	6-7	1038
Alatni čelik	6-7	817-1161
Kvarc	7	1103-1260
Pirit	7-8	1500
Markezit	7-8	1600
Topaz	8	1200-1648

Mineral	Tvrdoća minerala	
	po Mohu	po Vickersu
Korund	9	2060-2720
Dijamant	10	8000-10000

Osim kvarca, u radnom fluidu hidrauličkog sistema se mogu pronaći i čvrste čestice čije je poreklo od: sulfida gvožđa (pirit), korunda (Al_2O_3), gipsa, itd. što zavisi od sredine u kojoj se hidraulički sistem nalazi.

Abrazivnost čvrstih čestica, osim tvrdoće materijala, zavisi i od krtosti. Ako su čestice previše krte, one se mogu lomiti u sitnije komade što ima za posledicu smanjenje habanja [75]. Ako abrazivna čestica ima veoma veliku tvrdoću, mala je verovatnoća da će se ista lomiti na manje čestice i pri tome formirati oštre ivice, koje bi izazvale ubrzano habanje [15]. Oštre ivice ovakvih čestica se postepeno troše (slika 4.8), čime se abrazivna svojstva smanjuju za razliku od uglastih čestica koje imaju visok stepen abrazije [95].



Slika 4.8 Uticaj tvrdoće i krtosti čestice na njenu abrazivnost [94].

Još jedan faktor abrazivnosti čestice su veličina i geometrija zrna čestice. Čestice su trodimenzionalni objekti i ukoliko nisu savršene sfere (poput vazdušnog mehura), ne mogu da budu u potpunosti definisane samo jednom dimenzijom kao što je to radijus ili prečnik. Međutim, uobičajeno je da se veličina čestice uproščeno definiše kao minimalna veličina sfere koja može da obuhvati celu česticu. Zbog uproščavanja mernog postupka često se koristi koncept ekvivalentne sfere. U tom slučaju, čestica se definiše prečnikom ekvivalentne sfere preko svojstva npr. jednake površine, jednake zapremine, jednake mase itd., čime se omogućava automatizacija postupka merenja, a time se smanjuje i vreme merenja i cene koštanja. Naravno, i dalje tačnost merenja je najveća sprovođenjem optičkih mernih metoda, ali koje imaju višu cenu koštanja i zahtevaju mnogo više vremena za sprovođenje. Načini

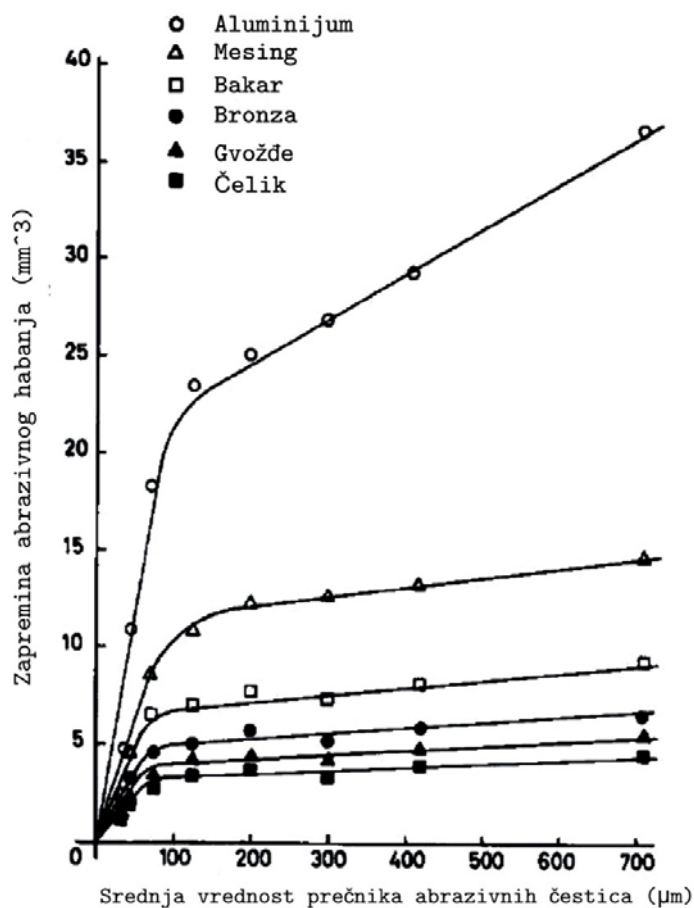
reprezentacije čestice pomoću koncepta ekvivalentne sfere su prikazani na slici 4.9. Način koji se primenjuje u hidraulici, prvobitno je bio preko sfere ekvivalentne najvećoj dimenziji čestice (po starom standardu ACFTD), a potom onaj koji je i danas u upotrebi, tj. preko sfere ekvivalentne površine čestice (novi MTD standard).

U nekim studijama se tvrdi [87], [66] da čestice prečnika $10\ \mu\text{m}$ su isuviše male da izazovu abraziju, međutim autori posmatraju delovanje čestica između dve ploče, a ne u radijalnom zazoru. Osim toga ponovo se skreće pažnja da se zazoru u hidrauličkim upravljačkim komponentama kreću u rangu od $1 - 10\ \mu\text{m}$ što implicira da su upravo čestice prečnika $\leq 10\ \mu\text{m}$ (tj. prečnika veličine zazora) najdestruktivnije ako uđu u zazor, jer mogu naneti najveću štetu abrazijom ili mehaničkom blokadom što je utvrđeno eksperimentalnim istraživanjem u okviru ove doktorske disertacije.



Slika 4.9 Ilustracija koncepta ekvivalentne sfere koji se primenjuju kod određivanja veličine čestice [70].

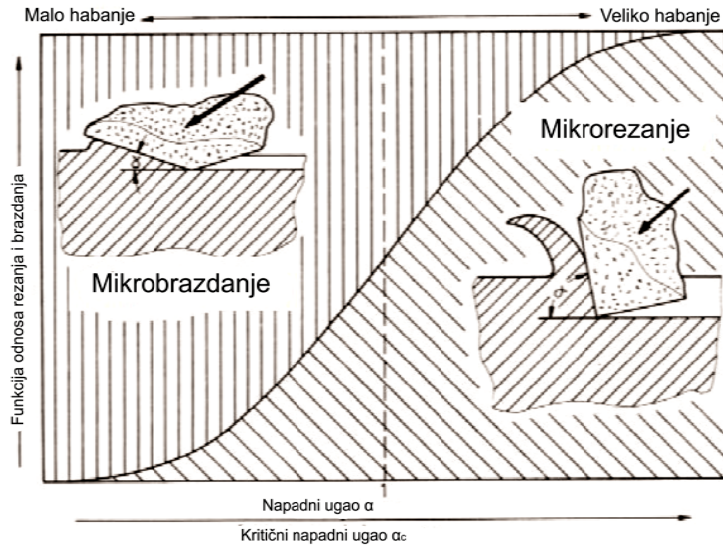
Veličina abrazivnog habanja pri konstantnom opterećenju ima izraženo nelinearan karakter sa česticama veličine do $50\ \mu\text{m}$, i dostiže graničnu vrednost sa česticama veličine do $100\ \mu\text{m}$. Ovo važi za većinu metalnih materijala [91]. Slični rezultati su dobijeni i u drugim eksperimentalnim istraživanjima [4], [79], [73], i važe za slučaj abrazije dva tela u kontaktu. Iako su data adekvatna i prihvatljiva objašnjenja, fenomena kritične veličine abraziva, nije sigurno da se ovi rezultati mogu generalizovati za sve slučajeve abrazivnog habanja [14]. Slika 4.10 prikazuje eksperimentalni nalaz prethodno pomenutih tvrdnji i daje se, u želji da se stekne jasnija slika o uticaju čestica koje su veće od $100\ \mu\text{m}$, pri čemu se opet ističe da je područje delovanja čestica do $50\ \mu\text{m}$ interesantno za komponente hidrauličkih sistema. Sa ove slike, može se primetiti da je proces habanja veoma intenzivan sa česticama veličine do $100\ \mu\text{m}$, a sa česticama preko ove dimenzije intenzitet značajno opada.



Slika 4.10 Odnos između zapremine abrazivnog habanja i srednje vrednosti prečnika abrazivnih čestica, pri opterećenju od 2 kg, dužini puta od 6 m i brzini kretanja 0.5 m/s [79].

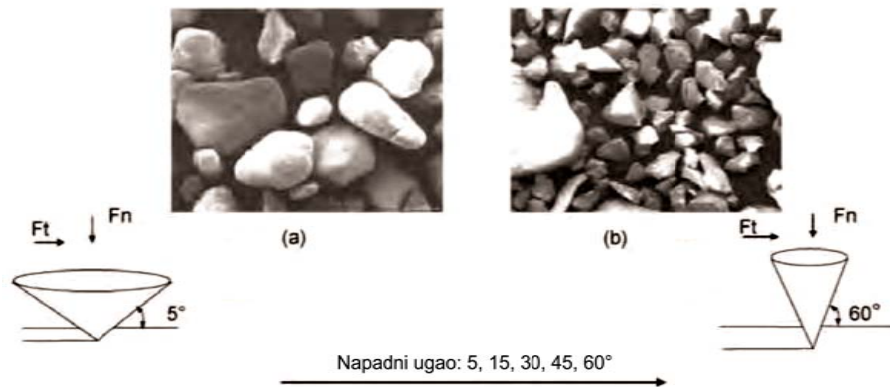
Osnovno ograničenje abrazivnog delovanja čestica sa ekstremno malim prečnicima zrna, jeste površinska energija materijala na koji čestice deluju. Kako se veličina zrna smanjuje, količina frikcione energije raste proporcionalno veličini kontaktne površine.

Što se tiče oblika čestica, veoma je bitno da li je čestica uglasta ili zaobljena i koji je njen napadni ugao. Naime čestice koje imaju uglaste ivice i veći napadni ugao, daleko više mogu da utiču na povećanje stepena abrazije (mehanizmom mikro-rezanja) za razliku od čestica koje imaju zaobljene ivice i manji napadni ugao (pretežno abrazija mehanizmom mikro-brazdanja), slika 4.11.



Slika 4.11 Prikaz funkcije zavisnosti veličine abrazivnog habanja od vrednosti napadnog ugla čestice [110].

U studiji Mezlinija [72] došlo se do zaključka da čestice većeg prečnika teže ka oblicima koji su zaobljeni bez oštih ivica (slika 4.12 a), dok čestice manjih prečnika imaju oštrije ivice (slika 4.12 b).



Slika 4.12 SEM snimak čestica nastalih abrazijom: a) krupne čestice oblih ivica, b) sitne čestice oštih ivica [72].

4.2 Erozivno habanje

Strujanje kontaminiranog radnog fluida velikom relativnom brzinom u odnosu na čvrstu površinu sa kojom je u kontaktu, može svojim kinetičkim dejstvom, izazvati odstranjivanje materijala sa površine. Skidanje materijala sa kontaktne površine, utoliko je veće ukoliko je veća brzina strujanja, odnosno stepen kontaminacije fluida sa čvrstim česticama. Takvo trošenje materijala smatra se erozivnim habanjem. Osim mehaničkog dejstva čestica, erozivno habanje uključuje i termičke efekte (pod određenim radnim uslovima), sa postizanjem lokalno visokih temperatura što utiče na promenu strukture

kontaktne površine. Površinu oštećenu erozivnim habanjem karakteriše sjajna površina sa prisutnim sitnim rupicama i kraterima, za razliku od površine oštećene korozionim habanjem koja je matirana.

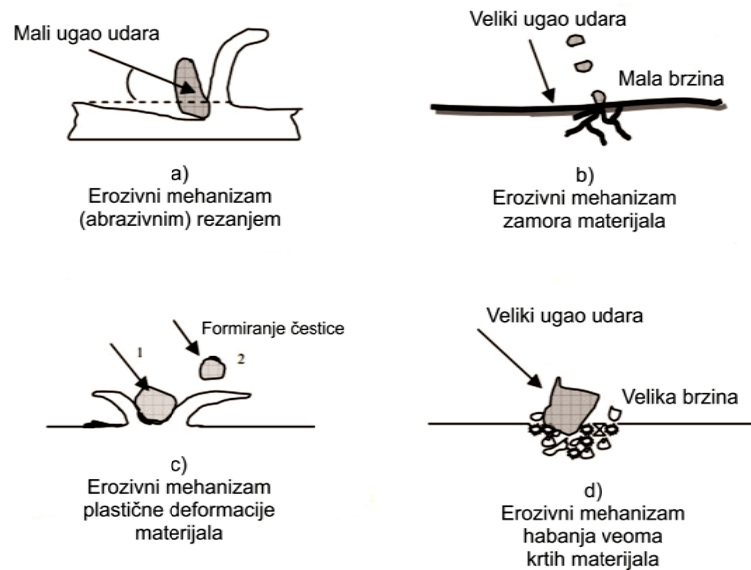
Na osnovu velikog broja istraživačkih radova u ovoj oblasti, utvrđeno je da se erozivno habanje može posmatrati najmanje na dva načina, i to kao:

- erozivno habanje plastičnog (duktilnog) materijala i
- erozivno habanje krto (lomljivog) materijala.

Erozivno habanje plastičnog materijala podrazumeva gubitak materijala koji je posledica neprestanog plastičnog deformisanja ili skidanja materijala kidanjem, sa kontaktne površine, dok sa druge strane, erozivno habanje krto (lomljivog) materijala podrazumeva gubitak materijala kao posledice ukrštanja (spajanja) površinskih naprslina koje se šire od mesta nastanka, tj. mesta udara erozivne čestice o kontaktnu površinu.

U komponentama u kojima dolazi do brze promene pravca strujanja kao što su lopatice turbina, razvodni ventili, mesta spojeva cevovoda pod uglom itd., erozija može izazvati značajna oštećenja, u odnosu na elemente u kojima promene pravca strujanja fluida nema ili je mala.

Poput abrazivnog, erozivno habanje se vrši na nekoliko načina (slika 4.13) što zavisi od karakteristika materijala čestice i habajućeg elementa, ugla udara čestice u površinu, brzine kretanja čestice pre udara i veličine erozivne čestice.



Slika 4.13 Mehhanizmi erozije: a) abrazija pri malom uglu udara, b) zamora materijala izazvan udarima čestica koje imaju malu brzinu kretanja, c) plastična deformacija materijala usled udara čestica koje se kreću srednjim brzinama i imaju veliki ugao udara u kontaktnu površinu, d) rasprskavanje usled pucanja naprsline [99].

Vrednost brzine kretanja erozivne čestice ima veoma veliki uticaj na proces habanja. Ako su brzine kretanja čestice male, vrednost kinetičke energije kojom čestica raspolaže pre momenta udara, je nedovoljna da izazove plastičnu deformaciju kontaktne površine, pa je ista

podložna habanju usled zamora materijala, pri kojem dolazi prvo do pojave naprslina površinske strukture (slika 4.13 b). Pri određenim brzinama, udar čestice o kontaktnu površinu izaziva plastične deformacije, koje u zavisnosti od intenziteta i frekventnosti imaju za posledicu trošenje kontaktne površine što je i najčešći slučaj u tehničkim sistemima (karakteristično za plastične materijale). Ako su čestice oble ili sferične često dolazi do pojave plastičnih deformacija (slika 4.13 c), dok u slučaju čestica sa oštrim i uglastim ivicama uglavnom se dešava skidanje materijala sa kontaktne površine rezanjem ili stvaranjem naprslina (slika 4.13 a). U slučaju kretanja erozivnih čestica veoma velikim brzinama, čestice imaju veliku kinetičku energiju koja, pri udaru čestice u površinu može izazvati pojavu prskotina (slika 4.13 d), na mestima gde su prvobitno bile ili nastale naprsline površinske strukture materijala, a u nekim ekstremnim slučajevima, može doći do topljenja materijala sa kontaktne površine što nije slučaj u hidrauličkim sistemima [107].

Brzina kretanja erozivne čestice pre udara o površinu ima veoma značajan uticaj na veličinu habanja. Praktično, za brzinu kretanja čestice postoji granica ispod koje je habanje zanemarljivo malo. Za opseg brzina koje se javljaju u većini slučajeva kada je erozivno habanje prisutno, odnos između veličine habanja i brzine kretanja čestice pre udara se može opisati empirijskom jednačinom [2]:

$$E_h = k \cdot v_{ep}^n \cdot f(\beta_{ep}), \quad (4.10)$$

gde je:

E_h – masa pohabanog elementa,

k – empirijska konstanta,

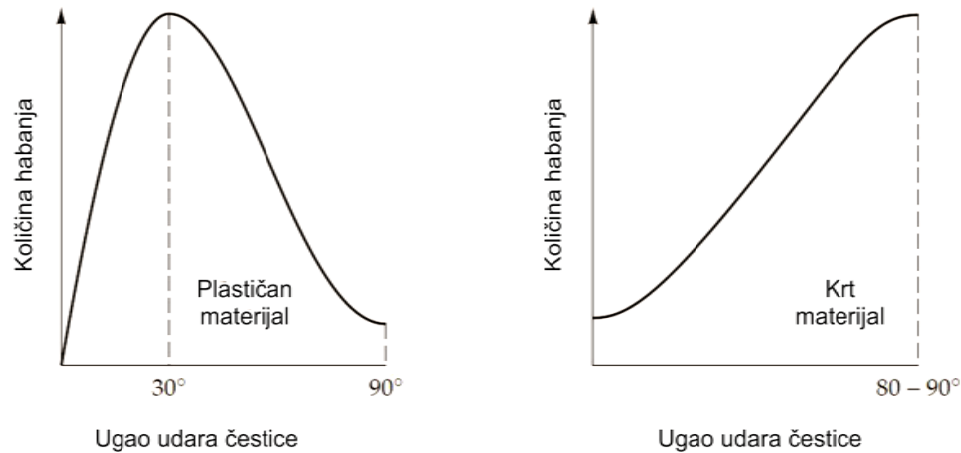
v_{ep} – brzina kretanja erozivne čestice pre udara,

n – eksponent brzine (u slučaju plastičnog materijala koeficijent ima vrednosti u opsegu od 2,3 do 2,7; dok u slučaju krtoog materijala vrednost koeficijenta se kreće od 2 do 4),

β_{ep} – ugao udara (ugao između ravni koja tangira na površinu na mestu udara erozivne čestice i pravca kretanja erozivne čestice).

Vrednost konstanti k i n zavisi od fizičkih karakteristika materijala površine i čestice, a vrednost $f(\beta_{ep})$ predstavlja zavisnost erozije od ugla udara čestice u habajuću površinu.

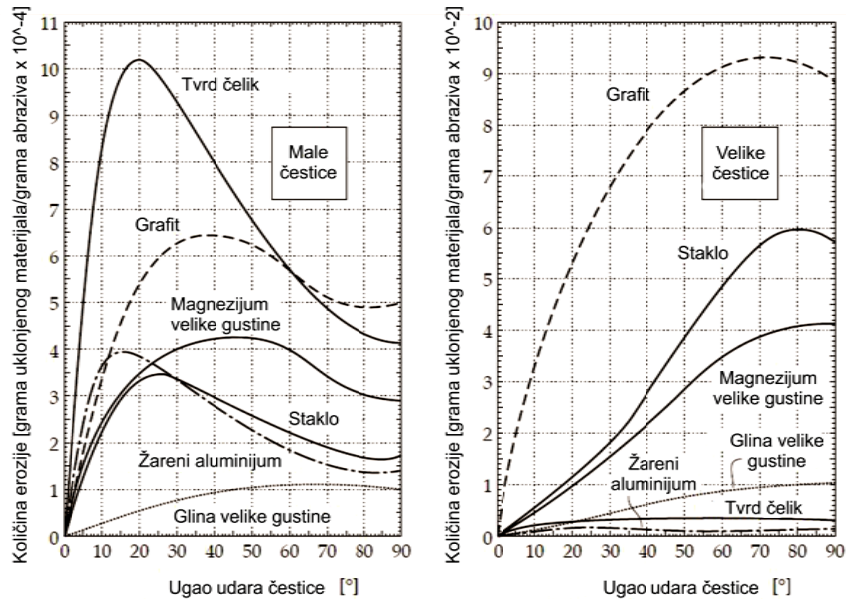
Ugao udara erozivne čestice u kontaktnu površinu, može imati vrednosti od 0 do 90° pri čemu u slučaju ugla od 0° habanje kontaktne površine, je zanemarljivo malo. Međutim, u slučaju kada je habajuća površina od mekanog materijala, a čestica ima veliku tvrdoću i ugao udara < 20°, može doći do veoma velikog trošenja kontaktne površine, pri čemu se praktično vrši abrazivan mehanizam habanja. U slučaju kada je kontaktna površina veoma krta, na površini habajućeg dela nastaju naprsline koje se šire sve do momenta odlamanja fragmenata sa površine i rasprskavanja istih kao i rasprskavanja samih erozivnih čestica. Ovo se najčešće dešava kada su vrednosti ugla udara blizu 90°. Odnos veličine habanja i ugla udara za plastične i krte materijale je prikazan na slici 4.14.



Slika 4.14 Uticaj ugla udara erozivnih čestica u kontaktnu površinu i veličine habanja za plastične i krte materijale [94].

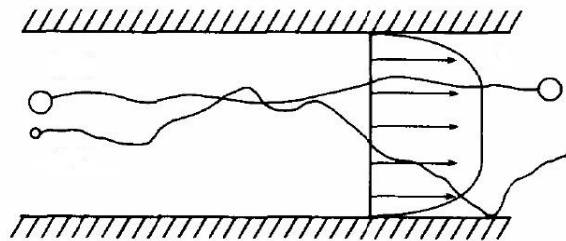
Pored brzine kretanja, karakteristike erozivne čestice poput oblika, tvrdoće, veličine, mase i količine, takođe veoma značajno utiču na veličinu habanja. Poznato je da tvrđe čestice izazivaju veće habanje u odnosu na čestice od mekšeg materijala [31] i da je odnos tvrdoće erozivne čestice i materijala koji se haba, takođe veoma bitan. Potvrđeno je i da čestice sa oštrim ivicama daleko više doprinose povećanju veličine erozivnog habanja [6], [93]. Varijacije u pogledu veličine erozivne čestice utiču na tip erozivnog mehanizma habanja koji će biti prisutan. Serija eksperimenata sprovedenih na materijalima kao što su staklo, čelik, grafit i keramika su pokazali da ako se menja veličina erozivne čestice u opsegu od 8,75 μm do 127 μm , menja se i tip erozivnog habanja od erozije plastičnog materijala ka eroziji krto materijala [94]. Uticaj veličine čestice na mehanizam erozivnog habanja je prikazan na slici 4.15, gde su veličine čestice pomenutog opsega prema [94] podeljene u dve grupe (male i velike).

Sa slike 4.15 takođe može da se uoči da veličina čestice pri različitim vrednostima ugla udara, osim intenziteta habanja, utiče i na poredak ispitivanih materijala u pogledu otpornosti na habanje, tako da u ovom smislu žilavost materijala predstavlja veoma bitan parametar. Materijal koji nije ni žilav ni tvrd, poput grafita, ima veoma nisku otpornost na erozivno habanje.



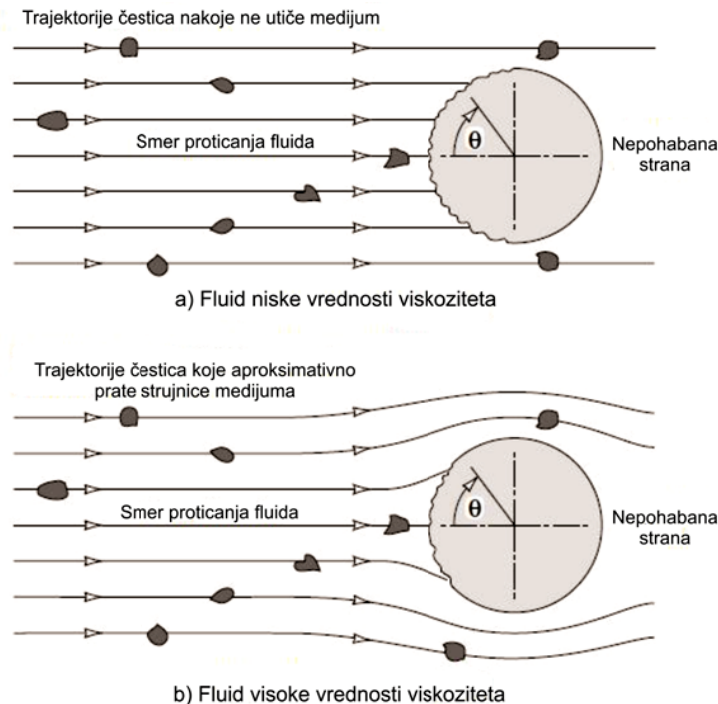
Slika 4.15 Uticaj veličine čestica na intenzitet erozivnog habanja, gde je kao eroziv korišćen karbid silicijuma koji ima brzinu pre udara 152 m/s [94].

Kada se već govori o uticaju veličine čestica ne treba izostaviti činjenicu da veće čestice imaju veću inerciju i sporo reaguju na promenu pravca ili brzine strujanja, dok manje čestice zbog manje inercije i veličine kontaktne površine sa fluidom, prate kretanje strujnica radnog fluida što je prikazano na slici 4.16.



Slika 4.16 Izgled trajektorije čestica različitih veličina pri strujanju fluida kroz cevovod [46].

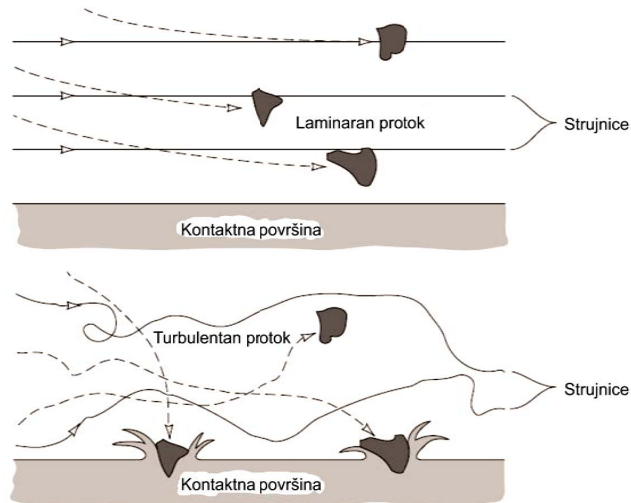
Uticaj medija koji nosi erozivne čestice poput vazduha ili tečnosti, ne treba zanemariti. Karakteristike medijuma, kao što su viskoznost, gustina, brzina proticanja, sposobnost podmazivanja i hlađenja, imaju veoma značajan uticaj na intenzitet habanja. Fluidi koji imaju visoku vrednost viskoziteta mogu uticati na promenu ugla udara pre samog kontakta erozivne čestice sa habajućom površinom (slika 4.17).



Slika 4.17 Uticaj viskoznosti fluida na promenu ugla udara erozivne čestice [32].

Turbulentno strujanje fluida, u odnosu na laminarno, pojačava erozivno habanje s obzirom na to da se strujnice fluida zajedno sa česticama kreću haotično i pri tome stvaraju mogućnost pojave vrednosti različitih uglova pod kojim čestice udaraju u kontaktne površine. Kod laminarnog strujanja strujnice i viskozne sile imaju tendenciju da prisile čestice da se kreću paralelno sa kontaktnom površinom [16]. Razlike kretanja čestica pri laminarnom i turbulentnom strujanju prikazane su na slici 4.18. Izuzetak ovom pravilu jeste laminarno strujanje fluida i čestica ka površini koja je normalna u odnosu na pravac kretanja fluida i čestica.

S obzirom da je veliki broj plastičnih deformacija površinskog sloja potrebno kako bi se uklonio deo materijala sa habajuće površine, ovaj vid erozivnog habanja je veoma spor. Nasuprot njemu, formiranje naprslina i pucanje površinskog sloja (struktura), predstavlja mnogo destruktivniji i intenzivniji proces. Takođe treba spomenuti da tokom perioda inkubacije (period od momenta izlaganja površine eroziji, do momenta pojave pozitivnih merljivih rezultata habanja, odnosno period akumulacije oštećenja u površini kontaktnog materijala), habanje je zanemarljivo ili se može desiti da ima negativan efekat. Negativan efekat se ostvaruje u slučajevima kada erozivna čestica ostaje zaglavljena u materijalu koji se haba. Nakon perioda inkubacije, habanje se nastavlja konstantnim intenzitetom.

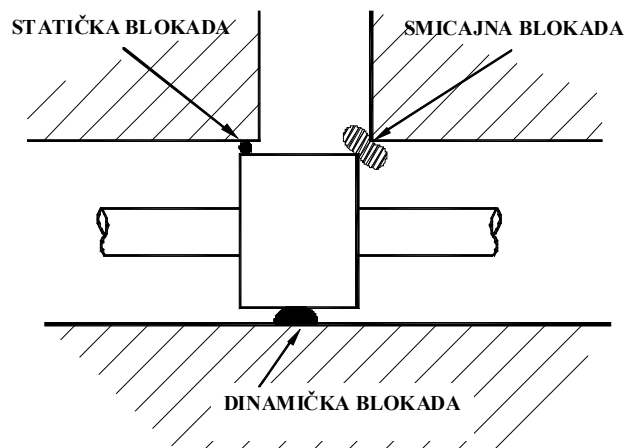


Slika 4.18 Uticaj strujanja fluida na kretanje erozivnih čestica [94].

4.3 Ostale vrste poremećaja rada komponenata izazvanih čvrstim česticama

Pored prethodno pomenutih mehanizama habanja postoje efekti koji su, takođe posledica delovanja čvrstih čestica prisutnih u uljnoj masi, a koji utiču na smanjenje funkcionalnosti hidrauličkih komponenata. Pod ovim efektima se podrazumevaju poremećaji pri kretanju radnih elemenata hidrauličkih komponenti koji su izazvani:

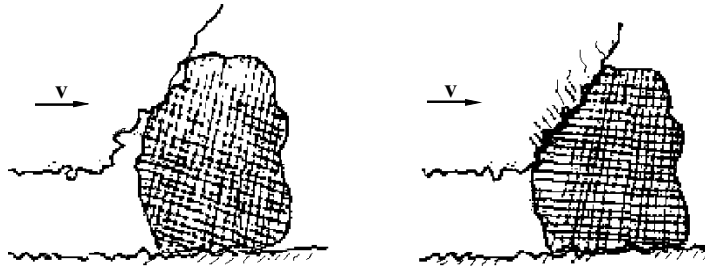
- čestičnom blokadom koja može da bude statička, dinamička i smicajna (slika 4.19) i
- obliteracijom.



Slika 4.19 Tri osnovna tipa čestične blokade [22].

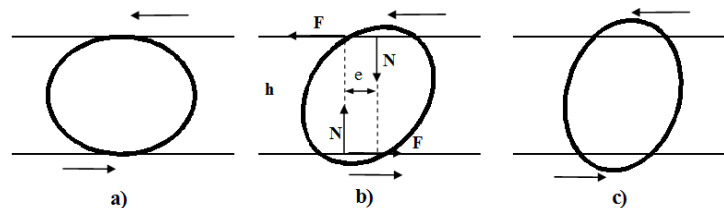
Statička čestična blokada se javlja u slučaju kada se jedna ili više čestica nađe u zazoru između statičkog i pokretnog elementa, tako da je u dodiru sa oba elementa

istovremeno. Ovakav vid blokade može imati ozbiljne posledice, naročito ako na jednom od elemenata postoji kosina (npr. na klipu, u slučaju sklopa klip-cilindar kod razvodnog ventila) koja kada nasedne na česticu (slika 4.20), koja se kreće u suprotnom smeru ili miruje, dovodi do trenutne promene ekscentriciteta ili pravca kretanja pokretnog elementa.



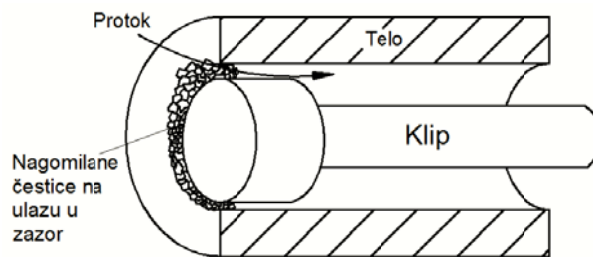
Slika 4.20 Statička čestična blokada – slučaj 1 [55].

Isti problem može da izazove i čestica nepravilnog oblika koja je ušla u zazor i koja se, pri pomeranju pokretnog elementa sklopa, rotira do kritične pozicije, kada nastaje njeno zaglavljivanje – utiskivanje, uklinjavanje (slika 4.21).



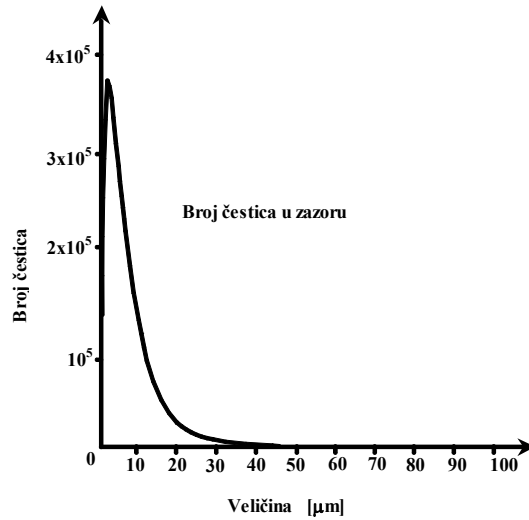
Slika 4.21 Statička čestična blokada – slučaj 2 [55].

Dinamička čestična blokada uobičajeno se javlja na samom ulazu čestica u zazor (slika 4.22).



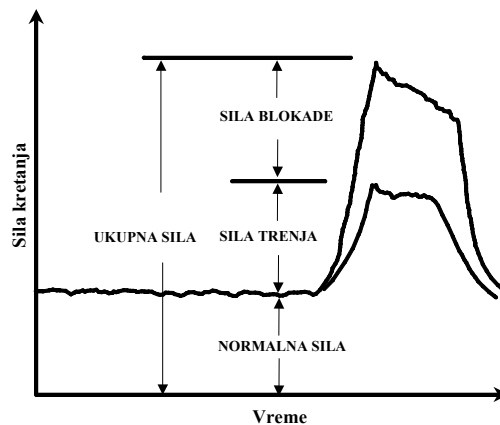
Slika 4.22 Dinamička čestična blokada.

Za slučaj zazora od $30\ \mu\text{m}$, na slici 4.23 se može primetiti da je distribucija veličina čestica koje doprinose formiranju naslaga na ulazu u zazor, asimetričnog tipa. Najveći broj čestica koje utiču na formiranje tzv. “čestičnog kolača”, jesu čestice veličine ispod $10\ \mu\text{m}$.



Slika 4.23 Raspodela veličina čestica koje su se zadržale u zazoru veličine 30 μm [22].

Sila koja je potrebna za pomeranje klipa u slučaju dinamičke čestične blokade, variraće u zavisnosti od broja nagomilanih čestica u zazoru. Na slici 4.24 je prikazan dijagram promene sile koja pogoni klip.



Slika 4.24 Promena intenziteta potrebne sile za pomeranje klipa [55].

Ukupna sila potrebna za pokretanje klipa iz položaja prilikom čestične blokade jednaka je:

$$F_{UK} = F_N + \Delta F_T + \Delta F_B, \quad (4.11)$$

gde je:

F_{UK} – ukupna sila potrebna za pokretanje klipa iz blokiranog položaja,

F_N – normalna sila kada klip nije u stanju blokade,

ΔF_T – sila potrebna za savladavanje trenja,

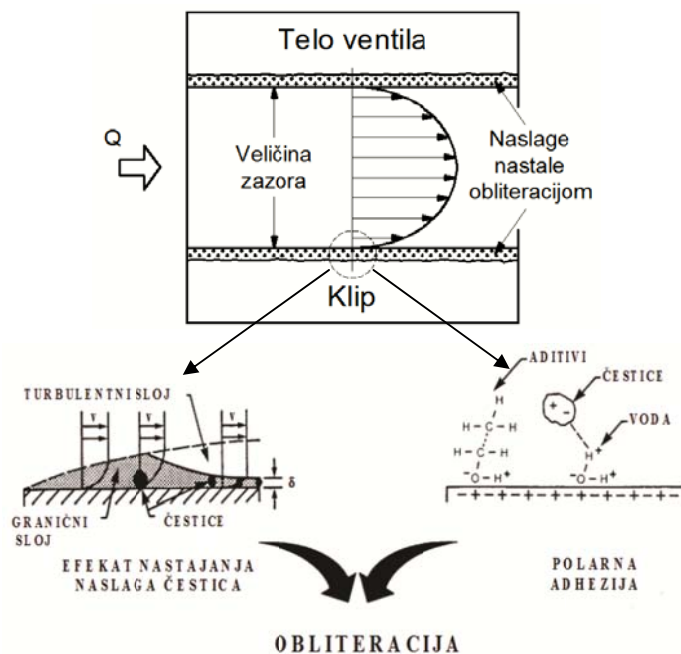
ΔF_B – sila potrebna za savladavanje blokade.

Smicajna čestična blokada se javlja kada se čestica (ili grupa čestica istovremeno) nađe u smicajnoj poziciji između pokretnog i nepokretnog dela u sklopu, tako da ne dozvoljava dalje kretanje pokretnog elementa, ukoliko se čestica ne smakne. Verovatnoća pozicioniranja čestice između klipa i tela ventila u trenutku zatvaranja ventila, kao što je prikazano na slici 4.19, je potpuno slučajnog karaktera. Da li će doći do blokade, u ovom slučaju, zavisi od nekoliko faktora:

- populacije (količine) čvrstih čestica koje imaju veće vrednosti veličine od zazora,
- dužina hoda pokretnog elementa (klipa) i
- otpornost čestice na smicanje (tvrdoća, žilavost i efektivna površina smicanja).

Obliteracija se javlja kada se formirani polarni materijali (sačinjeni od vlage, polimera sa dugolančanim vezama, čvrstih čestica) u hidrauličkom fluidu, pri isticanju kroz zatore komponenti, polarnim adhezionim silama vezuju za površine koje čine taj zazor (slika 4.25). Adhezioni proces vezivanja je kontinualan i odvija se, dok sile strujanja fluida (energija strujanja) ne nadjačaju polarne adhezione sile. Upravo iz tih razloga, lokacije gde postoje zatori, i gde su strujne sile najmanje, predstavljaju idealno mesto za odvijanje ovog polarizacionog procesa.

Ovako formirane višeslojne strukture usporavaju ili zadržavaju čvrste čestice koje usled razlike pritiska, zajedno sa fluidom, ulaze i prolaze kroz zazor time omogućavajući njihovo taloženje u zazoru. Zbog procesa formiranja obliteracionih naslaga sila trenja se značajno povećava do kritične tačke kada dolazi do totalne blokade.



Slika 4.25 Prikaz procesa stvaranja obliteracionih naslaga.

5 Analiza karakterističnih kontaktnih parova u hidrauličkim komponentama

S obzirom na to da je broj tipova kontakata kod hidrauličkih komponenta veoma veliki, u ovom poglavlju je urađena klasifikacija, najkarakterističnijih kontaktnih parova, koji su direktno izloženi delovanju fluida pod pritiskom zajedno sa čvrstim česticama u fluidnoj masi, za različite grupe hidrauličkih komponenta. Uz prikaz klasifikacije kontaktnih parova je data analiza najzastupljenije grupe kontaktnih parova u hidrauličkim komponentama što doprinosi boljem razumevanju principa rada komponente i uspostavljanju odgovarajućeg programa praćenja stanja i održavanja hidrauličkih sistema/komponenta. Pored karakterističnih kontaktnih parova, bitno je spomenuti i druge uticajne parametre na rad istih, a to su veličina zazora, tvrdoća kontaktnih površina, površinska hrapavost i materijal kontaktnih parova o kojima će, takođe biti reči u okviru ovog poglavlja.

Hidrauličke komponente, mogu da se klasifikuju na sledeće interesne grupe, u okviru kojih se mogu posmatrati karakteristični kontaktni parovi:

1. Pumpe i motori,
2. Cilindri,
3. Upravljačko-regulacioni ventili.

5.1 Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod pumpi i motora

Ove dve vrste komponenta iako imaju različitu namenu u hidrauličkom sistemu, slične su konstrukcije (u nekim slučajevima i iste, npr. kada se motor koristi kao pumpa i obratno) i zbog toga svrstane u istu grupu komponenta u daljoj analizi.

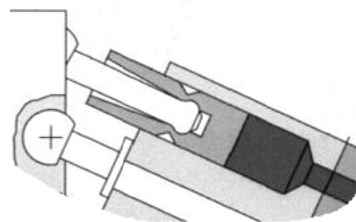
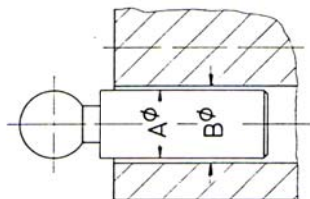
5.1.1 Klipno-aksijalne pumpe i motori

Kao jedna od veoma često korišćenih grupa, klipno-aksijalne pumpe i motori odlikuju se malom težinom, malim gabaritima (u odnosu na radijalne pumpe i motore), i malim momentima inercije što omogućava njihovu široku primenu u instalacijama od kojih se zahteva određena brzina reagovanja. Konstrukcioni oblici klipno-aksijalnih pumpi i motora mogu biti sledeći:

1. u odnosu na kinematiku radnih elemenata:
 - a. sa nagibnom pločom, gde osa cilindarskog bloka leži u osi obrtanja,
 - b. sa nagibnim cilindarskim blokom (dobošem), gde osa cilindarskog bloka zaklapa ugao α sa osom obrtanja.

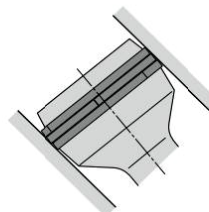
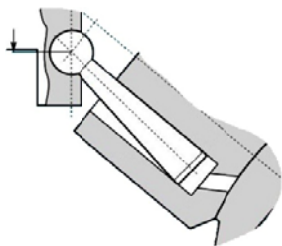
Kod klipno-aksijalnih pumpi i motora karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt **po površini** (cilindričnog tipa) između klipa koji ima translatorno kretanje i košuljice cilindra u dobošu (slika 5.1).



a) primer kontaktne površine jednodelnog klipa i cilindra (Bosch Rexroth);

b) primer kontaktne površine dvodelnog klipa i cilindra (Bosch Rexroth);



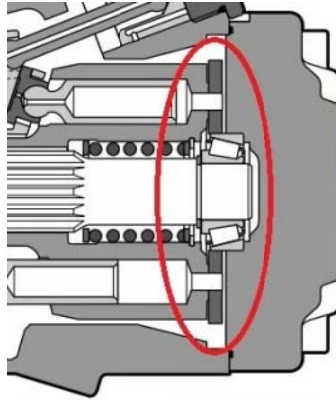
c) primer kontaktne površine jednodelnog konusnog klipa i cilindra (Bosch Rexroth);

d) primer kontaktne površine klipa sa zaptivnim prstenovima, i cilindra (Parker Hannifin);

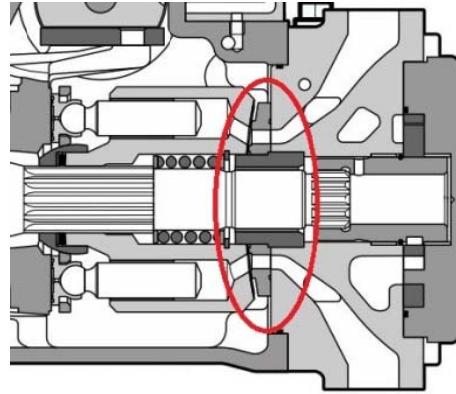
Slika 5.1 Prikaz kontakata između različitih izvedbi klipova i cilindara, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.

Ovo je jedan od najkritičnijih elemenata u sklopu klipno-aksijalne pumpe/motora, koji najčešće dovodi do otkaza. Uzrok oštećenja površina klipa i cilindra, najčešće je prisustvo čvrstih čestica u radnom fluidu ili neadekvatna debljina mazivog filma (usled niskih vrednosti viskoziteta). Posledica nastalih oštećenja na klipu i cilindru, tj. košuljici cilindra (u nekim izvedbama), jeste povećanje zazora, a samim tim i isticanja fluida iz klipnih komora pod pritiskom u slobodan prostor kućišta, čime se smanjuje stepen iskorišćenja pumpe, odnosno motora. Klizne površine klipa se rade sa tvrdoćom većom od 870 HV. Maksimalni radijalni zazor se kreće od 5 do 40 μm u zavisnosti od specifične zapremine pumpe [37].

2. Kontakt **po površini** između sabirne ploče i doboša, gde sabirna ploča miruje, a doboš rotira. Kontaktne površine doboša i sabirne ploče mogu da budu ravne – ravanski kontakt (slika 5.2 a) ili sferne – delimičan sferni kontakt (slika 5.2 b), zavisno od konstrukcije pumpe ili motora.



a) primer ravne kontaktne površine između doboša i sabirne ploče (Bosch Rexroth);

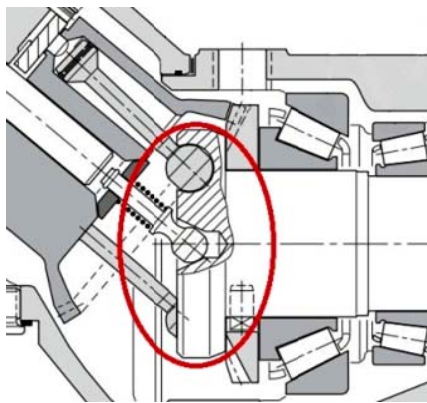


b) primer sferne kontaktne površine između doboša i sabirne ploče (Bosch Rexroth);

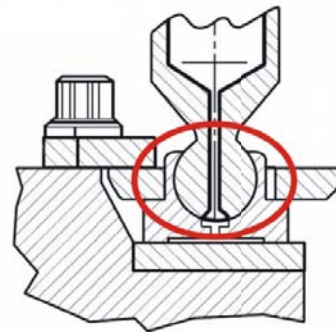
Slika 5.2 Prikaz kontakata između različitih izvedbi sabirnih ploča i doboša, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.

Kod ovih elemenata sklopa, sabirna ploča je ta koja se izrađuje od čelika, sa kontaktnom površinom povećane tvrdoće (min. 700 HV), a kontaktna površina doboša je najčešće od legure bronzne sa dobrim frikcionim karakteristikama. S obzirom na to da se kontakt doboša ostvaruje po velikoj površini, stepen obrade je veoma visok, vrednosti N6 ili N5 [71]. Veličina zazora zavisi od proizvođača i u većini slučajeva se kreće od 0.5 do 5 μm [37].

3. Kontakt **po površini** između noseće ploče i kuglastog dela klipnjače – sferni kontakt – konstrukcije pumpi i motora sa zakrenutim dobošem (slika 5.3 a), odnosno potporne papučice (konstrukcije pumpi i motora sa zakrenutom pločom) i kuglastog dela klipnjače – sferni kontakt (slika 5.3 b).



a) primer kontaktne površine noseće ploče i kugle (Parker Hannifin);



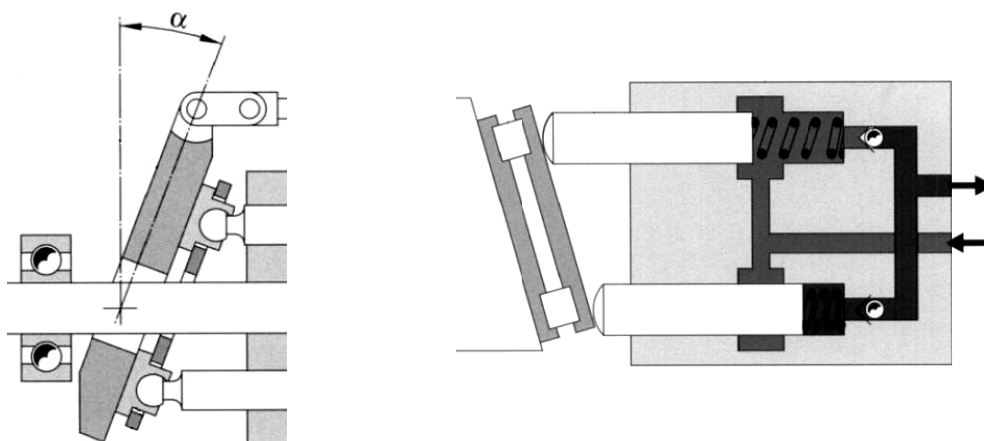
b) primer kontaktne površine potporne papučice i kugle (Eaton Vickers);

Slika 5.3 Prikaz kontakta između kuglastog rukavca klipa i ležišta koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.

Materijal kuglastog dela klipnjače je isti kao i materijal od kojeg je izrađen klip, tj. klipnjača. Potporne papučice se izrađuju od ugljeničnog čelika AISI 1045 (170 HV), ili legiranih čelika hromom, manganom, molibdenom ili niklom 4140 i 4150 (207 HV), i 4340

(230 HV). Površina potporne papučice koja je u kontaktu sa habajućom pločom (ravanski kontakt koji je prikazan na slici 5.4 a), ima prevlaku od bronce. Sve kontaktne površine su veoma osetljive na abrazivna oštećenja nastala prodorom čvrstih čestica u zazor. Kvalitet obrade elemenata sfernog zgloba (kuglastog dela klipnjače i potporne papučice) je N1.

4. Kontakt **po površini** (ravanskog tipa), između potporne papučice (konstrukcije pumpi i motora sa zakrenutom pločom) i zakretne ploče (slika 5.4 a), odnosno kontakt **po tački** između klipa i zakretne ploče (slika 5.4 b).



a) primer kontaktne površine potporne papučice i zakretne ploče (Bosch Rexroth);

b) primer kontaktne površine klipa i zakretne ploče (Bosch Rexroth);

Slika 5.4 Prikaz kontakta između klizne papučice (ležišta) i zakrenute ploče, odnosno klipa i zakrenute ploče, koji se koriste u klipno-aksijalnim pumpama i motorima.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za klipno-aksijalne pumpe i motore, tabela 5.1 prikazuje u koliko slučajeva se ostvaruje kontakt po površini, liniji ili tački.

Tabela 5.1 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod klipno-aksijalnih pumpi i motora.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	2	5
	sferni kontakt	2	
	cilindrični kontakt	1	
Kontakt po liniji		0	
Kontakt po tački		1	

5.1.2 Klipno-radijalne pumpe i motori

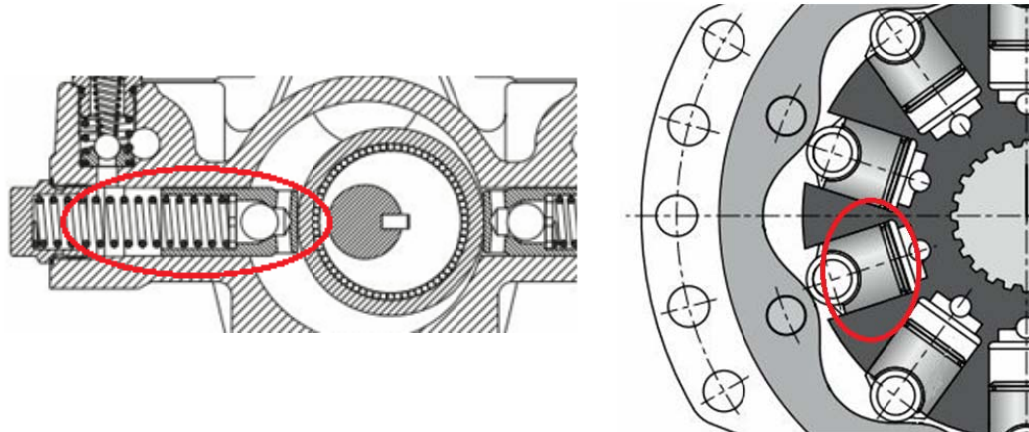
Radijalno-klipne pumpe i motori, za razliku od klipno-aksijalnih, su pogodniji za male brzine i velike momente. Translatorno kretanje klipova koje zavisi od veličine ekscentriciteta, se obavlja u jednoj ravni. Konstrukcioni oblici klipno-radijalnih pumpi i motora mogu da budu sledeći:

1. u odnosu na položaj klipova:

- a. redne,
- b. zvezdaste.

Kod klipno-radialnih pumpi i motora karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt **po površini** (cilindričnog tipa) između klipa koji ima translatorno kretanje, i cilindra (slika 5.5).

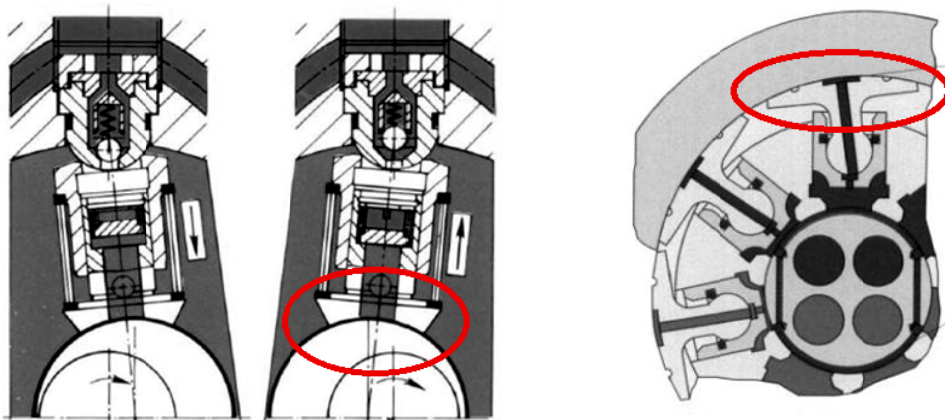


a) primer kada su klipovi i cilindri u statoru (FHER);

b) primer kada su klipovi i cilindri u rotoru (BoschRexroth);

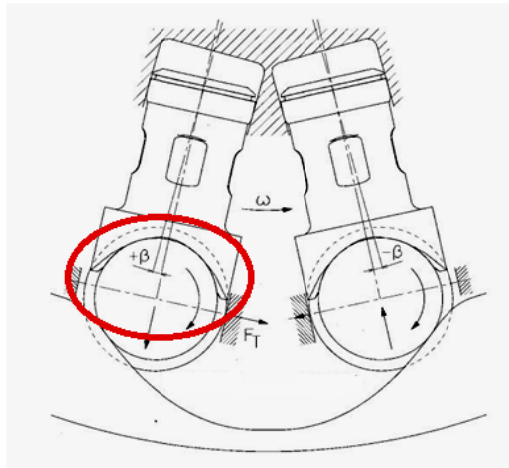
Slika 5.5 Prikaz kontakta između klipa i cilindra, koji se koriste u klipno-radialnim pumpama i motorima.

2. Kontakt **po površini** (cilindričnog tipa) između potporne papučice i rotora – slika 5.6 a, **ili liniji** između klipa i rotora (kada su klipovi smešteni u statoru) – slika 5.6 d i kontakt **po površini** (cilindričnog tipa) između potporne papučice i statora (kada su klipovi smešteni u rotoru), slika 5.6 b, odnosno klipa i rolera (slika 5.6 c).

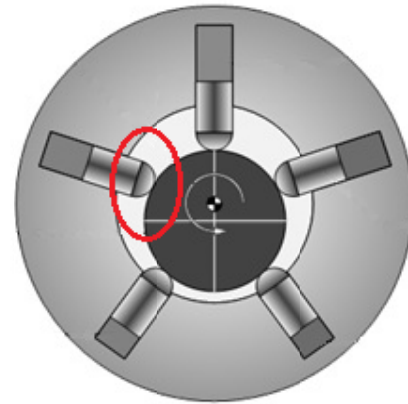


a) kontakt između potpornog elementa i rotora (BoschRexroth);

b) kontakt između potpornog elementa i statora (BoschRexroth);



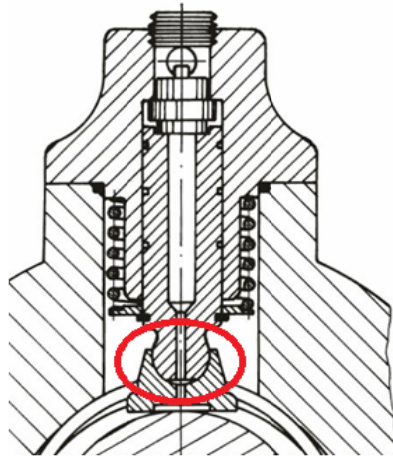
c) kontakt između profilisanog statorskog prstena i rolera, i između klipa i rolera (BoschRexroth – Hägglund motor);



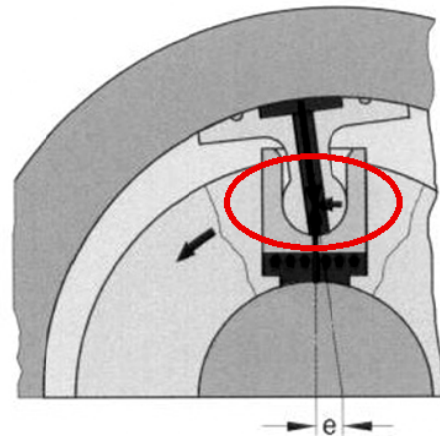
d) kontakt između klipa i rotora ili statora;

Slika 5.6 Prikaz kontakta između potpornog elementa, klipa i rotora, odnosno statora koji se koriste u klipno-radikalnim pumpama i motorima.

3. Kontakt **po površini** (sfernog tipa) između potpornog elementa i kuglastog dela klipa (slika 5.7).



a) primer kontakta između kuglastog dela klipa i potpornog elementa (Prva Petoletka);



b) primer kontakta između kuglastog dela klipa i potpornog elementa (BoschRexroth);

Slika 5.7 Prikaz sfernog zgloba koji se koristi u klipno-radikalnim pumpama i motorima.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za klipno-radikalne pumpe i motore, tabela 5.2 prikazuje u koliko slučajeva se ostvaruje kontakt po površini, liniji ili tački.

Tabela 5.2 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod klipno-radijalnih pumpi i motora.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	0	4
	sferni kontakt	1	
	cilindrični kontakt	3	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

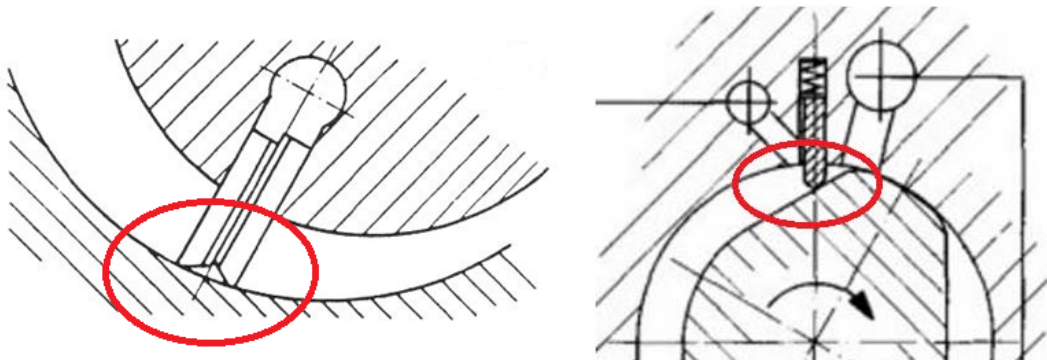
5.1.3 Krilne pumpe i motori

Krilne pumpe i motori su pored klipno-aksijalnih veoma često korišćeni, a posebno u području radnih pritisaka do 220 bar i srednjih kapaciteta sa dobrom karakteristikom u pogledu pulzacija protoka. Konstrukcioni oblici krilnih pumpi i motora mogu da budu sledeći:

1. U odnosu na oblik profila statora:
 - a. sa kružnim profilom (neuravnotežene),
 - b. sa elipsoidnim profilom (uravnotežene).

Kod krilnih pumpi i motora karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu jesu sledeći:

1. Kontakt **po liniji** između vrha krilca, koji se nalazi u rotoru ili statoru (zavisno od konstrukcije) i unutrašnje površine statorskog prstena, odnosno rotora (slika 5.8 a). Kod primera prikazanog na slici 5.8 b, treba primetiti da i rotor dolazi u kontakt sa cilindričnim kućištem statora, gde zbog formiranja pritisne zone (kod neuravnoteženih pumpi / motora) fluid potiskuje rotor ka površini statora koja klizi po **cilindričnoj površini** statora.



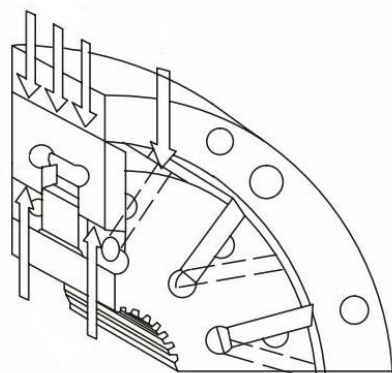
a) primer kontakta vrhova krilaca, koji se kreću zajedno sa rotorom, i unutrašnje površine statora (BoschRexroth);

b) primer kontakta vrhova krilaca, koji su smešteni u statoru, i površine rotora (BoschRexroth);

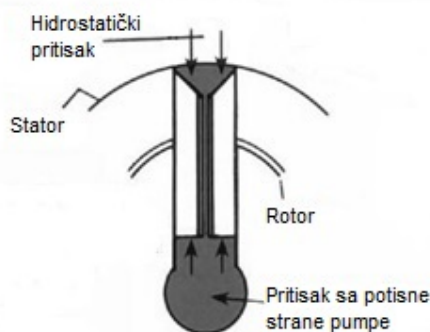
Slika 5.8 Prikaz kontakta između krilca i statora (a), odnosno rotora (b) kada je krilce postavljeno u statoru.

Kontaktne površine ovih elemenata su izložene intenzivnom procesu habanja, a naročito u slučaju kada dođe do kidanja uljnog filma kada vrh krilca zadire u površinu statora, odnosno rotora. Pri tome na kontaktnoj površini statora/rotora nastaju oštećenja u vidu riseva, brazdi u pravcu kretanja krilaca. Takođe, dolazi i do habanja vrha krilca, pa se tako vremenom kontakt između statora/rotora i krilaca umesto po liniji, ostvaruje po površini. Nastali risevi na površini statora/rotora spajaju komore različitog pritiska, pa dolazi do stvaranja unutrašnjih gubitaka – pada pritiska i kapaciteta pumpe. Stator, rotor i krilca se izrađuju najčešće od nitriranog čelika (krilca se izrađuju i od volframovog čelika sa tvrdoćom radnih površina oko 830 HV), sa tvrdoćom radnih površina minimalno 750 HV [39]. Radne površine statora, krilaca i rotora se izrađuju kvalitetom obrade N6.

2. Kontakt **po površini** (ravanskog tipa) između krilca i žljeba koji se nalazi u rotoru ili statoru zavisno od konstrukcije (slika 5.9).



a) primer kontakta između jednostrukog krilca i površina žljeba (Eaton Vickers);

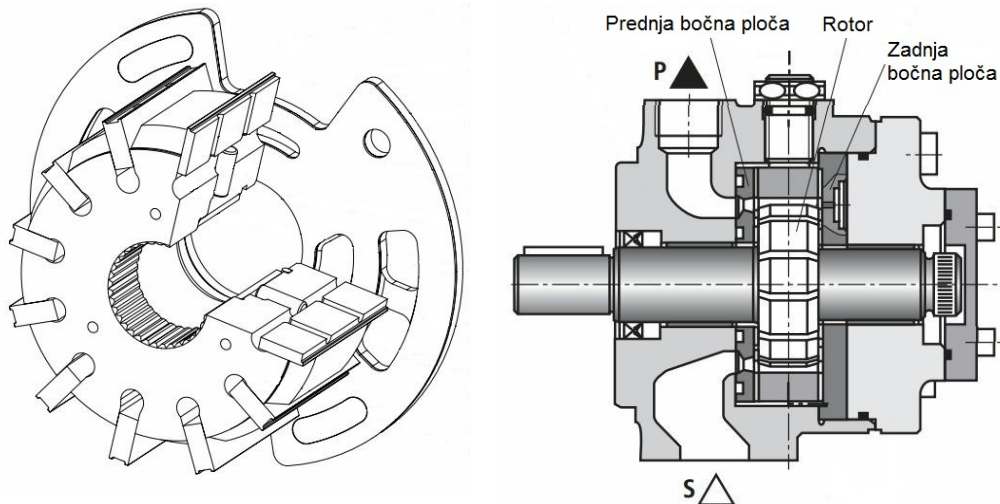


b) primer kontakta dvostrukog krilca i površina žljeba (BoschRexroth);

Slika 5.9 Prikaz kontakta između krilca i žljeba.

Kontaktna površina između krilca i žljeba je još jedno mesto gde dolazi do intenzivnijeg habanja s obzirom na to da se krilca tokom rada pumpe neprestano kreću uzduž žljeba u rotoru, odnosno statoru. Pošto su površine krilaca i rotora različitih mehaničkih karakteristika, površina rotora je izložena procesu intenzivnijeg habanja. Sa procesom povećanja zazora, dolazi do poremećaja sila koje deluju na krilca. One se prenose na rotor i dovode do daljeg povećanog procesa habanja.

3. Kontakt **po površini** (ravanskog tipa), između rotora i bočne ploče (slika 5.10).



Slika 5.10 Prikaz kontakta između rotora sa krilcima i bočne ploče (Eaton Vickers).

Bočne ploče su nepokretne i s jedne strane se naslanjaju na kućište, a s druge strane na rotor i krilca. Potrebna veličina zazora između bočnih ploča i rotora se obezbeđuje delovanjem hidrostatičkog pritiska na površinu između bočne ploče i kućišta, a kreće se u opsegu od 5 do 13 μm [80]. Bočne ploče se izrađuju od silicijumske ili manganove bronz. U cilju povišenja stepena iskorišćenja jedna od bočnih ploča, izvodi se tako da bude plivajuća i da pod delovanjem pritiska tečnosti sa zadnje strane naleže na čeonu površinu rotora.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za krilne pumpe i motore, tabela 5.3 prikazuje u koliko slučajeva se ostvaruje kontakt po površini, liniji ili tački.

Tabela 5.3 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod krilnih pumpi i motora.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	2	2
	sferni kontakt	0	
	cilindrični kontakt	1	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

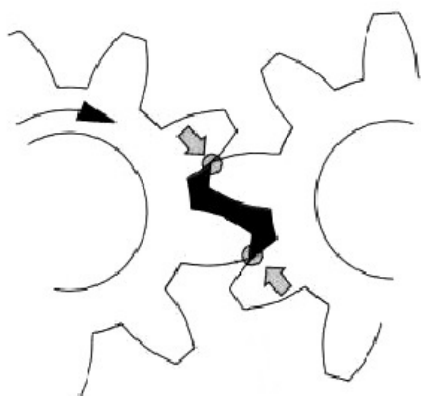
5.1.4 Zupčaste pumpe i motori

Neke od karakteristika zupčastih pumpi i motora su: jednostavnost, pouzdanost, mali gabariti, itd. Zupčaste pumpe sa spoljašnjim ozubljenjem se koriste kod hidrauličkih sistema nižeg stepena zahteva u pogledu pulzacija protoka i pritiska, dok pumpe sa unutrašnjim ozubljenjem imaju primenu kod sistema od kojih se zahteva miran rad bez pulzacija protoka. Konstrukcioni tipovi zupčastih pumpi i motora mogu da budu sledeći:

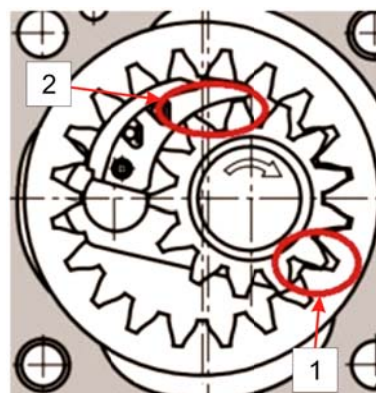
1. U odnosu na vrstu zupčanika:
 - a. sa spoljašnjim ozubljenjem,
 - b. sa unutrašnjim ozubljenjem.

Kod zupčastih pumpi i motora karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt po **liniji** između bočnih površina zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika koji su u zahvatu (slika 5.11 a – kod pumpe sa spoljašnjim ozubljenjem i slika 5.11 b-1 – kod pumpe sa unutrašnjim ozubljenjem), i kontakt po čeonj **površini** zubaca (zupčanika sa spoljnim ozubljenjem) i razdelnog elementa – polumeseca (slika 5.11 b-2). Takođe, treba spomenuti da, kao i kod krilnih pumpi, neuravnotežene zupčaste pumpe imaju nedostatak u smislu dolaska u kontakt čeonih površina zubaca sa cilindričnom površinom statora što ima za posledicu trošenje statorske površine (koja je manje tvrdoće) i tako povećanje prvobitne veličine zazora.



a) Primer kontakta zupčanika u zahvatu kod pumpe i motora sa spoljašnjim ozubljenjem (Bosch Rexroth);

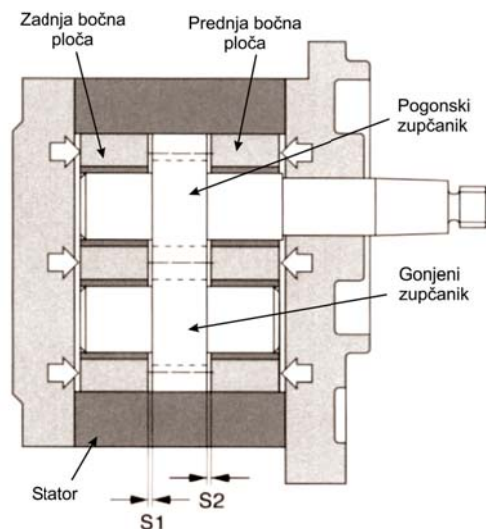


b) Primer kontakta zupčanika u zahvatu kod pumpe i motora sa unutrašnjim ozubljenjem (Bosch Rexroth);

Slika 5.11 Prikaz kontakta između zubaca u zahvatu kod zupčastih pumpi sa spoljašnjim i unutrašnjim ozubljenjem.

Zupčanici su izloženi delovanju sila visokog pritiska, posebno u momentu dolaska u spregu kada se u međuzublju zarobi ulje. Momentom izlaska iz zahvata dolazi do rasterećenja, pa i pada sile pritiska koja deluje na površinu zupčanika. Zbog stalne promene veličine sile pritiska dolazi do zamora površine i vremenom do stvaranja jamica (*pitting*). One su u početnom periodu oštećenja – male, ali kasnije se povećavaju i narušavaju mehanizam zaptivanja dodiranjem zupčanika po liniji. Zupčanici se najčešće izrađuju od nitriranog čelika, okaljenog posle nitriranja do 750 – 800 HV. Čeone i profilne površine zubaca se rade u kvalitetu obrade ne manjem od N6 [37].

2. Kontakt po **površini** (ravanskog tipa) između čeonih površina zupčanika i bočnih ploča (slika 5.12).



Slika 5.12 Primer kontakta zupčanika, statora i bočnih ploča (Bosch Rexroth).

Kontakt između čeonih površina zupčanika i bočnih ploča predstavlja kritično mesto kod onih pumpi i motora, kod kojih nema regulacije bočnog zazora. Danas se u sve pumpe/motore ugrađuje ovaj vid regulacije koji je neophodan, kako bi se stepen iskorišćenja održao na zadovoljavajućem nivou. Bočne ploče se, inače izrađuju od kalajno-olovne bronz, ali i antifrikcionijskih aluminijumskih legura. Veličina zazora između čeonih površina zupčanika i bočnih ploča se kreću u opsegu od 0,5 – 5 μm [80]. Čeone (zaptivne) površine zupčanika se rade sa kvalitetom obrade, ne manjim od N7.

Kontakt između čeone površine zubaca i unutrašnje površine kućišta, predstavlja kritični deo pumpe. Za vreme rada dolazi do habanja obe površine. Kod pumpi ili motora čije su ose zupčanika pomerene (neuravnotežene pumpe/motori) iz potrebnog horizontalnog i paralelnog položaja, dolazi do intenzivnog, po širini i obimu neravnomernog habanja, prvenstveno površine kućišta (s obzirom na to da je izrađeno od mekšeg materijala, najčešće legure aluminijuma), a zatim i čeonih površina zupčanika. Kod povećanja zazora dolazi do povećanog proticanja ulja iz komora međuzublja sa višim, u one sa nižim pritiskom. Ovo rezultira padom kapaciteta kod pumpi, a kod motora dolazi do smanjenja brzine rotacije i obrtnog momenta. Stator, tj. kućište zupčaste pumpe se obično izrađuje od sivog liva, a danas najčešće od aluminijumske legure, čime mu se značajno smanjuje težina. Veličina zazora između čeonih površina zubaca i statora se kreće u opsegu od 0,5 – 5 μm [80].

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za zupčaste pumpe i motore, tabela 5.4 prikazuje u koliko slučajeva se ostvaruje kontakt po površini, liniji ili tački.

Tabela 5.4 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod zupčastih pumpi i motora.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	1	3
	sferni kontakt	0	
	cilindrični kontakt	2	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

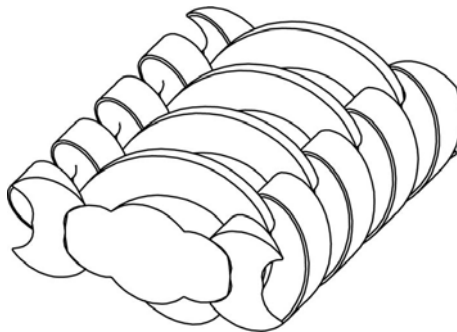
5.1.5 Zavojne pumpe i motori

Pored kompaktne konstrukcije, u osnovne odlike zavojnih pumpi i motora spadaju pouzdan i bešuman rad, sa ravnomernim protokom radnog fluida i ravnomernim torzionim momentom. Konstrukcioni tipovi vijčanih pumpi i motora mogu da budu sledeći:

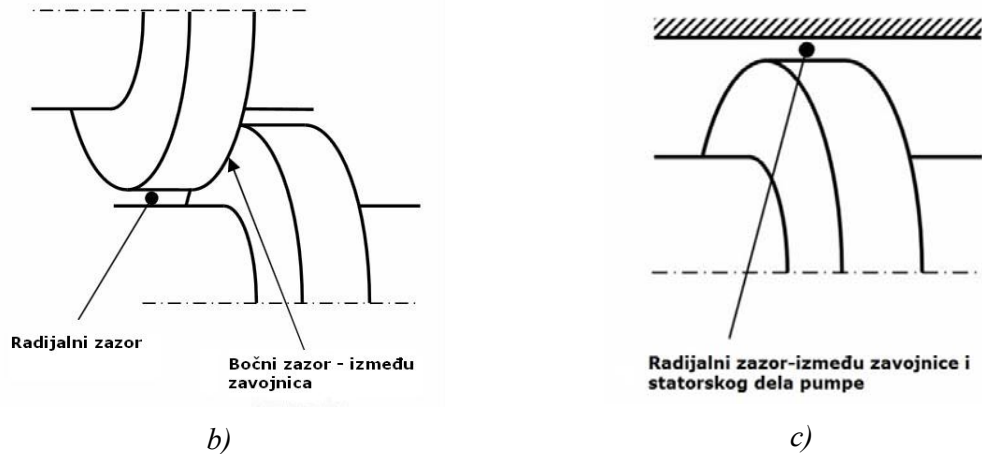
1. U odnosu na broj vretena:
 - a. sa dva vretena,
 - b. sa tri vretena i
 - c. sa pet vretena.

Kod zavojnih pumpi i motora karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt po **liniji** dodira između čeonu površine zavojnice pogonskog/gonjenog vretena sa osovinskim delom vretena (slika 5.13 b), odnosno između čeonu površine zavojnice i statorskog dela pumpe (slika 5.13 c) i kontakt po **površini** između bočnih površina zavojnica pogonskog i gonjenog vretena (slika 5.13 b).



a)



Slika 5.13 Profil zavojnih vretena (a), i prikaz međusobnih kontakata kod vijčane pumpe (b, c).

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za vijčane pumpe i motore, tabela 5.5 prikazuje u koliko slučajeva se ostvaruje kontakt po površini, liniji ili tački.

Tabela 5.5 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod vijčanih pumpi i motora.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	0	2
	sferni kontakt	0	
	cilindrični kontakt	1	
	ostali	1 ¹	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

5.2 Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod cilindara

Hidraulički cilindar jeste zapreminski hidromotor sa naizmeničnim pravolinijskim kretanjem radnog organa, tj. klipa, u odnosu na telo cilindra. U zavisnosti od zahteva koji se pred radne cilindre postavljaju, primenjuju se cilindri različitih konstrukcija.

Konstrukcioni tipovi hidrauličkih radnih cilindara mogu da budu sledeći:

1. prema smeru delovanja:
 - a. cilindri jednostranog dejstva,
 - b. cilindri dvostranog dejstva;
2. prema broju klipnjača:
 - a. sa jednostranom klipnjačom,

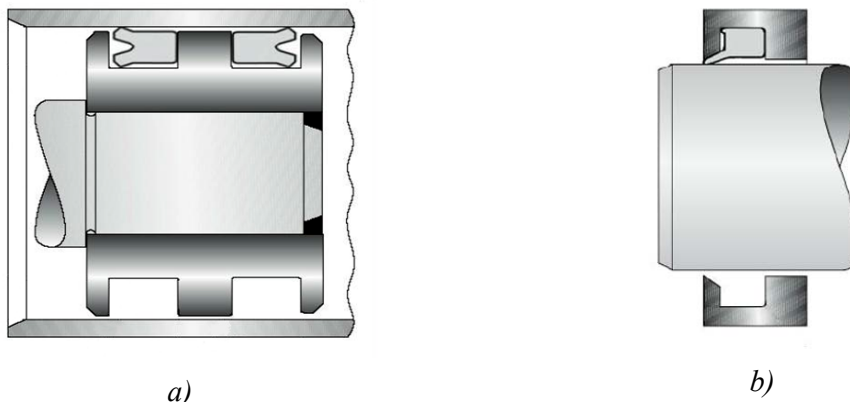
¹ Ovaj tip kontakta se odnosi na dodir između dva zavojna vretena po profilnim površinama.

- b. sa dvostranom klipnjačom;
- 3. teleskopski (višestepeni) cilindri.

Na vek korišćenja cilindra najviše utiču uslovi okoline u kojoj radi, kvalitet ugrađenog materijala zaptivača, odnosno brisača, materijal i tehnologija obrade klipnjače. Eksploatacioni vek se smanjuje kod rada u sredini sa čvrstim i abrazivnim česticama koje, pre svega oštećuju zaptivače (zaptivač klipnjače i komplet zaptivača klipa), a zatim i površinu klipnjače i košuljicu cilindra.

Kod hidrauličkih cilindra karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt po **površini** između klipa i unutrašnje površine cilindra (slika 5.14 a) i kontakt po **površini** između prednjeg poklopcu cilindra i klipnjače (slika 5.14 b) – ovde treba naglasiti da iako se u početku ne ostvaruje direktan kontakt, metal na metal, do njega dolazi kada se zaptivači na klipu i prednjem poklopcu cilindra potroše).



Slika 5.14 Prikaz kontaktnih površina klipa sa cilindrom (a) i klipnjače sa prednjim poklopcem cilindra odnosno brisačem (b).

Tokom eksploatacije mogu da se oštete klip ili klipnjača usled habanja abrazivnim česticama, ali najčešće se dešava da se oštećuju zaptivači ili cilindar (koju su izrađeni od mekših materijala). Zaptivač klipnjače jeste element koji po pravilu prvi dovodi do otkaza, jer na njega deluju:

- aksijalna sila klipnjače koja ga deformiše i mehanički oštećuje,
- čvrste čestice i drugi kontaminanti koji se lepe po površini klipnjače,
- neodgovarajuća obrada klipnjače,
- oštećenje površine klipnjače,
- ulje koje utiče na promenu tvrdoće i zapreminu zaptivača (zaptivač bubri u kontaktu sa uljem).

Drugi element po kritičnosti u sklopu cilindra, jeste zaptivač klipa koji je stalno dinamički opterećen silama pritiska, posebno sa klipne strane. Opterećen je i mehaničkom

silom, naročito kod cilindara većih gabarita, jer nosi njegovu celokupnu težinu (ukoliko je cilindar postavljen horizontalno ili pod uglom). Klipnjača je sa dugim vekom trajanja ukoliko se njena površina (koja je tvrdo hromirana ili niklovana i brušena), mehanički ne ošteti čvrstim česticama iz okoline ili udarcem nekog stranog predmeta.

Unutrašnja površina cilindra (košuljica) je izrađena postupkom honovanja ili rolovanja, i uvek je manje tvrdoće u odnosu na tvrdoću klipnjače. Oštećuje se procesom abrazivnog habanja čvrstim česticama prisutnim u hidrauličkom ulju, ili direktnim kontaktom površine klipa. Kod cilindara velikih prečnika, nakon dugotrajnog rada može da dođe do habanja površina koje se stalno nalaze u kontaktu sa zaptivačem klipa i na koju deluje težina klipa.

Materijali koji se koriste za izradu klipnjača su tvrdo hromirani čelici koji u sastavu mogu da imaju molibden, vanadijum i nikl. Klipnjače se rade u tolerantnom polju f7-f8, kvalitetom obrade N3 ili N4, i imaju površinsku tvrdoću minimalno 800 HV. Cilindri se rade od honovanih hladno vučenih, bešavnih cevi čija je tolerancija unutrašnje obrade H7-H9, a kvalitet obrade N4.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za cilindre, tabela 5.6 prikazuje zbirno kakvi kontakti se ostvaruju kod ovog tipa komponenti.

Tabela 5.6 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod cilindara.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	0	2
	sferni kontakt	0	
	cilindrični kontakt	2	
Kontakt po liniji		0	
Kontakt po tački		0	

5.3 Prikaz karakterističnih kontaktnih parova kod ventila

Funkcionalna grupa upravljačko-regulacionih elemenata, po svom obimu i raznovrsnosti, broju podgrupa i komponenti, predstavlja najveću grupaciju komponenata hidrauličkih sistema. U osnovi upravljanje hidrauličkim sistemima se ostvaruje sledećim podgrupama komponenti:

- ventili za razvođenje hidrauličkog fluida (klasični, proporcionalni i servo ventili, logički ventili),
- ventili za regulaciju pritiska (ventili za ograničenje pritiska, redosledni ventili, regulatori pritiska),
- ventili za regulaciju protoka (mlaznice, prigušnice, raspodeljivači protoka, regulatori protoka, nepovratni ventili).

5.3.1 Ventili za razvođenje hidrauličkog fluida

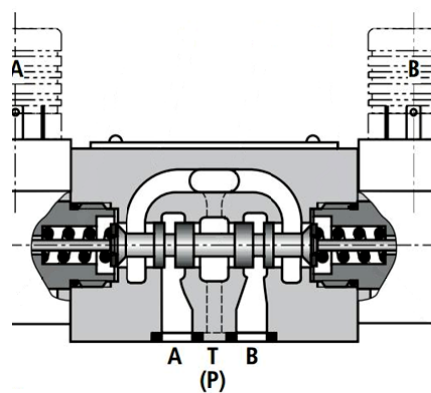
Ventilima za razvođenje hidrauličkog fluida se određuje smer kretanja ili pozicija izvršnog organa (hidrauličkog aktuatora). Osnovne karakteristike razvodnih ventila su: broj radnih položaja, broj radnih priključaka, način aktiviranja, oblik radnog elementa, način montaže (pojedinačna, blok ili preko podnožne ploče). Za dalje razmatranje u okviru ovog poglavlja značajna je analiza razvodnika prema obliku radnog elementa i njegovog kretanja u sklopu. Prema obliku radnog elementa razvodnici se dele na:

- razvodnike sa sedištem (razvođenje fluida prema odgovarajućoj grani hidrauličkog sistema se ostvaruje uzdužnim pomeranjem radnog elementa u obliku cilindra, konusa ili sfere, a zaptivanje se ostvaruje preko kontaktne linije ili površine između sedišta i nekog od pomenutih oblika radnog elementa) i
- razvodnike sa cilindričnim klipom (razvođenje fluida se ostvaruje, takođe uzdužnim kretanjem radnog elementa u vidu cilindričnog klipa sa prstenastim žlebom ili bez njega, a zaptivanje se ostvaruje po površini dodira klipa sa telom razvodnog ventila).

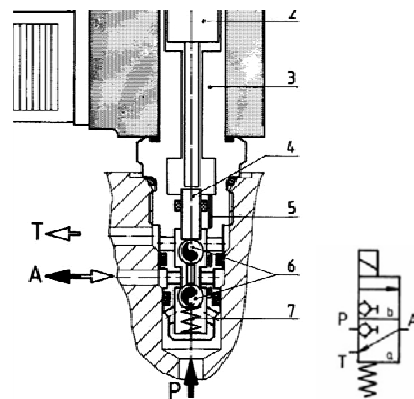
Prema obliku radnog elementa i njegovom kretanju, postoje i razvodnici čiji radni elementi u vidu cilindričnog klipa ili sfere koji imaju otvore ili žljebove u telu, vrše obrtno kretanje u cilju razvođenja hidrauličkog fluida. Međutim, zbog malog trenja između radnog elementa i tela ventila, lakšeg postizanja i većeg broja ostvarivih pozicija, bolje uravnoteženosti od statičkih sila pritiska tečnosti, ventili sa uzdužnim kretanjem radnog elementa imaju veću primenu, te će se stoga isti dalje razmatrati u ovom poglavlju.

Kod hidrauličkih razvodnih ventila karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

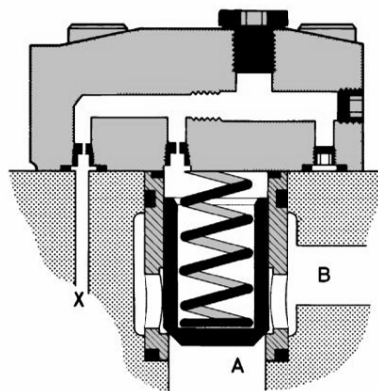
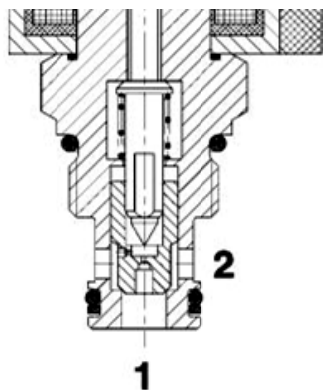
1. Kontakt po **površini** (cilindričnog tipa) između cilindričnog klipa i unutrašnje površine cilindra u telu ventila (slika 5.15 a), i kontakt po **površini** (ravanskog ili sfernog tipa) **ili liniji** između sedišta i radnog elementa koji može biti u vidu sfere, cilindra ili konusa (slika 5.15 b, c, i d).



a) Klasičan razvodnik sa cilindričnim klipom (Bosch Rexroth);



b) Ugradni razvodnik sa sedištem i radnim elementima u vidu sfere (Hydac);



c) Ugradni razvodnik sa sedištem i radnim elementom u vidu konusa (Hydac);

d) Logički ventil (Denison-Parker);

Slika 5.15 Prikaz razvodnih ventila sa različitim oblikom radnih elemenata.

Sklop cilindar – klip predstavlja najkritičniji deo razvodnog ventila, u toku čijeg rada dolazi do habanja kontaktnih površina. Zbog manje tvrdoće kontaktne površine cilindra (292 – 328 HV) u odnosu na površinu klipa (698 – 804 HV), tokom eksploatacije razvodnog ventila, cilindar je podložan većem trošenju. Veličina zazora između otvora u telu i cilindričnog klipa zavisi od veličine i konstrukcione koncepcije proizvođača. Danas se kod razvodnih ventila, vrednosti zazora kreću u sledećim granicama [80]:

- klasični razvodni ventili 2 – 10 μm ,
- proporcionalni razvodni ventili 1 – 6 μm i
- servo razvodni ventili 1- 4 μm .

Obrada otvora u telu ventila i klipova razvodnika, radi se u klasi tačnosti H7 / h7, a po kvalitetu obrade N5 ili više.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za razvodne ventile, tabela 5.7 prikazuje zbirno kakvi kontakti se ostvaruju kod ovog tipa komponenti.

Tabela 5.7 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod razvodnih ventila.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	1	3
	sferni kontakt	1	
	cilindrični kontakt	1	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

5.3.2 Ventili za regulaciju pritiska

Ventili pritiska imaju zadatak da u delu ili celom hidrauličkom sistemu obezbede pritisak određene veličine. U odnosu na konstrukciju i funkciju koju obavljaju u hidrauličkom sistemu se dele na tri osnovne grupe:

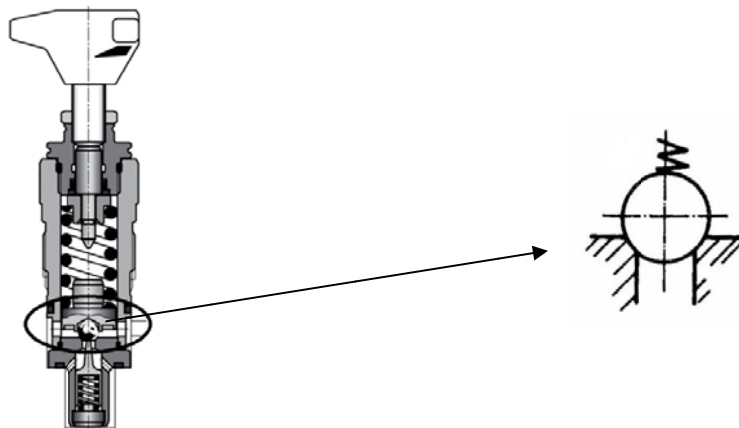
- ventili za ograničenje pritiska,
- redosledni ventili i
- redukcionni ventili ili regulatori pritiska.

Prema obliku radnog elementa, ventili pritiska se mogu podeliti na ventile sa:

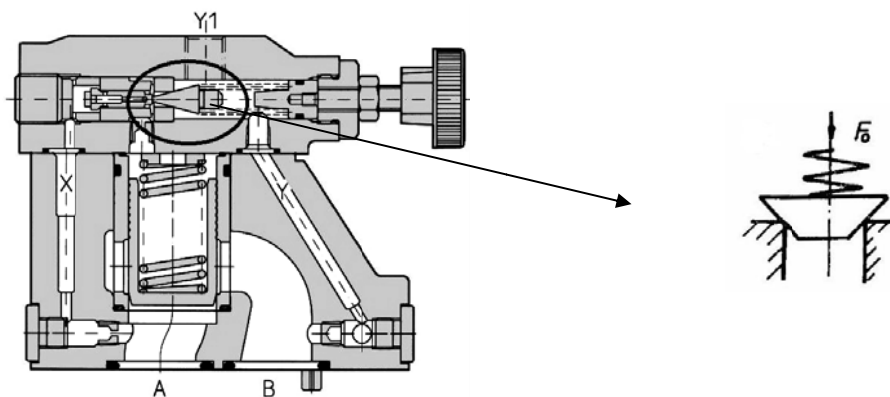
- kuglom,
- konusom i
- cilindričnim klipom.

Kod ventila pritiska karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

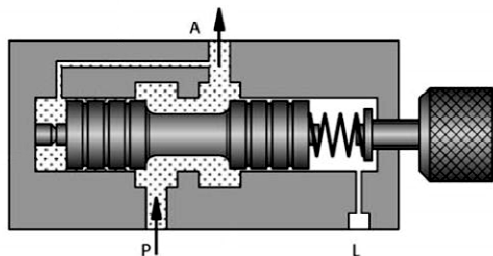
1. Kontakt po **površini** (ravanskog ili sfernog tipa) **ili liniji** između sedišta i radnog elementa koji može biti u vidu sfere ili konusa (slika 5.16 a, b) i kontakt po **površini** (cilindričnog tipa) između cilindričnog klipa i unutrašnje površine cilindra u telu ventila (slika 5.16 c).



a) Ventil za ograničenje pritiska direktnog dejstva sa radnim elementom u obliku sfere – kontakt po površini između sedišta i sfernog elementa (Bosch Rexroth);



b) Ventil za ograničenje pritiska indirektnog dejstva sa radnim elementom u obliku konusa – kontakt po liniji između sedišta i konusnog elementa (Denison-Parker);



c) Ventil za redukciju pritiska sa radnim elementom u obliku cilindričnog klipa – kontakt po površini između tela i cilindričnog klipa (Festo);

Slika 5.16 Prikaz ventila pritiska sa različitim radnim elementima.

Kod ventila pritiska razdvajanje zone visokog pritiska od zone niskog pritiska se vrši kontaktom radnog elementa (koji je uglavnom sfernog ili koničnog oblika) i sedišne površine, pa veličine zazora nemaju značaja osim u slučaju kada se kao radni element koristi cilindričan klip. Kontaktne površine radnih elemenata i dosednih površina, vremenom se habaju zbog zamora materijala i erozije. U slučaju kada se kod ovih ventila kao radni element koristi cilindričan klip, problematika otkaza i uzroka je ista kao i kod razvodnih ventila.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za razvodne ventile, tabela 5.8 prikazuje zbirno kakvi kontakti se ostvaruju kod ovog tipa komponenti.

Tabela 5.8 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod ventila pritiska.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	1	3
	sferni kontakt	1	
	cilindrični kontakt	1	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

5.3.3 Ventili za regulaciju protoka

Ventili protoka u hidrauličkom sistemu imaju zadatak da podešavaju protok, odnosno da ga menjaju ili održavaju konstantnim, da utiču na brzinu kretanja potrošača i omoguće kontinualno podešavanje brzine. Promena protoka se postiže promenom površine poprečnog preseka kroz koji protiče fluid. Ventili protoka se dele na:

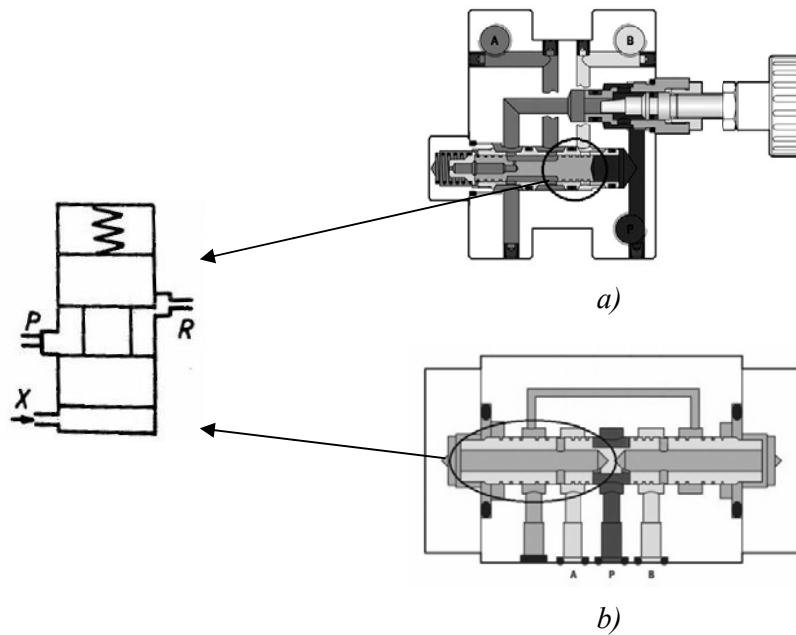
- upravljčke ventile:
 - mlaznice (blende) i
 - prigušnice (sa mogućnošću podešavanja protočne površine ili bez nje),
- regulacione ventile:
 - dvograne regulatore,
 - trograne regulatore i

- raspodeljivače protoka.

Za dalju analizu razmatraće se kontakti koji se javljaju kod regulacionih ventila protoka, s obzirom na to da se radni elementi ovih komponenti kreću tokom rada kako bi izvršili regulaciju što utiče na njihovo intenzivnije habanje u odnosu na nepokretne radne elemente, prisutne kod upravljačkih ventila.

Kod ventila protoka karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu, jesu sledeći:

1. Kontakt po **površini** (cilindričnog tipa) između cilindričnog klipa i unutrašnje površine cilindra u telu ventila (slika 5.17).



Slika 5.17 Prikaz trogranog ventila za regulaciju protoka (a) i raspodeljivača protoka (b) sa karakterističnim kontaktnim parom (Festo).

Ventili protoka sa karakterističnim kontaktom između cilindra i klipa se identično ponašaju u eksploataciji kao i razvodni ventili.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za ventile protoka, tabela 5.3.3.1 prikazuje zbirno kakvi kontakti se ostvaruju kod ovog tipa komponenti.

Tabela 5.9 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod ventila protoka.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	0	2
	sferni kontakt	0	
	cilindrični kontakt	2	
Kontakt po liniji		0	
Kontakt po tački		0	

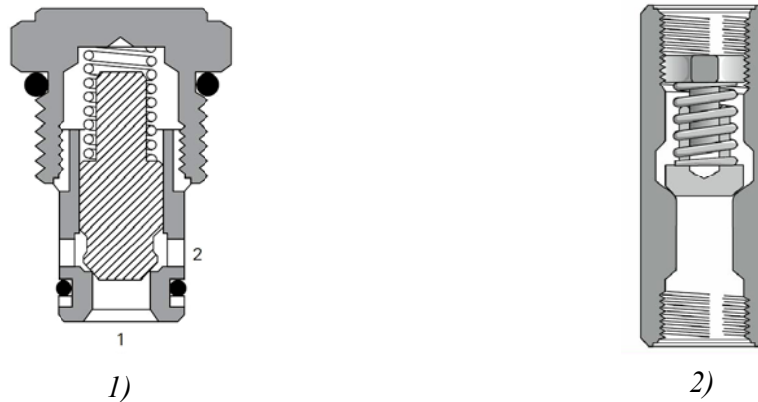
5.3.4 Nepovratni ventili

Nepovratni ventili imaju namenu da obezbede jednosmerno strujanje radne tečnosti i spreče strujanje u suprotnom smeru. Po konstrukciji su analogni ventilu za ograničenje pritiska, samo sa tom razlikom što se u nepovratne ventile postavljaju opruge sa malom silom (ili se uopšte ne postavljaju), dovoljnom za pouzdano nasadanje radnog elementa u sedište. Prema konstrukcionoj izvedbi nepovratni ventili se dele na:

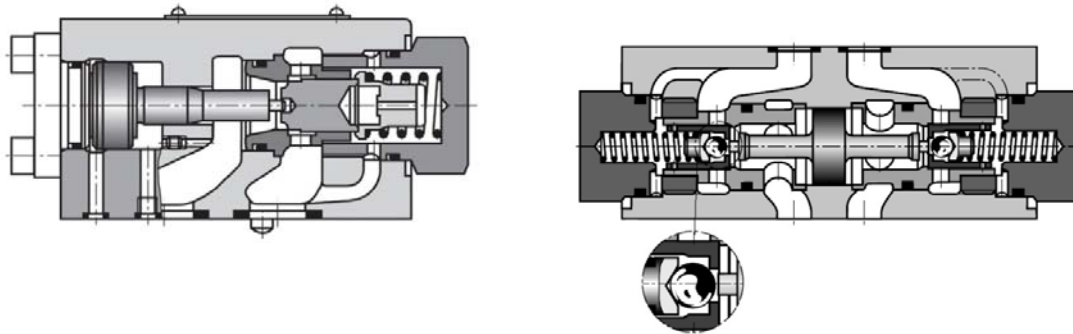
- klasični nepovratni ventili,
- nepovratni ventili sa hidrauličkim upravljanjem,
- naizmenični nepovratni ventili,
- dvostrani nepovratni ventili i
- kočioni ventili.

Kod nepovratnih ventila karakteristični kontakti koji su od interesa za ovu analizu jesu sledeći:

1. Kontakt po **liniji** (slika 5.18 a-1) **ili površini** - slika 5.18 a-2 (ravanskog ili sfernog tipa), između konusnog klipa (u nekim konstrukcijama ventila umesto konusnog klipa može da bude i sfera) i sedišne površine u telu ventila; kontakt po površini (cilindričnog tipa) kada se konusni ili sferni zaptivni element gura cilindričnim klipom (primer nepovratnog ventila sa hidrauličkim upravljanjem ili dvostrukog nepovratnog ventila), slika 5.18 b.



a) Nepovratni ventil sa radnim elementom u obliku konusnog klipa – kontakt po liniji (1 – Eaton Vickers), odnosno površini (2 – Parker Hannifin) između klipa i dosedne površine;



1)

2)

b) Nepovratni ventil hidraulički upravljani sa radnim elementom u obliku cilindričnog i konusnog klipa – kontakt po površini (1 – Eaton Vickers), odnosno površini (2 – Parker Hannifin) između klipa i dosedne površine;

Slika 5.18 Prikaz kontakata radnih elemenata kod različitih konstrukcionih izvedbi nepovratnog ventila.

Klip i sedište u kontaktu razdvajaju strane različitih pritisaka i sa stanovišta veka korišćenja nepovratnog ventila predstavljaju ključno kritično mesto. Za vreme zatvaranja ventila konusni klip se kreće prema dosednoj prstenastoj površini brzinom koja zavisi od veličine sile pritiska koji vlada na izlaznoj strani ventila i količine upravljačkog ulja. U momentu kontakta površine klipa i dosednog prstena preuzimaju celokupno opterećenje, pa vremenom dolazi do oštećenja. Pored navedenog razloga, ove površine se habaju i zbog zamora materijala i erozije.

U odnosu na posmatrane karakteristične kontaktne parove za nepovratne ventile, tabela 5.10 prikazuje zbirno kakvi kontakti se ostvaruju kod ovog tipa komponenti.

Tabela 5.10 Prikaz vrsta kontakata za karakteristične kontaktne parove kod nepovratnog ventila.

Vrsta kontakta		Ukupan broj u odnosu na posmatrane slučajeve	
Kontakt po površini	ravanski kontakt	1	3
	sferni kontakt	1	
	cilindrični kontakt	1	
Kontakt po liniji		1	
Kontakt po tački		0	

5.4 Analiza zastupljenosti pojedinih tipova kontakata

Posmatrajući prethodno prikazane primere, u odnosu na vrstu kontakta između dodirnih površina radnih elemenata hidrauličkih komponenti, može da se uradi analiza zastupljenosti određenih tipova kontakata.

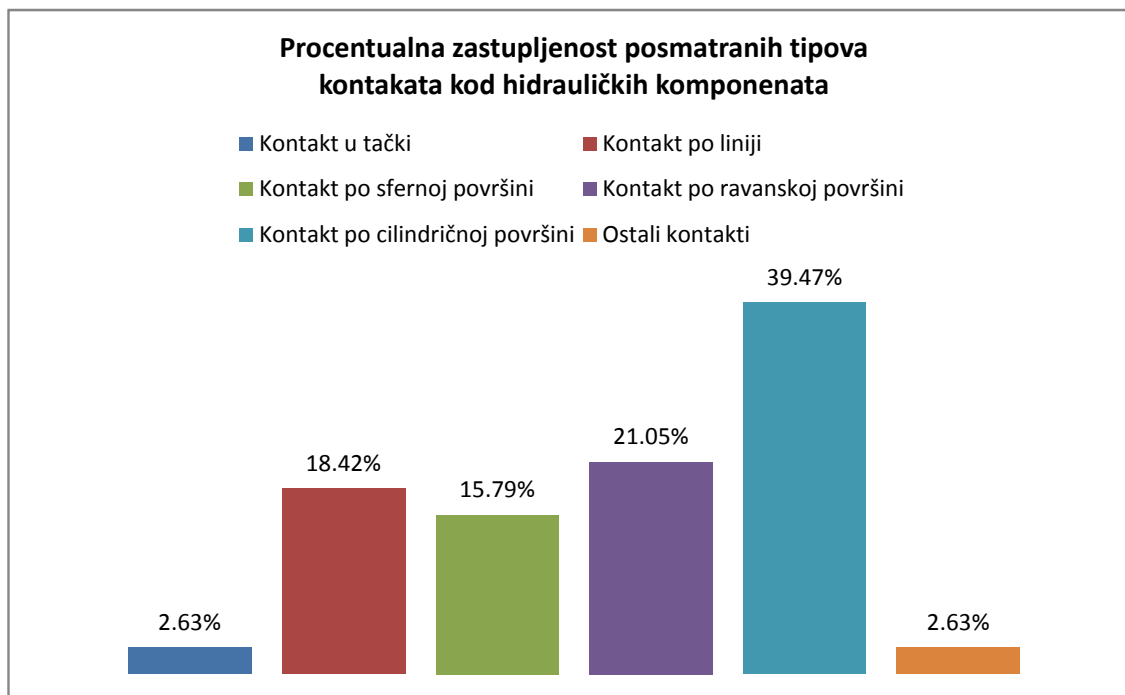
Prema, do sada razmatranim primerima, kontakti između tribo-parova u sklopu hidrauličkih komponenti mogu da se razlikuju kontakti po:

- tački,
- liniji i
- površini (ravanske kontaktne površine, cilindrične kontaktne površine, sferne kontaktne površine i ostale koje su zastupljene kod pojedinih komponenata – kružni luk, deo sfere, itd.),

a rezultati uporedne analize su dati u tabeli 5.11 i dijagramu prikazanom na slici 5.19.

Tabela 5.11 Prikaz vrsta kontakata kod hidrauličkih komponenata.

Vrsta hidrauličke komponente	Kontakt u tački	Kontakt po liniji	Kontakt po površini			
			sferni kontakt	ravanski kontakt	cilindrični kontakt	ostali
Pumpa / Motor	1	4	3	5	8	1
Cilindar	/	/	/	/	2	/
Razvodni ventili	/	1	1	1	1	/
Ventili pritiska	/	1	1	1	1	/
Ventili protoka	/	/	/	/	2	/
Nepovratni ventili	/	1	1	1	1	/
Σ	1	7	6	8	15	1



Slika 5.19 Prikaz zastupljenosti pojedinih tipova kontakata kod hidrauličkih komponenata.

Kao što se da videti iz ove uporedne analize, od ukupnog broja posmatranih tipova kontakata, najveći broj predstavljaju kontakti parova po cilindričnoj površini. Na bazi iskustva i prakse autor je uvideo da veliki broj komponenta koje se inače ugrađuju u hidrauličke sisteme radi upravljanja sistemom, imaju uglavnom cilindričan kontakti par. Ovo ukazuje na jedan veoma bitan zaključak, a to je:

- S obzirom na svoju zastupljenost u komponentama upravljačkog tipa, analiza cilindričnih kontaktnih parova i njihov rad, su od veoma velikog značaja za funkcionalnost hidrauličkih sistema, te se stoga dalji tok disertacije odnosi na posmatranje samo cilindričnih kontaktnih parova.

Dakle, u nastavku disertacije će cilindrični kontakti parovi biti detaljnije razmatrani sa aspekta konstrukcije, veličine radijalnog zazora, zaptivanja, dinamike rada, i habanja, odnosno mogućnosti nastanka otkaza.

5.5 Karakteristike cilindričnog kontaktnog para

Kako je prethodnom analizom potvrđeno, cilindrični kontakti parovi su čest slučaj kod hidrauličkih komponenta, stoga se njihovom detaljnom analizom i određivanjem karakterističnih parametara koji se prate tokom eksploatacije, olakšava dijagnostika i održavanje istih što ima višestruki značaj:

- omogućava se pravovremena reakcija u smislu primene odgovarajuće aktivnosti (podešavanja određenog radnog parametra, zamena dela u otkazu, itd.),
- sprečava se prevremeni otkaz komponente,
- smanjuju troškovi održavanja,
- povećava pouzdanost,
- identifikuju kritični faktori koji utiču na funkcionalnost (konstrukcija, zazor, tvrdoća površina, uravnoteženje dinamičkih sila, brzina kretanja, vrednost trenja, itd.).

Kod različitih komponenta, cilindrični kontakti parovi imaju različite uslove rada (različite vrednosti pritiska i protoka kroz komponentu, različite brzine kretanja klipa, različite načine pomeranja – aktiviranja klipa, različite vrednosti površinskih tvrdoća u kontaktu, različite vrednosti radijalnih i aksijalnih zazora, itd.), ali se uglavnom kreću (translatorno) i troše (habaju) na isti način (delimično usled direktnog kontakta klipa sa cilindrom – kada dolazi do cepanja mazivog filma – i uglavnom posredstvom delovanja čvrstih čestica koje uđu u zazor između klipa i cilindra).

Konstrukcija klipa. Kod kontaktnog para klip – cilindar, klip je taj koji se kreće i koji može da bude različitih konstrukcija. Na slici 5.20 se daje nekoliko različitih konstrukcija klipa, karakterističnih za hidrauličke komponente.



a) Klipovi ručno upravljanih razvodnih ventila;



b) Klipovi klasičnih razvodnih ventila;



c) Klipovi proporcionalnih razvodnih ventila;



d) Klip ventila za regulaciju protoka;



e) Klipovi i konstrukcija logičkih ventila (logički raspodjeljivač protoka, logički nepovratni sa

hidrauličkim upravljanjem, logički razvodni ventil);



f) Klipovi klipno-aksijalne pumpe/motora;



g) Klipovi klipno-radijalne pumpe/motora;



h) Klipovi hidrauličkih cilindara (standardni klip sa klipnjačom – levo, plunžer – desno);

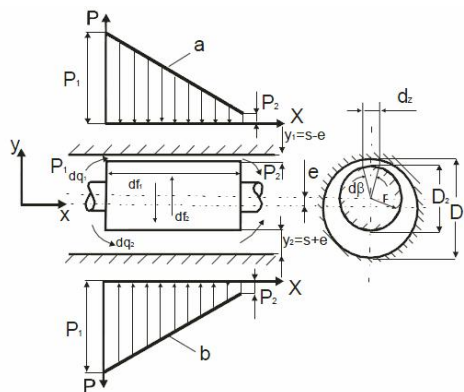
Slika 5.20 *Konstrukcije varijante radnih elemenata komponenata sa cilindričnim kontaktnim parom.*

Konstrukcija klipa zavisi od funkcije koju klip obavlja u sklopu, zatim radnih sila i temperaturnih opterećenja koje podnosi tokom eksploatacije. Kvalitet obrade kliznih površina klipa i cilindra je na veoma visokom nivou. Za obradu ovih površina uglavnom se koriste postupci mašinske obrade kao što su fino brušenje, honovanje i lepovanje (u opsegu od N6 do N3).

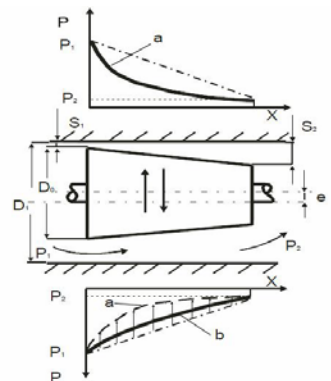
Da bi se eliminisala pojava ekscentriciteta (koja ima značajnog uticaja na zapreminske gubitke), odnosno stabilizovala koaksijalna pozicija klipa i cilindra tokom dinamičkog rada komponenti, često se na klipovima izrađuju radijalni žlebovi ili divergentni, odnosno

konvergentni profili klipnih površina. Osim povećanja stabilnosti, primena ovih rešenja obezbeđuje:

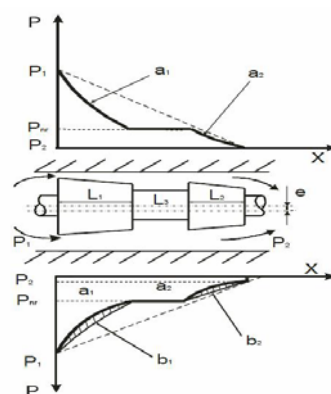
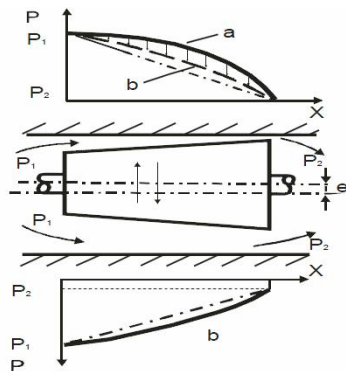
- smanjenje kontaktne površine na klipu i do 40%, u odnosu na staru konstrukciju klipova koje uglavnom nisu imale žlebove,
- smanjenje frikcionih sila zbog kojih dolazi do stvaranja toplote i uticaja na tačnost pozicioniranja posredstvom sve sofisticiranijih elektro-magnetnih, elektro-mehaničkih i dr. sistema za pozicioniranje,
- smanjenje trošenja kontaktnih površina i time povećanja zazora između klipa i tela ventila što kasnije ima za posledicu povećanje zapreminskih gubitaka usled povećanog proticanja fluida kroz zatore,
- izradom žlebova, smanjuje se masa klipa, a time i inercijalna sila, čime se poboljšava kontrola istog pomoću elektromagneta (bilo da je proporcionalni ili servo-elektromagnet u pitanju, njegov histerezis se ovim rešenjem smanjuje),
- žlebovi doprinose boljem hlađenju sklopa, ali i ispiranju taloga finih čestica koji mogu da se nagomilaju u zazoru i izazovu blokadu kretanja,
- izradom žlebova uravnotežuju se radijalne sile i time obezbeđuje ravnomerna raspodela sila koje deluju na površinu klipa i tela ventila u toku njegovog rada (slika 5.21).



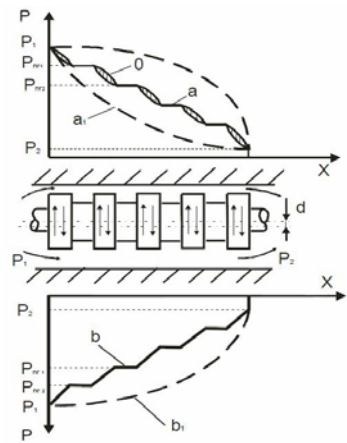
a) Klasičan klip;



b) Klip sa divergirajućom površinom;

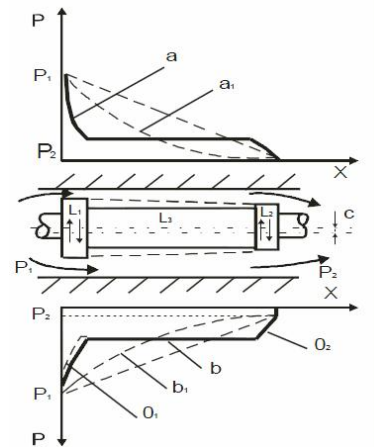


c) Klip sa konvergirajućom površinom;



e) Klip sa radijalnim žlebovima;

d) Klip sa dvostrukom divergirajućom površinom;



f) Klip sa jednim žlebom i različitim prečnicima prstenova;

Slika 5.21 Prikaz različitih varijanti konstrukcija klipa razvodnog ventila sa odgovarajućom raspodelom pritiska duž kontaktnih površina klipa [101].

Usled neizbalansiranih sila prilikom proticanja fluida kroz komponentu i zazore unutar iste, dolazi do zakretanja klipa unutar cilindra što ima za posledicu povećanje zapreminskih gubitaka, zatim dolazi do direktnog kontakta dodirnih površina pokretnog i nepokretnog elementa, do povećanja trenja, ulaska većeg broja čvrstih čestica u zazor, a u nekim ekstremnim situacijama i do zaglavlivanja (mehaničke blokade), o čemu je bilo reči u poglavlju 3.

Aksijalni i radijalni zazori u sklopu. Pored konstrukcije radnih elemenata, značajne karakteristike su i veličine aksijalnih i radijalnih zazora. Postojanje radijalnih zazora je neophodno kako bi se obezbedila pokretljivost elemenata u cilju vršenja radne funkcije, ali sa druge strane, veličine zazora utiču na vrednosti zapreminskih gubitaka, odnosno isticanja ulja iz zona visokog u zone niskog pritiska. Ovo je karakteristično za sklopove hidrauličkih komponenata, gde se na taj način vrši beskontaktno zaptivanje usklađivanjem odnosa potrebne veličine radijalnog i dužine aksijalnog (preklapa) zazora. Veličina radijalnog zazora i dužina aksijalnog zazora kod komponenata sa beskontaktnim zaptivanjem zavisi od nekoliko faktora:

- vrste komponente – konstrukcije komponente,
- shvatanja konstruktora i njegove konstrukcione koncepcije – komponente istog tipa i iste nazivne veličine od različitih proizvođača, često se razlikuju u veličini zazora i dužini preklapanja radnih elemenata komponente,
- radnog protoka – komponente viših protoka fluida, često su sa većim zazorom,
- radnog pritiska – u zavisnosti od visine pritiska, konstrukciono se definišu različite vrednosti zazora,

- dimenzije komponente – komponente čiji su sklopovi elemenata većih prečnika imaju veće zazore (do određene mere),
- uslova rada i upotrebe komponente – komponente koje treba tačnije da regulišu rad nekog sistema imaju manje zazore (proporcionalne i servo komponente),
- godišta proizvodnje – komponente starijih generacija, su sa nešto većim zazorima u odnosu na novije.

U zavisnosti od prethodno navedenih faktora, problematika vezana za definisanje tolerantnog područja u odnosu na čvrste čestice prisutne u radnom fluidu, veoma je složena, jer neke komponente koje su po konstrukciji, radnom pritisku i protoku jednake, ne moraju da imaju iste veličine zazora, odnosno tolerantna područja. Neke od vrednosti radijalnih zazora, karakterističnih za komponente sa cilindričnim kontaktnim parom su date u tabeli 5.12.

Minimalni zazori mogu da se dostignu samo najvišim kvalitetom obrade kontaktnih površina i već pomenutim tehnološkim postupcima kao što su fino brušenje, honovanje, lepovanje i poliranje. Danas se serijski proizvode sklopovi sa tolerancijama međusobno pokretnih delova od samo nekoliko mikrona. To predstavlja vrhunski domet tehnike, ali i visoko iskušenje za održavanje kada tako precizna tehnika počne da otkazuje.

Tabela 5.12 Vrednosti zazora kod hidrauličkih komponenata sa cilindričnim kontaktnim parom.

Komponenta – zazor	Zazor [μm]		
	MOOG [81]	Bosch Rexroth [36]	Cetop RP 92H [36]
Klipna pumpa ili motor – (klip-čaura) radijalni zazor	5 – 40	5 – 40	–
Razvodni ventili – (klip-čaura) radijalni zazor	5 – 25	–	–
Servoventili – (klip – čaura) radijalni zazor	1 – 4	5 – 8	3 – 8
Regulacioni ventili (pritiska i protoka) – (klip – čaura) radijalni zazor	1 – 23	–	3 – 8
Hidraulički cilindri – (klip/klipnjača – čaura) radijalni zazor	50 – 250	–	–

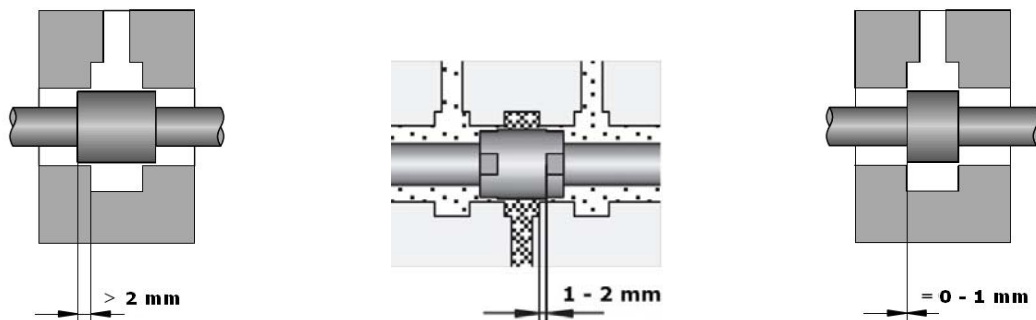
Pored radijalnog zazora, naravno, bitna je i dužina aksijalnog zazora, gde se razlikuju tri grupe aksijalnih zazora [55]:

1. dugi preklopi: sklopovi klip-cilindar kod klipno-aksijalne ili radijalne pumpe/motora, razvodnih ventila (aksijalni preklopi od 2 mm pa naviše),
2. kratki preklopi: sklopovi klip-cilindar klipno-aksijalnih pumpi novije konstrukcije (konstrukcija klipa sa klipnim prstenovima), proporcionalnih ventila (aksijalni preklopi od 1 do 2 mm),

3. nulti preklopi: sklopovi klip-cilindar kod servo-ventila (aksijalni preklopi od 0 do 1 mm).

Kod dugih preklopa (slika 5.22 a), proticanje fluida je usporeno, a toplota nastala usled trenja proticanja fluida potpuno se prenosi na okolinu (izotermni proces), odnosno radne elemente u kontaktu (klip i telo cilindra). Kod ovog procesa toplota preneti na okolne radne elemente dovodi do njihovog širenja usled toplotne dilatacije, a samim tim i do smanjenja radijalnih zazora. Kod dugih preklopa postoji veća verovatnoća zadržavanja (nagomilavanja) čestica s obzirom da pritisak dužinom zazora značajno opada i ostavlja mogućnost zaostajanja čestica u zazoru. Procesi strujanja fluida kroz duge zapore su dosta dobro obrađeni u dostupnoj literaturi, ali bez uticaja čistoće fluida na intenzitet proticanja kroz zapore.

Kod kratkih aksijalnih zazora (slika 5.22 b i 5.22 c), javlja se brzo proticanje fluida, tako da se generisana toplota u manjem delu prenosi na okolne elemente, a proces se posmatra kao adijabatski. Pretpostavlja se da je gomilanje čestica nešto manje u odnosu na veće dužine preklopa, ali je i dalje značajno u pogledu uticaja na abrazivno ili erozivno habanje površina u kontaktu.



a) Dugi preklop;

b) Kratki preklop;

c) Nulti preklop;

Slika 5.22 Prikaz primene različitih veličina aksijalnih zazora kod hidrauličkih ventila.

Usled oštećenja kontrolnih ivica (erozivnim i abrazivnim habanjem) kod ventila sa kratkim i nultim preklopom, ventil gubi upravljačku funkciju. Tada se mora izvršiti zamena klipa ili koristiti aktivni – adaptibilni algoritmi upravljanja ventilom što značajno utiče na pouzdanost i kompleksnost upravljačkog (elektro) dela, i u krajnjem slučaju cenu komponente.

Za razliku od eksternih, unutrašnja (interna) isticanja, koja se javljaju u hidrauličkim komponentama, ne pokazuju spolja vidljive znake, zbog čega ih je teže uočiti, a kada pređu određenu granicu, značajno utiču na funkcionisanje celokupnog sistema. Prevelika isticanja redukuju ukupni stepen efikasnosti sistema, smanjenjem zapreminskog koeficijenta iskorišćenja komponenta kao što su pumpe, motori, cilindri, ventili i pojačivači.

Nezavisno od mesta gde se javljaju, interna isticanja imaju za posledicu gubitak fluida pod pritiskom koji:

- predstavlja neiskorišćen rad sistema,

- podrazumeva transformaciju hidrauličke u toplotnu energiju što ima za posledicu povećanje temperature sistema,
- podrazumeva povišene troškove rada pumpe kako bi se nadoknadili gubici,
- ima za posledicu smanjenje brzine reakcije (odziva) radnih elemenata aktuatora,
- uzrokuje sporo kretanje klipa cilindra i onemogućuje držanje pozicije,
- smanjuje tačnost i preciznost (servo i proporcionalnih) hidrauličkih sistema,
- u ekstremnim slučajevima onemogućava ni postizanje projektovane radne sile, ni radne brzine itd.

Isticanja kroz zazole. Vrednosti radijalnog (s) i aksijalnog zazora (L), konstrukcija klipa, radni pritisak, protok, i viskozitet hidrauličkog radnog fluida (η) imaju značajan uticaj na vrednosti isticanja fluida kroz zazole, a samim tim i stepen zapreminskog iskorišćenja hidrauličkih komponenti. Opšte poznati izraz za izračunavanje proticanja fluida kroz prstenaste zazole [62], kada se zanemaruje relativna brzina klipa ($v_k = 0$), glasi:

$$Q = v_{sr} \cdot A_p = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot L}, \quad (5.1)$$

gde je:

v_{sr} – srednja brzina strujanja fluida u zazoru između klipa i cilindra,

A_p – površina zazora,

d – srednji prečnik prstenastog zazora pri koncentričnom položaju klipa i

$s = \frac{d_c - d_k}{2}$ – nominalni radijalni zazor, gde je d_c – prečnik cilindra, a d_k – prečnik klipa.

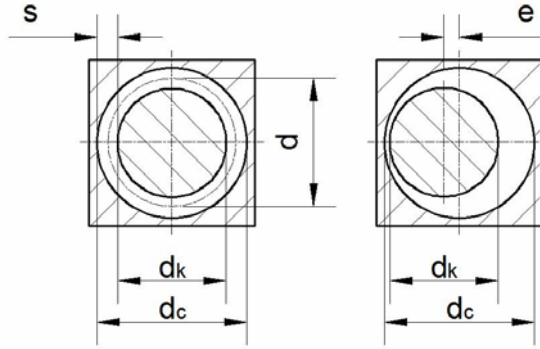
U slučaju da je položaj klipa ekscentričan u odnosu na cilindar (slika 5.23), proticanje fluida kroz zazole se povećava, a za proračunavanje koristi izraz (5.2).

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \cdot \varepsilon^2 \right), \quad (5.2)$$

gde je:

$\varepsilon = \frac{e}{s}$ – relativni ekcentricitet i

e – veličina ekscentriciteta.



Slika 5.23 Pozicije klipa u cilindru i karakteristični parametri.

Pri maksimalnoj veličini ekscentriciteta vrednost e_{max} biće jednaka radijalnom zazoru s , a protok Q_{max} iznosiće:

$$Q_{e_{max}} = \frac{2,5 \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \quad (5.3)$$

gde je:

$Q_{e_{max}}$ – protok tečnosti kroz zazor pri maksimalnoj veličini ekscentriciteta,

pri čemu treba reći i da je uticaj ekscentriciteta zazora na protok fluida pri turbulentnom strujanju manji nego pri laminarnom strujanju [7]. Takođe, treba napomenuti da je kod pojave ekscentriciteta između klipa i cilindra omogućen i prolaz većih čestica, koje posledično povećavaju habanje kontaktnih površina ili uzrokuju zaglavljivanje (tj. mehaničku blokadu), čime se dodatno povećava i vrednost ekscentriciteta. Pošto pri proticanju tečnosti kroz zazor, gradijent pritiska ne ostaje konstantan po njegovoj dužini, formula (5.1) može da se izrazi i na sledeći način:

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot s^3 \cdot (1 - e^{-b \cdot p})}{12 \cdot \eta \cdot L \cdot b} \quad (5.4)$$

gde je:

e – osnova prirodnog logaritma,

b – eksperimentalno određen koeficijent koji uzima u obzir promenu viskoziteta u zavisnosti od pritiska (praktično $b = (1,2 \div 1,9) \cdot 10^{-4}$)

pri tome je:

$$\lg e_{\eta_0}^{\eta} = b \cdot p,$$

gde su η i η_0 – koeficijenti dinamičkog viskoziteta pri atmosferskom i zadatom pritisku.

Pri nekom visokom pritisku, član $e^{-b \cdot p}$ postaje beskonačno mala veličina, a izraz $(1 - e^{-b \cdot p})$ konstantna veličina jednaka recipročnoj vrednosti koeficijenta b .

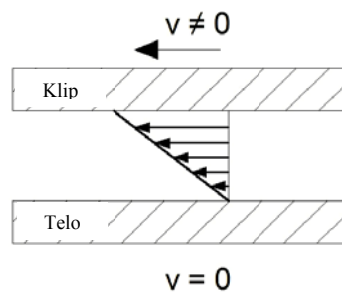
Kada se uzima u obzir i brzina kretanja klipa (v_k), izraz za računanje protoka fluida kroz zazor glasi [2]:

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \pm \frac{d \cdot \pi \cdot v_k \cdot s}{2} \quad (5.5)$$

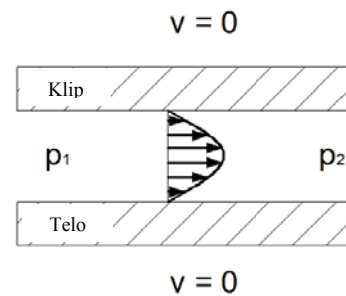
gde znak (+) važi za slučaj kada se kretanje ploče poklapa sa pravcem kretanja tečnosti, a znak (-) u obrnutom slučaju.

U zavisnosti od kretanja ili mirovanja klipa, dolazi do pojave Kuetovog ili/i Poazjeovog modela proticanja fluida između klipa i cilindra koji se superponiraju (slika 5.24). Ovi modeli veoma jasno opisuju proticanje fluida i raspodelu viskoznih i pritisnih sila u fluidu, naravno uz određene pretpostavke: da postoji saosnost cilindra i klipa, da fluid nije kompresibilan, da je kretanje fluida uzduž ose klipa, da je vrednost viskoziteta konstantna, itd.

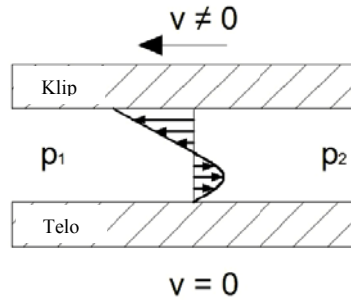
U slučaju smanjenja veličine zazora (što bi hipotetički bilo najpoželjnije za komponente visokog pritiska, $p > 200$ bar), vrednost protoka po Poazjeu znatno opada, a pad pritiska postaje zanemarljivo mali. Međutim, veličina zazora ne sme da bude previše mala, iz razloga što usled velikih pritisnih sila i dinamičkih opterećenja, dolazi do ekstremnog opterećenja uljnog filma koji razdvaja kontaktne površine. Capanje uljnog filma usled visokog opterećenja, dozvoljava direktan kontakt radnih površina što može da ima katastrofalne posledice (pojavu adhezionog mehanizma habanja). Drugi razlog zbog kojeg nije poželjno da vrednosti zazora budu male, jeste što se u tom slučaju koriste postupci mašinske obrade koji su veoma skupi, pa se takav način izrade ograničava, samo za potrebe servo komponenti. Treći razlog zašto nije poželjno raditi komponente sa malim zazorima, jeste potreba da se radni fluid održava u besprekorno čistom stanju tokom eksploatacije što ima za posledicu veoma velike troškove održavanja. Dakle, vrednost veličine zazora predstavlja kompromis velikog broja uslova.



a) Kuetov protok;



b) Poazjev protok ($p_1 > p_2$);



c) *Kombinovani protok;*

Slika 5.24 *Različite varijante proticanja fluida kroz zazor.*

Kod određenih vrednosti viskoziteta radnog fluida, radnog pritiska, veličine zahtevanog protoka se javlja situacija da u slučaju kada je prisutno kombinovano strujanje fluida kroz zazor kod klipnih pumpi, veličine zazora idu i do $40 \mu\text{m}$, a da gubici protoka nisu veliki. Ovo je samo rezultat pravilnog određivanja veličine zazora, na osnovu radnih uslova pumpe i izjednačavanja dejstva viskoznih i pritisnih sila u fluidu (superponiranje Kuetovog i Poazjeovog protoka).

6 Eksperimentalno istraživanje

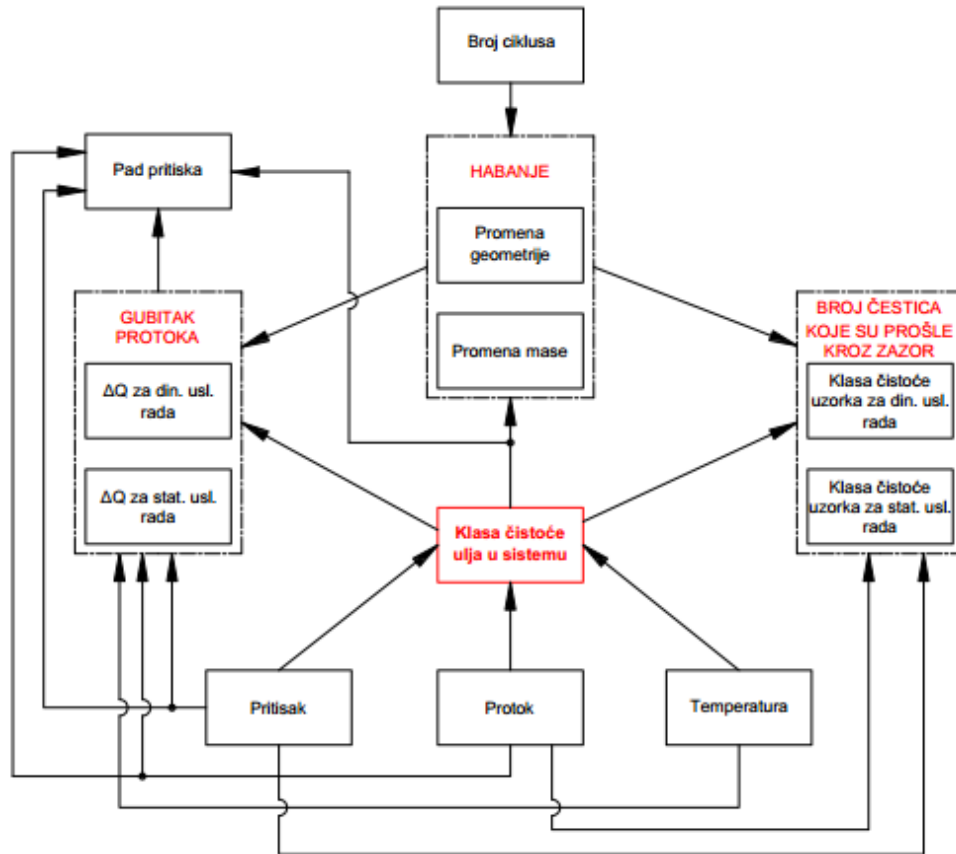
U ovom poglavlju je dat opis eksperimentalnog istraživanja i prikaz dobijenih rezultata. Razmatranjem teorijskih podloga, trendova razvoja u hidraulici kao i rezultata eksperimenta, potvrđeno je da čistoća radnog fluida može značajno da utiče na radne performanse i životni vek hidrauličkih komponenata i sistema. Činjenica je da još uvek ne postoji univerzalan način određivanja potrebne klase čistoće za određenu komponentu, ali da postoji inicijativa da se takav standard razvije kako bi se proizvođači i potrebe korisnika hidrauličke opreme usaglasili. Takođe, proučavajući naučnu i stručnu literaturu je utvrđeno da je veoma teško predvideti stanje pohabanosti radnih elemenata u sklopu hidrauličkih komponenata, s obzirom na postojanje velikog broja uticajnih faktora i dinamike rada hidrauličkog sistema. Stoga se u praksi pribegava korišćenju raznih tehnika praćenja (monitoringa) stanja sistema, odnosno trenda promene neke karakteristike sistema, kako bi se kritične situacije predvidele i na vreme preduzele odgovarajuće mere. U sprovedenoj analizi u prethodnom poglavlju, zaključeno je da su kod hidrauličkih komponenata najprisutniji kontakti cilindričnih parova i kao što je već ranije rečeno, osim što su najčešći, cilindrični kontakti su veoma zastupljeni kod upravljačko-regulacionih hidrauličkih komponenata. Od upravljačko-regulacionog tipa komponenata koje su u hidrauličkim sistemima neuporedivo brojnije, nego bilo koje komponente drugog tipa, značajno zavise ukupne performanse sistema. Stoga, u kontekstu zavisnosti celokupne efikasnosti hidrauličkog sistema od ponašanja cilindričnih parova u sklopu upravljačko-regulacionih komponenti, istraživanje uticaja nečistoća na ponašanje cilindričnih parova ima veliki značaj. Zbog pomenutih razloga za predmet posmatranja u eksperimentu su izabrani elementi sa cilindričnim površinskim kontaktom (tj. klip – cilindar kontaktni par). Osim prikazanih rezultata eksperimentalnog ispitivanja, u ovom poglavlju je data i analiza dobijenih rezultata, kao i kritički osvrt na primenenu metodologiju u izvođenju eksperimenta.

6.1 Eksperimentalna instalacija

Instalacija korišćena u eksperimentu, simulira realne uslove rada hidrauličkog sistema. Instalacija je projektovana prema konceptualnom modelu prikazanom na slici 6.1, a konstruisanom prema autorovom shvatanju problematike. Sve komponente ugrađene u sistem su standardne i usvojene u cilju obezbeđenja vrednosti radnih parametara predviđenih planom eksperimenta.

Parametre koji su od posebnog značaja za ovu analizu, predstavljaju vrednosti veličine radijalnog zazora, vrednosti izmerenih klasa čistoće uzoraka ulja u otkapu (uzetih za statičke i dinamičke uslove rada), vrednosti veličine proticanja fluida kroz radijalni zazor (u statičkim i dinamičkim uslovima rada), i vrednosti pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil. Prema modelu prikazanom na slici 6.1, pomenuti parametri se nalaze u okviru tri grupe, tj. grupa

parametara “GUBITAK PROTOKA”, grupa parametara “HABANJE” i grupa parametara “BROJ ČESTICA KOJE SU PROŠLE KROZ ZAZOR”. Radni parametri kao što su pritisak protok i temperatura predstavljaju grupu parametara koji imaju najveći uticaj na ponašanje onih koji su predmet posmatranja, te su stoga neizostavni u modelu.

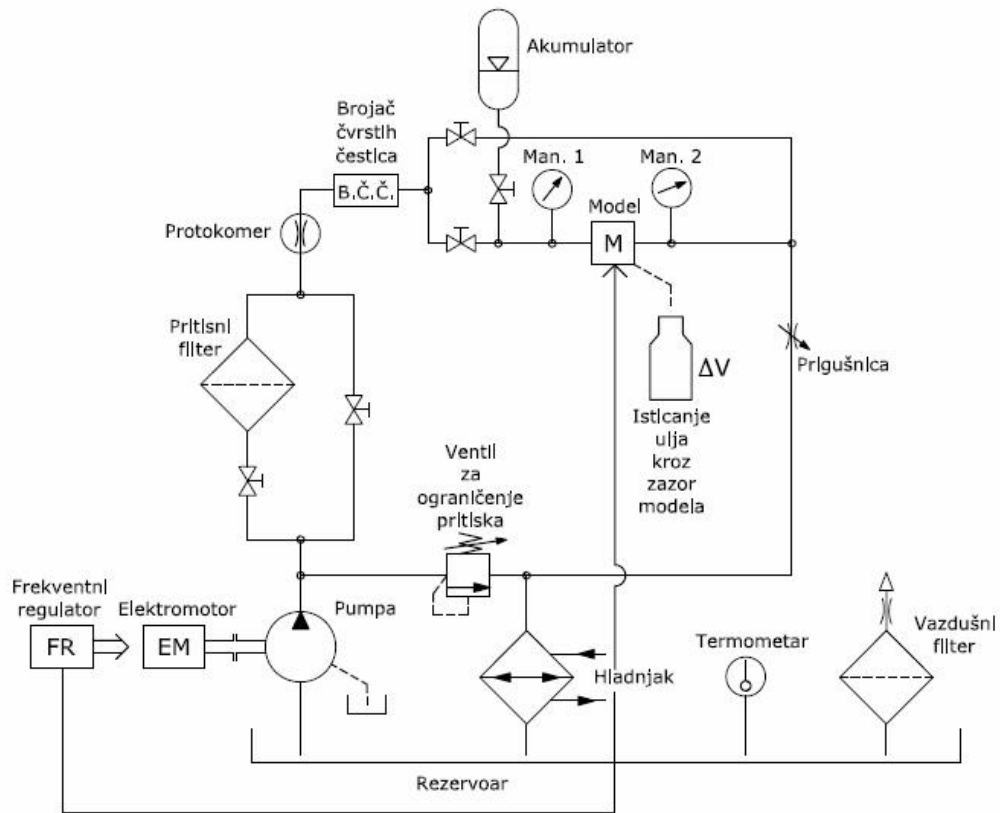


Slika 6.1 Konceptualni model eksperimenta.

Na slici 6.2 je dat šematski prikaz eksperimentalne instalacije. Koncept instalacije je baziran na principu otvorenog hidrauličkog kola, kroz koje cirkuliše ulje unapred definisanog stepena čistoće. Hidraulički agregat se sastoji od rezervoara zapremine $V = 90$ litara, zupčaste pumpe sa unutrašnjim ozubljenjem specifičnog kapaciteta $q = 6.5 \text{ cm}^3$, pritiskog filtera apsolutne finoće filtriranja sa beta faktorom $\beta_5 = 200$ i izmenjivača toplote za održavanje potrebne radne temperature ulja. Osim pomenutih komponenata, u hidraulički sistem ugrađeni su:

- prigušnica, pomoću koje se podešava radna vrednost pritiska u sistemu,
- sigurnosni ventil kojim se ograničava maksimalna vrednost radnog pritiska i
- akumulator zapremine $V = 0.5$ litara i pritiska gasa do $p_0 = 120$ bar, kojim se amortizuju oscilacije radnog pritiska u sistemu.

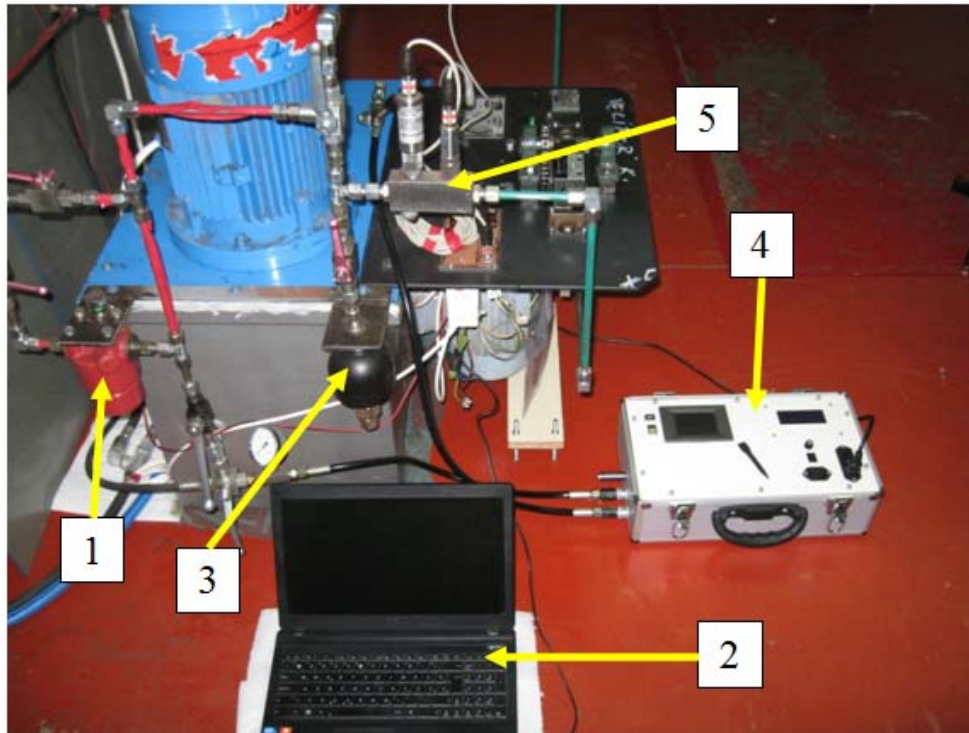
Za izvođenje eksperimenta se koristi hidrauličko ulje na mineralnoj baznoj osnovi viskozne gradacije ISO VG 46 i kvalitetnog nivoa HM. Slike 6.3 i 6.4 prikazuju eksperimentalnu instalaciju u laboratoriji.



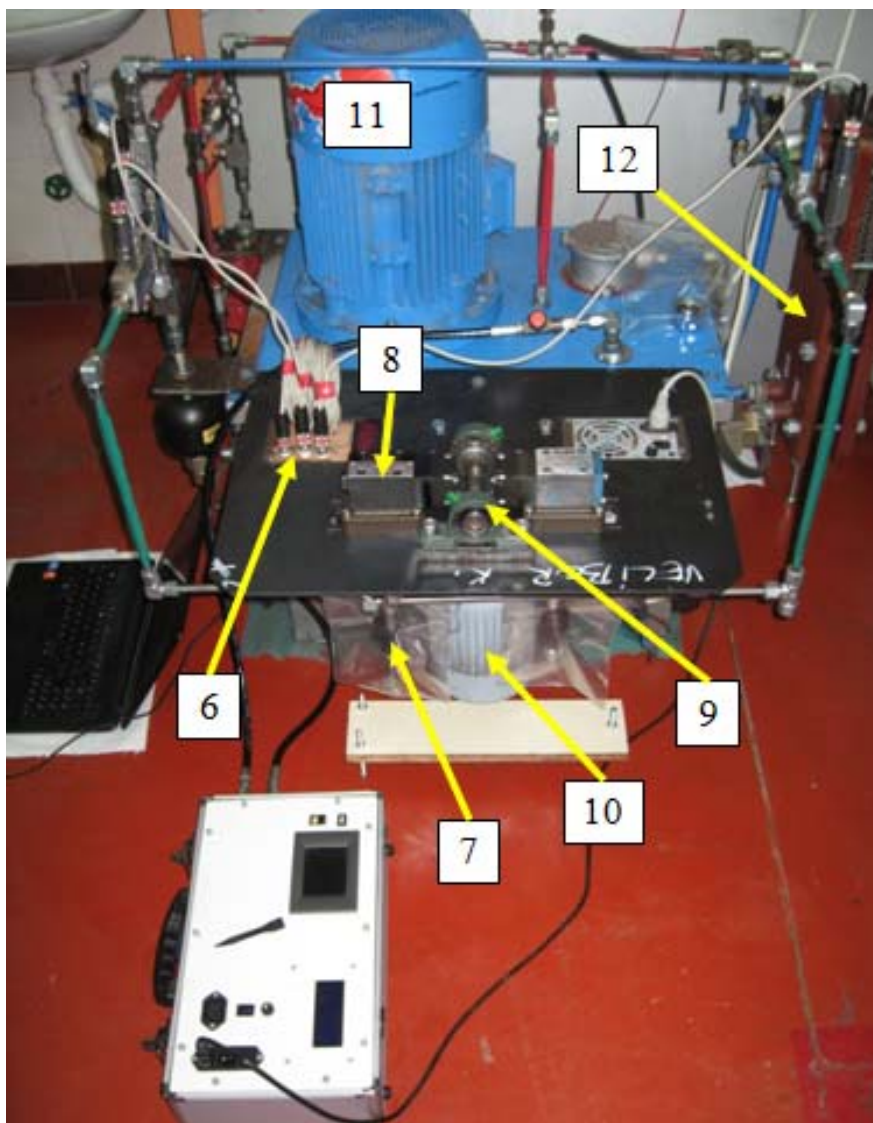
Slika 6.2 Šema eksperimentalne instalacije.

Hidrauličku pumpu pogoni elektromotor snage $P = 3 \text{ kW}$, čiji broj obrtaja izlaznog vratila, može da se po potrebi reguliše uz pomoć frekventnog regulatora. Na ovaj način može da se obezbedi fino podešavanje vrednosti radnog protoka u hidrauličkom sistemu. Zupčasta pumpa sa unutrašnjim ozubljenjem, potiskuje fluid ka ispitivanom modelu, pri čemu fluid prethodno prolazi kroz senzor koji meri kontaminaciju radnog fluida u sistemu. U slučaju da je kontaminacija preko dozvoljene granice, u funkciju se stavlja instalirani pritisni filter propisane finoće filtriranja, sve dok se nivo kontaminacije ne dovede u granice tolerancije. Sa šeme na slici 6.2, može da se primeti da u tom delu sistema postoje dva paralelna voda, gde su na oba instalirane slavine koje sprečavaju ili omogućavaju proticanje fluida dalje u sistem. Pre ispitivanog modela, u sistem je ugrađen akumulator čiji je cilj da amortizuje nagle skokove radnog pritiska (hidrauličke udare) u sistemu koji su posledica promene radnih položaja razvodnog ventila (modela). Pored akumulatora, ispred i iza modela instalirani su senzori pritiska koji se koriste u svrhu merenja veličine pada pritiska pri proticanju fluida kroz model. Pri povećanim zapreminskim gubicima (usled proticanja fluida kroz konstrukcione zatore unutar modela) dolazi do porasta pada pritiska i transformacije hidrauličke energije u toplotnu. Ispitivani model ima i jedan cevni izvod koji se koristi za prikupljanje fluida koji istekne kroz zatore i predstavlja zapreminski gubitak. Uzeti uzorak daje indirektno

informacije o nivou pohabanosti radnih elemenata unutar razvodnog ventila (modela) i broja čvrstih čestica koje prođu kroz zazor. Nakon ispitivanog modela u instalaciji se nalazi prigušnica kojom se paralelno sa podešavanjem ventila za ograničenje pritiska (odmah posle pumpe) definiše vrednost radnog pritiska u sistemu. Nakon prigušnice fluid se potiskuje ka vodom hlađenom izmenjivaču toplote koji se aktivira u slučaju porasta temperature radnog fluida preko tolerisane vrednosti.



Slika 6.3 Izgled eksperimentalne instalacije u laboratoriji - 1: 1 – pritisni filter; 2 – računar za skladištenje podataka i podešavanje termoregulatora; 3 – hidroakumulator; 4 – uređaj za merenje klase čistoće hidrauličkog ulja (on-line); 5 – monoblok sa mernim senzorima.

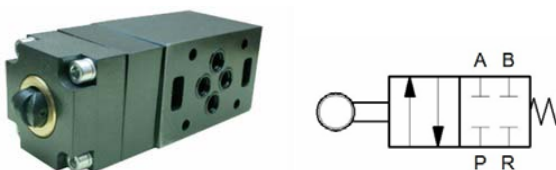


Slika 6.4 Izgled eksperimentalne instalacije u laboratoriji - 2: 6 – termoregulator i jedinica za transfer podataka na računar; 7 – slavina za hvatanje uzoraka ulja koje protiče kroz zazoru u ventilu; 8 – ispitivani ventil; 9 – bregasti mehanizam za aktiviranje ventila; 10 – pogonski elektromotor bregastog mehanizma; 11 – pogonski elektromotor hidrauličkog agregata; 12 – izmjenjivač toplote.

6.2 Ispitni model komponente

Kao eksperimentalni model se koristi razvodni ventil 4/2 (proizvođača CAPRONI, koji inače radi ventile po licenci Bosch Rexroth-a), propusne moći $Q =$ do 20 l/min, maksimalnog radnog pritiska $p = 320$ bar i aksijalnog radnog hoda $h = 4$ mm koji se aktivira mehanički pomoću nagaznog rolera. Za potrebe eksperimenta su korišćena tri ventila istih karakteristika tipa RH06164F, čiji je prikaz zajedno sa funkcionalnim simbolom dat na slici 6.5. Svaki od ventila je pojedinačno montiran (na standardnu NO6 podnožnu ploču) i ispitivan na uticaj čvrstih čestica u eksploataciji. Ovde treba napomenuti da se kod klasičnih

razvodnih ventila tehnološki propisani zazor, između klipa i cilindra u telu ventila, fabrički postiže napasivanjem istih, tako da je moguće postojanje razlika u početnim vrednostima zazora među ventilima. Aktiviranje razvodnog ventila se vrši pomoću bregaste osovine (slika 6.4), koja dobija pogon od elektromotora sa reduktorom, preko lančastih prenosnih elemenata. Položaj ose bregastog vratila je postavljen tako da se obezbedi potrebno aksijalno pomeranje radnog elementa – klipa. Broj obrtaja bregaste osovine se može po potrebi, podešavati pomoću frekventnog regulatora, kojim se vrši modulacija frekvencije pogonskog elektromotora.



Slika 6.5 Izgled razvodnog ventila i funkcionalni simbol.

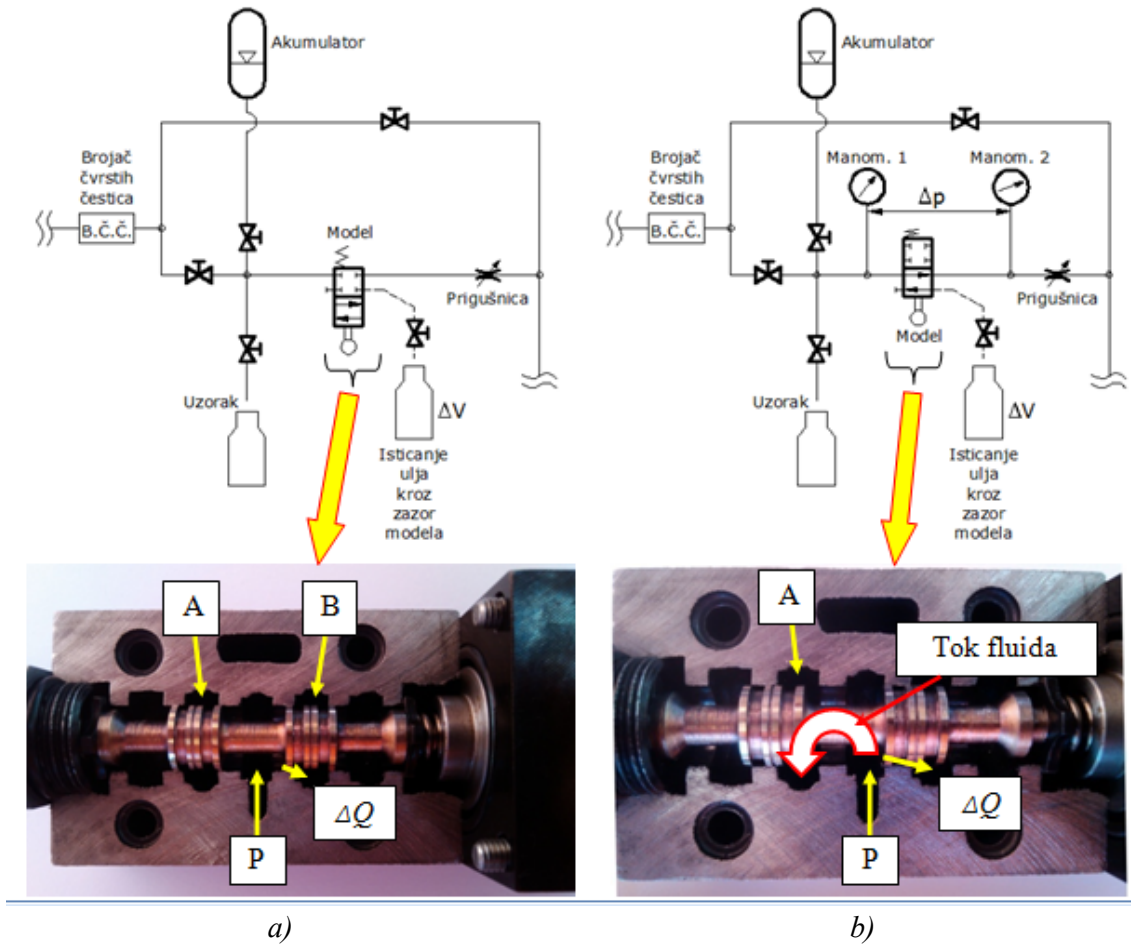
Da bi se jasnije shvatio tok fluida kroz ventil, na slici 6.6 je dat šematski prikaz faza rada ventila u instalaciji.

Sa šematskog prikaza datog na slici 6.6, može se videti da ventil ima dve faze rada:

- faza 1 – neutralni položaj (slika 6.6 a), u kojem su svi priključci blokirani, fluid ne protiče kroz ventil,
- faza 2 – radni položaj (slika 6.6 b), u kojem se omogućava prolaz radnom fluidu kroz ventil od P ka A, koji se kreće ka prigušnici, a potom odlazi u rezervoar.

U neutralnom položaju ventila, svi priključci (P – pritisni vod, R – rasteretni vod, A – radni vod 1, i B – radni vod 2) su blokirani, dok u radnom položaju, fluid protiče od P ka A, a proticanje od B ka R je onemogućeno blindiranjem priključka R. Blindiranje priključka R je urađeno kako bi se onemogućio povratak ulja u rezervoar, a priključak B iskoristio za uzimanje uzorka ulja koje protiče kroz zazor između klipa i tela ventila u pravcu od P ka B vodu.

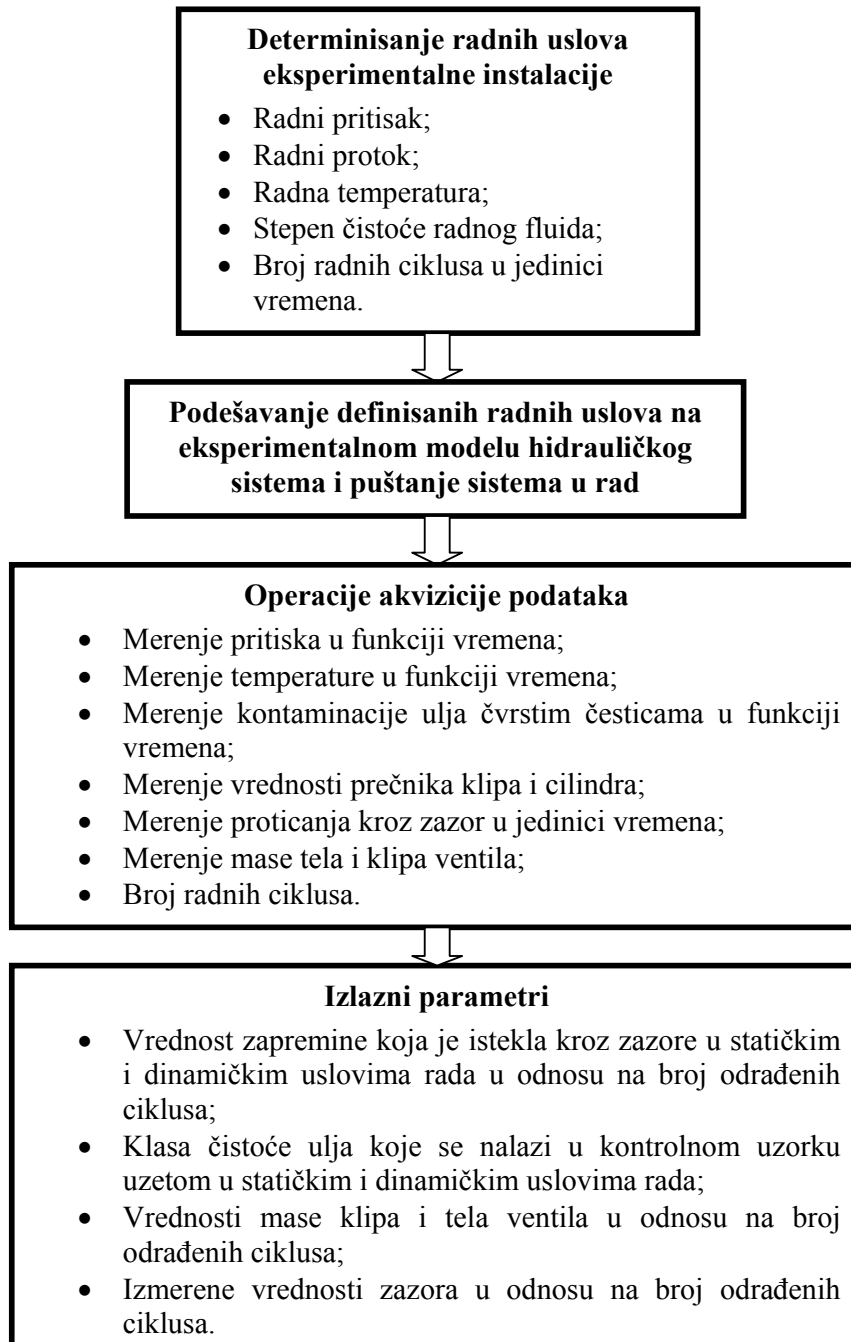
Na priključak B je postavljen cevovodni izvod sa slavinom, kojim se omogućava uzimanje kontrolnog uzorka ulja, koje protekne kroz zapore od pritiskog voda P ka radnom vodu B. Pri uzimanju kontrolnog uzorka meri se količina ulja koja za određeno vreme istekne kroz zazor i time indirektno ukazuje na stepen pohabanosti klipa i cilindra u telu ventila. Takođe, analizom kontrolnog uzorka se utvrđuju veličina i količina čvrstih čestica, koje zajedno sa uljnom masom prođu kroz zazor između klipa i cilindra u telu ventila.



Slika 6.6 Radne faze razvodnog ventila: a) kada je ventil u neutralnom položaju; b) kada je ventil u radnom položaju.

6.3 Procedura eksperimentalnog ispitivanja

Na slici 6.7 je dat redosledni prikaz aktivnosti u okviru procedure eksperimentalnog ispitivanja.



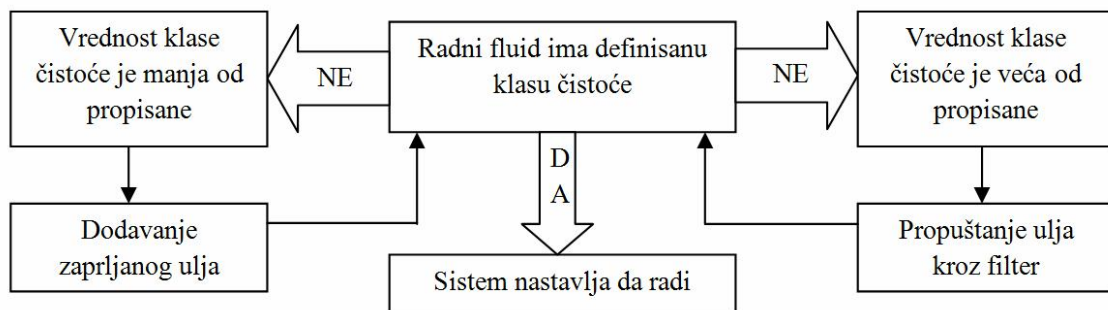
Slika 6.7 Prikaz procedure eksperimentalnog ispitivanja.

6.4 Plan eksperimenta

Eksperimentalno ispitivanje je vršeno za sledeće radne uslove:

- konstantna vrednost protoka,
- konstantna vrednost radnog pritiska,
- konstantna vrednost radne temperature,
- promenljiva vrednost klase čistoće radnog fluida.

Za razliku od ostalih parametara, klasa čistoće radnog fluida se menja (kada se postavlja drugi ventil za ispitivanje) i održava (tokom ispitivanja novo-postavljenog ventila) planski. Pre puštanja sistema u rad, klasa čistoće ulja u rezervoaru (sistemu) prema potrebi se podešava dodavanjem i mešanjem sa zaprljanim industrijskim hidrauličkim uljem ili filtriranjem do potrebnog nivoa. Ulje koje se dodaje je iste viskozitetne gradacije i kvalitetnog nivoa kao ulje u rezervoaru kako se ne bi narušile fizičko-hemijske i eksploatacione karakteristike fluida u sistemu. Tokom sprovođenja eksperimenta podešena klasa čistoće se prati i održava na konstantnom nivou prema algoritmu prikazanom na slici 6.4.1.



Slika 6.8 Prikaz procedure održavanja klase čistoće radnog fluida na potrebnom nivou.

U tabeli 6.1 su date planirane vrednosti eksperimentalnog ispitivanja.

Tabela 6.1 Plan eksperimentalnog ispitivanja.

Razvodni ventil	Vrednost radnog pritiska (bar)	Vrednost radne temperature (°C)	Broj radnih ciklusa	Frekvencija aktivacije ventila (Hz)	Klasa čistoće hidrauličkog ulja (NAS 1638 / ISO 4406/99) za čestice od $\geq 4 \mu\text{m}_{(c)}$
RV1	150	45	1 000 000	1	NAS 11 / ISO 22
RV2					NAS 10 / ISO 21
RV3					NAS 9 / ISO 20

Pošto se izvrši postavljanje razvodnog ventila, na odgovarajuće mesto u instalaciji i startuje hidraulički sistem, vrši se *on-line* merenje i podešava potrebna klasa čistoće ulja prema tabeli 6.1 i algoritmu prikazanom na slici 6.8.

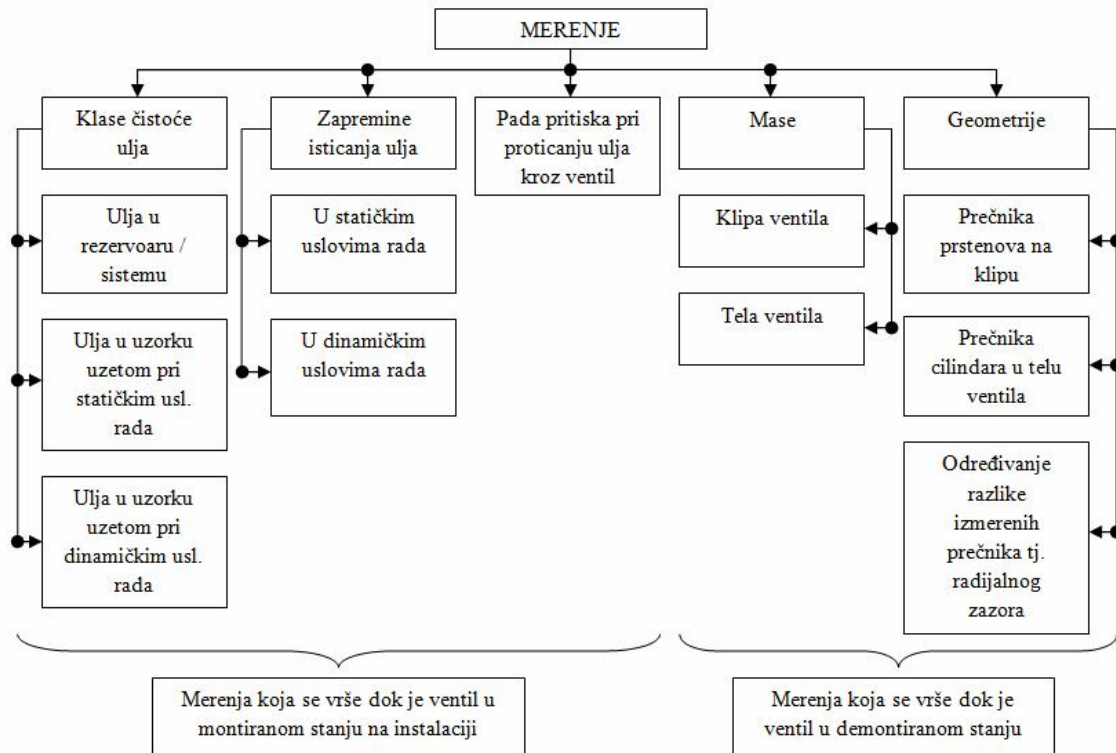
Nakon postizanja odgovarajuće klase čistoće radnog fluida se vrši zagrevanje istog do vrednosti temperature predviđene eksperimentom. Tokom eksperimenta radna temperatura

fluida se kontroliše temperaturnim regulatorom i održava u granicama $45 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ – vrednosti temperature na kojima se uključuje ($44,5 \text{ }^\circ\text{C}$), odnosno gasi ($45,5 \text{ }^\circ\text{C}$) sistem za hlađenje). Inače, temperatura od 45°C je uzeta kao prosek radnih temperatura koje mogu da budu prisutne kod industrijskih hidrauličkih sistema, a koje se uobičajeno kreću u opsegu od $25 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ iako treba reći, da one znaju da budu i znatno niže ili više što zavisi od sredine u kojoj se koristi hidraulička oprema.

Nakon dostizanja radne temperature se vrši podešavanje vrednosti radnog pritiska na potrebnu vrednost. Tokom eksploatacije radni pritisak osciluje kao posledica uključanja / isključenja razvodnog ventila, odnosno pojave pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil. U svrhu minimizacije ovih oscilacija je ugrađen akumulator sa punjenjem gasa na pritisku od 120 bar, što se uklapa u odnos preporučen za izbor akumulatora u ulozi kompenzatora oscilacija tj. $(0,8 - 0,9) * p_r$, gde je p_r vrednost radnog pritiska. Vrednost radnog pritiska u sistemu se obezbeđuje naizmeničnim podešavanjem prigušnice i ventila za ograničenje pritiska.

Nakon podešavanja radne vrednosti pritiska, sistem se pušta u rad sa odgovarajućim brojem radnih ciklusa, tj. brojem uključanja/isključenja razvodnog ventila u jedinici vremena. U svrhu brojanja radnih ciklusa je upotrebljen brojač sa optičkim senzorom.

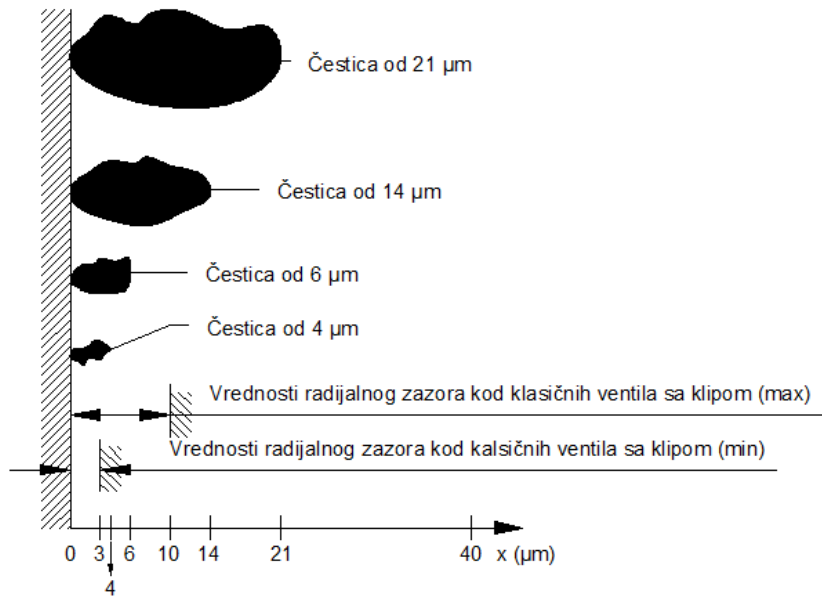
Nakon odrađenog predviđenog broja ciklusa se vrši merenje karakterističnih parametara (slika 6.7 – izlazni parametri) za dinamičke i statičke uslove rada. Dinamičkim uslovima rada se smatraju uslovi pri kojima sistem pod opterećenjem radi u smislu vremenski programiranog aktiviranja i deaktiviranja razvodnog ventila, a statičkim uslovima rada se smatraju uslovi pri kojima sistem takođe radi pod opterećenjem, ali je razvodni ventil neaktivan u smislu mirovanja u neutralnoj ili radnoj poziciji (na slici 6.6 je dat prikaz radne i neutralne pozicije razvodnog ventila). Struktura pomenutih merenja karakterističnih parametara je prikazana na slici 6.9.



Slika 6.9 Struktura merenja karakterističnih parametara tokom eksperimenta.

Nakon što se izvrše sva merenja za koje je neophodno da ventil bude montiran u sistemu, sistem se isključuje iz funkcije i vrši demontaža razvodnog ventila. Pošto se očiste elementi koji se mere, pristupa se merenju mase klipja i kućišta, odnosno prečnika klipnih prstenova i cilindara u telu ventila, kako bi se utvrdilo da li je i u kojoj meri došlo do habanja uzrokovano čvrstim česticama.

Uzorki ulja koji su uzeti pri merenju isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada se koriste za *off-line* analizu klase čistoće ulja u uzorku, kako bi se utvrdilo koja koncentracija čestica u odnosu na vrednost klase čistoće ulja u sistemu, prolazi zajedno sa fluidom kroz zazor. Upravo te čestice predstavljaju jedan od glavnih uzroka pojave oštećenja kontaktnih površina radnih elemenata kod razvodnog ventila. U cilju jasnije ilustracije čestica koje prolaze kroz zazor, na slici 6.10 se daje prikaz odnosa veličine zazora između klipja i cilindra u ventilu i veličine klasifikovanih čvrstih čestica koje mogu da se nađu u hidrauličkom ulju.



Slika 6.10 Odnos minimalne i maksimalne veličine radijalnog zazora i veličine čvrstih čestica.

Ovde ne treba zaboraviti da se veličina čestice predstavlja prečnikom sfere kao ekvivalentom snimljene projekcije površine čestice tokom njenog kretanja zajedno sa fluidom kroz senzor, a ne najveća izmerena dužina ili drugo. U tom kontekstu, merenje zavisi i od orijentacije čestica u trenutku kada prolaze kroz senzor, zbog čega se dešava da izmerene čestice koje su veće od veličine zazora mogu da prođu kroz isti, ako zauzmu odgovarajući položaj pri ulasku u zazor.

U tabeli 6.2 je prikazan ukupan broj merenja pojedinih parametara koji se izvrši tokom eksperimenta.

Tabela 6.2 Prikaz broja merenja karakterističnih parametara tokom eksperimenta.

Merenje		
Parametar	Broj ciklusa nakon kojeg se vrši merenje	Ukupan broj merenja
Klasa čistoće ulja		
Klasa čistoće ulja u rezervoaru	5 000 cikl.	200
Klasa čistoće ulja u statičkom uzorku	5 000 cikl.	200
Klasa čistoće ulja u dinamičkom uzorku	5 000 cikl.	200
Zapremina isticanja ulja		
Zapremina isticanja ulja pri statičkim uslovima rada	5 000 cikl.	200
Zapremina isticanja ulja pri dinamičkim uslovima rada	5 000 cikl.	200
Pad pritiska		
Pad pritiska	5 000 cikl.	200

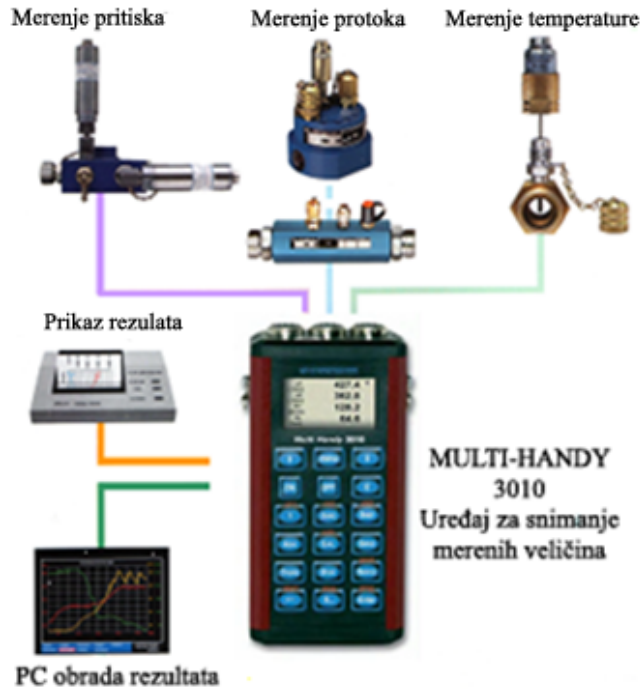
Merenje		
Parametar	Broj ciklusa nakon kojeg se vrši merenje	Ukupan broj merenja
Masa		
Masa tela ventila	20 000 cikl.	50
Masa klipa ventila	20 000 cikl.	50
Prečnici		
Prečnici prstenova na klipu	100 000 cikl.	11
Prečnici cilindara u telu ventila	100 000 cikl.	11

Opisani postupak se sprovodi dok se za svaki od ventila ne postigne predviđeni broj radnih ciklusa (tabela 6.1).

6.5 Oprema za merenje karakterističnih veličina u eksperimentu

Od opreme za merenje veličina koje su se posmatrale tokom eksperimentalnog ispitivanja u okviru doktorske disertacije je korišćeno sledeće:

- **Uređaj za merenje pritiska, temperature i protoka** tipa MULTI-HANDY 3010 proizvođača Hydrotechnik (slika 6.11). U ovaj merni set su uključeni:
 - Senzori pritiska sa opsegom merenja od 0 do 200, odnosno 400 bar sa izlaznim strujnim signalom u opsegu od 4 do 20 mA i apsolutnom greškom merenja $\pm 0,1$ %.
 - Senzor temperature Pt 100 sa opsegom merenja od -50 do 200 °C, takođe sa izlaznim strujnim signalom u opsegu od 4 do 20 mA i apsolutnom greškom merenja $\pm 0,1$ %.
 - Merna turbina koja se sastoji od mehaničkog (turbina) i elektro dela (induktivni senzor). Senzor merne turbine ima opseg merenja od 2 do 75 l/min i daje izlazni strujni signal u opsegu od 4 do 20 mA.



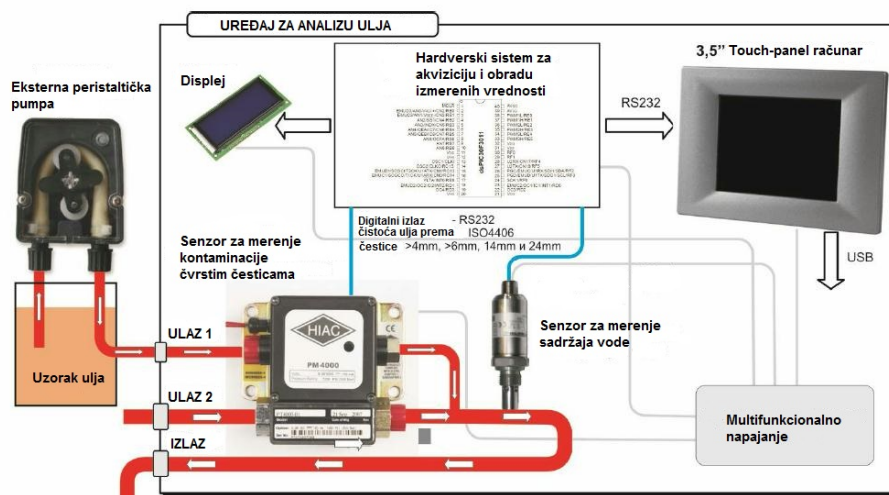
Slika 6.11 Multi-Handy 3010 sa mernim priključnim elementima.

Pomoću kablova, senzori se povezuju sa mernim uređajem Multi-Handy 3010. Na displeju uređaja mogu da se prate trenutne vrednosti merenih veličina, a po potrebi se iste mogu sačuvati u memoriji mernog uređaja. Kod memorisanja merenih veličina postoji mogućnost izbora vremena skeniranja (dužine intervala vremena između dva merenja) u intervalima od 10 ms pa do nekoliko časova.

- **Uređaj za merenje broja čvrstih čestica** tipa HIAC PM 4000 koji predstavlja deo integralnog rešenja (slika 6.12 a) razvijenog za potrebe istraživanja, ali i sprovođenje merenja na terenu [69]. Ovaj uređaj osim senzora za merenje kontaminacije čvrstim česticama, sadrži i senzore za merenje vlage i temperature ulja. Senzor za određivanje klase čistoće radi na principu difrakcije laserskog zraka i kalibrisan je prema novom ISO MTD standardu. Ima mogućnost određivanja broja čestica veličine od 4, 6, 14 i 21 $\mu\text{m}_{(c)}$. Protok ulja, viskoziteta u granicama od 2 do 424 cSt, kroz senzor je moguć u opsegu od 50 do 500 mL/min. Dijagnostika može da se vrši u on-line i off-line režimu, s tim što je za off-line režim potrebno dodatno obezbediti potisnu (peristaltičku) pumpu koja će uzorkovano ulje iz bočice za uzorkovanje potiskivati u senzor odgovarajućim protokom (slika 6.12 b). Uređaj ima mogućnost prikaza rezultata na alfanumeričkom i grafičkom panel displeju.



a)



b)

Slika 6.12 Integralno rešenje uređaja za potrebe in-line i off-line ispitivanja čistoće ulja [69].

- **Uređaj za merenje viskoznosti** ulja, proizvođača KITTIWAKE. Ovaj uređaj je namenjen za digitalno merenje viskoznosti radnog fluida na temperaturi od 40°C (slika 6.13). Apsolutna greška merenja ovog uređaja je u dijapazonu od ± 2 do 3 cSt.



Slika 6.13 Viskozimetar tipa KITTIWAKE za merenje viskoznosti radnog fluida.

Uređajem je merena vrednost kinematske viskoznosti na 40°C, 45°C i 100°C, dok je dinamička viskoznost ulja (korišćena u proračunima) proračunata pomoću odgovarajućeg izraza i data u prilogu br. 3.

- **Uređaji za merenje mase klipa i tela ventila (slika 6.14 a i 6.14 b):**
 - analitička vaga tipa KERN ABJ 120-4M, maksimalna težina merenja iznosi $m_{max} = 120$ g, a greška merenja $\pm 0,001$ g i
 - tehnička vaga KERN EW 1500-2M, maksimalna težina merenja $m_{max} = 1500$ g, greška merenja $\pm 0,01$ g.



a)



b)

Slika 6.14 a) Analitička vaga i b) tehnička vaga.

- **Uređaj za merenje prečnika klipa i cilindra proizvođača Carl Zeiss (slika 6.15).**



Slika 6.15 Koordinatna merna mašina Contura G2.

Koordinatna merna mašina *Contura G2*, ima integrisanu VAST (Variable Accuracy and Speed Probing Technology) tehnologiju kontinualnog merenja skeniranjem, koja omogućava brže i pouzdanije merenje u odnosu na merenje po principu “tačka-po-tačka”. Propisana merna nesigurnost mašine se iskazuje sledećim obrascem: $1.9 + L/300$ (μm).

6.6 Prikaz i analiza eksperimentalnih rezultata

Tokom eksperimentalnog ispitivanja je praćen i prikupljen veliki broj prodataka za nekoliko različitih parametara:

- **Čistoća radnog fluida** – tokom ispitivanja su praćene klase čistoće za čestice od 4, 6, 14 i 21 μm po ISO 4406 kodnom sistemu za MTD kalibraciju. Eksperimentalno ispitivanje je započeto sa veoma kontaminiranim uljem (RV1 (ispitivani ventil br. 1) - NAS 11) koje se sa promenom ispitivanog razvodnog ventila, prema planu eksperimenta podešavalo na odgovarajuću klasu čistoće (RV2 (ispitivani ventil br. 2) – NAS 10 i RV3 (ispitivani ventil br. 3) – NAS 9). Merenje klase čistoće je vršeno za ulje u sistemu i ulje koje je uzeto uzorkovanjem u statičkim i dinamičkim uslovima rada ventila (otkap). Izmerene koncentracije čvrstih čestica u uzorcima smatraju se onima koje su prošle kroz zazor i izazvale habanje kontaktnih površina, zajedno sa česticama koje su se generisale u zazoru kao posledica abrazije ili razaranja većih čestica na manje.
- **Zapremina isticanja kroz zazole** – tokom ispitivanja praćene su vrednosti veličine isticanja radnog fluida kroz zazole između cilindra u telu ventila i klipa. Isticanja su posmatrana za statičke i dinamičke uslove rada razvodnog ventila.
- **Pad pritiska** – tokom ispitivanja praćena je vrednost pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil, merenjem vrednosti pritiska u sistemu na ulazu u ventil i na izlazu iz ventila. Merenje vrednosti pada pritiska je vršeno u statičkim uslovima rada pri čemu je ventil, tj. klip postavljen u radni položaj, kako bi se omogućio protok fluida kroz ventil i izmerila vrednost pada pritiska.
- **Masa klipa i tela ventila** – tokom ispitivanja je praćena promena vrednosti težine klipa i tela ventila kako bi se posredno videlo napredovanje procesa habanja pomenutih elemenata tokom njihove eksploatacije,
- **Prečnik klipa i cilindra u telu ventila** – tokom ispitivanja je praćena promena vrednosti prečnika kontaktnih elemenata, kako bi se utvrdila veličina promene geometrijskih parametara, tj. veličine zazora, kao posledice habanja.

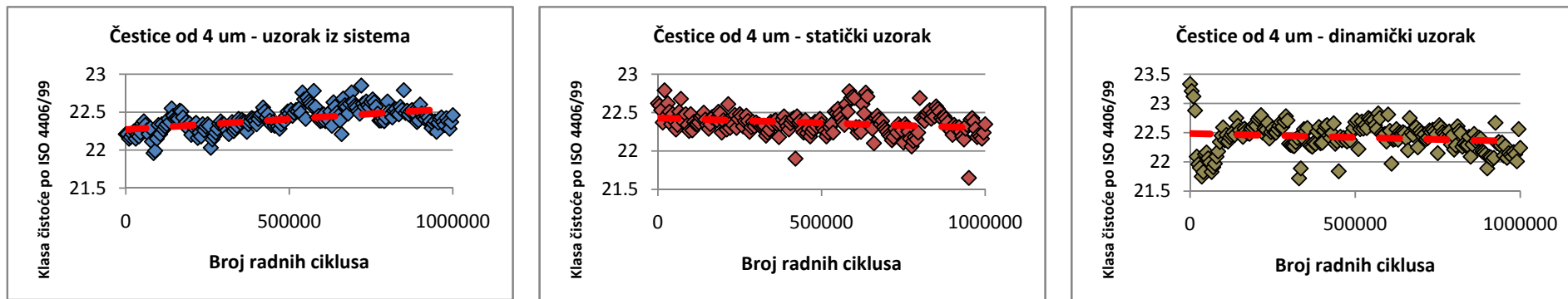
6.6.1 Eksperimentalni rezultati o izmerenom broju čvrstih čestica

U narednom delu disertacije su dati grafički prikazi izmerenih vrednosti broja čestica u odnosu na broj ciklusa rada, dok su sve numeričke vrednosti merenih parametara prikupljene tokom eksperimenta, date tabelarno u prilogu br. 4.

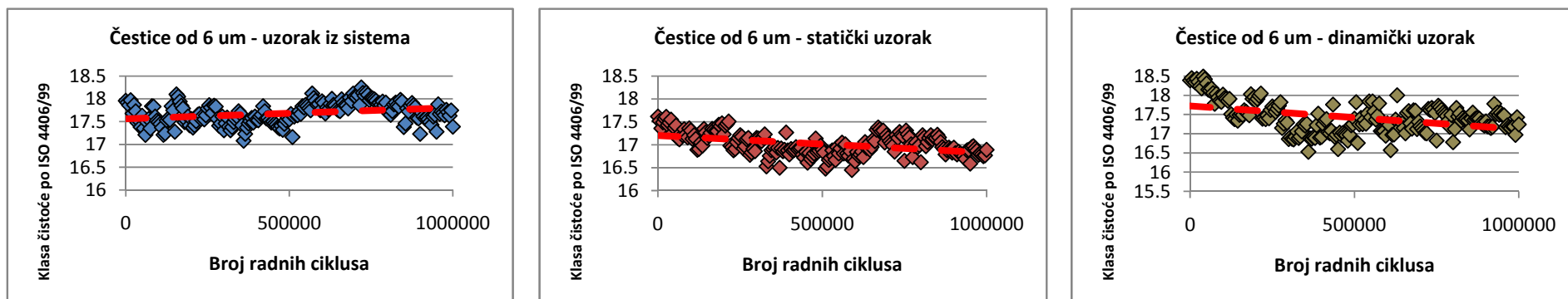
Napomene:

- Vrednosti radne temperature, pritiska i protoka su tokom uzimanja uzorka održavane u okvirima granica tolerancije, tako da njihove oscilacije vrednosti nemaju značajan uticaj na rezultate merenja.
- Tokom merenja broja čestica *off-line* postupkom, poštovala se standardizovana procedura kako bi se minimizovao uticaj spoljnih faktora.

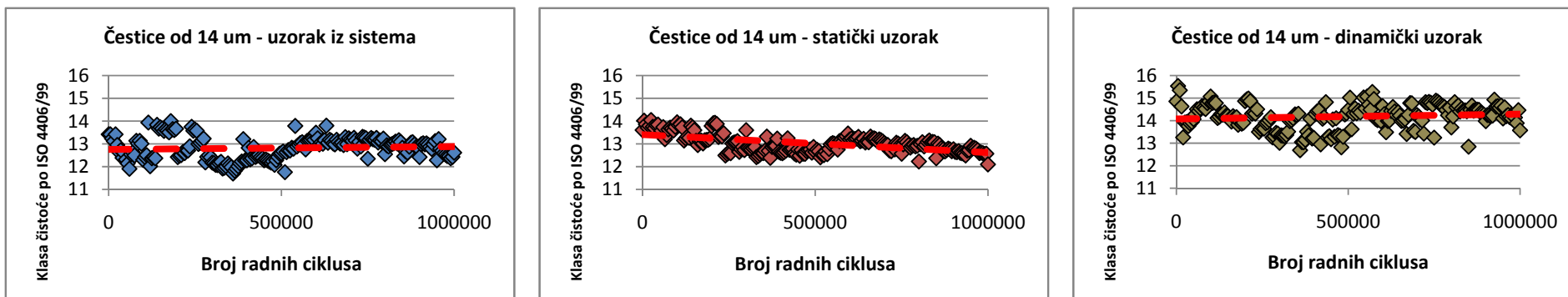
Izmerene vrednosti klase čistoće u uzorcima ulja za eksperiment br. 1 – ispitivanje ventila RV1



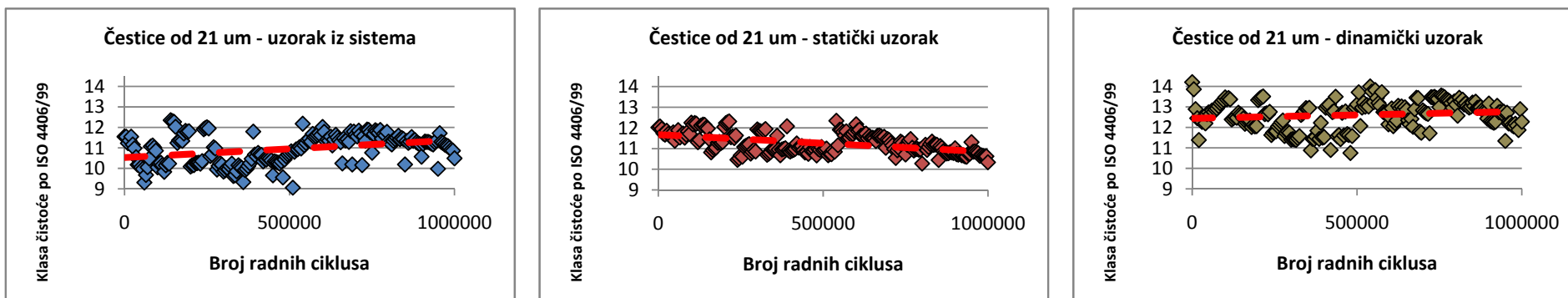
Slika 6.16 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 µm za ventil RV1.



Slika 6.17 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 6 µm za ventil RV1.



Slika 6.18 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 µm za ventil RV1.



Slika 6.19 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 µm za ventil RV1.

Napomene:

- Klasa čistoće ulja u sistemu je praćena i održavana po ISO 4406/99 standardu i iznosi **ISO 22 / 17 / 12** za eksperiment sa RV1 ventilom,
- Prema NAS 1638 standardu koji se često koristi u praksi zbog njegove jednostavnosti, daje se približno ekvivalentna vrednost klase čistoće koja iznosi **NAS 11**.

Zapažanja

Za čestice od 4 μm :

Sa uporednih grafičkih prikaza za čestice od 4 μm , može se primetiti da postoje male razlike u izmerenim vrednostima klasa čistoće ulja u statičkom i dinamičkom uzorku u odnosu na uzorak ulja iz sistema. Kontaminacija ulja u sistemu ima blagu tendenciju porasta, kako broj radnih ciklusa raste. Izmerena kontaminacija ulja u statičkom uzorku može da se smatra u većem delu eksperimenta konstantnom sa neznatnim razlikama u odnosu na veličinu kontaminacije ulja u sistemu. Kod dinamičkog uzorka ulja izmerene vrednosti kontaminacije su nešto više u odnosu na vrednosti kontaminacije ulja u sistemu i statičkom uzorku, i sa porastom broja radnih ciklusa imaju tendenciju opadanja i izjednačavanja sa vrednostima izmerene kontaminacije ulja u sistemu i statičkom uzorku. Ono što još može da se primeti iz grafičkog prikaza, jeste da je rasipanje (devijacija) izmerenih vrednosti kontaminacije kod dinamičkog uzorka najveće.

Za čestice od 6 μm :

U slučaju merenja koncentracije čestica od 6 μm uporedni grafički prikazi ukazuju da kao i kod čestica od 4 μm , tendencije porasta, odnosno smanjenja kontaminacije u uzorcima su slične. Kontaminacija ulja u sistemu ima tendenciju blagog porasta. U statičkom uzorku može da se primeti neznatno opadanje koncentracije kontaminanata od 6 μm , dok je kod dinamičkog uzorka tendencija opadanja kontaminacije znatno izraženija u odnosu na statički uzorak. Takođe, međusobne razlike u izmerenim vrednostima kontaminacije po uzorcima za čestice od 6 μm su izraženije nego što je to slučaj sa izmerenim vrednostima kontaminacije česticama od 4 μm .

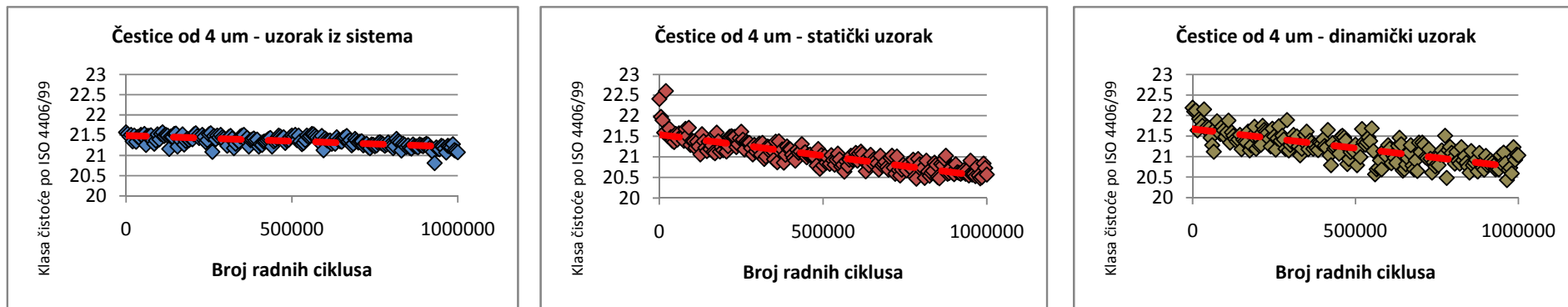
Za čestice od 14 μm :

U slučaju čestica od 14 μm grafički prikazi tendencije izmerenih vrednosti kontaminacije za uzorak iz sistema i statički uzorak, su veoma slični (razlike su neznatne), dok su izmerene vrednosti kontaminacije za dinamički uzorak znatno veće, tj. za jednu klasu veće: ISO 13 – srednja vrednost izmerene klase čistoće za prva dva uzorka; ISO 14 – srednja vrednost izmerene klase čistoće za dinamički uzorak. Takođe, rasipanje izmerenih oko srednje vrednosti klase čistoće je kod dinamičkog uzorka veće nego kod statičkog i uzorka iz sistema.

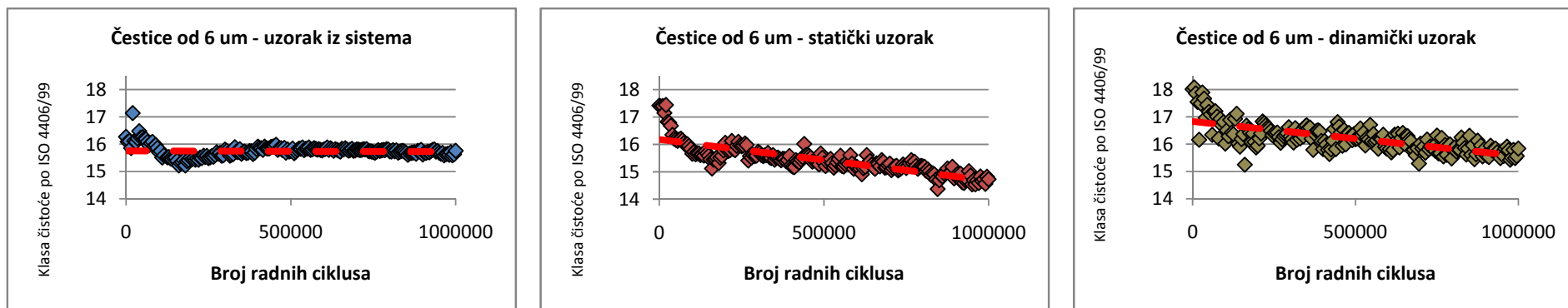
Za čestice od 21 μm :

U slučaju čestica od 21 μm , situacija je slična kao i kod čestica od 14 μm . Kontaminacija u dinamičkom uzorku je za klasu veća nego kod statičkog i uzorka iz sistema. Kontaminacija ulja u sistemu ima tendenciju porasta, u statičkom uzorku ima tendenciju opadanja, dok kod dinamičkog uzorka kontaminacija je u blagom (neznatnom opadanju).

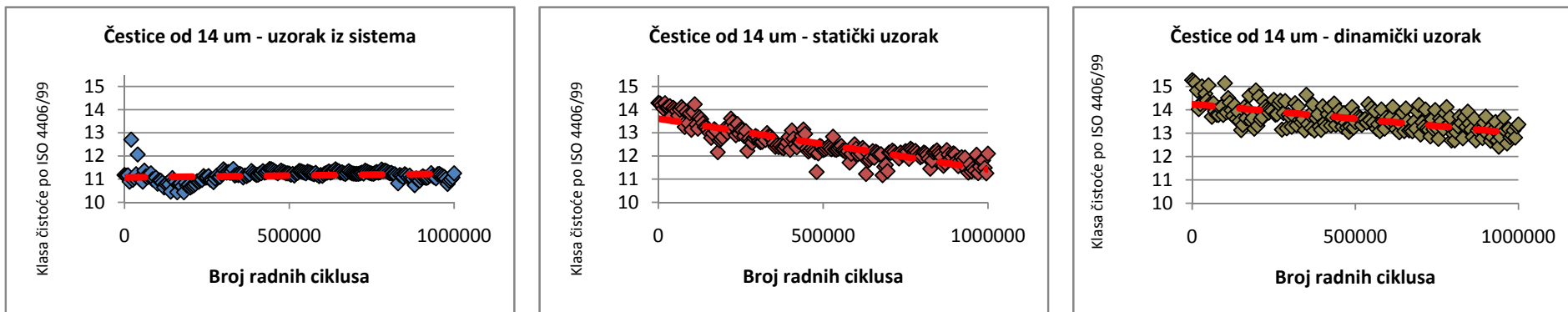
Izmerene vrednosti klase čistoće u uzorcima ulja za eksperiment br. 2 – ispitivanje ventila RV 2



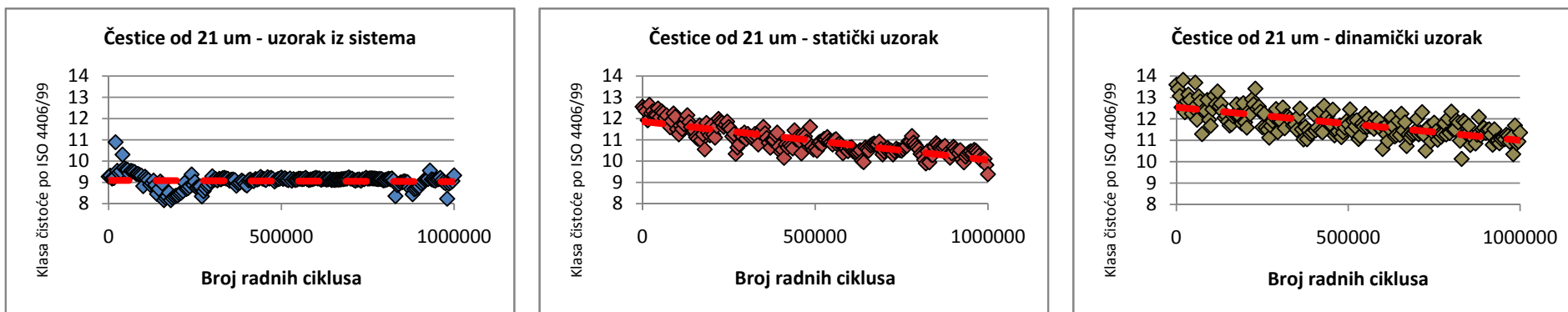
Slika 6.20 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 µm za ventil RV2.



Slika 6.21 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 6 µm za ventil RV2.



Slika 6.22 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 µm za ventil RV2.



Slika 6.23 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 µm za ventil RV2.

Napomene:

- Klasa čistoće ulja u sistemu je praćena i održavana po ISO 4406/99 standardu i iznosi **ISO 21 / 16 / 11** za eksperiment sa RV2 ventilom,
- Približna ekvivalentna vrednost klase čistoće po starom NAS standardu iznosi **NAS 10**.

Zapažanja

Za čestice od 4 μm :

Za razliku od RV1, kod ventila RV2 sa porastom broja ciklusa može da se primeti značajniji trend opadanja izmerene vrednosti klase čistoće za čestice od 4 μm , u statičkom i dinamičkom uzorku. Upoređivanjem početnih i krajnjih vrednosti testa, klasa čistoće i u statičkom i u dinamičkom uzorku raste za skoro jednu klasu, tj. sa ISO 21 na ISO 20, pri čemu je rasipanje (devijacija) izmerenih vrednosti kontaminacije kod dinamičkog uzorka veće.

Za čestice od 6 μm :

U slučaju merenja koncentracije čestica od 6 μm , startne vrednosti čistoće ulja u statičkom i dinamičkom uzorku iznose ISO 16, ali sa porastom broja radnih ciklusa, došlo je do smanjenja broja čestica u uzorcima. Smanjenje broja čestica u statičkom uzorku je na kraju testa dovelo do toga da se klasa čistoće ulja u uzorku povećava za 2 stepena, tako da ulje u statičkom uzorku ima za jednu klasu, manju koncentraciju čestica od ulja u sistemu, dok kod ulja u dinamičkom uzorku sa brojem ciklusa dolazi do povećanja klase čistoće za jedan stepen, tako da se čistoća ulja izjednačava sa čistoćom ulja u sistemu.

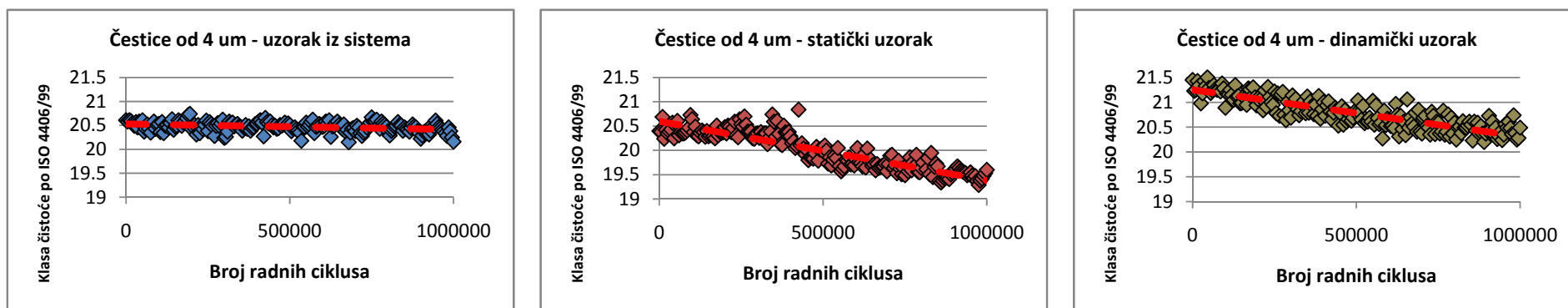
Za čestice od 14 μm :

Kod posmatranja koncentracije čestica od 14 μm , ulje u statičkom uzorku ima za dve klase veću koncentraciju čestica (ISO 13) u odnosu na ulje u sistemu (ISO 11), a ulje u dinamičkom uzorku ima za tri klase veću čistoću (ISO 14) od ulja u sistemu. Sa porastom broja radnih ciklusa čistoća ulja u statičkom uzorku ima tendenciju porasta, te se na kraju testa približava klasi čistoće ulja u sistemu što kod dinamičkog uzorka nije slučaj. Kod dinamičkog uzorka takođe postoji tendencija smanjenja koncentracije čestica u uzorku, ali je ta promena slabijeg intenziteta.

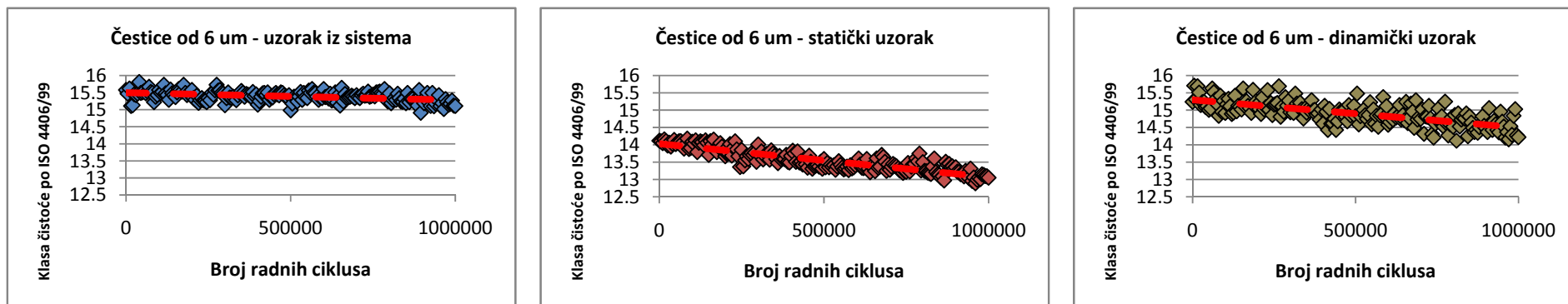
Za čestice od 21 μm :

U slučaju čestica od 21 μm , situacija je slična kao i kod čestica od 14 μm . Kontaminacija u dinamičkom uzorku je za klasu veća (ISO 12) nego kod statičkog uzorka (ISO 11). Koncentracija kontaminanata u vidu čvrstih čestica i u statičkom i u dinamičkom uzorku ima približno istu tendenciju opadanja, tako da se u oba slučaja klasa čistoće uzorka povećava za jednu klasu.

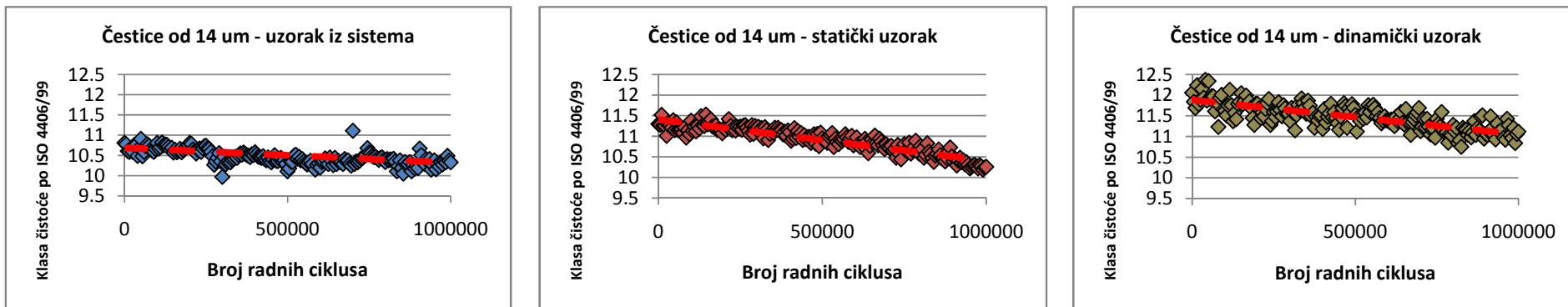
Izmerene vrednosti klase čistoće u uzorcima ulja za eksperiment br. 3 – ispitivanje ventila RV3



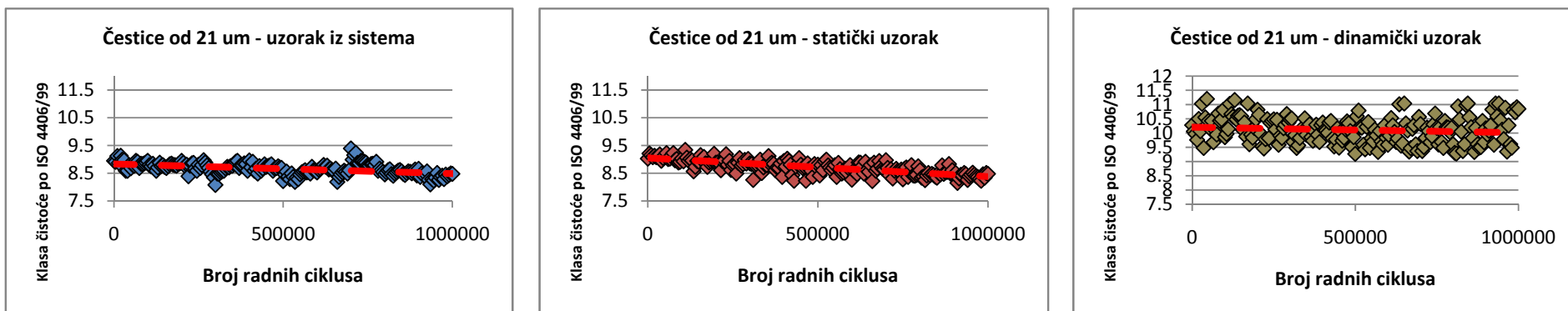
Slika 6.24 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 4 µm za ventil RV3.



Slika 6.25 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 6 µm za ventil RV3.



Slika 6.26 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 14 µm za ventil RV3.



Slika 6.27 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti klase čistoće hidrauličkog ulja za čestice od 21 µm za ventil RV3.

Napomene:

- Klasa čistoće ulja u sistemu je praćena i održavana po ISO 4406/99 standardu i iznosi **ISO 20 / 15 / 10** za eksperiment sa RV3 ventilom,
- Približna ekvivalentna vrednost klase čistoće po starom NAS standardu iznosi **NAS 9**.

Zapažanja

Za čestice od 4 μm :

Na dijagramima sa slike 6.24 koji prikazuju promenu vrednosti klase čistoće uzoraka uzetih u statičkim i dinamičkim uslovima rada, može se konstatovati da postoji tendencija smanjenja koncentracije čvrstih čestica sa povećanjem broja radnih ciklusa. Pri tome se ističe da je koncentracija čestica od 4 μm u uzorku uzetom u dinamičkim uslovima (ISO 21) znatno veća u odnosu na izmerenu koncentraciju u uzorku uzetom u statičkim uslovima (ISO 20). I u jednom, i u drugom uzorku koncentracija čestica se na kraju testa smanjuje za jednu klasu što znači da je ustanovljen duplo manji broj čestica nego što je bio na početku testa.

Za čestice od 6 μm :

U slučaju merenja klase čistoće za čestice od 6 μm , koncentracija čestica u uzorcima ima tendenciju opadanja, ali sa manjim intenzitetom nego što je to slučaj kod čestica veličine od 4 μm . U statičkom uzorku (ISO 14), startne vrednosti izmerene klase čistoće su za klasu ispod čistoće ulja u sistemu (ISO 15).

Za čestice od 14 μm :

Kod posmatranja koncentracije čestica od 14 μm , ulje u statičkom uzorku ima za jednu klasu veću koncentraciju čestica (ISO 11) u odnosu na ulje u sistemu (ISO 10), a ulje u dinamičkom uzorku ima za dve klase veću čistoću (ISO 12) od ulja u sistemu. Sa porastom broja radnih ciklusa, koncentracija čestica u statičkom uzorku ima tendenciju opadanja, te se na kraju testa približava klasi čistoće ulja u sistemu što kod dinamičkog uzorka nije slučaj. Kod dinamičkog uzorka, takođe postoji tendencija smanjenja koncentracije čestica u uzorku, ali je ta promena slabijeg intenziteta.

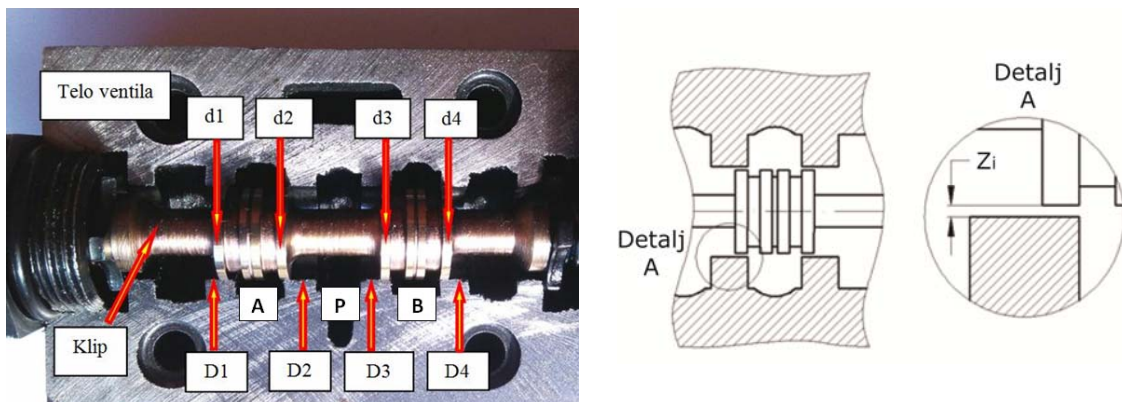
Za čestice od 21 μm :

U slučaju čestica od 21 μm , kontaminacija u dinamičkom uzorku je za klasu veća (ISO 10) nego kod statičkog uzorka (ISO 9). Koncentracija kontaminanata u vidu čvrstih čestica u statičkom uzorku ima tendenciju opadanja, dok je u dinamičkom ta tendencija neprimetna.

6.6.2 Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima zazora

Napomene:

- Pre svakog merenja dimenzija na koordinatnoj mašini, klip i telo ventila se čiste sredstvom za odmašćivanje, i potom na određeno vreme ostavljaju u prostoriji sa kontrolisanom temperaturom, kako bi se izvršila stabilizacija materijala na temperaturu na kojoj će biti vršeno merenje (20 °C).
- Da bi se jasnije shvatile promene merenih veličina radijalnih zazora, na slici 6.28 se daje prikaz ispitivanog razvodnog ventila u preseku sa označenim elementima (klipnim i cilindarskim prstenovima), čije kontaktne površine formiraju zazore koji se prate tokom eksploatacije.



Slika 6.28 Prikaz lokacija merenih vrednosti prečnika klipnih (d_i) i cilindarskih (D_i) prstenova koji obrazuju posmatrane zazore.

Vrednosti prečnika posmatranih klipnih i cilindarskih prstenova se mere pomoću koordinatne merne mašine, a vrednost veličine zazora Z_i se određuje primenom formule:

$$Z_i = \frac{D_i - d_i}{2}, \quad (6.1)$$

gde je:

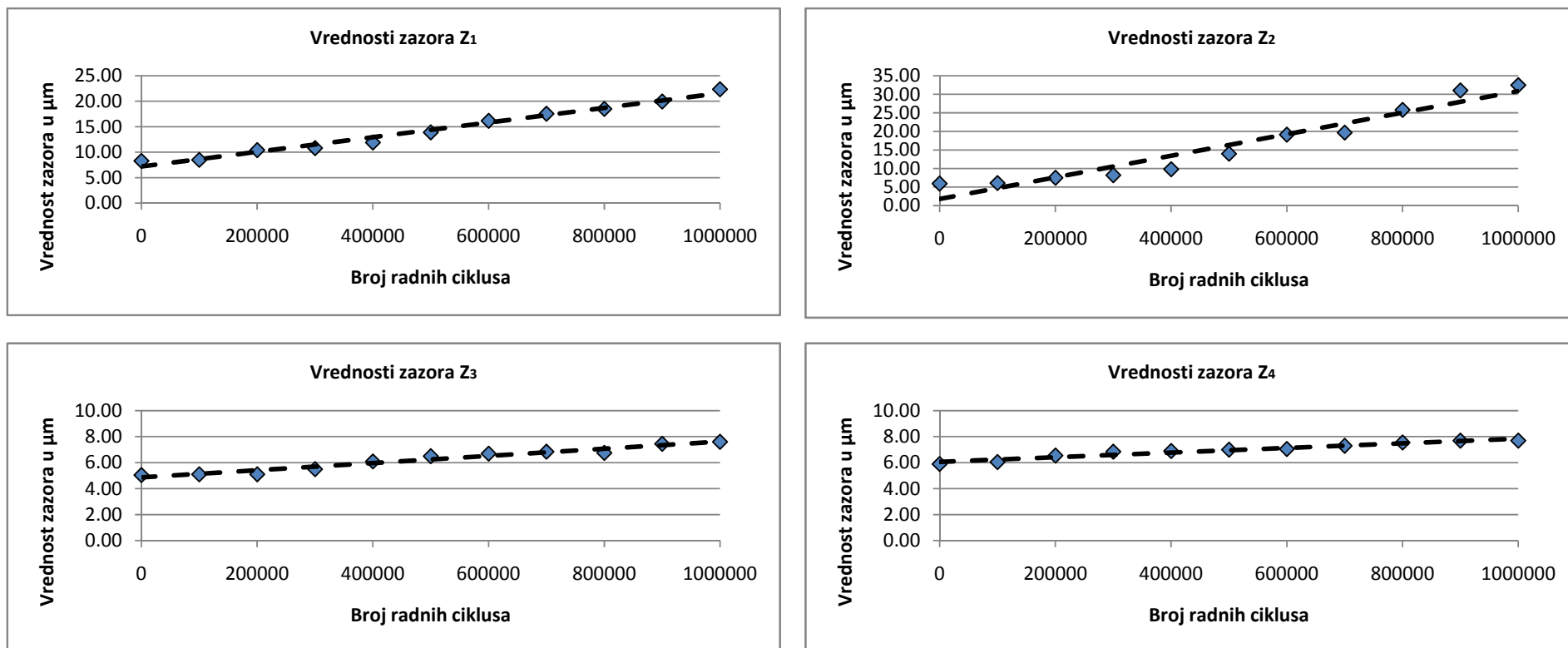
Z_i – vrednost zazora,

D_i – vrednost prečnika cilindra u telu ventila,

d_i – vrednost prečnika klipnog prstena.

Za svaki ispitani ventil, nakon 100 000 odrađenih ciklusa su merene vrednosti zazora Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 , koji predstavljaju razliku odgovarajućih prečnika (d_i) klipnih i cilindarskih (D_i) prstenova prikazanih na slici 6.28.

Izmerene vrednosti veličine zazora za eksperiment br. 1 – ispitivanje ventila RV1



Slika 6.29 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radialnih zazora Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_4 za ventil RV1.

Zapažanja

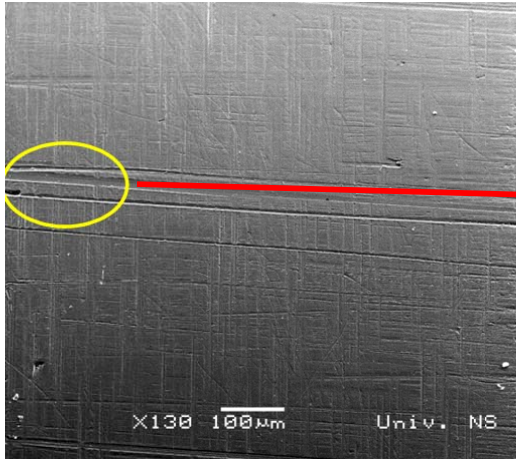
Sa grafičkih prikaza na slici 6.29, može da se vidi progresija habanja posmatranih prstenova klipa i cilindra za ventil RV1, preko veličine zazora. Sa datih dijagrama može se uočiti da su se vrednosti zazora Z_1 i Z_2 značajno uvećale u odnosu na njihove početne vrednosti, za razliku od zazora Z_3 i Z_4 koji su pretrpeli znatno manje promene. S obzirom da fluid protiče kroz kanal $P \rightarrow A$, kada je ventil otvoren, prsten klipa i cilindra koji formiraju zazor Z_2 uvek su na putu fluidu i česticama, pa je shodno tome, bilo očekivano da će on biti najviše oštećen, ali se intenzitet nije mogao pretpostaviti. Njegova oštećenja predstavljaju posledicu delovanja kombinacije mehanizama habanja (abrazija, erozija, zamor materijala) što se može videti na priloženim slikama u nastavku (slika 6.30). Ove slike predstavljaju snimke klipnih prstenova, i urađene su pod različitim uvećanjima uz pomoć mikroskopa (*SEM – Scanning Electron Microscope*) tipa JEOL JSM 6460LV.

Značajnu tendenciju rasta u odnosu na početnu vrednost, bi trebalo da imaju i zazori Z_1 i Z_3 . Iako nisu direktno na udaru fluidne struje koja protiče kada je ventil otvoren, zazor Z_1 i Z_3 trpe oštećenja uglavnom zbog čestica koje uđu u zazor.

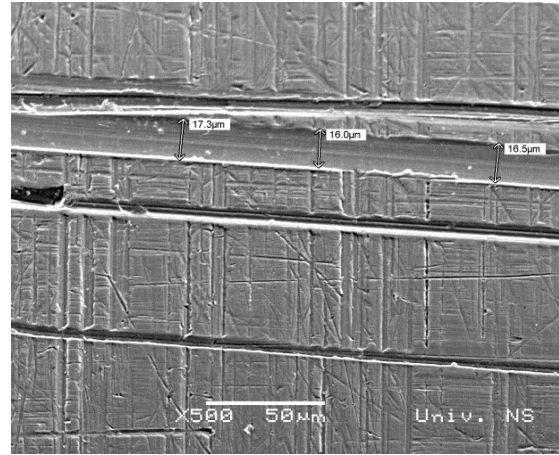
U tabeli 6.3 su date izmerene vrednosti veličine zazora, uz pomoć kojih će se, u nastavku, odrediti pohabanost kontaktnih elemenata u sklopu razvodnog ventila.

Tabela 6.3 Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindara za ventil RV1.

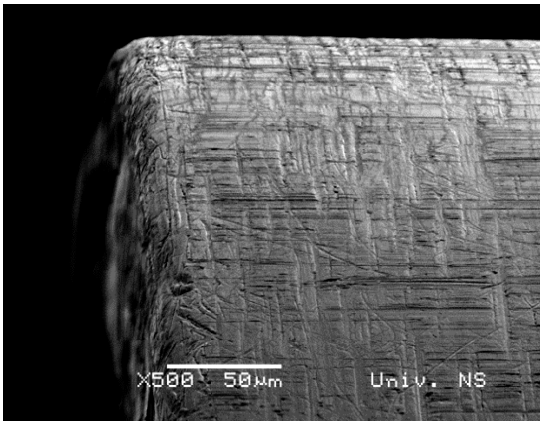
Br. ciklusa	Vrednosti zazora (μm)			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0	8.3	5.95	5.05	5.9
100000	8.5	6.1	5.1	6.05
200000	10.4	7.5	5.1	6.55
300000	10.8	8.2	5.5	6.85
400000	11.9	9.8	6.1	6.9
500000	13.9	14	6.5	7
600000	16.15	19.15	6.7	7.05
700000	17.55	19.7	6.75	7.3
800000	18.5	25.8	6.85	7.55
900000	19.95	31.05	7.45	7.7
1000000	22.35	32.5	7.6	7.7



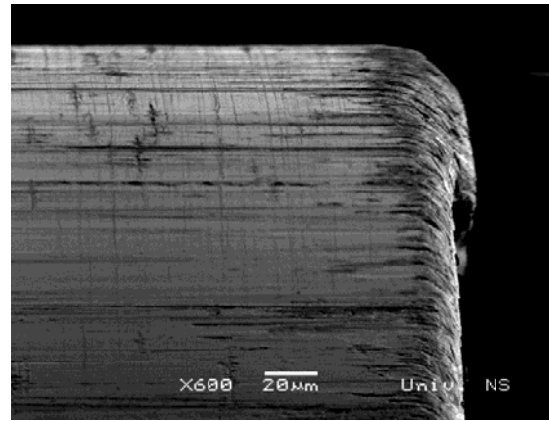
a) Prikaz klipnog prstena Z_2 sa uočljivim brazdama nastalim kao posledica abrazije;



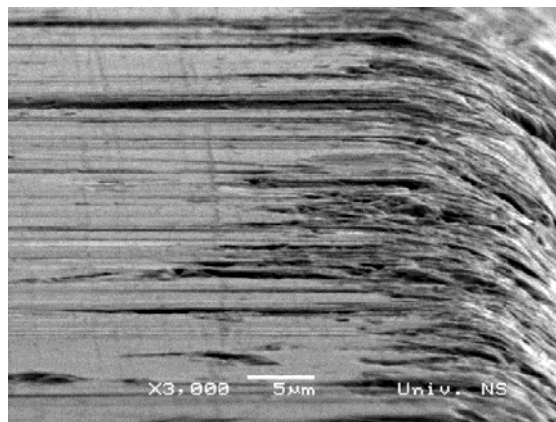
b) Prikaz klipnog prstena Z_2 sa većim uvećanjem i izmerenom veličinom brazde;



c) Prikaz leve ivice klipnog prstena Z_2 ;



d) Prikaz desne ivice klipnog prstena Z_2 ;



e) Prikaz oštećenja desne ivice klipnog prstena Z_2 sa velikim uvećanjem;

Slika 6.30 Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 , ventila RV1.

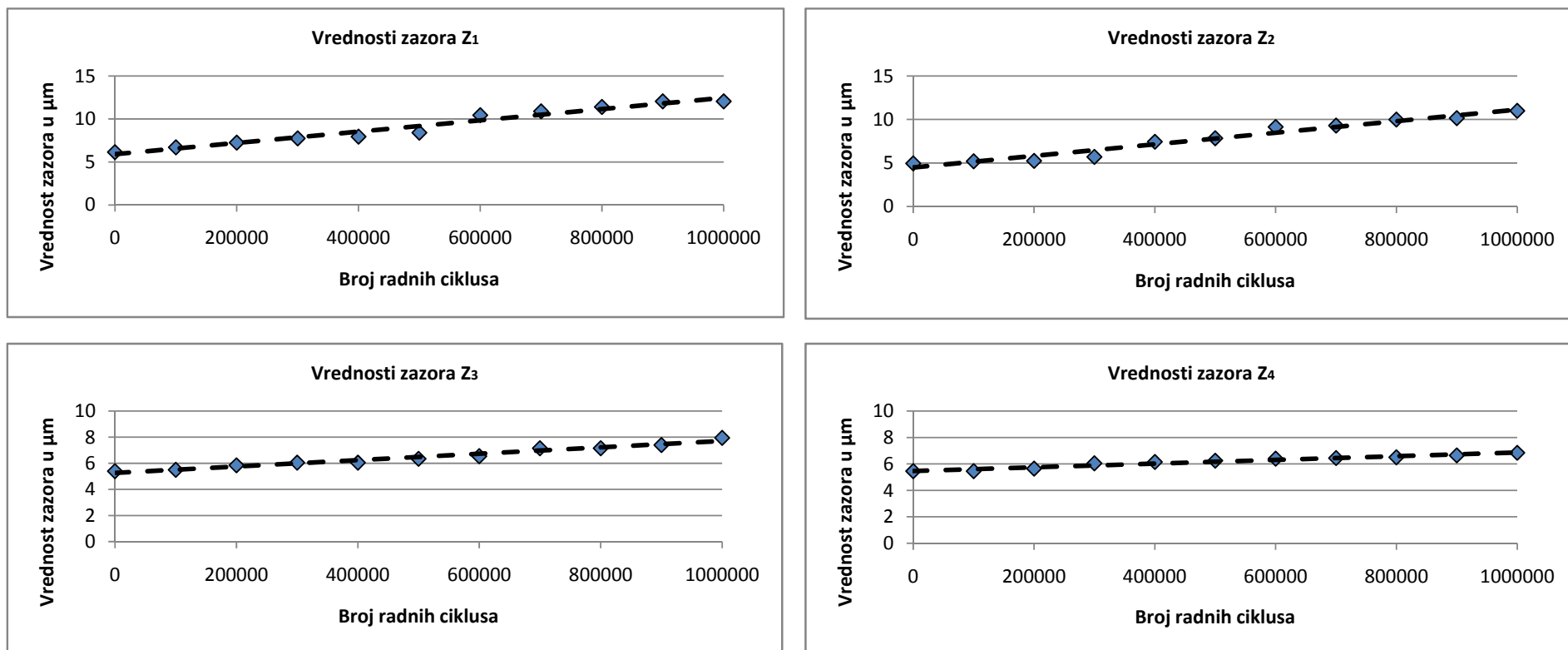
U tabeli 6.4 je dat odnos veličina zazora, izmerenih na početku i kraju eksperimenta, kako bi se utvrdila potrošenost kontaktnih površina klipa i cilindra. Ovde treba napomenuti, da su za računanje vrednosti koeficijenta K_z , kojim je iskazana vrednost povećanja veličine zazora, u obzir su uzete prva i zadnja izmerena vrednost zazora.

Tabela 6.4 Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RVI.

Zazori	Veličina zazora na početku testa $x(0)$	Veličina zazora na kraju testa $x(1\ 000\ 000)$	Odnos veličine zazora na početku i kraju testa $K_z = x(1\ 000\ 000) / x(0)$
Z1	8,3	22,35	2,69
Z2	5,95	32,5	5,46
Z3	5,05	7,6	1,51
Z4	5,9	7,7	1,31

Kao što se i pretpostavljalo, prema rezultatima iz tabele 6.4, jasno se vidi da su najviše pohabane kontaktne površine klipnog prstena prečnika d_2 i cilindra prečnika D_2 koji formiraju zazor Z_2 . Prema podacima iz tabele, zazor Z_2 se uvećao 5,46 puta. Ovo uvećanje zazora značajno će uticati na količinu fluida koja ističe kroz taj zazor kada je sistem, tj. ventil u eksploataciji. Samim tim, uvećavaju se energetske gubici, što ima za posledicu generisanje veće količine toplote u sistemu, zatim gubitak sposobnosti preciznog i tačnog pozicioniranja, itd. Svi ovi negativni efekti značajno utiču na ukupnu efikasnost sistema, naročito ako se intenzivno trošenje kontaktnih površina, manifestuje kod više ventila ugrađenih u sistemu (što je karakteristično za kompleksnije hidrauličke sisteme). Značajan uticaj, čvrste čestice su izvršile i na elemente koji formiraju zapore Z_1 i Z_3 , što pokazuju parametri dobijeni iz odnosa izmerenih vrednosti posmatranih elemenata u tabeli 6.4. U slučajevima habanja zazora Z_1 i Z_3 dominirao je uticaj abrazivnog habanja.

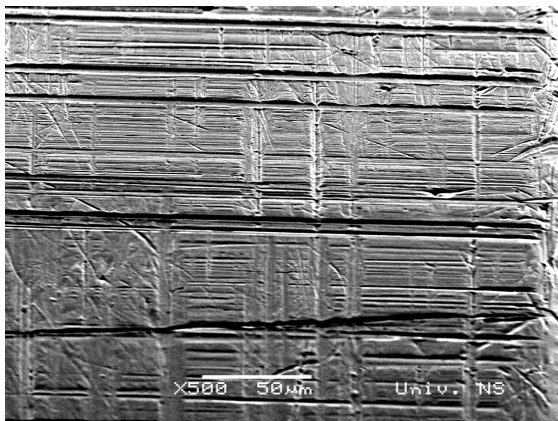
Izmerene vrednosti veličine zazora za eksperiment br. 2 – ispitivanje ventila RV2



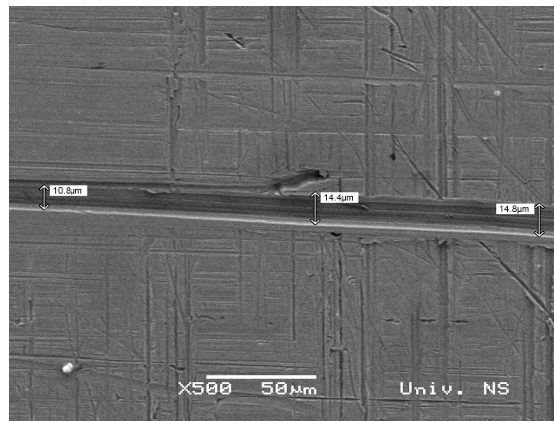
Slika 6.31 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radialnih zazora Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_4 za ventil RV2.

Zapažanja

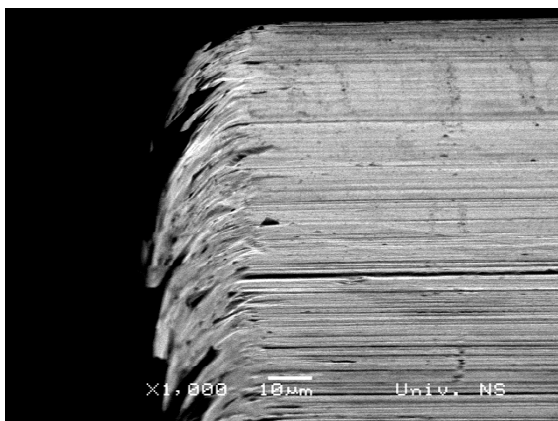
Na slici 6.31 su prikazane promene vrednosti zazora za ventil RV2 koji je radio sa klasom čistoće ulja **ISO 21 / 16 / 11**, odnosno **NAS 10**. Za razliku od ventila RV1, kod slučaja sa ventilom RV2, povećanje zazora Z_1 i Z_2 je znatno manje, dok su promene zazora Z_3 i Z_4 slične kao i kod prethodno ispitivanog ventila. Sasvim je jasno da je smanjenje koncentracije čestica u radnom fluidu značajno uticalo na smanjenje intenziteta delovanja mehanizama habanja i drugih poremećaja. Kao kod klipa ventila RV1, i za klip ventila RV2 su rađena snimanja klipnih prstenova uz pomoć elektronskog mikroskopa, a interesantni snimci su dati na slici 6.32.



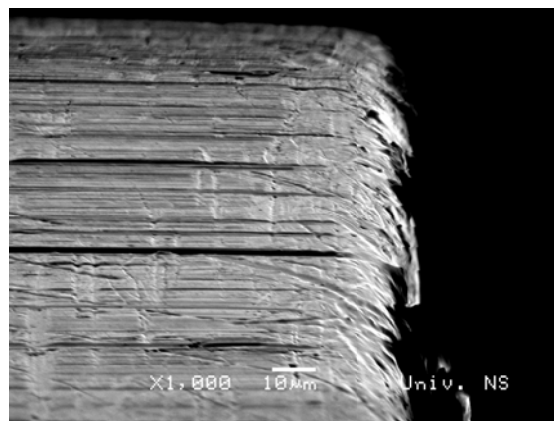
a) Prikaz dela klipnog prstena gde se vidi izbrazdana kontaktna površina klipa;



b) Prikaz klipnog prstena Z_2 sa izmerenom širinom brazde koja je nastala kao posledica abrazije;



c) Prikaz leve ivice klipnog prstena Z_2 gde se vidi i oborenost ivice za određeni broj stepeni;



d) Prikaz desne ivice klipnog prstena Z_2 sa karakterističnim brazgotinama;

Slika 6.32 Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 , ventila RV2.

U tabeli 6.5 su date izmerene vrednosti veličine zazora, kojima će se odrediti odnos početne i krajnje vrednosti zazora u sklopu razvodnog ventila.

Tabela 6.5 Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindra za ventil RV2.

Br. ciklusa	Vrednosti zazora (μm)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
0	6.15	4.95	5.4	5.45
100000	6.7	5.2	5.5	5.45
200000	7.25	5.25	5.85	5.65
300000	7.75	5.7	6.05	6.05
400000	7.95	7.45	6.05	6.15
500000	8.4	7.85	6.35	6.25
600000	10.45	9.15	6.55	6.4
700000	10.9	9.3	6.8	6.45
800000	11.4	10	7.15	6.5
900000	12.05	10.15	7.3	6.65
1000000	12.05	11	7.45	6.85

U tabeli 6.6 je dat odnos veličina zazora, izmerenih na početku i kraju eksperimenta, kako bi se utvrdila potrošenost kontaktnih površina klipa i cilindra.

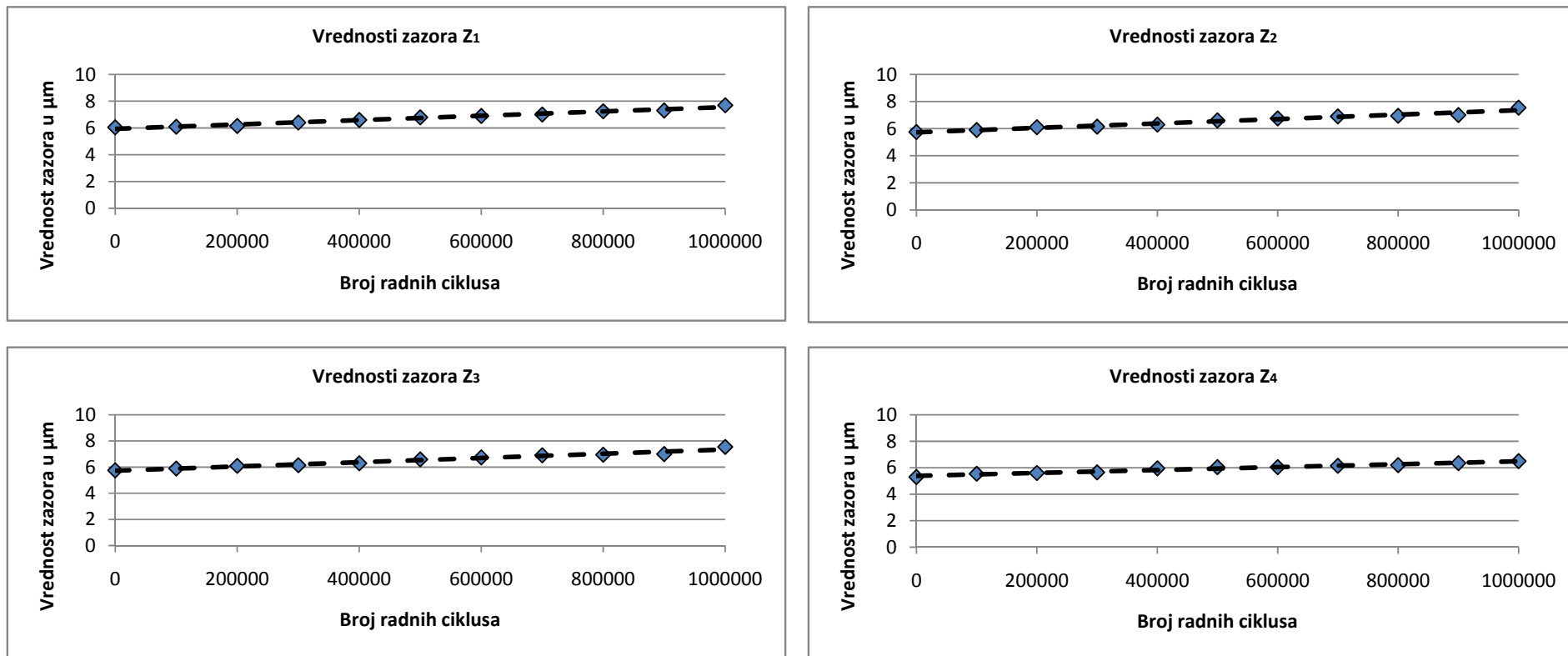
Tabela 6.6 Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RV2.

Zazori	Veličina zazora na početku testa $x(0)$	Veličina zazora na kraju testa $x(1\ 000\ 000)$	Odnos veličine zazora na početku i kraju testa $K_z = x(1\ 000\ 000) / x(0)$
Z1	6,15	12,05	1,96
Z2	4,95	11	2,22
Z3	5,4	7,45	1,38
Z4	5,45	6,85	1,25

*Veličina K predstavlja koeficijent kojim je iskazana vrednost povećanja veličine zazora

Prema rezultatima iz tabele 6.6 i u ovom, kao i kod prethodnog slučaja sa ventilom RV1, najviše su se pohabale kontaktne površine klipnog prstena prečnika d_2 i cilindra prečnika D_2 koje čine zazor Z_2 , gde se zazor uvećao za 2,22 puta što je za 2,46 puta manje nego u slučaju ventila RV1. Osim kritičnog zazora Z_2 , i vrednosti ostalih zazora takođe su se umanjile u odnosu na slučaj sa ventilom RV1, ali u mnogo manjoj meri.

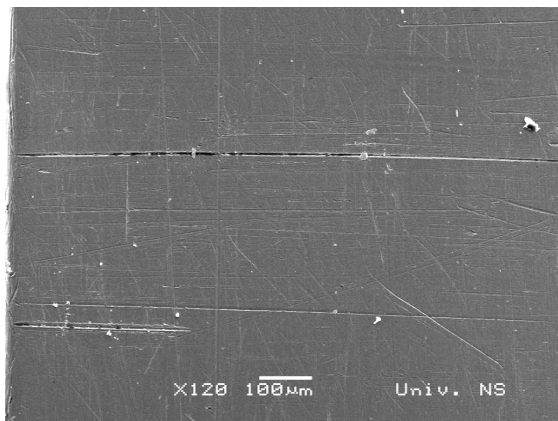
Izmerene vrednosti veličine zazora za eksperiment br. 3 – ispitivanje ventila RV3



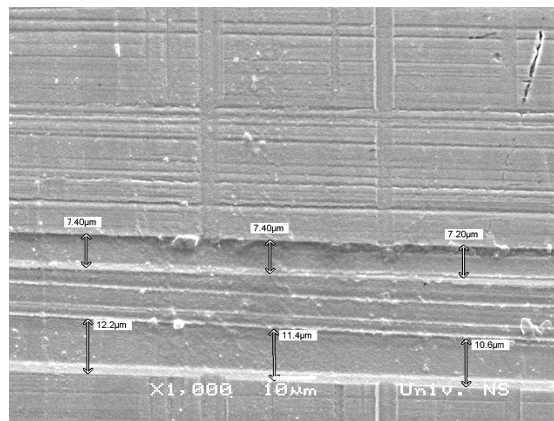
Slika 6.33 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti veličine radialnih zazora Z₁, Z₂, Z₃ i Z₄ za ventil RV3.

Zapažanja

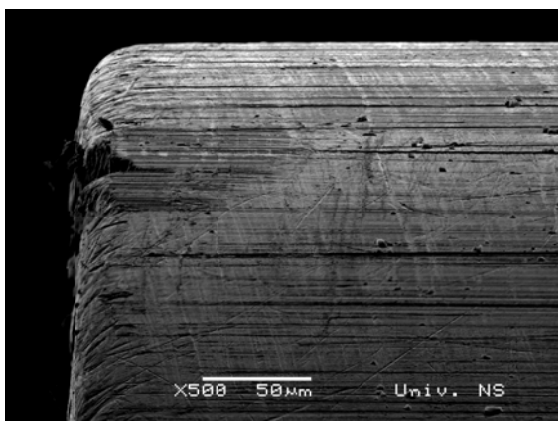
Na slici 6.33 može da se vidi kako su se tokom eksploatacije razvodnog ventila RV3, sa čistoćom radnog fluida **ISO 20 / 15 / 10**, odnosno **NAS 9**, ponašale geometrijske veličine kontaktnog para klip-cilindar. Sa slike 6.34 mogu se videti karakteristične brazde nastale kao posledica abrazije na klipnom prstenu Z_2 , u slučaju ventila RV3.



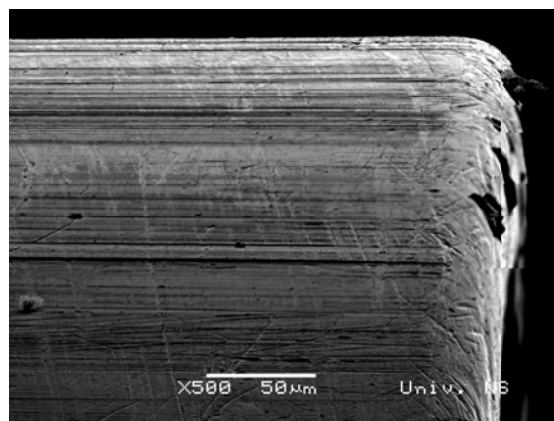
a) Prikaz veće površine klipnog prstena gde se vidi izbrazdanost kontaktne površine klipa;



b) Prikaz klipnog prstena Z_2 sa izmerenom širinom najizraženijih brazdi na klipnom prstenu Z_2 ;



c) Prikaz leve ivice klipnog prstena Z_2 gde se vidi i nedostatak dela ivice;



d) Prikaz desne ivice klipnog prstena Z_2 sa karakterističnim brazgotinama i oborenim ivicama;

Slika 6.34 Prikaz SEM snimaka za klipni prsten Z_2 , ventila RV3.

U tabeli 6.7 su date vrednosti veličine zazora, kojima će se odrediti odnos početne i krajnje vrednosti zazora u sklopu razvodnog ventila.

Tabela 6.7 Vrednosti zazora između klipnih prstenova i cilindara za ventil RV3.

Br. ciklusa	Vrednosti zazora (μm)			
	Z1	Z2	Z3	Z4
0	6.05	6.4	5.75	5.3
100000	6.1	6.45	5.9	5.55
200000	6.15	7.75	6.1	5.6
300000	6.4	8.75	6.15	5.65
400000	6.6	8.85	6.3	5.95
500000	6.8	8.9	6.6	6.05
600000	6.9	9.1	6.75	6.05
700000	7	9.2	6.9	6.15
800000	7.25	9.5	6.95	6.2
900000	7.3	10.55	7.3	6.35
1000000	7.7	11	7.55	6.5

U tabeli 6.8 je dat odnos veličina zazora, izmerenih na početku i kraju eksperimenta, kako bi se utvrdila potrošenost kontaktnih površina klipa i cilindra.

Tabela 6.8 Odnosi veličina zazora između kontaktnih površina klipa i cilindra za ventil RV3.

Zazori	Veličina zazora na početku testa $x(0)$	Veličina zazora na kraju testa $x(1\ 000\ 000)$	Odnos veličine zazora na početku i kraju testa $K_z = x(1\ 000\ 000) / x(0)$
Z1	6,05	7,7	1,27
Z2	6,4	11	1,72
Z3	5,75	7,55	1,31
Z4	5,3	6,5	1,23

*Veličina K_z predstavlja koeficijent kojim je iskazana vrednost povećanja veličine zazora

Prema rezultatima iz tabele 6.8, i u ovom kao i kod prethodna dva slučaja, najviše su se pohabale kontaktne površine klipnog prstena koje čine zazor Z_2 , te se iz tih razloga isti može posmatrati kao kritični zazor.

6.6.3 Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima zapreminskog isticanja fluida kroz zazor

Napomene:

- Kod merenja isticanja fluida (ΔQ) kroz zazor (slika 6.6), oscilacije vrednosti radne temperature i pritiska u sistemu su održavane u okviru opsega vrednosti, tako da nemaju značajnog uticaja na rezultate merenja.
- Merenje isticanja fluida kroz zazor je vršeno za određeni vremenski interval, pa je stoga protok dobijen po sledećoj formuli:

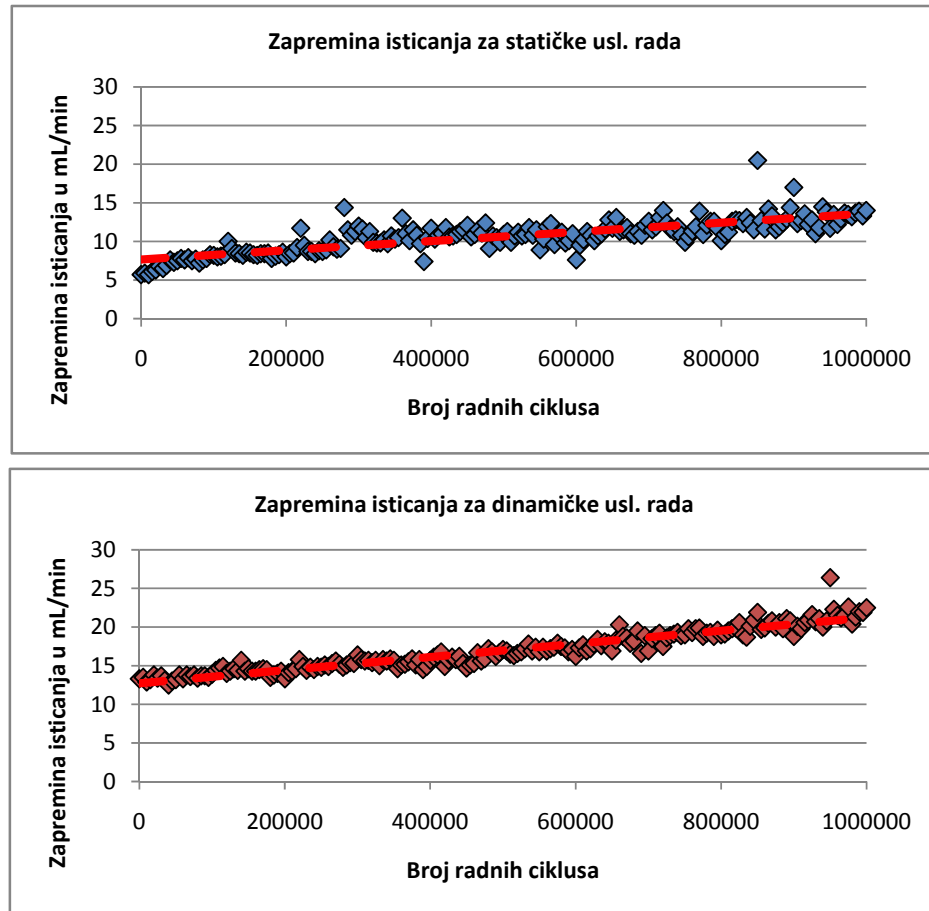
$$Q_i = \frac{V_i}{t}, \quad (6.2)$$

gde je:

V_i – izmerena zapremina (u ml),

$t = 10$ min – vreme za koje je mereno isticanje fluida.

Izmerene vrednosti isticanja fluida kroz zazor za eksperiment br. 1 – ispitivanje ventila
RV1



Slika 6.35 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za ventil RV1.

Zapažanja

Sa prikazanih dijagrama na slici 6.35 može se primetiti da je u oba slučaja došlo do povećanja zapreminskih gubitaka i da su vrednosti isticanja pri statičkim uslovima rada (kada je sistem pod opterećenjem, a razvodni ventil u neutralnom položaju), manje nego što je to slučaj kod dinamičkih uslova rada (kada je sistem pod opterećenjem, a razvodni ventil menja svoju poziciju prema zadatoj frekvenciji). Kao što se vidi sa dijagrama, mnogo veće rasipanje izmerenih vrednosti od aproksimativne prave, prisutno je kod slučaja sa statičkim uslovima rada. Pretpostavlja se da je do ovih odstupanja dovela pojava nagomilavanja čvrstih čestica na ulazu u zazor i u samom zazoru (po modelu dinamičke blokade opisane u poglavlju 4). Te čestice predstavljaju prepreku daljem proticanju fluida, sve dok sila pritiska ne postane dovoljno velika da, zajedno sa novim česticama koje ulaze u zazor, razbije naslage i progura ih kroz zazor (tzv. adrenlin efekat [23], [90]).

U nastavku je data tabela 6.9 u kojoj je preko parametra K_v iskazano relativno povećanje veličine zapreminskih isticanja fluida u jedinici vremena, kroz radijalni zazor.

Tabela 6.9 Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za ventil RV1

Zapremina isticanja za statičke uslove rada							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmereno isticanje x_i (ml)	Prosečna vrednost (ml) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmereno isticanje x_j (ml)	Prosečna vrednost (ml) $q_{ii} = \frac{\sum_i^j q_i}{n}$	Odnos prosečnih vrednosti $K_v^* = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i}$
1	0	5,7	6,39	960 000	12,2	13,38	2,09
2	5 000	5,9		965 000	12,9		
3	10 000	5,7		970 000	13,7		
4	15 000	6,1		975 000	13,5		
5	20 000	6,3		980 000	13,2		
6	25 000	6,8		985 000	13,7		
7	30 000	6,5		990 000	13,9		
8	35 000	6,9		995 000	13,3		
9	40 000	7,6		1 000 000	14		
Zapremina isticanja za dinamičke uslove rada							
1	0	13,3	13,27	960 000	21,5	21,65	1,63
2	5 000	13,5		965 000	21,2		
3	10 000	12,9		970 000	21,5		
4	15 000	13,2		975 000	22,6		
5	20 000	13,8		980 000	20,4		
6	25 000	13,4		985 000	21,3		
7	30 000	13,7		990 000	22		
8	35 000	13,1		995 000	21,9		
9	40 000	12,5		1 000 000	22,5		

*Veličina K_V predstavlja broj koji iskazuje koliko puta se uvećala zapremina koja protiče kroz zazor

Iz tabele 6.9 može se videti da je relativno povećanje proticanja veće u slučaju statičkih uslova rada, gde su se zapreminski gubici povećali nešto više od 2 puta, dok je kod dinamičkih uslova rada ostvareno povećanje od 1,6 puta. S obzirom da je vrednost radijalnog zazora (tabela 6.3) i ostalih potrebnih parametara poznata, za statičke uslove rada se može odrediti teorijski protok kroz taj zazor (tabela 6.10) uz pomoć formule (4.1).

Tabela 6.10 Razlike između teorijske i izmerene vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RVI.

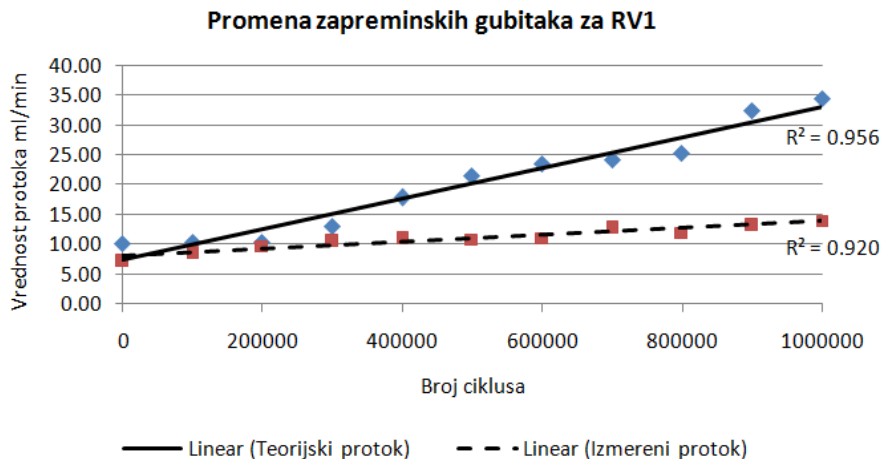
/	Vrednosti parametara koji figurišu u jednačini (4.1)						Teorijska vr.	Izmerena vr.**	Razlika
	Broj ciklusa	s^{***} (μm)	d (mm)	π	l^* (mm)	Δp (bar)			
0	5.05	12	3,14	1	150	0,0361	10.08	7.1	2.98
100 000	5.10						10.38	8.4	1.98
200 000	5.10						10.38	9.7	0.68
300 000	5.5						13.02	10.5	2.52
400 000	6.1						17.77	11	6.77
500 000	6.5						21.50	10.8	10.70
600 000	6.70						23.54	11.1	12.44
700 000	6.75						24.08	11.9	12.18
800 000	6.85						25.16	12.8	12.36
900 000	7.45						32.37	13.2	19.17
1 000 000	7.6						34.36	14	20.36

*Dužina aksijalnog preklopa jednaka je širini klipnog prstena;

**Izmerena vrednost protoka dobijena je kao srednja vrednost svih izmerenih u intervalu od prethodnog do narednog merenja zazora (interval I: od 0 do 95 000, interval II: 100 000 do 195 000, itd.);

***Vrednost radijalnog zazora s u proračunu jednaka je izmerenim vrednostima zazora Z_3 .

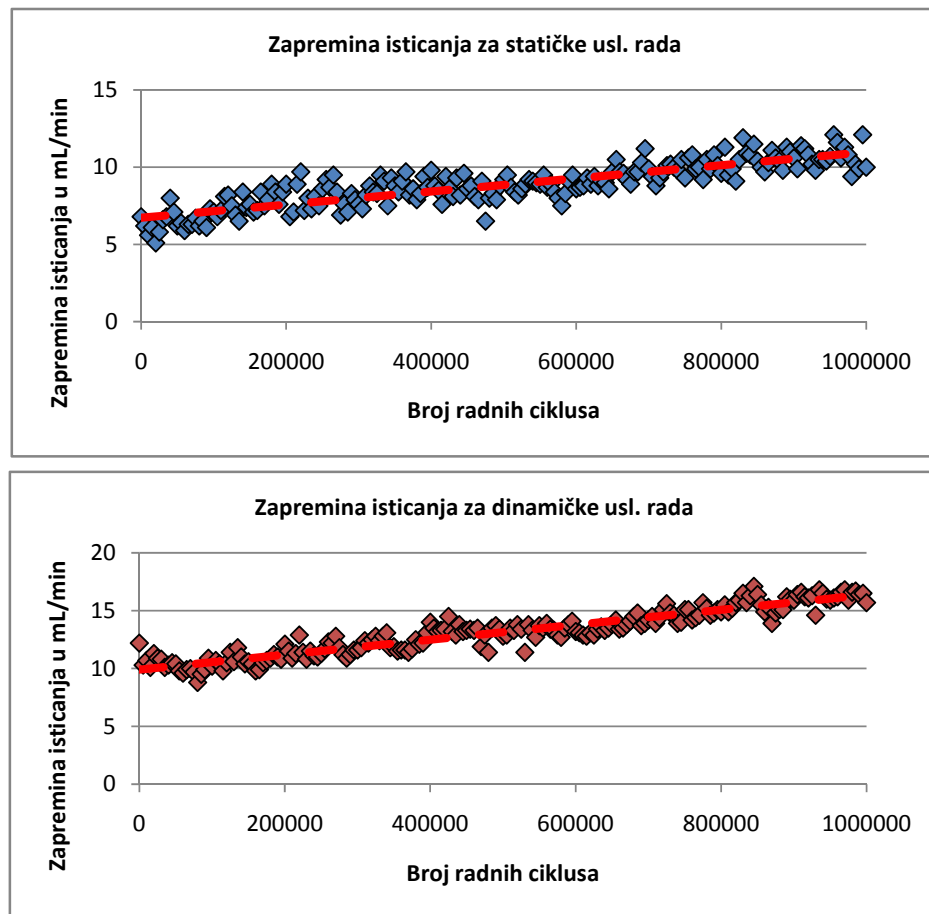
Na slici 6.36 grafički su prikazane vrednosti teorijskog (proračunatog) i izmerenog protoka.



Slika 6.36 Prikaz promene teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV1.

Kao što se vidi iz tabele 6.10 ali i dijagrama na slici 6.36, razlike između proračunatih i izmerenih vrednosti protoka fluida kroz zazor postoje i nisu zanemarljive. Ove razlike, mogu biti posledica gomilanja čestica na ulazu u zazor i formiranja barijere koja značajno redukuje isticanje fluida kroz ventil kada klip miruje u neutralnoj poziciji. Što je veća kontaminacija ulja pretpostavlja se da će razlike između teorijskih i stvarnih vrednosti zapreminskih gubitaka biti još veće. Sam proces gomilanja čestica na ulazu u zazor je teško definisati, jer je proces veoma dinamičan u kojem osim koncentracije čvrstih čestica značajan uticaj imaju i oblik i orijentacija čestica kod ulaza u zazor, radni pritisak, nazivni protok, radna temperatura, viskozitet radnog fluida, hrapavost kontaktnih površina koje formiraju zazor (kvalitet površinske obrade klipa i cilindra).

Izmerene vrednosti isticanja fluida kroz zazor za eksperiment br. 2 – ispitivanje ventila RV2



Slika 6.37 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za ventil RV2.

Zapažanja

Sa prikazanih dijagrama na slici 6.37, može se primetiti da je u oba slučaja došlo do povećanja zapreminskih gubitaka u odnosu na početne vrednosti, pri čemu su gubici kod statičkih uslova rada manji nego kod dinamičkih uslova rada (kao u slučaju ventila RV1). U nastavku je data tabela 6.11, koja numeričkim vrednostima prikazuje relativni odnos isticanja fluida na početku i kraju testa za ventil RV2.

Tabela 6.11 Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za ventil RV2.

Zapremina isticanja za statičke uslove rada							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmereno isticnaje x_i (ml)	Prosečna vrednost (ml) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmereno isticnaje x_j (ml)	Prosečna vrednost (ml) $q_{li} = \frac{\sum_i^j q_i}{n}$	Odnos prosečnih vrednosti $K_v^* = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i}$
1	0	6,8	6,33	960 000	11,6	10,65	1,68
2	5 000	6,2		965 000	10,6		
3	10 000	5,6		970 000	11,3		
4	15 000	6,1		975 000	10,8		
5	20 000	5,1		980 000	9,4		
6	25 000	5,8		985 000	10,2		
7	30 000	6,6		990 000	9,9		
8	35 000	6,8		995 000	12,1		
9	40 000	8		1 000 000	10		
Zapremina isticanja za dinamičke uslove rada							
1	0	12,2	10,74	960 000	16,2	16,38	1,53
2	5 000	10,3		965 000	16,6		
3	10 000	10,7		970 000	16,8		
4	15 000	10,1		975 000	15,9		
5	20 000	11,3		980 000	16,6		
6	25 000	10,9		985 000	16,7		
7	30 000	10,8		990 000	16,4		
8	35 000	10,1		995 000	16,5		
9	40 000	10,3		1 000 000	15,7		

*Veličina K_v predstavlja broj koji iskazuje koliko puta se uvećala zapremina koja protiče kroz zazor.

Iz tabele 6.11 može se videti da je odnos početnih i vrednosti proticanja na kraju testa veći i u slučaju ventila RV2 kod statičkih uslova rada. Zapreminski gubici nakon 1 000 000 radnih ciklusa, povećali su se 1,68 puta, dok je kod dinamičkih uslova rada ostvareno povećanje od 1,53 puta. U odnosu na ventil RV1 proticanja kod ventila RV2 za statičke uslove rada su se smanjila 1,24 puta (ΔQ RV1 / ΔQ RV2), dok su se dinamička proticanja kroz zazor smanjila za 1,07 puta. S obzirom da su vrednosti radijalnog zazora i ostalih

potrebnih parametara poznate, prema formuli (4.1) može se proračunati teorijski protok i uporediti sa stvarnim izmerenim vrednostima (tabela 6.12).

Tabela 6.12 Razlike između teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV2.

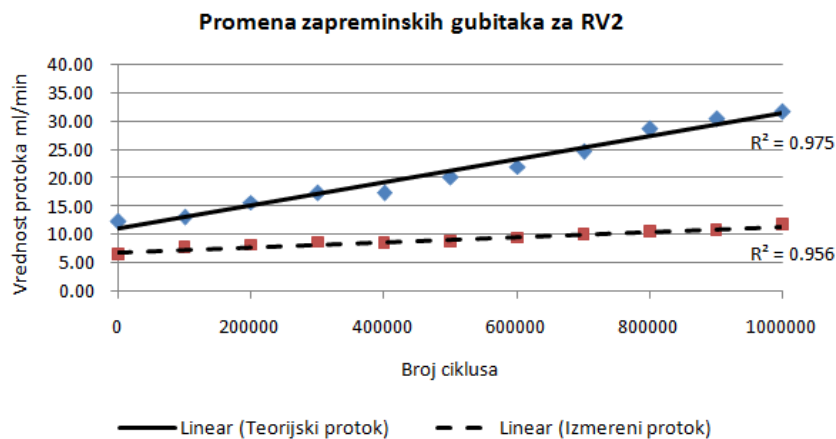
/	Vrednosti parametara koji figurišu u jednačini (4.1)						Teorijska vr.	Izmerena vr.**	Razlika
	Broj ciklusa	s^{***} (μm)	d (mm)	π	l^* (mm)	Δp (bar)			
0	5.4	12	3,14	1	150	0,0361	12.33	6.4	5.93
100 000	5.5						13.02	7.7	5.32
200 000	5.85						15.67	8.1	7.57
300 000	6.05						17.34	8.6	8.74
400 000	6.05						17.34	8.5	8.84
500 000	6.35						20.04	8.7	11.34
600 000	6.55						22	9.4	12.60
700 000	6.8						24.61	9.94	14.67
800 000	7.15						28.61	10.5	18.11
900 000	7.3						30.45	10.7	19.75
1 000 000	7.45						32.37	11.7	20.67

*Dužina aksijalnog zazora jednaka je širini jednog klipnog prstena;

**Izmerena vrednost protoka dobijena je kao srednja vrednost svih izmerenih u intervalu od prethodnog do narednog merenja zazora (interval I: od 0 do 95 000 ciklusa, interval II: 100 000 do 195 000 ciklusa, itd.);

***Vrednost radialnog zazora s u proračunu jednaka je izmerenim vrednostima zazora Z_3 .

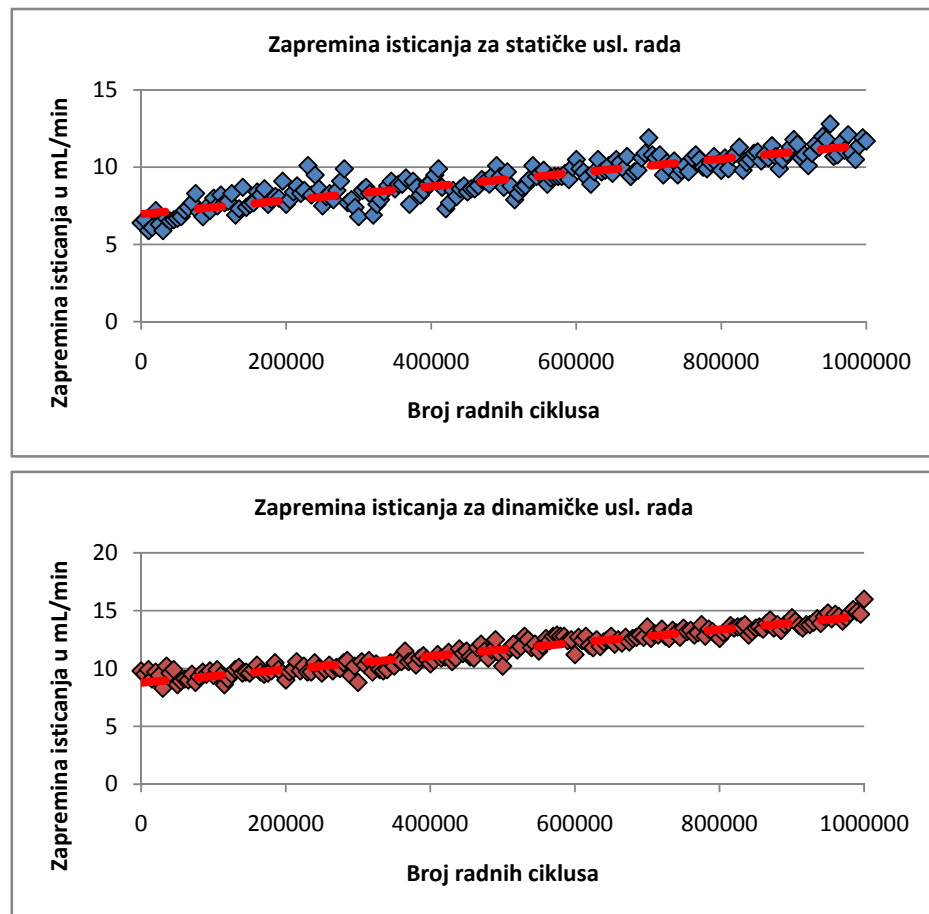
Na slici 6.38 grafički su prikazane promene vrednosti teorijskog i izmerenog protoka koje su prikazane u tabeli 6.12.



Slika 6.38 Grafički prikaz teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV2.

Kao što se vidi iz tabele 6.12, ali i dijagrama na slici 6.38, razlike između teorijskih (proračunatih) i izmerenih vrednosti protoka fluida kroz zazoru postoje i nisu zanemarljive. Razlike za ventil RV2 imaju manje vrednosti nego što je to slučaj kod ventila RV1.

Izmerene vrednosti isticanja fluida kroz zazor za eksperiment br. 3 – ispitivanje ventila RV3



Slika 6.39 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti isticanja fluida kroz zazor za statičke i dinamičke uslove rada za ventil RV3.

Zapažanja

Proticanja kroz zazor ventila RV3 u statičkim i dinamičkim uslovima rada se ponašaju isto kako je opisano u prethodna dva slučaja. U nastavku se daje tabela 6.13 koja pokazuje relativno uvećanje zapreminskih gubitaka kao posledice habanja kontaktnih površina klipa i cilindra, razvodnog ventila.

Tabela 6.13 Relativno povećanje zapreminskih gubitaka za RV3.

Zapremina isticanja za statičke uslove rada							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmereno isticanje x_i (ml)	Prosečna vrednost (ml) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmereno isticanje x_j (ml)	Prosečna vrednost (ml) $q_{ij} = \frac{\sum_i^j q_i}{n}$	Odnos prosečnih vrednosti $K_v^* = \frac{\bar{x}_j}{\bar{x}_i}$
1	0	6.4	6,4	960 000	10,8	11,3	1,77
2	5 000	6.6		965 000	11,6		
3	10 000	5.9		970 000	11,1		
4	15 000	6.1		975 000	12,1		
5	20 000	7.2		980 000	10,9		
6	25 000	6.3		985 000	10,5		
7	30 000	5.9		990 000	11,4		
8	35 000	6.7		995 000	11,9		
9	40 000	6.4		1 000 000	11,7		
Zapremina isticanja za dinamičke uslove rada							
1	0	9.8	9,5	960 000	14,7	14,8	1,56
2	5 000	9.5		965 000	14,5		
3	10 000	9.9		970 000	14,1		
4	15 000	9.1		975 000	14,4		
5	20 000	9.7		980 000	14,8		
6	25 000	9.4		985 000	15,1		
7	30 000	8.3		990 000	14,9		
8	35 000	10.2		995 000	14,7		
9	40 000	9.6		1 000 000	16		

*Veličina K_v predstavlja broj koji iskazuje koliko puta se uvećala zapremina koja protiče kroz zazor.

Praćenjem rezultata u tabeli 6.13, opet se može primetiti da je u slučaju statičkih uslova rada došlo do većeg isticanja fluida kroz zazor, u odnosu na vrednosti isticanja u dinamičkim uslovima rada.

S obzirom da je vrednost radijalnog zazora i ostalih potrebnih parametara poznata, prema formuli (4.1) može se proračunati teorijski protok i uporediti sa stvarnim izmerenim vrednostima (tabela 6.14).

Tabela 6.14 Razlike između teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za RV3.

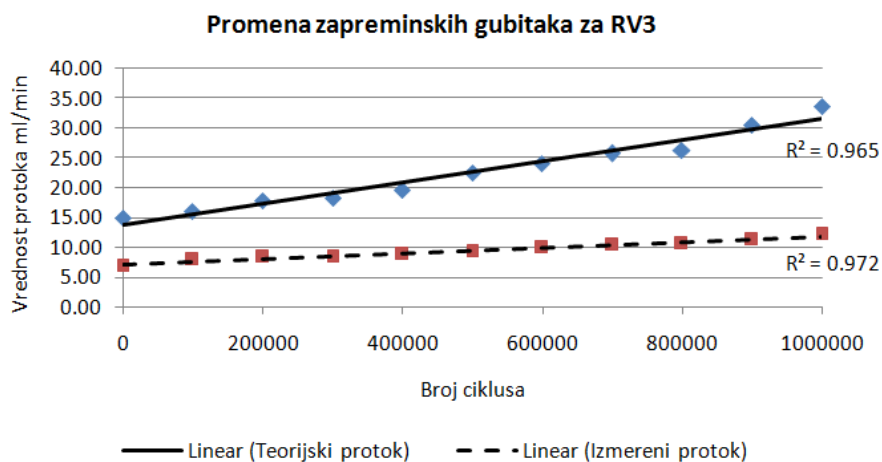
/	Vrednosti parametara koji figurišu u jednačini (4.1)						Teorijska vr.	Izmerena vr.**	Razlika
	Broj ciklusa	s^{***} (μm)	d (mm)	π	l^* (mm)	Δp (bar)			
0	5.75	12	3,14	1	150	0,0361	14.88	6.8	8.08
100 000	5.9						16.08	8.0	8.08
200 000	6.1						17.77	8.4	9.37
300 000	6.15						18.21	8.4	9.81
400 000	6.3						19.57	8.8	10.77
500 000	6.6						22.51	9.2	13.31
600 000	6.75						24.08	10.0	14.08
700 000	6.9						25.72	10.3	15.42
800 000	6.95						26.28	10.6	15.68
900 000	7.3						30.45	11.3	19.15
1 000 000	7.55						33.69	12.2	21.49

*Dužina aksijalnog zazora jednaka je širini jednog klipnog prstena;

**Izmerena vrednost protoka dobijena je kao srednja vrednost svih izmerenih u intervalu od prethodnog do narednog merenja zazora (interval I: od 0 do 95 000 ciklusa, interval II: 100 000 do 195 000 ciklusa, itd.);

***Vrednost radijalnog zazora s u proračunu jednaka je izmerenim vrednostima zazora Z_3 .

Na slici 6.40 grafički su prikazane promene vrednosti teorijskog i izmerenog protoka.



Slika 6.40 Grafički prikaz promene teorijskih i izmerenih vrednosti zapreminskih gubitaka za ventil RV3.

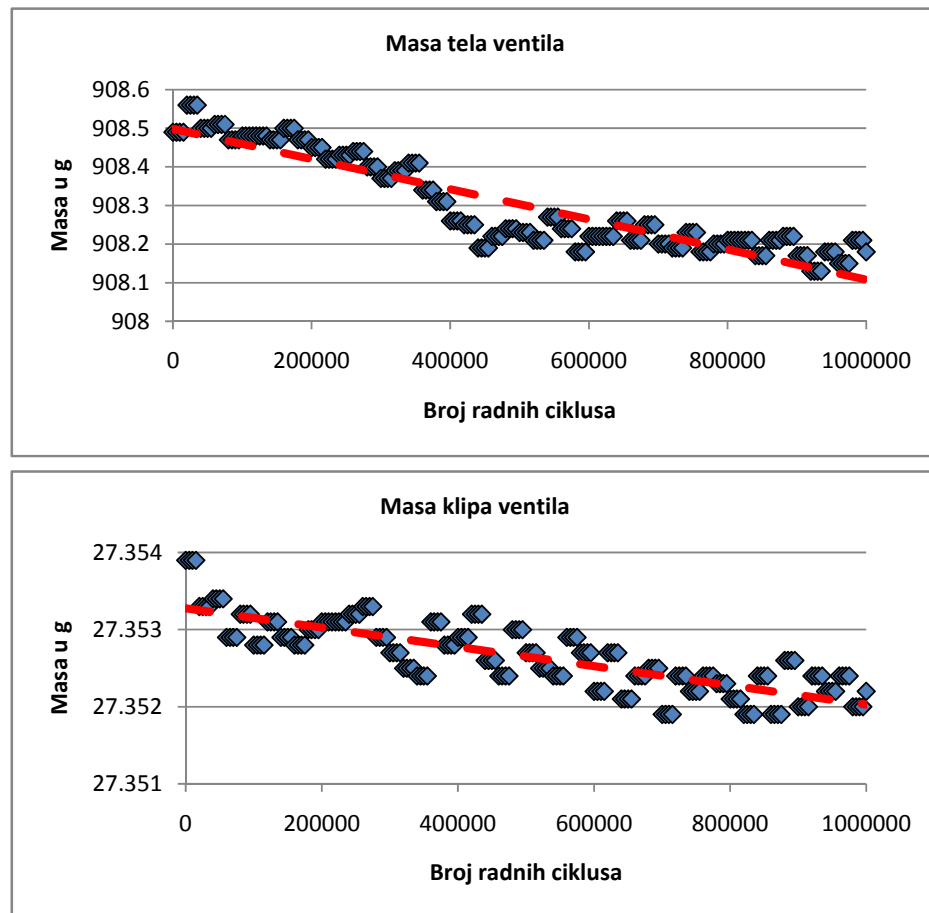
Kao što se vidi iz tabele 6.14 ali i dijagrama na slici 6.40, razlike između proračunatih (teorijskih) i izmerenih vrednosti protoka fluida kroz zatore postoje i nisu zanemarljive.

6.6.4 Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima gubitka mase

Napomene:

- Izmerene vrednosti mase su pokazatelji koji nisu od posebnog značaja za analizu u radu, već isključivo služe kao pokazatelj masenog odnosa potrošenosti radnih elemenata razvodnog ventila.
- Pre svakog merenja mase, treba imati u vidu da se kao i kod merenja prečnika prstenova klipa i cilindra u telu, vrši čišćenje odmašćivanjem za oba elementa čime se odstranjuje ulje sa površina elemenata koji se mere, kao i ulje koje se zadržalo u kanalima u telu ventila.
- Iako se koristi ovaj tretman, ne može se garantovati da su potpuno odstranjeni svi produkti habanja (sitne čestice) koji su zaostali u kanalima i konstrukcionim rupama u telu ventila. Njihovo prisustvo može uticati na rezultate merenja mase.

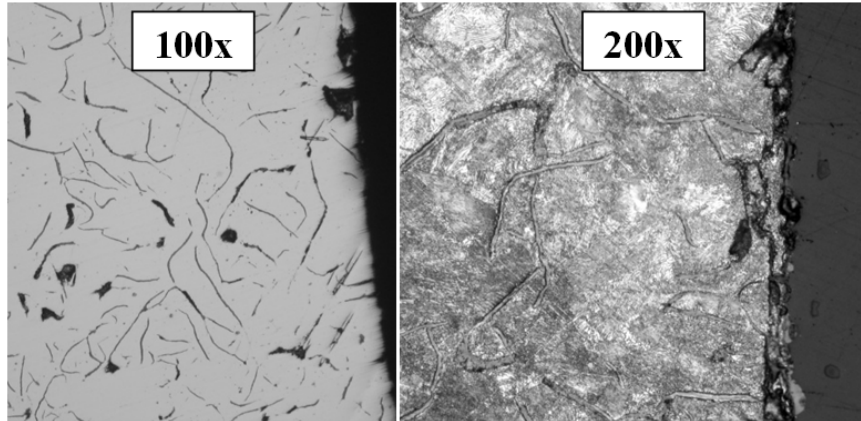
Izmerene vrednosti mase klipa i tela ventila za eksperiment br. 1 – ispitivanje ventila RV1



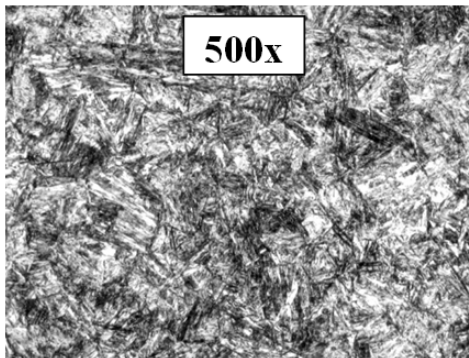
Slika 6.41 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV1.

Zapažanja

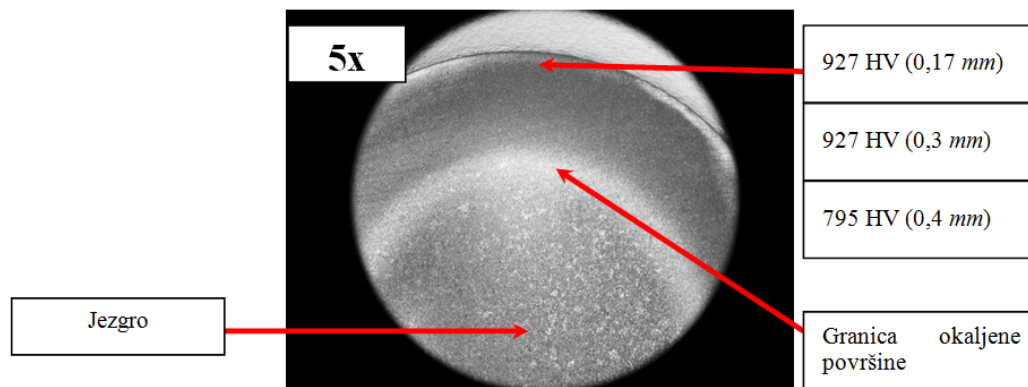
Merenjem mase tela i klipa ventila je potvrđeno da su oba elementa izgubila na masi, tako da se više trošilo telo ventila u odnosu na klip (slika 6.41). Ako se uzme u obzir da je telo za sva tri ventila izrađeno od sivog liva (koji ima homogenu perlitnu strukturu – slika 6.42 a) i da je njihova izmerena tvrdoća u opsegu od 240 do 248 BHN (što u poređenju sa Vickersovom



a) Prikaz homogene perlitne strukture (pri različitim uvećanjima) u blizini kontaktne (radne) površine cilindričnog otvora u telu ventila;



b) Austenitna struktura u jezgru klipa;



c) Prikaz izmerenih vrednosti tvrdoće na klipnom prstenu;

Slika 6.42 Snimci mikrostrukture klipa i tela ventila.

skalom iznosi 250 – 260 HV), a da su klipovi izrađeni od čelika (koji ima austenitnu strukturu - γ -Fe – slika 6.42 b) koji je okaljjen kako bi se postigla veća površinska tvrdoća od 927 HV (slika 6.42 c). Prema izmerenim podacima o tvrdoći kontaktnih površina, klipovi imaju najmanje 3,5 puta veću površinsku tvrdoću u odnosu na telo ventila.

S obzirom na to da su izmerene vrednosti mase veoma male i da postoji velika varijacija rezultata merenja, za proračun masene potrošenosti, u tabeli 6.15 se uzimaju u obzir prvih i poslednjih devet merenja mase.

Tabela 6.15 Relativni odnos masene potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV1.

Masa tela							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmerena masa tela x_i (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmerena masa tela x_j (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_j = \frac{\sum x_j}{n_j}$	$\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\bar{x}_i} \cdot 100\%$
1	0	908,49	908,5	840 000	908,17	908,18	0,035 %
2	20 000	908,56		860 000	908,21		
3	40 000	908,5		880 000	908,22		
4	60 000	908,51		900 000	908,17		
5	80 000	908,47		920 000	908,13		
6	100 000	908,48		940 000	908,18		
7	120 000	908,48		960 000	908,15		
8	140 000	908,47		980 000	908,21		
9	160 000	908,5		1 000 000	908,18		
Masa klipa							
1	0	27,3539	27,3531	840 000	27,3524	27,35223	0,0031 %
2	20 000	27,3533		860 000	27,3519		
3	40 000	27,3534		880 000	27,3526		
4	60 000	27,3529		900 000	27,352		
5	80 000	27,3532		920 000	27,3524		
6	100 000	27,3528		940 000	27,3522		
7	120 000	27,3531		960 000	27,3524		
8	140 000	27,3529		980 000	27,352		
9	160 000	27,3528		1 000 000	27,3522		

S obzirom na to da je gubitak mase neznatan, ovaj uticaj na performanse razvodnog ventila, može da se zanemari, ali pokazuje koliko je ventil, u masenom smislu, pohaban.

Ne treba zaboraviti da od materijala odstranjenog sa kontaktnih površina radnih elemenata, nastaju nove čestice koje se fluidom distribuiraju kroz sistem i tako dopiru i vrše uticaj na ostale komponente sistema koje takođe koriste mehanizam beskontaktnog zaptivanja. Ako bi se pohabana masa klipa i tela ventila posmatrale kroz generisani broj

čestica po ISO 4406/99 klasifikaciji za čistoću ulja, onda se iz tabele 6.16, može videti koliki je to broj, odnosno stepen kontaminacije.

Tabela 6.16 Maseni gubitak tela i klipa ventila RV1, iskazan u vidu generisanog broja čestica.

$\Delta m(\text{MTV})^*$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.31	Broj čestica od 4 μm	$1,2 \cdot 10^7$	ISO 31
	Broj čestica od 6 μm	$4,6 \cdot 10^5$	ISO 26
	Broj čestica od 14 μm	$3,6 \cdot 10^4$	ISO 22
	Broj čestica od 21 μm	10^4	ISO 21
$\Delta m(\text{MKV})^{**}$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.0009	Broj čestica od 4 μm	$3,7 \cdot 10^6$	ISO 22
	Broj čestica od 6 μm	$1,4 \cdot 10^5$	ISO 18
	Broj čestica od 14 μm	$1,1 \cdot 10^4$	ISO 14
	Broj čestica od 21 μm	$2,94 \cdot 10^3$	ISO 12

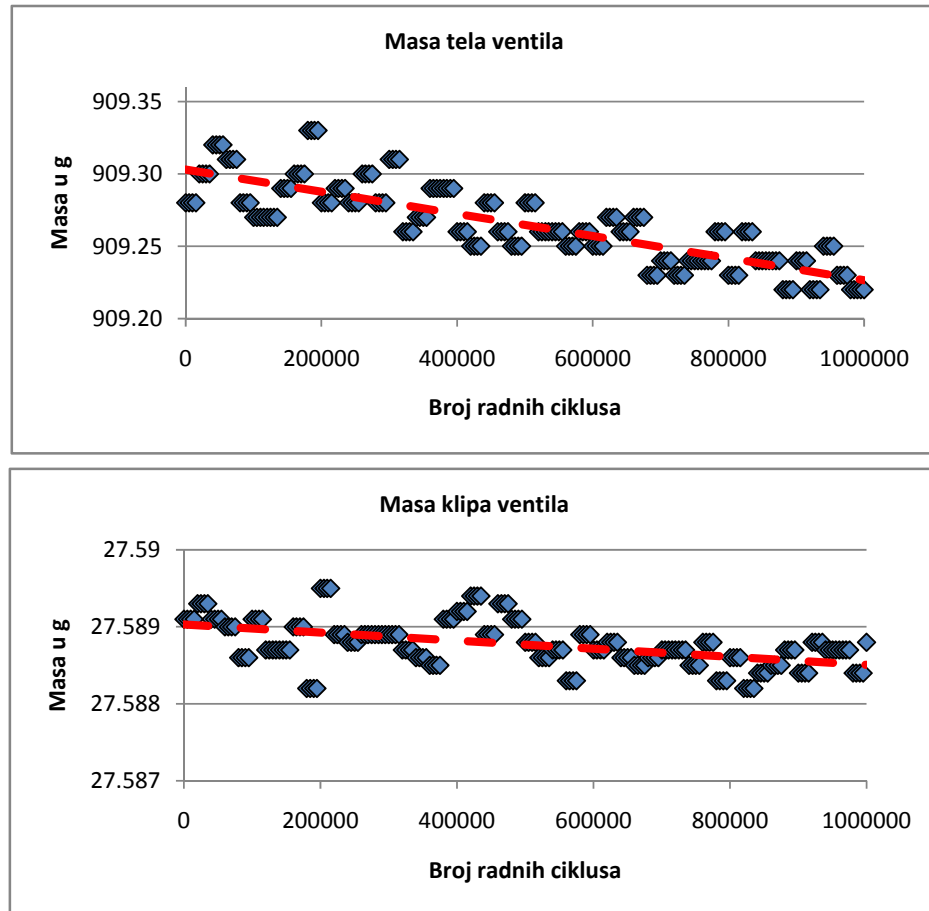
* $\Delta m(\text{MTV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.15 za masu tela;

** $\Delta m(\text{MKV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.15 za masu klipa.

Ovde treba napomenuti da se broj čestica proračunavao za svaku veličinu čestice pojedinačno, a koncentracija čestica posmatrala u zapremini od 1 ml ulja kako bi se izvršilo dodeljivanje odgovarajućeg ISO kodnog broja. Naravno, ovo nije slučaj u realnom sistemu, ali je dobar pokazatelj odnosa između pohabanosti i stepena kontaminacije koji nastaje kada taj materijal završi u radnom fluidu.

Pretpostavlja se da bi sa porastom broja ventila ugrađenih u sistem, došlo do eksponencijalnog porasta broja generisanih čestica svih veličina.

Izmerene vrednosti mase klipa i tela ventila za eksperiment br. 2 – ispitivanje ventila
RV2



Slika 6.43 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV2.

Zapažanja

Merenjem mase tela i klipa ventila RV2 je potvrđeno da su oba elementa izgubila na masi, tako da se više trošilo telo ventila u odnosu na klip (slika 6.43). U tabeli 6.17 je data analiza, odnosno relativni iznos potrošenosti klipa i tela gde je za iskazivanje ovog odnosa u obzir uzeto prvih i poslednjih devet merenja.

Tabela 6.17 Relativni odnos masene potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV2.

Masa tela							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmerena masa tela x_i (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmerena masa tela x_j (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_j = \frac{\sum x_j}{n_j}$	$\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\bar{x}_i} \cdot 100\%$
1	0	909.28	909,29	840 000	909,24	909,23	0,0066 %
2	20 000	909.30		860 000	909,24		
3	40 000	909.32		880 000	909,22		
4	60 000	909.31		900 000	909,24		
5	80 000	909.28		920 000	909,22		
6	100 000	909.27		940 000	909,25		
7	120 000	909.27		960 000	909,23		
8	140 000	909.29		980 000	909,22		
9	160 000	909.30		1 000 000	909,22		
Masa klipa							
1	0	27.5891	27,589	840 000	27,5884	27,5886	0,0014 %
2	20 000	27.5893		860 000	27,5885		
3	40 000	27.5891		880 000	27,5887		
4	60 000	27.589		900 000	27,5884		
5	80 000	27.5886		920 000	27,5888		
6	100 000	27.5891		940 000	27,5887		
7	120 000	27.5887		960 000	27,5887		
8	140 000	27.5887		980 000	27,5884		
9	160 000	27.589		1 000 000	27,5888		

Upoređujući podatke iz tabela 6.15 i 6.17 može se primetiti da se masena potrošenost kod ventila RV2 drastično smanjila u odnosu na ventil RV1. Pohabanost tela RV2, u odnosu na pohabanost tela ventila RV1, posmatrana kroz smanjenje mase, smanjila se 5,3 puta, a za klip 2,2 puta. Kao što je već rečeno i u analizi za ventil RV1, gubitak mase habajućih elemenata ventila nema uticaja na njihovu funkcionalnost, ali posmatrajući kroz generisani broj čestica po ISO kodnoj klasifikaciji možemo dobiti informaciju o stepenu kontaminacije koji se javlja kada pohabani materijal završi u radnom fluidu (tabela 6.18).

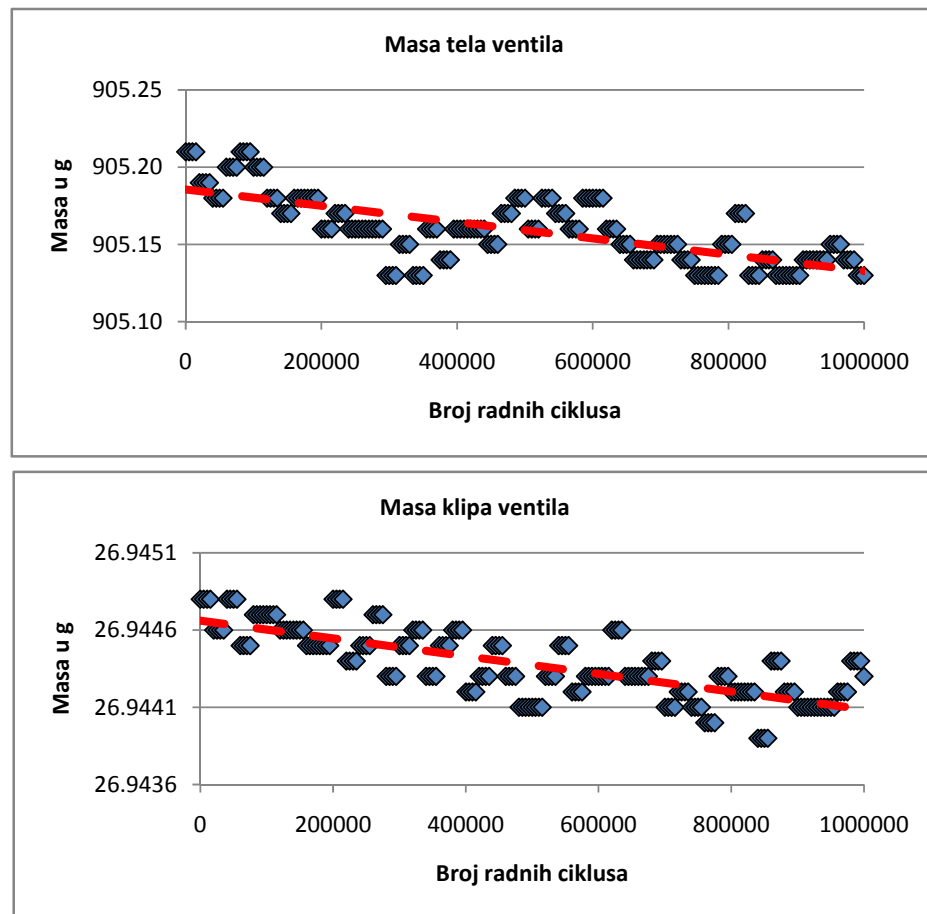
Tabela 6.18 Maseni gubitak, tela i klipa ventila RV2, iskazan u vidu generisanog broja čestica za svaku veličinu pojedinačno.

$\Delta m(\text{MTV})^*$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.06	Broj čestica od 4 μm	$2,6 \cdot 10^6$	ISO 29
	Broj čestica od 6 μm	$9 \cdot 10^4$	ISO 24
	Broj čestica od 14 μm	$7,7 \cdot 10^3$	ISO 20
	Broj čestica od 21 μm	$2,2 \cdot 10^3$	ISO 19
$\Delta m(\text{MKV})^{**}$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.0004	Broj čestica od 4 μm	$1,5 \cdot 10^4$	ISO 21
	Broj čestica od 6 μm	$5,5 \cdot 10^2$	ISO 16
	Broj čestica od 14 μm	44	ISO 13
	Broj čestica od 21 μm	13	ISO 11

* $\Delta m(\text{MTV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.17 za masu tela;

** $\Delta m(\text{MKV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.17 za masu klip.

Izmerene vrednosti mase klipa i tela ventila za eksperiment br. 3 – ispitivanje ventila
RV3



Slika 6.44 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti mase tela i klipa za ventil RV3.

Zapažanja

Očekivano, kao i u prethodnim slučajevima telo ventila RV3 se potrošilo više nego klip (slika 6.44). Procentualni gubitak mase tela i klipa ventila RV3 je prikazan u tabeli 6.19 koja sledi.

Tabela 6.19 Relativni odnos potrošenosti klipa i cilindra za ventil RV3.

Potrošena masa tela							
R. br.	Broj radnih ciklusa n_i	Izmerena masa tela x_i (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{n_i}$	Broj radnih ciklusa n_j	Izmerena masa tela x_j (g)	Prosečna vrednost (g) $\bar{x}_j = \frac{\sum x_j}{n_j}$	$\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\bar{x}_i} \cdot 100\%$
1	0	905,21	905,19	840 000	905,13	905,14	0,0055 %
2	20 000	905,19		860 000	905,14		
3	40 000	905,18		880 000	905,13		
4	60 000	905,20		900 000	905,13		
5	80 000	905,21		920 000	905,14		
6	100 000	905,20		940 000	905,14		
7	120 000	905,18		960 000	905,15		
8	140 000	905,17		980 000	905,14		
9	160 000	905,18		1 000 000	905,13		
Potrošena masa klipa							
1	0	26.9448	26,9446	840 000	26,9439	26,9442	0,0015 %
2	20 000	26.9446		860 000	26,9444		
3	40 000	26.9448		880 000	26,9442		
4	60 000	26.9445		900 000	26,9441		
5	80 000	26.9447		920 000	26,9441		
6	100 000	26.9447		940 000	26,9441		
7	120 000	26.9446		960 000	26,9442		
8	140 000	26.9446		980 000	26,9444		
9	160 000	26.9445		1 000 000	26,9443		

Ako se i u trećem slučaju gubitak mase tela i klipa posmatra kroz generisani broj čestica po ISO kodnoj klasifikaciji, dobijaju se vrednosti date u tabeli 6.20.

Tabela 6.20 Maseni gubitak tela i klipa ventila RV3, iskazan u vidu generisanog broja čestica.

$\Delta m(\text{MTV})^*$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.05	Broj čestica od 4 μm	$2,3 \cdot 10^6$	ISO 28
	Broj čestica od 6 μm	$8,4 \cdot 10^4$	ISO 24
	Broj čestica od 14 μm	$6,6 \cdot 10^3$	ISO 20
	Broj čestica od 21 μm	$2 \cdot 10^3$	ISO 18
$\Delta m(\text{MKV})^{**}$ (g)	Količina generisanih čestica posmatrana u 1 ml ulja		
0.0004	Broj čestica od 4 μm	$1,5 \cdot 10^4$	ISO 21
	Broj čestica od 6 μm	$5,5 \cdot 10^2$	ISO 16
	Broj čestica od 14 μm	44	ISO 13
	Broj čestica od 21 μm	13	ISO 11

* $\Delta m(\text{MTV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.19 za masu tela;

** $\Delta m(\text{MKV})$ – predstavlja razliku vrednosti \bar{x}_i i \bar{x}_j iz tabele 6.19 za masu klipa.

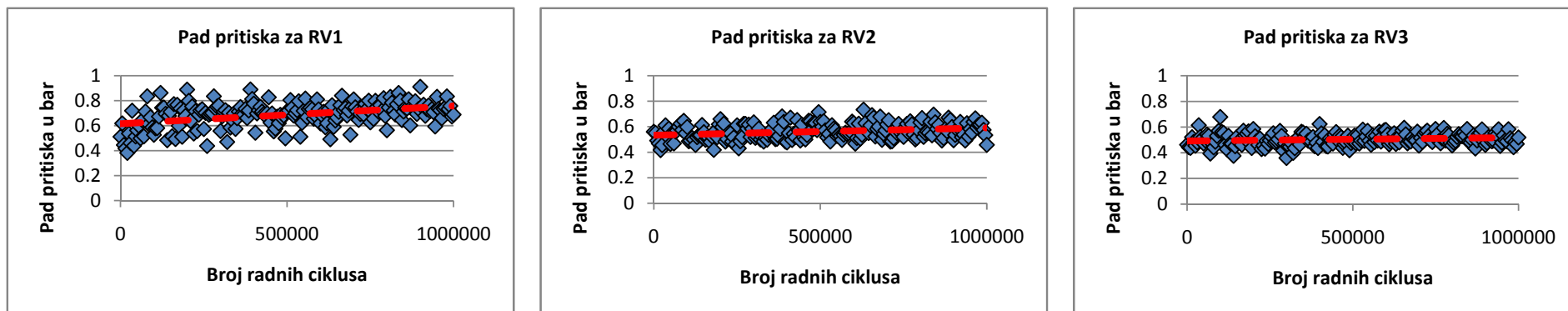
U nastavku je data uporedna tabela u kojoj su prikazani procentualno iskazani gubici mase za telo i klip sva tri ventila (tabela 6.21).

Tabela 6.21 Uporedni prikaz gubitka mase za sva tri ventila

Ventil	Procentualni gubitak mase	
	Tela	Klipa
RV1	0,035 %	0,0031 %
RV2	0,0066 %	0,0014 %
RV3	0,0055 %	0,0015 %

6.6.5 Eksperimentalni rezultati o izmerenim vrednostima pada pritiska

Izmerene vrednosti pada pritiska za ventile RV1, RV2 i RV3



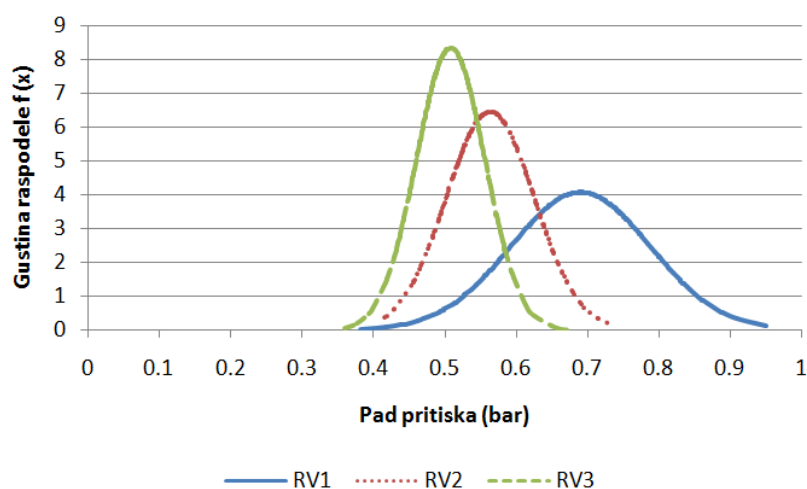
Slika 6.45 Uporedni prikaz izmerenih vrednosti padova pritiska pri različitim stepenima kontaminacije i radnom protoku od 5,8 l/min.

Zapažanja

Sa uporednog prikaza dijagrama pada pritiska na slici 6.45, može se primetiti da su startne vrednosti pada pritiska za sva tri ventila podjednake, uz manja odstupanja i da u sva tri slučaja pad pritiska ima tendenciju rasta, koja se sa povećanjem klase čistoće radnog fluida smanjuje.

Kao što je već rečeno, smanjenjem koncentracije čvrstih čestica u radnom fluidu (posmatrano od eksperimenta br. 1, ka eksperimentu br. 3), dolazi do blagog smanjenja tendencije rasta pada pritiska tokom eksploatacije razvodnog ventila. Pojava smanjenja vrednosti pada pritiska, može se dovesti u vezu sa smanjenjem tendencije porasta vrednosti zazora kroz koje fluid ističe, tj. smanjenjem veličine zapreminskih gubitaka kroz te zatore. Interesantno za primetiti iz datih dijagrama, jeste i rasipanje izmerenih vrednosti pada pritiska.

Na slici 6.46 je prikazana interpretacija rezultata merenja pomoću funkcije normalne raspodele, sa ciljem da se jasnije vide razlike u pogledu rasipanja rezultata oko srednje vrednosti. Ova odstupanja svakako da predstavljaju rezultat merne nesigurnosti senzora pritiska, ali se pretpostavlja da uticaj na rezultate merenja veličine pritiska ima i klasa čistoće radnog fluida. Na istraživanja uticaja čistoće radnog fluida na merenje vrednosti pritiska, odnosno veličine pada pritiska, autor tokom pretrage stručne i naučne literature nije naišao.



Slika 6.46 Uporedni prikaz funkcija normalne raspodele za vrednosti padova pritiska za sva tri ventila.

U slučaju ventila RV1, gde se koristi ulje najmanjeg stepena čistoće, standardna devijacija σ je najveća, a kako se povećava čistoća korišćenog ulja slučaj RV2 i RV3 devijacija se smanjuje (tabela 6.22).

Tabela 6.22 Vrednosti standardne devijacije za sva tri ventila.

/	RV1	RV2	RV3
$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	0,09811	0,06187	0,04790

Takođe se pretpostavlja da smanjenje devijacije, kao rezultat povećanja klase čistoće ima svoje ograničenje, odnosno da se povećanjem čistoće ulja može do određene mere uticati na preciznije očitavanje rezultata uz pomoć mernih instrumenata, ali da bi se ta granica utvrdila, moraju se naknadno sprovesti eksperimenti koji bi bili usmereni samo na posmatranje te pojave za različite slučajeve.

Zbog pojave pada pritiska, ali i zapreminskih gubitaka, smanjuje se efikasnost hidrauličkih sistema, a time i njegova konkurentnost drugim pogonskim uređajima. Stoga se kod sofisticiranih, savremenih hidrauličkih sistema, značajna pažnja posvećuje kondicioniranju radnog fluida, koje predstavlja komponentu od višefunkcionalnog značaja.

7 Analiza i modelovanje uticaja čvrstih čestica na rad kontaktnog para klip-cilindar

U ovom poglavlju je data obrada prikupljenih eksperimentalnih podataka i diskusija o dobijenim rezultatima.

7.1 Definisanje hipotetičkih modela za statističku proveru postojanja zavisnosti

U skladu sa ciljem istraživanja i hipotezom 3, postavljaju se sledeći pohipotetički modeli čija će značajnost biti statistički testirana sa skupom eksperimentalno dobijenih podataka:

H 3.1 – Zapreminski gubici i čvrste čestice utiču na veličinu gubitaka u vidu pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil, postavljen u radni položaj.

U okviru ove hipoteze pojedinačno će se proveriti statistička značajnost hipotetičkih modela uticaja čestica i zapreminskih gubitaka na veličinu pada pritiska, ali i značajnost hipotetičkog modela zajedničkog dejstva ovih faktora, kako bi se ustanovilo da li i koliko eksperimentalni podaci koreliraju:

H 3.1.1: Čestice u sistemu utiču na vrednost pada pritiska.

(CUS 4, 6, 14, 21) → PP

H 3.1.2: Isticanja kroz zazore utiču na vrednost pada pritiska.

(ZIUS) → PP;

H 3.1.3: Čestice u sistemu i isticanja kroz zazore utiču na vrednost pada pritiska.

(CUS 4, 6, 14, 21; ZIUS) → PP;

gde je:

CUS – izmereni broj čvrstih čestica od 4, 6, 14 i 21 μm , prisutnih u radnom fluidu u sistemu,

ZIUS – izmerena veličina zapreminskih gubitaka u statičkim uslovima rada i

PP – izmerena vrednost pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil.

H 3.2 – Čvrste čestice koje se nalaze u masi fluida utiču na veličinu gubitaka u vidu zapreminskog isticanja fluida kroz zazor.

U okviru ove hipoteze, proveriće se statistička značajnost hipotetičkih modela uticaja čestica u sistemu i čestica u uzorku na veličinu zapreminskih gubitaka, za statičke i dinamičke uslove rada:

H 3.2.1: Čestice koje prolaze kroz zazor u statičkim uslovima rada, imaju uticaja na količinu isticanja fluida kroz zazor.

(CUUS 4, 6, 14, 21) → ZIUS;

H 3.2.2: Čestice koje se nalaze u sistemu i čestice koje prolaze kroz zazor u statičkim uslovima rada, imaju uticaja na količinu isticanja fluida kroz zazor.

(CUS 4, 6, 14, 21; CUUS 4, 6, 14, 21) → ZIUS;

H 3.2.3: Čestice koje prolaze kroz zazor u dinamičkim uslovima rada, imaju uticaja na količinu isticanja fluida kroz zazor.

(CUUD 4, 6, 14, 21) → ZIUD;

H 3.2.4: Čestice koje se nalaze u sistemu i čestice koje prolaze kroz zazor u statičkim uslovima rada, imaju uticaja na količinu isticanja fluida kroz zazor.

(CUS 4, 6, 14, 21; CUUD 4, 6, 14, 21) → ZIUD;

gde je:

CUUS – izmereni broj čvrstih čestica od 4, 6, 14 i 21 μm , prisutnih u uzorku fluida koji je istekao kroz zazor u statičkim uslovima rada,

CUUD – izmereni broj čvrstih čestica od 4, 6, 14 i 21 μm , prisutnih u uzorku fluida koji je istekao kroz zazor u dinamičkim uslovima rada i

ZIUD – izmerena veličina zapreminskih gubitaka u dinamičkim uslovima rada.

7.2 Uslovi primene regresione analize

Kako nacrt istraživanja uključuje konstrukciju predikcionog modela za svaku od postavljenih hipoteza i s obzirom na specifičnosti nacrta, koji ne zadovoljavaju uslove za primenu multiple regresione analize [20]:

- izražena međuzavisnost opservacija (postojanje serijske autokorelacije),
- narušena pretpostavka o homoskedasticitetu,

kako bi se odgovorilo na postavljena istraživačka pitanja, primenjene su dve nezavisne regresione analize.

Prva, linearna multipla regresiona analiza [20] je upotrebljena za procenu parametara regresionog modela, koju uključuju: statističku značajnost modela, visinu F-testa i procenat objašnjene varijanse kriterijuma (na osnovu seta prediktora). Druga, regresiona analiza sa robustnim proceniteljem koeficijenata [108] je primenjena kako bi se dobila tačnija procena parametara prediktora u modelu: parcijalnog doprinosa prediktora i nivoa statističke značajnosti. Kako regresiona analiza sa robustnim proceniteljem koeficijenata koriguje formule za procenu koeficijenata u odnosu na autokorelaciju (međuzavisnost opservacija

merjenja) i homoskedasticitet (standardna devijacija greške merjenja je konstantna i ne zavisi od drugih promenljivih) [108], opravdano je primeniti u ovakvom istraživačkom nacrtu.

Za potrebe obrade podataka je upotrebljen statistički paket R for Windows (v. 3.1.1.) [83]. U okviru ovog statističkog paketa je upotrebljena biblioteka „lmtest“ [108] za potrebe linearnog multiplog regresionog modela, kao i biblioteka „sandwich“ [108], za potrebe regresione analize sa robustnom procenom koeficijenata.

U svim sprovedenim analizama su upotrebljeni sirovi rezultati, prikupljeni tokom eksperimenata, tj. skorovi nisu transformisani.

7.3 Rezultati statističke analize

U ovom delu disertacije su prikazani rezultati statističke analize, odnosno provere statističke značajnosti postavljenih hipotetičkih modela.

Provera značajnosti za H 3.1.1: (CUS 4, 6, 14, 21) → PP

Tabela 7.1 Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	$df(F)$	p nivo
	0,115	6.351	4/196	8e-05
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	-1,6319	1,3986	-1,1668	0,2433
cus4	0,1714	0,0805	2,1302	0,0332
cus6	-0,0717	0,0434	-1,6512	0,0987
cus14	-0,0642	0,0218	-2,9409	0,0033
cus21	0,0520	0,0206	2,5236	0,0116

Tabela 7.2 Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	$df(F)$	p nivo
	0.024	1.209	4/196	0.308

Tabela 7.3 Značajnost regresionog modela H 3.1.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	$df(F)$	p nivo
	0.007	0.322	4/196	0.836

Komentar: Proverom hipotetičkog modela H 3.1.1 primenom regresione metode pokazalo se da model, samo u slučaju ventila RV1 ima veoma malu značajnost za analizirani skup podataka. Kod preostala dva ventila test nije pokazao da postoji statistička značajnost ovog modela, tako da se **hipotetički model H 3.1.1 ne prihvata**.

Provera značajnosti za H 3.1.2: (ZIUS) → PP

Tabela 7.4 Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,182	44,26	1/199	2,234e-10
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	0,49692695	0,04780928	10,3939	2,2e-16
zius	0,0176507	0,00040356	4,3737	1,221e-05

Tabela 7.5 Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,059	12,49	1/199	0,000509
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	0,4779554	0,0256342	18,6452	2,2e-16
zius	0,0094096	0,0027092	3,4732	0,0005143

Tabela 7.6 Značajnost regresionog modela H 3.1.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,031	6,26	1/199	0,013
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	0,43980345	0,02432668	18,0791	2,2e-16
zius	0,00072290	0,00024179	2,9898	0,011792

Komentar: Proverom značajnosti hipoteze H 3.1.2, analiza je pokazala da je u slučaju sva tri ventila ova hipoteza značajna. Međutim, veoma mali procenat zavisne promenljive je objašnjen nezavisnom promenljivom. Iz tih razloga, može se zaključiti da se **hipotetički model H 3.1.2 ne prihvata**.

Provera značajnosti za H 3.1.3: (CUS 4, 6, 14, 21; ZIUS) → PP

Tabela 7.7 Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0.181	9.824	5/195	1.606e-08

Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	-0,2448	1,1694	-0,2093	0,8342
cus4	0,0734	0,0669	1,0975	0,2724
cus6	-0,0541	0,0373	-1,4502	0,1470
cus14	-0,0158	0,0280	-0,5647	0,5723
cus21	0,0263	0,0222	1,1830	0,2368
zius	0,0015	0,0005	3,2050	0,0014

Tabela 7.8 Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
R^2	F -test	$df(F)$	p nivo	
0,073	3.072	5/195	0.010802	
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	-0,8557	0,8292	-1,0319	0,3021
cus4	0,0487	0,0368	1,3241	0,0185
cus6	0,0284	0,0132	2,1429	0,03021
cus14	-0,0012	0,0324	-0,0356	0,2056
cus21	-0,0186	0,0194	-0,9587	0,7585
zius	0,0126	0,0037	3,4356	0,3156

Tabela 7.9 Značajnost regresionog modela H 3.1.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
R^2	F -test	$df(F)$	p nivo	
0,054	2.232	5/195	0.053	
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	0.2763	0.8103	0.3410	0.7331
cus4	-0.0236	0.0343	-0.6872	0.4920
cus6	0.0257	0.0233	1.1031	0.2700
cus14	0.0059	0.0014	4.3226	0.3853
cus21	0.0194	0.0235	0.8251	0.4093
zius	0.0009	0.0003	2.7637	0.0057

Komentar: Proverom značajnosti hipoteze H 3.1.3 je utvrđeno da je statistički značajna za sva tri ventila, ali da je kao i kod hipoteze H 3.1.2, mali procenat zavisne promenljive objašnjen skupom podataka nezavisnih promenljivih. Zaključno, uticaj čestica i zapreminskih gubitaka na veličinu pada pritiska pri proticanju fluida kroz ventil je izuzetno mali, te se stoga, **hipotetički model H 3.1.3 ne prihvata.**

Provera značajnosti za H 3.2.1: (CUUS 4, 6, 14, 21) → ZIUS

Tabela 7.10 Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,403	33,08	4//216	1,21e-06
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	692,7915	296,2827	2,3383	0,01937
cuus4	-10,1066	14,8036	-0,6827	0,04879
cuus6	-7,9554	16,3278	-0,4872	0,62610
cuus14	-13,9040	7,8752	-1,7655	0,03747
cuus21	-3,8142	9,5208	-0,4006	0,68871

Tabela 7.11 Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,676	102,089	4/196	2,2e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	55,67571	5,81423	9,5758	2,2e-16
cuus4	-1,44227	0,33703	-4,2793	1,874e-05
cuus6	-0,17295	0,06176	-2,8004	0,003103
cuus14	-0,85612	0,20509	-4,1743	2,989e-05
cuus21	-0,27372	0,20296	-1,3487	0,3541

Tabela 7.12 Značajnost regresionog modela H 3.2.1 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,756	151,422	4/196	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	654,5604	44,7667	14,6216	2,2e-16
cuus4	-6,0857	2,9202	-2,0840	0,03716
cuus6	-6,5864	4,4448	-1,4818	0,13839
cuus14	-25,8616	4,2639	-6,0652	1,318e-09
cuus21	-7,9035	3,1248	-2,5293	0,01143

Komentar: Proverom statističke značajnosti hipotetičkog modela H 3.2.1 se pokazalo da je statistički značajan s obzirom na dobijenu vrednost p nivoa i da je kriterijumska varijabla, odnosno zavisna promenljiva u zadovoljavajućem procentu objašnjena posmatranim nezavisnim promenljivim. Ovim se opravdava usvajanje hipoteze H 3.2.1, odnosno da je

uticaj čestica koje prolaze kroz zazor, na isticanje fluida u statičkim uslovima rada, veoma značajan. Zaključno, **hipotetički model H 3.2.1 se usvaja**.

Provera značajnosti za H 3.2.2: (CUS 4, 6, 14, 21; CUUS 4, 6, 14, 21) → ZIUS

Tabela 7.13 Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,536	27,68	8/192	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	-550,9362	387,1653	-1,4230	0,1547
cus4	80,1927	19,8921	4,0314	0,0001
cus6	-16,5809	11,4010	-1,4543	0,1459
cus14	-25,8824	7,6479	-3,3843	0,0007
cus21	15,3243	5,7523	2,6640	0,0077
cuus4	-23,8570	9,3575	-2,5495	0,0108
cuus6	-7,7992	13,0952	-0,5956	0,5515
cuus14	11,2157	7,7891	1,4399	0,0505
cuus21	-14,2926	6,4250	-2,2245	0,0261

Tabela 7.14 Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,693	54,272	8/192	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	116,8337	18,3213	6,3769	1,807e-10
cus4	-3,0152	0,8550	-3,5266	0,0401
cus6	-0,3563	0,2726	-1,3071	0,01512
cus14	-0,3253	0,3884	-0,8375	0,00243
cus21	0,2393	0,3140	0,7621	0,4960
cuus4	-1,0886	0,3356	-3,2436	0,0012
cuus6	-0,1092	0,0387	-2,8244	0,4847
cuus14	-0,7898	0,2176	-3,6295	0,0003
cuus21	-0,1819	0,1931	-0,9416	0,3464

Tabela 7.15 Značajnost regresionog modela H 3.2.2 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela*				
	R^2	F-test	$df(F)$	p nivo
	0.758	75.317	8/192	2.1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	957.9613	144.4759	6.6306	3.34e-11
cus4	-13.1317	6.3431	-2.0702	0.0384
cus6	-4.7438	4.8321	-0.9817	0.3262
cus14	-0.0314	0.2043	-0.1538	0.8778
cus21	2.3399	4.3947	0.5324	0.5944
cuus4	-6.7720	2.8067	-2.4128	0.0158
cuus6	-6.6808	4.2059	-1.5884	0.0112
cuus14	-22.2398	3.8101	-5.8372	5.31e-09
cuus21	-8.6081	2.9706	-2.8978	0.0038

Komentar: Proverom statističke značajnosti za hipotezu H 3.2.2 se pokazalo da je statistički značajna u slučaju sva tri ventila, i da je zavisna promenljiva (ZIUS) u zadovoljavajućem procentu objašnjena skupom nezavisnih promenljivih. Na osnovu rezultata prikazanih u prethodnim tabelama, **hipotetički model H 3.2.2 se usvaja kao značajan.**

Provera značajnosti za H 3.2.3: (CUUD 4, 6, 14, 21) → ZIUD

Tabela 7.16 Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	$df(F)$	p nivo
	0,328	23,94	4/196	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	1231,2442	200,7937	6,1319	8,684e-10
cuud4	-31,6470	10,2524	-3,0868	0,002023
cuud6	-42,6690	6,7628	-6,3094	2,801e-10
cuud14	33,4775	12,4115	2,6973	0,006990
cuud21	-6,3760	9,7243	-0,6557	0,512033

Tabela 7.17 Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	df(F)	p nivo
	0,610	76,48	4/196	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	88,91588	6,51216	13,6538	2,2e-16
cuud4	-2,03047	0,32870	-6,1772	6,524e-10
cuud6	-0,72058	0,29341	-2,4559	0,001405
cuud14	-0,82866	0,18468	-4,4869	1,228e-06
cuud21	-0,81651	0,16022	-5,0961	1,466e-07

Tabela 7.18 Značajnost regresionog modela H 3.2.3 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	df(F)	p nivo
	0,790	184,38	4/196	2.1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	1139,75093	55,58218	20,5057	2,2e-16
cuud4	-30,09385	2,42571	-12,4062	2,2e-16
cuud6	-13,11109	2,39640	-5,4712	4,471e-08
cuud14	-17,28772	2,03364	-8,5009	2,2e-16
cuud21	-0,32824	1,38735	-0,2366	0,813

Komentar: Proverom statističke značajnosti za hipotezu H 3.2.3 se pokazalo da je statistički značajna s obzirom na dobijenu vrednost p nivoa za svaki ventil pojedinačno, i da je zavisna promenljiva u zadovoljavajućem procentu objašnjena posmatranom nezavisnom promenljivom. Ovim se opravdava usvajanje hipoteze H 3.2.3, kojom je pokazano da je uticaj čestica, koje prolaze kroz zazor, na isticanje fluida u dinamičkim uslovima rada, veoma značajan. Zaključno, **hipotetički model H 3.2.3 se usvaja.**

Provera značajnosti za H 3.2.4: (CUS 4, 6, 14, 21; CUUD 4, 6, 14, 21) → ZIUD

Tabela 7.19 Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV1.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0,501	24,14	8/192	2,1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	-72,0924	328,0993	-0,2197	0,8261
cus4	56,2742	16,2423	3,4647	0,0005
cus6	-0,7202	12,5261	-0,0575	0,0441
cus14	-29,9231	10,0562	-2,9756	0,0029
cus21	25,4641	6,4693	3,9362	0,0001
cuud4	-34,6189	8,4357	-4,1038	0,0000
cuud6	-20,8332	7,6325	-2,7295	0,0613
cuud14	29,1424	12,3188	2,3657	0,0180
cuud21	-13,7698	9,0709	-1,5180	0,0190

Tabela 7.20 Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV2.

Parametri regresionog modela*				
	R^2	F -test	$df(F)$	p nivo
	0.662	46.933	8/192	2.1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	168,9058	28,3575	5,9563	2,58E-09
cus4	-5,1122	1,5146	-3,3752	0,0007
cus6	0,2573	0,4250	0,6053	0,2450
cus14	0,3406	0,5521	0,6169	0,3173
cus21	0,2084	0,4751	0,4387	0,8708
cuud4	-1,4887	0,3032	-4,9101	9,11E-07
cuud6	-0,5561	0,2948	-1,8865	0,0592
cuud14	-0,6265	0,1828	-3,4282	0,0216
cuud21	-0,6059	0,1468	-4,1268	1,68E-05

Tabela 7.21 Značajnost regresionog modela H 3.2.4 i pojedinačnih parcijalnih doprinosa prediktora za rezultate eksperimenta sa ventilom RV3.

Parametri regresionog modela				
	R^2	F-test	df(F)	p nivo
	0.796	93.673	8/192	2.1e-16
Parametri prediktora				
Prediktor	Parcijalni doprinos (B)	Standardna Greška	z vrednost	p nivo (z)
(Intercept)	1512.9560	129.7983	11.6562	2.20E-16
cus4	-13.7612	5.7740	-2.3833	0.20172
cus6	-10.0112	5.6097	-1.7846	0.3943
cus14	-0.7810	0.2769	-2.8202	0.0048
cus21	-4.9362	4.7506	-1.0391	0.2988
cuud4	-27.6247	2.4791	-11.1433	2.20E-16
cuud6	-10.8465	2.2825	-4.7521	2.01E-06
cuud14	-14.6635	1.8998	-7.7184	1.18E-14
cuud21	-0.5203	1.2372	-0.4206	0.6741

Komentar: Proverom statističke značajnosti za hipotezu H 3.2.4 se pokazalo da je statistički značajna u slučaju sva tri ventila, i da je zavisna promenljiva (ZIUD) u zadovoljavajućem procentu objašnjena skupom nezavisnih promenljivih. Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama, **hipotetički model H 3.2.4 se usvaja.**

7.4 Analiza i modelovanje promene zazora i isticanja fluida

Na osnovu prethodno sprovedene statističke analize je pokazano da između broja čvrstih čestica u analiziranim uzorcima i količine isteklog fluida kroz zazore postoji zavisnost, ali ne i između broja čvrstih čestica i veličine pada pritiska, te će u daljem toku analize fokus biti na analizi promene zazora i zapreminskih gubitaka.

7.4.1 Analiza promene kritičnih zazora

Prema eksperimentalnim rezultatima, zazor Z_2 je pretrpeo najveća oštećenja i stoga se opravdano smatra kritičnim zazorom, dok zazor Z_3 predstavlja zazor kod kojeg su merena isticanja fluida, odnosno zapreminski gubici. Iz tih razloga ovi zazori predstavljaju predmet dalje analize. U nastavku je data sumirajuća tabela sa pregledom odnosa (K_z) početne i krajnje izmerene vrednosti zazora za sva tri ventila (tabela 7.22).

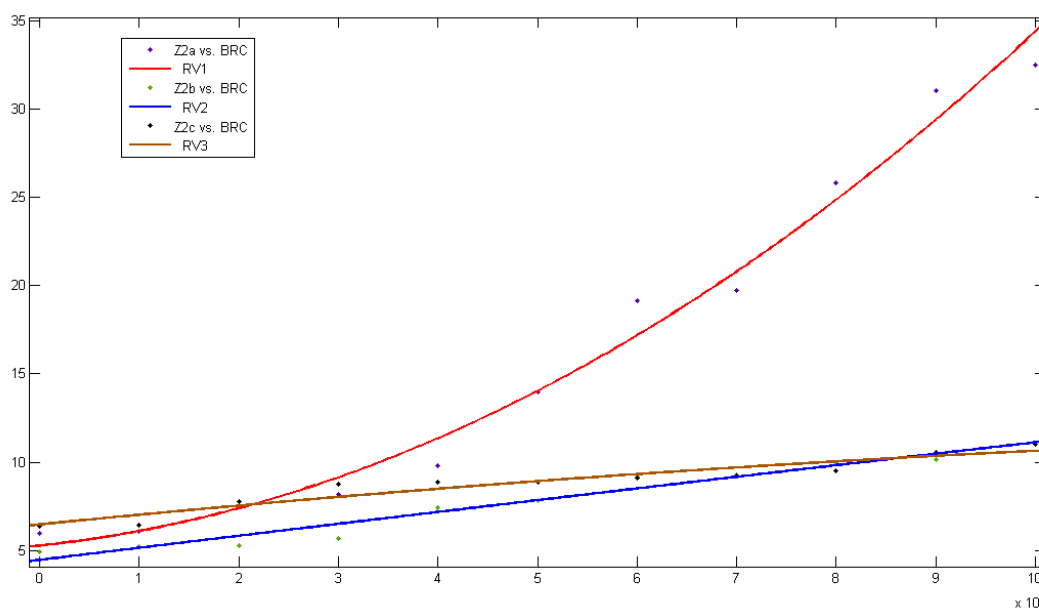
Tabela 7.22 Vrednosti koeficijenta K_z za sva tri ventila.

Ventil	Vrednosti koeficijenta K_z				Čistoća ulja
	K_{Z1}	K_{Z2}	K_{Z3}	K_{Z4}	
RV1	2,69	5,46	1,51	1,31	NAS 11
RV2	1,96	2,22	1,38	1,25	NAS 10
RV3	1,27	1,72	1,31	1,23	NAS 9

Prikazane vrednosti sasvim jasno ukazuju na intenzitet trošenja kontaktnih površina klipa-cilindra u odnosu na korišćenu klasu čistoće ulja kod sva tri ventila. Odnos početne i krajnje vrednosti veličine zazora može se posmatrati kao koeficijent potrošenosti i kao takav koristiti u daljoj analizi.

U nastavku su dati rezultati dobijeni postupkom fitovanja metodom najmanjih kvadrata za skup eksperimentalno dobijenih vrednosti zazora Z_2 i Z_3 . Za sprovođenje ovog postupka je korišćen softverski alat MATLAB.

Na slici 7.1 je prikazan dijagram sa krivama koje prema koeficijentu determinacije, najbolje opisuju skup eksperimentalnih podataka za sva tri ventila. Sve tri funkcije predstavljaju polinomske funkcije drugog reda.



Slika 7.1 Fitovane krive koje opisuju promenu veličine zazora Z_2 za sva tri ventila.

Polinomske funkcije drugog reda su odabrane kao najreprezentativnije s obzirom na to da imaju najviše vrednosti koeficijenta determinacije (tabela 7.23) i minimalne sume kvadratnih odstupanja. Pored polinomske funkcije, analizirane su i linearna, odnosno eksponencijalna funkcija za skup vrednosti zazora kod sva tri ventila.

Tabela 7.23 Vrednosti koef. determinacije kod fitovanja vrednosti zazora Z_2 različitim funkcijama za sva tri ventila.

Funkcija	Fit 1 (RV1)	Fit 2 (RV2)	Fit 3 (RV3)
	Koeficijent determinacije / Suma kvadratnih odstupanja		
Linearna funkcija	0,9376 / 61,92	0,9628 / 1,88	0,9067 / 1,962
Polinom II reda	0,9838 / 16,05	0,9629 / 1,876	0,9154 / 1,78
Eksponenc. funkcija	0,9753 / 24,5	0,9458 / 2,744	0,8924 / 2,263

Prikaz odgovarajućih polinomskih funkcija (modela) za određivanje promene zazora Z_2

Fit 1 – RV1

Prva funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV1 ventil, koji je radio sa najprljavijim uljem (NAS 11).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = 2.312 \cdot 10^{-11} (1.197 \cdot 10^{-11}, 3.427 \cdot 10^{-11}),$$

$$b = 5.949 \cdot 10^{-6} (-5.627 \cdot 10^{-6}, 1.753 \cdot 10^{-5}),$$

$$c = 5.273 (2.785, 7.761),$$

a funkcija glasi:

$$s(BRC) = 2.312 \cdot 10^{-11} \cdot BRC^2 + 5.949 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 5.273, \quad (7.1)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_2), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 2 – RV2

Druga funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV2 ventil, koji je radio sa srednje prljavim uljem (NAS 10).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = -2.098 \cdot 10^{-13} (-4.022 \cdot 10^{-12}, 3.603 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 6.864 \cdot 10^{-6} (2.906 \cdot 10^{-6}, 1.082 \cdot 10^{-5}),$$

$$c = 4.459 (3.609, 5.31),$$

a funkcija glasi:

$$s(BRC) = -2.098 \cdot 10^{-13} \cdot BRC^2 + 6.864 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 4.459, \quad (7.2)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_2), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 3 – RV3

Treća funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV3 ventil, koji je radio sa, uslovno rečeno, čistim uljem (NAS 9).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = -1.457 \cdot 10^{-12} (-5.17 \cdot 10^{-12}, 2.256 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 5.621 \cdot 10^{-6} (1.765 \cdot 10^{-6}, 9.476 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 6.468 (5.639, 7.296),$$

a funkcija glasi:

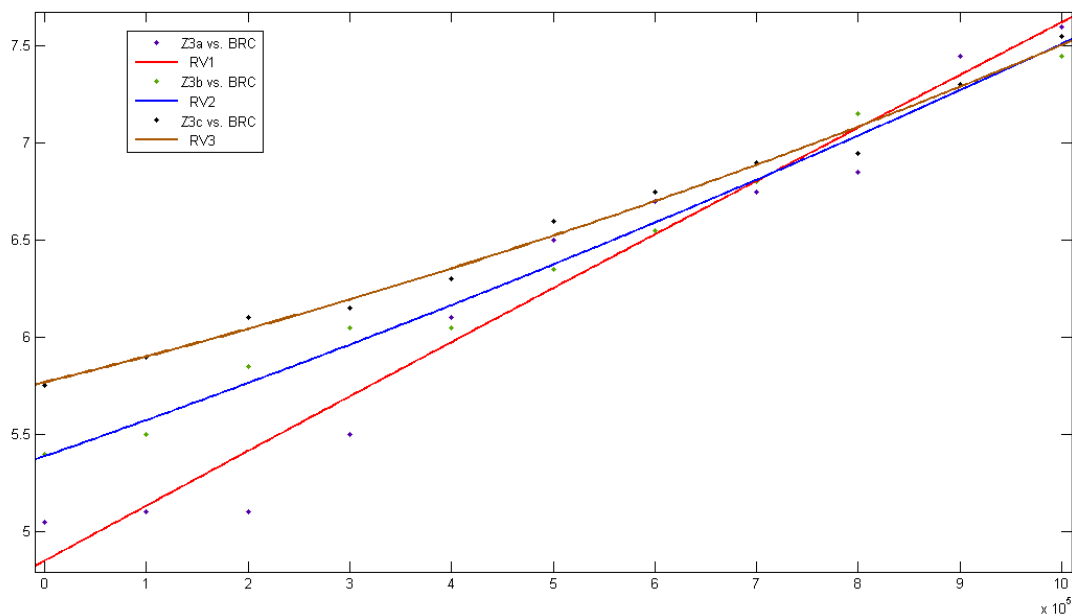
$$s(BRC) = -1.457 \cdot 10^{-12} \cdot BRC^2 + 5.621 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 6.468, \quad (7.3)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_2), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Treba napomenuti da bi se dobijene polinomske funkcije uz verifikaciju kroz dodatna eksperimentalna ispitivanja mogle u načelu primeniti u praksi, uz uslov da se kontroliše i održava određeni nivo čistoće radnog fluida.

Na slici 7.2 je prikazan dijagram sa krivama koje prema koeficijentu determinacije, najbolje opisuju skup promene vrednosti zazora Z_3 za sva tri ventila.



Slika 7.2 Fitovane krive koje opisuju promenu veličine zazora Z_3 za sva tri ventila.

Kao i u slučaju sa vrednostima zazora Z_2 , i vrednosti zazora Z_3 najprikladnije su opisane sa polinomsom funkcijom drugog reda. U tabeli 7.3 su date karakteristične vrednosti analiziranih slučajeva za sva tri ventila.

Tabela 7.24 Vrednosti koef. determinacije kod fitovanja vrednosti zazora Z_3 različitim funkcijama za sva tri ventila.

Funkcija	Fit 1 - RV1	Fit 2 – RV2	Fit 3 – RV3
	Koeficijent determinacije / Suma kvadratnih odstupanja		
Linearna funkcija	0,9602 / 0,3505	0,9879 / 0,0607	0,9837 / 0,05491
Polinom II reda	0.9603 / 0,35	0.9894 / 0,05313	0.989 / 0,03718
Ekspencijalna funkcija	0,9554 / 0,3926	0,9893 / 0,05361	0,9877 / 0,04133

Prikaz odgovarajućih polinomskih funkcija (modela) za određivanje promene zazora Z_3

Fit 1 – RV1

Prva funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV1 ventil, koji je radio sa najprljavijim uljem (NAS 11).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = -6.993 \cdot 10^{-14} (-1.717 \cdot 10^{-12}, 1.577 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 2.843 \cdot 10^{-6} (1.133 \cdot 10^{-6}, 4.552 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 4.849 (4.481, 5.216),$$

a funkcija glasi:

$$s(BRC) = -6.993 \cdot 10^{-14} \cdot BRC^2 + 2.843 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 4.849, \quad (7.4)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_3), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 2 – RV2

Druga funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV2 ventil, koji je radio sa srednje prljavim uljem (NAS 10).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = 2.972 \cdot 10^{-13} (-3.443 \cdot 10^{-13}, 9.387 \cdot 10^{-13}),$$

$$b = 1.826 \cdot 10^{-6} (1.159 \cdot 10^{-6}, 2.492 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 5.388 (5.245, 5.531),$$

a funkcija glasi:

$$s(BRC) = 2.972 \cdot 10^{-13} \cdot BRC^2 + 1.826 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 5.388, \quad (7.5)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_3), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 3 – RV3

Treća funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV3 ventil, koji je radio sa, uslovno rečeno, čistim uljem (NAS 9).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = 4.545 \cdot 10^{-13} (-8.216 \cdot 10^{-14}, 9.913 \cdot 10^{-13}),$$

$$b = 1.282 \cdot 10^{-6} (7.246 \cdot 10^{-7}, 1.839 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 5.786 (5.648, 5.888),$$

a funkcija glasi:

$$s(BRC) = 4.545 \cdot 10^{-13} \cdot BRC^2 + 1.282 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 5.786, \quad (7.6)$$

gde je:

s – zavisna promenljiva (Z_3), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

7.4.2 Analiza isticanja fluida kroz zazor

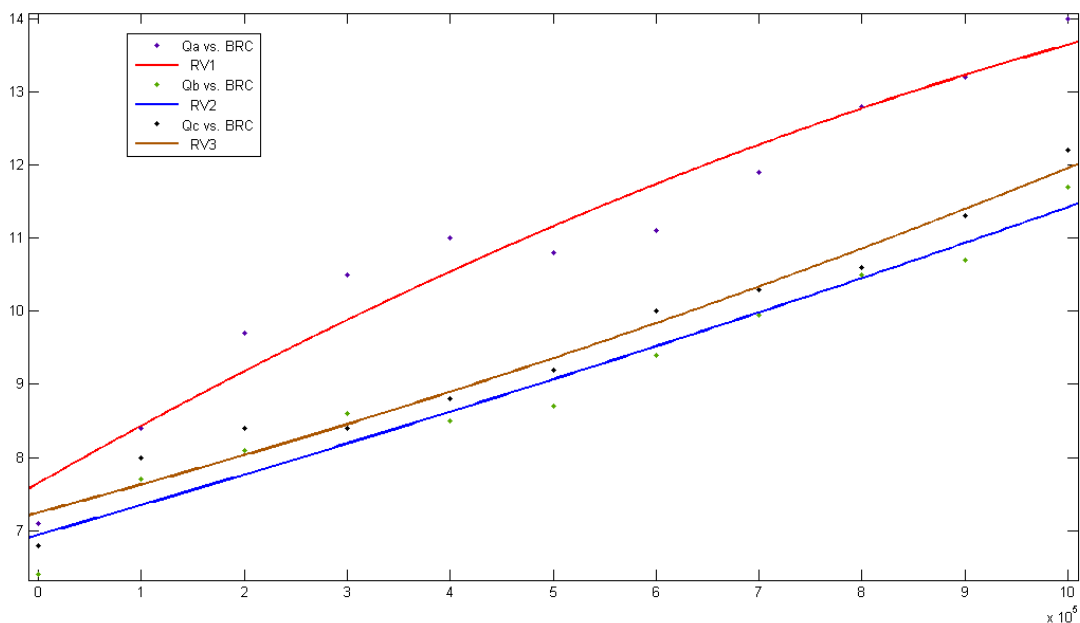
U nastavku se daje sumirajuća tabela sa pregledom vrednosti odnosa (K_v) između početnih i krajnjih vrednosti protoka kroz zazor za sva tri ventila (tabela 7.25). Iz nje može da se primeti kako vrednost odnosa K_v opada idući od RV1 ka RV2, međutim, kod RV3 ona raste u oba slučaja, tj. u slučaju statičkih, i u slučaju dinamičkih uslova rada. Dakle, habanje kontaktnih površina i povećanje veličine zazora kod ventila RV3 je najmanje, ali bez obzira na manje veličine zazora, dolazi do povećanja zapreminskih gubitaka.

Tabela 7.25 Vrednosti odnosa (K_v) početne i krajnje vrednosti protoka kroz zazor Z_3 za sva tri ventila.

/		RV1		RV2		RV3	
Vrednosti radijalnih zazora u (μm)		$s_{(0)}$	$s_{(10^6)}$	$s_{(0)}$	$s_{(10^6)}$	$s_{(0)}$	$s_{(10^6)}$
		5,1	7,6	5,4	7,4	5,75	7,55
Statički uslovi rada	\bar{x}_i^* (ml/min)	6,39		6,33		6,4	
	\bar{x}_j^* (ml/min)	13,38		10,65		11,3	
	K_{vs}	2,09		1,68		1,77	
Dinamički Uslovi rada	\bar{x}_i^* (ml/min)	13,27		10,74		9,5	
	\bar{x}_j^* (ml/min)	21,65		16,38		14,8	
	K_{vd}	1,63		1,53		1,56	

*Vrednosti preuzete iz tabela: 6.9 (za RV1), 6.11 (za RV2) i 6.13 (za RV3)

U nastavku je data slika 7.3 na kojoj su prikazane funkcije koje najbolje opisuju skup podataka izmerenih za proticanja u statičkim uslovima rada.



Slika 7.3 Fitovane krive koje opisuju promenu veličine protoka kroz zazor Z_3 za sva tri ventila.

Kao i u slučaju sa vrednostima zazora Z_2 i Z_3 , i vrednosti protoka kroz zazor najprikladnije su opisane sa polinomskom funkcijom drugog reda. U tabeli 7.26 su date karakteristične vrednosti analiziranih slučajeva za sva tri ventila.

Tabela 7.26 Vrednosti koef. determinacije kod fitovanja vrednosti protoka kroz zazor različitim funkcijama za sva tri ventila.

Funkcija	Fit 1	Fit 2	Fit 3
	Koeficijent determinacije / Suma kvadratnih odstupanja		
Linearna funkcija	0,9439 / 2,347	0,956 / 1,016	0,97 / 0,7542
Polinom II reda	0,9526 / 1,982	0,9568 / 0,9981	0,9733 / 0,6719
Eksponecijalna funkcija	0,9263 / 3,084	0,9561 / 1,014	0,9738 / 0,6601

Prikaz odgovarajućih polinomskih funkcija (modela) koje opisuju isticanje kroz zazor Z_3

Fit 1 – RV1

Prva funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV1 ventil, koji je radio sa najprljavijim uljem (NAS 11).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = -2.063 \cdot 10^{-12} (-5.982 \cdot 10^{-12}, 1.856 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 8.054 \cdot 10^{-6} (3.985 \cdot 10^{-6}, 1.212 \cdot 10^{-5}),$$

$$c = 7.65 (6.775, 8.524),$$

a funkcija glasi:

$$Q(BRC) = -2.063 \cdot 10^{-12} \cdot BRC^2 + 8.054 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 7.65, \quad (7.7)$$

gde je:

Q – zavisna promenljiva (protok kroz zazor), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 2 – RV2

Druga funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV2 ventil, koji je radio sa srednje prljavim uljem (NAS 10).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = 4.615 \cdot 10^{-13} (-2.319 \cdot 10^{-12}, 3.242 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 4.018 \cdot 10^{-6} (1.131 \cdot 10^{-6}, 6.906 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 6.942 (6.321, 7.563),$$

a funkcija glasi:

$$Q(BRC) = 4.615 \cdot 10^{-13} \cdot BRC^2 + 4.018 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 6.942, \quad (7.8)$$

gde je:

Q – zavisna promenljiva (protok kroz zazor), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Fit 3 – RV3

Treća funkcija predstavlja opis podataka sa polinomskom funkcijom (drugog reda) za RV3 ventil, koji je radio sa, uslovno rečeno, čistim uljem (NAS 9).

Koeficijenti (sa intervalom poverenja 95%) iznose:

$$a = 9.79 \cdot 10^{-13} (-1.303 \cdot 10^{-12}, 3.261 \cdot 10^{-12}),$$

$$b = 3.73 \cdot 10^{-6} (1.361 \cdot 10^{-6}, 6.099 \cdot 10^{-6}),$$

$$c = 7.247 (6.738, 7.756),$$

a funkcija glasi:

$$Q(BRC) = 9.79 \cdot 10^{-13} \cdot BRC^2 + 3.73 \cdot 10^{-6} \cdot BRC + 7.247, \quad (7.9)$$

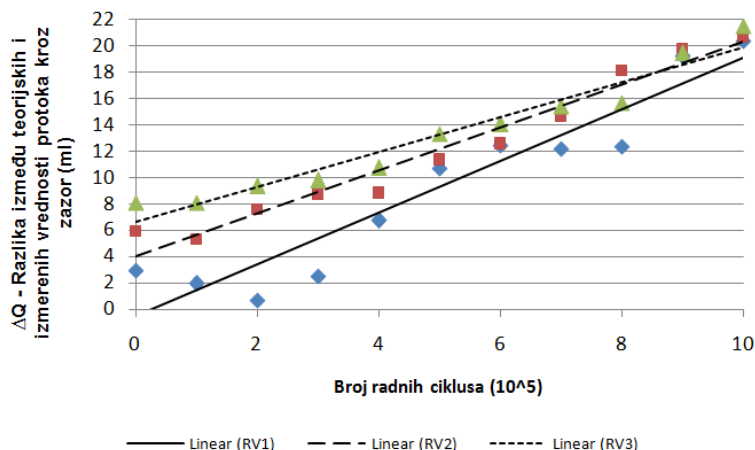
gde je:

Q – zavisna promenljiva (protok kroz zazor), a BRC – nezavisna promenljiva (broj radnih ciklusa).

Pored spomenutog, ono što je još interesantno kod posmatrane pojave proticanja fluida kroz zazole, jesu razlike između izmerenih eksperimentalnih i teorijskih (proračunatih) vrednosti. Specifičnost se ogleda u tome što se razlika između teorijske i izmerene vrednosti

protoka povećava, sa povećanjem veličine zazor, pri istim uslovima kontaminiranosti radnog fluida čvrstim česticama. Posmatranjem dijagrama prikazanih na slikama 6.36, 6.38 i 6.40 može da se primeti da i teorijske i izmerene vrednosti protoka imaju tendenciju rasta, ali da izmerene vrednosti imaju manji priraštaj nego što je to slučaj kod teorijski proračunatih vrednosti.

Na slici 7.4 je dat dijagram koji prikazuje prethodno konstatovano povećanje razlika, između teorijskih i izmerenih vrednosti protoka kroz zazor, sa povećanjem broja odrađenih ciklusa, a koji je dobijen pomoću vrednosti datih u tabelama 6.10, 6.12 i 6.14.



Slika 7.4 Grafički prikaz tendencije rasta razlika između izmerenih i proračunatih vrednosti protoka kroz zazor za sva tri ventila.

Ovim dijagramom, ali i na dijagramima koji su dati na slikama 6.36, 6.38 i 6.40 se ukazuje na to da teorijski model za proračunavanje protoka kroz radijalni zazor (4.1), odstupa od realnih vrednosti i da se treba dopuniti korekcionim faktorom u odnosu na klasu čistoće radnog fluida. Iz tog razloga u nastavku se daje dopunjen obrazac za izračunavanje protoka kroz radijalni zazor:

$$Q = v_{sr} \cdot A_p = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \cdot K_f \quad (7.10)$$

gde je K_f – korekcionni faktor.

Vrednosti ovog faktora, mogu se dobiti pomoću sledećeg izraza:

$$K_f = \frac{12 \cdot \eta \cdot L \cdot Q(BRC)}{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot (s(BRC))^3} \quad (7.11)$$

gde je:

$Q(BRC)$ – odgovarajuća funkcija za proračun protoka kroz radijalni zazor, koja je dobijena fitovanjem za prikupljene eksperimentalne podatke o promeni protoka kroz zazor, i

$s(BRC)$ – odgovarajuća funkcija za proračun radijalnog zazora, koja je dobijena fitovanjem za prikupljene eksperimentalne podatke o promeni odgovarajućeg zazora.

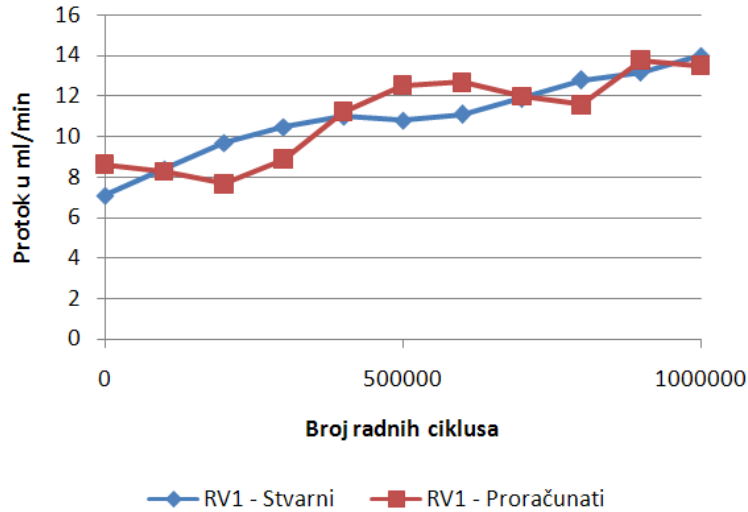
U skladu sa poznatim vrednostima parametara koji figurišu u izrazu 7.11, i proračunatim vrednostima po odgovarajućim funkcijama $Q(BRC)$ i $s(BRC)$, dobijaju se vrednosti korekcionog faktora K_f koje su za svaki ventil date posebno u tabelama 7.27 (za RV1), 7.28 (za RV2) i 7.29 (za RV3). Osim vrednosti korekcionog faktora, date su i vrednosti ponovo proračunatih protoka kroz zazor po formuli 7.10.

Tabela 7.27 Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radijalni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV1 i klasu čistoće ulja NAS 11.

Broj radnih ciklusa (BRC)	Proračunata vrednost zazora Z_3 po f-ji $s(BRC)$, u μm	Proračunata vrednost protoka po f-ji $Q(BRC)$, u ml/min	Vrednosti korekcionog faktora K_f	Proračunate vrednosti protoka kroz rad. zazor po formuli 6.10, u ml/min*	Izmerene (eksperimentalne) vrednosti protoka kroz rad. zazor, u ml/min
0	4.85	7.65	0.85	8.64	7.1
100 000	5.13	8.43	0.79	8.28	8.4
200 000	5.41	9.18	0.74	7.67	9.7
300 000	5.70	9.88	0.68	8.90	10.5
400 000	5.98	10.54	0.63	11.22	11
500 000	6.25	11.16	0.58	12.54	10.8
600 000	6.53	11.74	0.54	12.68	11.1
700 000	6.80	12.28	0.50	11.98	11.9
800 000	7.08	12.77	0.46	11.57	12.8
900 000	7.35	13.23	0.42	13.77	13.2
1 000 000	7.62	13.64	0.39	13.52	14

*Za ponovo proračunavanje vrednosti protoka kroz radijalni zazor, po formuli 7.10, za vrednosti zazora koji figuriše u datoj formuli su uvrštavane eksperimentalno izmerene vrednosti zazora Z_3 date u tabeli 6.3.

Iz tabele 7.27 može se primetiti da se vrednost korekcionog faktora K_f za rad ventila sa fluidom čija je klasa čistoće NAS 11, kreće u opsegu od **0,39** do **0,85**. Na slici 7.5 je dat uporedni prikaz izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV1.



Slika 7.5 Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radialni zazor za ventil RV1.

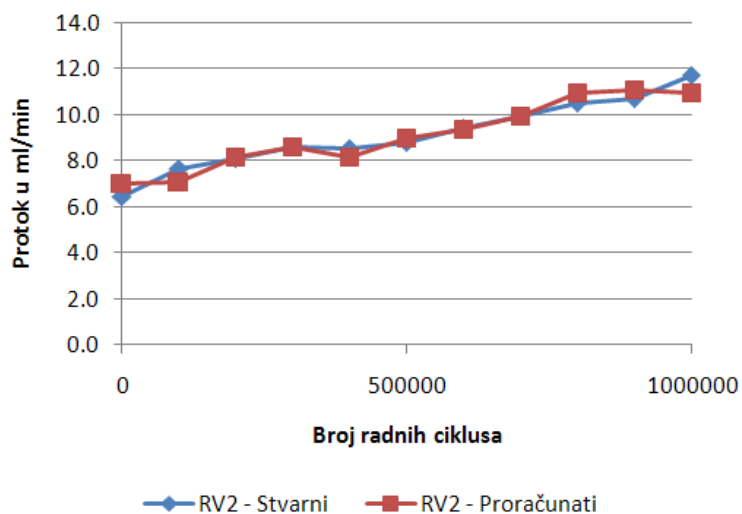
Tabela 7.28 Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radialni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV2 i klasu čistoće ulja NAS 10.

Broj radnih ciklusa (BRC)	Proračunata vrednost zazora Z_3 po f-ji $s(BRC)$, u μm	Proračunata vrednost protoka po f-ji $Q(BRC)$, u ml/min	Vrednosti korekcionog faktora K_f	Proračunate vrednosti protoka kroz rad. zazor po formuli 6.10, u ml/min*	Izmerene (eksperimentalne) vrednosti protoka kroz rad. zazor, u ml/min
0	5.39	6.94	0.57	6.99	6.4
100 000	5.57	7.35	0.54	7.06	7.7
200 000	5.77	7.76	0.52	8.11	8.1
300 000	5.96	8.19	0.49	8.55	8.6
400 000	6.17	8.62	0.47	8.15	8.5
500 000	6.38	9.07	0.45	8.96	8.8
600 000	6.59	9.52	0.42	9.34	9.4
700 000	6.81	9.98	0.40	9.93	9.9
800 000	7.04	10.45	0.38	10.95	10.5
900 000	7.27	10.93	0.36	11.06	10.7
1 000 000	7.51	11.42	0.34	10.92	11.7

*Za ponovo proračunavanje vrednosti protoka kroz radialni zazor, po formuli 7.10, za vrednosti zazora koji figuriše u datoj formuli su uvrštavane eksperimentalno izmerene vrednosti zazora Z_3 date u tabeli 6.5.

Iz table 7.28 se može primetiti da se vrednost korekcionog faktora K_f za rad ventila sa fluidom čija je klasa čistoće NAS 10, kreće u opsegu od **0,34** do **0,57**. Na slici 7.6 je dat

uporedni prikaz izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radialni zazor za ventil RV2.



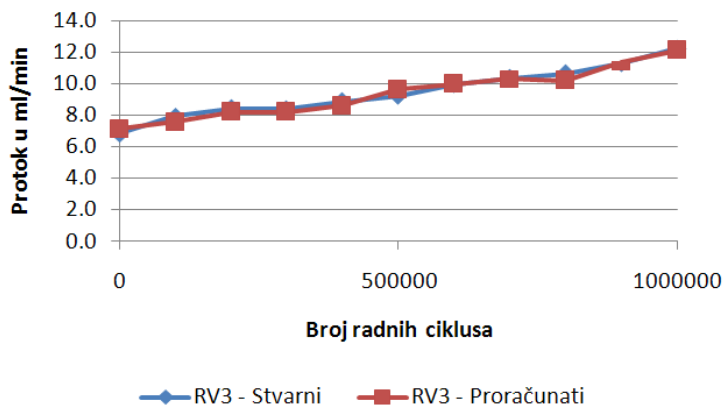
Slika 7.6 Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radialni zazor za ventil RV2.

Tabela 7.29 Prikaz vrednosti korekcionog faktora za proračun protoka kroz radialni zazor i novo-proračunatih (korigovanih) vrednosti protoka, za ventil RV3 i klasu čistoće ulja NAS 9.

Broj radnih ciklusa (BRC)	Proračunata vrednost zazora Z_3 po f-ji $s(BRC)$, u μm	Proračunata vrednost protoka po f-ji $Q(BRC)$, u ml/min	Vrednosti korekcionog faktora K_f	Proračunate vrednosti protoka kroz rad. zazor po formuli 6.10, u ml/min*	Izmerene (eksperimentalne) vrednosti protoka kroz rad. zazor, u ml/min
0	5.79	7.25	0.48	7.11	6.8
100 000	5.92	7.63	0.47	7.56	8.0
200 000	6.06	8.03	0.46	8.19	8.4
300 000	6.21	8.45	0.45	8.21	8.4
400 000	6.37	8.90	0.44	8.60	8.8
500 000	6.54	9.36	0.43	9.61	9.2
600 000	6.72	9.84	0.41	9.98	10.0
700 000	6.91	10.34	0.40	10.31	10.3
800 000	7.10	10.86	0.39	10.17	10.6
900 000	7.31	11.40	0.37	11.36	11.3
1 000 000	7.52	11.96	0.36	12.09	12.2

*Za ponovo proračunavanje vrednosti protoka kroz radialni zazor, po formuli 7.10, za vrednosti zazora koji figuriše u datoj formuli su uvrštavane eksperimentalno izmerene vrednosti zazora Z_3 date u tabeli 6.7.

Iz tabele 7.29 može da se primeti da se vrednost korekcionog faktora K_f za rad ventila sa fluidom čija je klasa čistoće NAS 9, kreće u opsegu od **0,36** do **0,48**. Na slici 7.7 je dat uporedni prikaz izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV3.



Slika 7.7 Uporedni prikaz eksperimentalno izmerenih i novo-proračunatih vrednosti protoka kroz radijalni zazor za ventil RV3.

Iz datih prikaza na slikama 7.5, 7.6 i 7.7, jasno se vidi da su odstupanja između teorijski proračunatih (po dopunjenom modelu za proračun protoka kroz radijalne zapore, formula 7.10) i eksperimentalno izmerenih vrednosti protoka kroz zazor, znatno smanjena. Dobijene vrednosti korekcionog faktora za izračunavanje protoka radnog fluida kroz radijalni zazor, date u tabelama 7.27, 7.28 i 7.29, trebalo bi proveriti ponovnim vršenjem serije eksperimenata, i uz to dodatno proveriti da li se ovakve razlike javljaju kod rada sa čistijim uljima od onih sa kojima je vršeno eksperimentalno ispitivanje u ovom radu. Takođe, bilo bi interesantno ispitati da li do tendencije porasta razlika između teorijski proračunatih i stvarnih izmerenih vrednosti protoka kroz radijalne zapore, dolazi i u slučajevima sa drugačijim režimima rada, i ako su prisutne, kojeg su intenziteta ove promene.

8 Zaključak

Kontrola nivoa kontaminacije radnog fluida čvrstim česticama utiče kako na radne performanse hidrauličkog sistema/komponente, tako i na sledeće bitne faktore:

- produženje radnog veka komponenti/sistema,
- rad komponente/sistema bez značajnijih poremećaja,
- produženje radnog veka hidrauličkog ulja,
- uštede sa aspekta održavanja sistema i skladištenja, odnosno uklanjanja otpadnog ulja ili komponenti,
- manji broj zastoja hidrauličke opreme.

Iz pomenutih razloga, praćenje i održavanje kontaminacije radnog fluida čvrstim česticama veoma je značajno, i treba da bude jedan od osnovnih zadataka održavaocima hidrauličkih sistema. Međutim, ovde treba biti veoma obazriv, jer održavanje čistoće radnog fluida na previše visokom ili niskom nivou ima za posledicu visoke troškove održavanja.

Proizvođači hidrauličke opreme obično daju preporuku o klasi čistoće radnog fluida sa kojom bi komponenta ili sistem, trebalo da radi. Preporučena vrednost klase čistoće nije nužno i najoptimalnija, a nepostojanje univerzalnog (standardizovanog) postupka za određivanje potrebne klase čistoće, dozvoljava proizvođačima da razvijaju sopstvene postupke i metode bez ikakvog usaglašavanja.

U dostupnoj naučnoj i stručnoj literaturi ne postoji celovita analiza niti model koji adekvatno opisuju fenomen proticanja i zadržavanja čvrstih čestica u radialnom zazoru, niti uticaja istih na proticanje fluida kroz zazor, pad pritiska i intenzitet habanja površina u kontaktu, gde je prisutno beskontaktno zaptivanje.

Na osnovu analize vrste kontakata prisutnih kod hidrauličkih komponenata, u poglavlju 4 je utvrđeno da su najčešći kontaktni parovi klip i cilindar, te je isti usvojen za sprovođenje eksperimentalnog ispitivanja uticaja čvrstih čestica na ovaj tip kontakta.

Prema konceptualnom modelu (slika 6.1) je urađen fizički model (eksperimentalna instalacija), uz pomoć kojeg je izvršeno testiranje uticaja različitih nivoa kontaminacije sistema čvrstim česticama.

Da bi se doneli zaključci o uticaju čvrstih čestica na rad kontaktnih parova klip-cilindar, bilo je potrebno izvršiti određena merenja radnih parametara testirane hidrauličke komponente. Osim merenja, primenom metode analize nad skupom eksperimentalnih podataka i sinteze praktičnog iskustva i teorijskog znanja, doneti su određeni zaključci o

uticaju čvrstih čestica na rad i ponašanje komponenti sa cilindričnim kontaktnim parom i beskontaktnim zaptivanjem.

Na osnovu teorijskih, praktičnih i eksperimentalnih proučavanja, kao i rezultata iz sprovedenih analiza, u radu je potvrđena prva hipoteza (H1 – poglavlje 1), tj. da čvrste čestice imaju veoma veliki uticaj na radne performanse hidrauličke komponente. Ovo se naročito odnosi na komponente sa ugrađenim preciznim upravljačko-regulacionim elementima sa beskontaktnim zaptivanjem, koji su zbog malih radijalnih zazora, veoma osetljivi na delovanje čvrstih čestica. Čestice koje uđu u zazor uzrokuju habanje kontaktnih površina i promenu topologije istih, generisanje novih čestica, povećanje trenja i temperature na lokalnom nivou, ekscentricitet, disbalans radijalnih sila pritiska, formiranje naslaga i kao posledica toga, mehaničku i protočnu blokadu.

Tokom eksploatacije hidrauličkog sistema, u zavisnosti od prisutne veličine zazora kod komponenti ugrađenih u sistemu, zatim stepena kontaminacije i oscilacija radnih parametara, intenzitet habanja kontaktnih površina radnih elemenata se menja. U eksperimentalnom radu parametri sistema (protok, pritisak i temperatura) su održavani uslovno rečeno konstantnim, tj. u granicama tolerancije u okviru kojih nema značajnog uticaja na tačnost rezultata, dok je klasa čistoće radnog fluida kontrolisana i održavana prema planu eksperimenta. Dobijeni eksperimentalni rezultati su pokazali kolike razlike u intenzitetu habanja mogu da se očekuju. Prema rezultatima ispitivanja uticaja čestica na kontaktni par klip-cilindar kod razvodnog ventila, dobijeni su sledeći odnosi:

- za fluid čistoće NAS 11 je ostvareno povećanje kritičnog zazora od 5,46 puta,
- za fluid čistoće NAS 10 je ostvareno povećanje kritičnog zazora od 2,22 puta i
- za fluid čistoće NAS 9 je ostvareno povećanje kritičnog zazora od 1,72 puta,

iz čega sledi da je povećanjem klase čistoće sa NAS 11 na NAS 10, postignuto smanjenje intenziteta habanja za 2,5 puta, a smanjenjem sa NAS 11 na NAS 9, smanjenje intenziteta za 3 puta. Zbog vremenskih i finansijskih ograničenja, nije bilo moguće ispitivanje i sa većim klasama čistoće radnog fluida, ali nije teško pretpostaviti da će dalje povećanje čistoće fluida, npr. na NAS 8 i više, sigurno doprineti smanjenju intenziteta habanja, ali da značaj neće biti tako veliki kao što je to pri povećanju čistoće fluida sa klase NAS 11 na NAS 10. Ovim, klasa NAS 10 jeste klasa čistoće koju bi proizvođač trebao sugerisati korisnicima, kao najniži zahtev. Poznavajući radne uslove sistema, kontaminaciju radnog fluida i intenzitet habanja kontaktnih parova, moguće je vršiti predviđanje pohabanosti kontaktnih parova komponente, sa ograničenom tačnošću. Da bi se takav matematički model uspostavio, ipak je potrebno izvršiti seriju eksperimenata, na osnovu kojih bi se statistički procenile i u praksi verifikovale vrednosti intenziteta habanja, te tako smanjila verovatnoća greške. Bez obzira na trenutnu nemogućnost uspostavljanja matematičkog modela za predviđanje pohabanosti, ovaj rad ima doprinos u kontekstu pružanja izuzetno važnih informacija dobijenih eksperimentalnim ispitivanjem, i uspostavljanjem procedure utvrđivanja specifičnih faktora u daljim eksperimentalnim istraživanjima. Stoga je, hipoteza H2 (poglavlje 1) delimično dokazana i ostaje otvorena kao predmet daljih istraživanja.

U cilju dokazivanja hipoteze H3 (poglavlje 1), sprovedena su ispitivanja u pogledu uticaja čvrstih čestica na dva aspekta:

- pad pritiska pri proticanju fluida kroz ventil i
- proticanje fluida kroz zazor.

Statistička analiza u poglavlju 7, ukazuje da uticaji prisutnih nečistoća i zapreminskih gubitaka na pad pritiska nisu značajni iako se na dijagramu (slika 6.46) u poglavlju 6, vidi kako sa povećanjem čistoće radnog fluida dolazi do smanjenja srednje vrednosti pada pritiska, ali i smanjenja devijacije rezultata merenja. Statistički gledano, između čestica i pada pritiska nije utvrđena nikakva veza, dok u pogledu protoka fluida kroz zazor i pada pritiska jeste što je i bilo očekivano. Bez obzira što su prisutni, doprinos zapreminskih gubitaka povećanju pada pritiska nije veliki, te je stoga, opravdano, geometrija odlučujući faktor u određivanju veličine pada pritiska.

U pogledu uticaja čestica na proticanje fluida kroz zazor, eksperimentalnom i statističkom metodom je pokazano da je ta zavisnost na visokom nivou. Takođe je pokazano da teorijski model za proračun protoka kroz radijalne zapore, značajno odstupa kada se uzme u obzir kontaminacija fluida čvrstim česticama. Između proračunatih i izmerenih (realnih) vrednosti protoka kroz zazor, postoje razlike koje se povećavaju sa povećanjem vrednosti zazora s tim da realne vrednosti imaju mnogo manji porast u odnosu na proračunate vrednosti protoka. Ova pojava implicira uvođenje korekcionog faktora u teorijski model za proračun protoka kroz radijalni zazor.

Još jedan zaključak je moguće izvesti posmatranjem odnosa proračunate i izmerene vrednosti protoka. Određivanjem ovih odnosa se dobija:

- za ventil RV1 odnos proračunate i izmerene vrednosti iznosi $34,4 \text{ (ml)} / 14 \text{ (ml)} = 2,46$,
- za ventil RV2 odnos proračunate i izmerene vrednosti iznosi $31,7 \text{ (ml)} / 11,7 \text{ (ml)} = 2,71$,
- za ventil RV3 odnos proračunate i izmerene vrednosti iznosi $33,69 \text{ (ml)} / 12,2 \text{ (ml)} = 2,76$,

odakle je moguće zaključiti da sa povećanjem čistoće radnog fluida očekivano dolazi do smanjenja habanja, ali sa druge strane do relativnog povećanja protoka kroz zazor.

Pravci budućih istraživanja i preporuke

Izradom ovog rada, osim dobijenih odgovora na postavljena pitanja, otvaraju se nova, do sada još uvek nedovoljno razjašnjena pitanja i problemi vezani za kontaminaciju i uticaj čvrstih čestica na radne performanse hidrauličkih komponenti i sistema. Ova pitanja su značajna pre svega sa aspekta održavanja, pouzdanosti, ali i energetske efikasnosti (sklopa) komponente.

U okviru budućeg istraživačkog rada trebalo bi se nastaviti sa ispitivanjima i izvršiti serija eksperimenata kojima bi se mogla dati preciznija procena korekcionih faktora za

proračun vrednosti protoka kroz radijalne zazore, odnosno zapreminskih gubitaka. U okviru istih, potrebno je ispitati zavisnost vrednosti korekcionog faktora i veličine: aksijalnog i radijalnog zazora, radnog pritiska, radne temperature, radnog protoka, viskoziteta i klase čistoće radnog fluida, kvaliteta površinske obrade kontaktnih površina.

Takođe, trebalo bi ispitati uticaj različitih klasa čistoće radnog fluida i režima rada na ponašanje kontaktnog para klip-cilindar, kod drugih tipova ventila, pumpi i ostalih komponenata gde je ovaj tip kontakta zastupljen, kako bi se omogućilo uspostavljanje odgovarajućeg modela uticaja na promenu veličine zazora u zavisnosti od korišćene klase čistoće radnog fluida. Ovim modelom bi trebalo da se omogući približna procena veličine povećanja kritičnih zazora, odnosno najviše opterećenih funkcionalnih površina, a poznavanjem tog podatka, moguće je dati adekvatnu (optimalnu) preporuku klase čistoće radnog fluida.

Postojeće razlike u preporukama proizvođača hidrauličke opreme u pogledu klase čistoće sistema, dovode korisnike hidrauličke opreme u dilemu oko izbora adekvatnog filterskog sistema, naročito ako u sistemu postoji nekoliko komponenti od različitih proizvođača što nije redak slučaj. Stoga je bitno u budućnosti raditi i na uvođenju unifikacije postupka određivanja potrebne klase čistoće radnog fluida i postupka odabira adekvatnog filterskog sistema.

9 Literatura

- [1] Addison, J.A., Needelman, W.M., *Diesel engine lubricant contamination and wear*, Scientific and laboratory services department – Pall Corporation, 1988.
- [2] Adler W. F., *Assesment of the state of knowledge pertaining to solid particle erosion*, Final report no. CR79-680 to the US Army research office, 1979
- [3] Alsyouf,I., *The role of maintenance in improving companies productivity and profitability*, International Journal of Production Economics, 2007, 105(1), pp. 70-78
- [4] Avient W. E., Goddard J., Wilman H., *An experimental study of friction and wear during abrasion of metals*, Proceedings of the Royal society of London, Series A. Mathematical and physical sciences 258, 1960, pp. 159-180
- [5] Backe, W., Winner, D., *Investigation of the contaminant sensitivity in hydraulic pumps*, Contamination in Fluid Power Systems, Conference Publication, University of Bath, 1984, pp. 129-134
- [6] Bahadur S., Badruddin R., *Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion*, Wear, 138, 1990, pp. 189-208
- [7] Bašta T.M., *Mašinska hidraulika*, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [8] Battat, B., Babcock, W., *Understanding and reducing the effects of contamination on hydraulic fluids and systems*, The AMPTIAC Quaterly, 2003, vol. 7, no.1, pp. 11-15
- [9] Bensch L., *A modern review of field contamination levels based on analyses of 25000 samples*, National Fluid Power Association, Technical paper series (192-15.6), 1992.
- [10] Bensch, L. E., Tessmann, R. K., *Field service considerations in contamination control*, Contamination in Fluid Power Systems, Conference Publication, University of Bath, 1976, pp. 107-113
- [11] BoschRexroth, *Rexroth oil cleanliness boklet*, 2011.
- [12] Broeder J. J., Heijnekamp J. W., *Abrasive wear of journal bearings by particles in the oil*, Proceedings Institution of Mechanical Engineers, 180(3K), str. 21-31, 1965.
- [13] Casey, B., *Symptoms of common hydraulic problems and their root causes*, Machinery Lubrication, September 2003.
- [14] Coronado J. J., *Effect of abrasive size on wear*, InTech, 2012, pp. 167-184
- [15] Dean S. K., Doyle E. D., *Significance of grit morphology in fine abrasion*, Wear, vol. 35, 1975., pp. 123-129

- [16] Dosanjh S., Humphrey J. A. C., *The influence of turbulence on erosion by a particle-laden fluid jet*, *Wear*, vol 102, 1985, 309-330
- [17] Eaton Vickers, *Systematic approach to contamination control*, 2002.
- [18] Fang L., Kong X. L., Su J. Y., Zhou Q. D., *Movement patterns of abrasive particles in three-body abrasion*, *Wear*, 162-164(Part B), 1993, pp. 782-789
- [19] Fang L., Zhou Q. D., Li Y. J., *An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion*, *Wear*, 151(2), pp. 313-320, 1991.
- [20] Field A. P., *Discovering statistics using SPSS* (3th edition), SAGE publications, London, 2009.
- [21] Fitch B., *Anatomy of an oil analysis report*, Machinery Lubrication, December, 2013.
- [22] Fitch E.C., Hong I.T., *Hydraulic system design for service assurance*, BarDyne, Inc., Stillwater, Oklahoma, 2004.
- [23] Fitch J., *Oil clotting and the adrenaline effect*, Machinery Lubrication, Sep.-Oct., 2008, str. 2-3
- [24] Fitch, E. C., Inoue, R., *Hydraulic component service life as influenced by lubricity and abrasivity*, Proceedings 38th National Conference on Fluid Power, 1982, pp. 201-207
- [25] Fitch, E. C., *Proactive maintenance for mechanical systems*, BarDyne Inc., 1992.
- [26] Fitch, E.C., *Fluid contamination control*, FES Inc., 1988.
- [27] Fitch, J.C., *Proactive and predictive strategies for setting oil analysis alarms and limits*, Noria Corp – Tulsa, Oklahoma, 1998.
- [28] Fitch, E.C., *Maintenance strategy for hydraulic service reliability*, BarDyne Inc., 2000
- [29] Fluid Technologies Inc., *Technical report – ISO contamination standards changes and their impact on filter testing and particle counting*
- [30] Frith, R.H., Scott, W., *Control of solids contamination in hydraulic systems: an overview*, *Wear*, 1993, 165(1), str. 69-74
- [31] Goodwin J. E., Sage W., Tilly G. P., *Study of erosion by solid particles*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 184(1), 1969, pp. 279-289
- [32] Hojo H., Tsuda K., Yabu T., *Erosion damage of polymeric material by slurry*, *Wear*, vol 112, 1986, pp. 17-28

- [33] Hong, I. T., *Sliding contact wear caused by loose abrasive particles in lubricant – Theory and verification*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1981., vol 15, no.2 , pp. 153-162
- [34] Hong, I.T., Izawa, K., Ito, T., *Evaluation of cylinder, solenoid valve and servovalve contaminant sensitivity*, Fluid Power Research Center, No. FPRC-83-M-1, 1984.
- [35] http://powersolutions.danfoss.com/stellent/groups/publications/documents/product_literature/52010463.pdf
- [36] http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/norway/download/re08016_2011-05.pdf
- [37] <http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/industrial-hydraulics/index>
- [38] http://www.boschrexroth.no/business_units/brc/de/bauhaus_de/eppensteiner/en/products/knowhow/recommended_oil_cleanliness_codes/index.jsp?sessionid=cabYbRpO0T0lva8Ktbp1t
- [39] <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/index.htm?wtredirect=www.eaton.com/hydraulics>
- [40] http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@hyd/documents/content/ct_233707.pdf
- [41] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=10308
- [42] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=46573
- [43] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=61558
- [44] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=21463
- [45] <http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Filter/ConMon/Guide%20to%20Contamination%20Standards.pdf>
- [46] Humphrey J. A. C., *Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 11(3), str. 170-195, 1990.
- [47] Hydac, *Fluidcontrolling Kontaminationsfibel*, Prospekt-Nr. 7.603.0/3.99
- [48] Inoue, R., *Contaminant lock in spool type directiona control valves – Omega rating and failure predictions*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1979., vol 13, no.2 , pp. 183-188

- [49] Inoue, R., Fitch, E. C., *The omega pump rating system*, The BFPR Journal, 12(2), 1979, pp. 131-139
- [50] Inoue, R., *Gamma and zeta rating – Effects of fluid and abrasivity on component wear life*, FRH Journal, Vol 4, no.2, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1983., vol 16, no.2 , pp. 211-219
- [51] ISO/DIS 9632, Hydraulic Fluid Power – fixed displacement pumps – flow degradation due to classified A. C. Fine Test Dust contaminant – test method
- [52] Iyengar, S. K. R., *Effect of particulate contaminants on break-out and actuating forces in spool valves – case study*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1976.
- [53] Jack, L. Johnson, *Q&As about servo and proportional valves*, *Hydraulics and pneumatics*, July 2010, pp. 30-39
- [54] Jardine, A. K. S, Lin, D., Banjevic, D., *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition based maintenance*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(7), pp. 1483-1510
- [55] Jocanović M., *Prilaz istraživanju modela za proračun proticanja čvrstih čestica sa uljnom masom kroz zazor u funkciji konstrukciono radnih parametara hidrauličkih komponenata*, Doktorska disertacija – Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2010.
- [56] Jocanović M., Karanović V., Ivanišević A., Knežević D., *Hydraulic hammer excavator failure due to solid particle contamination*, Vojnotehnički glasnik, 2014 (1), str. 112-129
- [57] Jocanović M., Šević D., Karanović V., Beker I., Dudić S., *Increased efficiency of hydraulic systems through reliability theory and monitoring of system operating parameters*, Strojniški Vestnik, 2012, 58(4), str. 281-288
- [58] Johnson M., *Industrial fluid contaminants and their effect*, Tribology and Lubrication Technology, 2009, 65(9), str. 26-31
- [59] Johnson M., *Strategic oil analysis-Time dependent alarms for extended lubricant lifecycles*, Tribology and lubrication technology, August 2010.
- [60] Karanović V., Jocanović M., Delić M., *Influence of solid particles as a contaminants on degradation processes in hydraulic components or systems*, 16th International scientific conference on Industrial Systems – IS'14, Serbia, Novi Sad, 2014, str. 189-194
- [61] Kato K., Adachi K., *Wear mechanisms* in “Modern tribology handbook” (Bhushan, B.), CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000, pp. 273-300
- [62] Kelić V.N., *Hidroprenosnici*, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [63] König-Birk J., *Filter testing: Particle counters for hydraulic and lubricating*

oils, Filtration + Separation, 2011, 48(3), pp. 33-36

- [64] Kumar, M., Mukherjee, P.S., Misra, N.M., *Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review*, Industrial lubrication and tribology, 2013, 65(1), str. 3-11
- [65] Lansdown A.R., Price, A.L., *Materials to resist wear: a guide to their selection and use*, Oxford, Pergamon, 1986.
- [66] Larsen-Basse J., *Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion*, Wear, vol. 12, 1968, pp. 35-53
- [67] Lobmeyer, R. J., Kelley, M. A., Chapman, R. J., *Hydraulic fluid contaminant sensitivity test*, SAE Paper 770543, SAE Earthmoving Industry Conference, Peoria, Illinois, USA, 1977.
- [68] Luxhoj J. T., Riis J. O., Thorsteinsson U., *Trends and perspectives in industrial maintenance management*, Journal of manufacturing systems, 1997, 16(6), str. 437-453
- [69] Mačužić I., *Proaktivni pristup u strategiji održavanja hidrauličkih sistema*, Doktorska disertacija – Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2011.
- [70] Malvern Instruments Limited, *A basic guide to particle characterisation – inform white paper*, 2012.
- [71] Mannesmann Rexroth, *Axialkolbenmaschinen*, Ulm, 1987.
- [72] Mezlini S., Zidi M., Arfa H., Tkaya M. B., Kapsa P., *Experimental, numerical and analytical studies of abrasive wear: correlation between wear mechanisms and friction coefficient*, C. R. Mécanique 333, 2005, pp. 830-837
- [73] Misra A., Finnie I., *On the size effect in abrasive and erosive wear*, Wear, vol 65, 1981, pp. 359-373
- [74] Mobley, R.K., *Hydraulic fluids – poglavlje 4 (u knjizi: Fluid power dynamics)*, Elsevier, 2000.
- [75] Moore M. A., *Abrasive wear*, ASM Materials science seminar on fundamentals of friction and wear of materials, Pittsburgh, USA, pp. 73-118, 4-5 October 1980.
- [76] Mraz S., *Contamination: hydraulic system enemy no. 1*, Machine Design, Septembar, 2001.
- [77] Nagel L., *Messtechnik zur Überwachung von Fluiden in Hydraulik und Schmierungssystemen*, Symposium Anlagentechnik-Fluidtechnik VDEh Stahlzentrum Dusseldorf, 2005.
- [78] Nash, T., *Filtration: It's the little things that get you*, Hydraulics and Pneumatics, 2006, no.5, pp. 29-31

- [79] Nathan G. W., Jones J. D., *The empirical relationship between abrasive wear and applied conditions*, *Wear*, vol 9, 1966, pp. 300-309
- [80] Pall Corp., *Pocket book – Filtration, separation, solution*, 2006.
- [81] Park R.W., *Contamination control – A hydraulic OEM perspective*, Workshop on Total contamination control centre for machine conditioning, Monash University, August, 1997.
- [82] Perić, S., *Savremene metode analize ulja u tehničkim sistemima*, *Vojnotehnički glasnik*, 2010, 58(1), str. 83-112
- [83] R Development Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008.
- [84] Rabinowicz E., *Wear coefficients – metals* – in “Wear control handbook” (Peterson M. B. and Winer W. O.), ASME, 1980
- [85] Richardson R.C.D., *Wear of metals by relatively soft abrasives*, *Wear*, vol 11, 1968, pp. 245-275
- [86] Ronen A., Malkin S., *Wear mechanisms of statically loaded hydrodynamic bearings by contaminant abrasive particles*, *Wear*, 68(3), str. 371-389, 1981
- [87] Sasada T., Oike M., Emori N., *The effects of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear*, *Wear*, vol. 97, 1984, pp. 291-302
- [88] Savić V., Zirojević Lj., *Uljna hidraulika 3*, Ikos, 2003.
- [89] Savić, V., *Zaptivanje u hidraulici*, Ikos, Novi Sad, 2008.
- [90] Silva G., *The adrenaline phenomenon of silt*, *TSF Journal*, Fluid Power Research Center, Oklahoma State University, vol. 7, 1987.
- [91] Sin H., Saka N., Suh N. P., *Abrasive wear mechanisms and the grit size effect*, *Wear*, vol. 55, 1979, pp. 163-170
- [92] Sitton, G., *Effect of particulate contaminants on wear rates of lubricated components – Sliding contact stand*, *BFPR Journal*, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1981., vol 15, no.4 , pp. 509-510
- [93] Stachowiak G. W., *Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear*, *Wear*, 241, 2000, pp. 214-219
- [94] Stachowiak G., Batchelor A. W., *Engineering tribology*, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [95] Swanson P. A., Vetter A. F., *The measurement of abrasive particle shape and its effect on wear*, *ASLE Transactions*, vol. 28, 1985, pp. 225-230

- [96] Swedeen, R., Izawa, K., Nair, K. S., *Frictional forces created in hydraulic components by fluid contamination – A case study*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1980., vol 14, no.4 , pp. 357-365
- [97] Tessmann, R.K., *Contaminant wear in hydraulic and lubricating systems*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1975.
- [98] Tessmann, R.K., Hong, I.T., *Hydraulic pump contaminant wear*, ASTM Special technical publication, 2001, 1339, str. 248-262
- [99] Thapa B., *Sand erosion in hydraulic machinery*, PhD Thesis, 2004.
- [100] Timken Bearing Co., *How dirt and water effect bearing life*, Machine design, July 1989.
- [101] Ulanowicz, L., *Violation of the steady-state friction behaviour of a precise hydraulic pair due to imbalanced radial hydrostatic force*, Journal of KONBIN, 14, 2010, str. 333-350
- [102] Wang W., *Condition-based maintenance modelling – chapter 5* in “Complex system maintenance handbook”, Springer London, 2008.
- [103] Wang, J. T., *Structural factors affecting component contaminant sensitivity*, BFPR Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1982., vol 16, no.2 , pp. 349-356
- [104] Williamson M., *Mesh blockage particle monitoring*, Machinery Lubrication, Vol. 3, 2009
- [105] Wooton, D., *The lubricant’s nemesis – oxidation*, Practicing Oil Analysis, Mart 2007.
- [106] Xuan, J. L., *ZETA Rating – An investigation of contaminant abrasivity: Theoretical fundamentals*, TSF Journal, Fluid Power Research Center, Stillwater, Oklahoma, USA, 1986., vol 7, pp. 19-29
- [107] Yust C. S., Crouse R. S., *Melting at particle impact sites during erosion of ceramics*, Wear, vol 51, 1978, pp. 193-196
- [108] Zeileis A., *Econometric Computing with HC and HAC Covariance Matrix Estimators*, Journal of Statistical Software, 11(10), 2004, pp. 1-17.
- [109] Zeileis, A., Hothorn, T, *Diagnostic Checking in Regression Relationships*, R News 2(3), 2002, pp. 7-10.
- [110] Zum Gahr K. H., *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, 1987.
- [111] Zumbusch S., Helgerson D., *Return on investment of energy efficient designs*, Energy efficient hydraulics and pneumatics conference, 2012.

10 Prilozi

Prilog 1

Klasifikacija čistoće ulja prema standardu NAS 1638 – 01

Klasa čistoće	Dozvoljeni broj čvrstih čestica u 100 ml uzorka ulja					
	2 do 5 µm	5 do 15 µm	15 do 25 µm	25 do 50 µm	50 do 100 µm	> 100 µm
00	625	125	22	4	1	0
0	1.250	250	44	8	2	0
1	2.500	500	89	16	3	1
2	5.000	1.000	178	32	6	1
3	10.000	2.000	356	63	11	2
4	20.000	4.000	712	126	22	4
5	40.000	8.000	1.425	253	45	8
6	80.000	16.000	2.850	506	90	16
7	160.000	32.000	5.700	1.012	180	32
8	320.000	64.000	11.400	2.025	360	64
9	640.000	128.000	22.800	4.050	720	128
10	1.280.000	256.000	45.600	8.100	1.440	256
11	2.560.000	512.000	91.200	16.200	2.880	512
12	5.120.000	1.024.000	182.400	32.400	5.760	1.024
13	-	2.048.000	364.800	64.800	11.520	2.048
14	-	4.096.000	729.000	129.600	23.040	4.096

Prilog 2

Klasifikacija čistoće ulja prema standardu SAE AS 4059E

	Dozvoljeni broj čvrstih čestica u 100 ml uzorka ulja					
ISO 4402 kalibracija →	> 2 μm	> 5 μm	> 15 μm	> 25 μm	> 50 μm	> 100 μm
ISO 11171 kalibracija →	> 4 μm(c)	> 6 μm(c)	> 14 μm(c)	> 21 μm(c)	> 38 μm(c)	> 70 μm(c)
SAE kod ↓	A	B	C	D	E	F
000	195	76	14	3	1	0
00	390	152	27	5	1	0
0	780	304	54	10	2	0
1	1.560	609	109	20	4	1
2	3.120	1.217	217	39	7	1
3	6.250	2.432	432	76	13	2
4	12.500	4.864	864	152	26	4
5	25.000	9.731	1.731	306	53	8
6	50.000	19.462	3.462	612	106	16
7	100.000	38.924	6.924	1.224	212	32
8	200.000	77.849	13.849	2.449	424	64
9	400.000	155.698	27.698	4.898	848	128
10	800.000	311.396	55.396	9.796	1.696	256
11	1.600.000	622.792	110.792	19.592	3.392	512
12	3.200.000	1.245.584	221.584	39.184	6.784	1024

Prilog 3

Karakteristike korišćenog hidrauličkog fluida od proizvođača: Rafinerija ulja - Modriča

Tabela P3.1 Kinematski viskozitet korišćenog hidrauličkog ulja meren na tri različite temperature i gustina ulja na 15°C i 45°C

-	HM 46
$\rho_{15^{\circ}\text{C}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,8827
$\rho_{45^{\circ}\text{C}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,8656
$\nu_{40^{\circ}\text{C}} \text{ (cSt)}$	47,07
$\nu_{45^{\circ}\text{C}} \text{ (cSt)}$	41,71
$\nu_{100^{\circ}\text{C}} \text{ (cSt)}$	6,75
IV – indeks viskoziteta	96

Vrednost dinamičkog viskoziteta korišćena u proračunima, određena je pomoću jednačine koja glasi:

$$\eta_{45^{\circ}\text{C}} = \nu_{45^{\circ}\text{C}} \cdot \rho_{45^{\circ}\text{C}}, \quad (\text{a})$$

pa je vrednost dinamičkog viskoziteta jednaka:

$$\eta = 865,6(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 4,171 \cdot 10^{-5}(\text{m}^2 / \text{s}) = 0,0361(\text{Pa} \cdot \text{s}) . \quad (\text{a})$$

Prilog 4

Tabelarni prikaz numeričkih vrednosti merenih veličina u eksperimentu

Eksperiment 1 (ventil RV1)

BRC	CUS4	CUS6	CUS14	CUS21	CUUS4	CUUS6	CUUS14	CUUS21	CUUD4	CUUD6	CUUD14	CUUD21	MTV	MKV	ZIUS	ZIUD	PP	Z1	Z2	Z3	Z4
0	22.21	17.96	13.42	11.55	22.62	17.62	13.61	12.02	23.33	18.39	14.86	14.21	908.49	27.3539	5.7	13.3	0.5117	8.3	5.95	5.05	5.9
5000	22.21	17.92	13.42	11.55	22.59	17.52	14.02	12.07	23.21	18.45	15.54	13.86	908.49	27.3539	5.9	13.5	0.6188	8.3	5.95	5.05	5.9
10000	22.15	17.86	13.23	11.23	22.53	17.36	13.86	11.95	23.12	18.38	15.35	12.89	908.49	27.3539	5.7	12.9	0.4451	8.3	5.95	5.05	5.9
15000	22.17	17.97	13.12	11.36	22.37	17.49	13.71	11.73	22.88	18.34	14.63	12.45	908.49	27.3539	6.1	13.2	0.4175	8.3	5.95	5.05	5.9
20000	22.21	17.68	13.42	11.55	22.79	17.57	13.79	11.68	22.09	18.43	13.26	11.38	908.56	27.3533	6.3	13.8	0.3819	8.3	5.95	5.05	5.9
25000	22.25	17.87	12.95	11.16	22.46	17.61	14.05	11.86	21.96	18.35	13.92	12.36	908.56	27.3533	6.8	13.4	0.5374	8.3	5.95	5.05	5.9
30000	22.15	17.73	12.64	10.98	22.62	17.43	13.75	11.71	21.9	18.23	13.94	12.27	908.56	27.3533	6.5	13.7	0.4615	8.3	5.95	5.05	5.9
35000	22.2	17.48	12.72	10.54	22.51	17.48	13.69	11.62	21.75	18.18	13.76	12.48	908.56	27.3533	6.9	13.1	0.7199	8.3	5.95	5.05	5.9
40000	22.18	17.52	12.39	10.18	22.35	17.55	13.81	11.59	21.83	18.49	13.88	12.2	908.5	27.3534	7.6	12.5	0.4388	8.3	5.95	5.05	5.9
45000	22.23	17.38	12.59	10.2	22.48	17.26	13.85	11.78	22.13	18.42	13.94	12.65	908.5	27.3534	7.3	13	0.5143	8.3	5.95	5.05	5.9
50000	22.35	17.63	12.31	10.05	22.39	17.37	13.46	11.38	22.16	18.31	14.07	12.73	908.5	27.3534	7.5	13.2	0.5631	8.3	5.95	5.05	5.9
55000	22.38	17.35	12.14	9.97	22.28	17.42	13.58	11.69	22.06	18.15	14.28	12.64	908.5	27.3534	7.8	13.8	0.5997	8.3	5.95	5.05	5.9
60000	22.33	17.21	11.91	9.31	22.34	17.15	13.74	11.89	21.99	18.13	14.51	12.83	908.51	27.3529	7.6	13.3	0.4992	8.3	5.95	5.05	5.9
65000	22.26	17.49	12.54	9.68	22.51	17.12	13.21	11.54	21.83	18.18	14.43	12.76	908.51	27.3529	7.9	13.8	0.6438	8.3	5.95	5.05	5.9
70000	22.21	17.56	12.63	10.06	22.68	17.26	13.39	11.67	21.91	18.06	14.55	12.87	908.51	27.3529	7.5	13.6	0.5146	8.3	5.95	5.05	5.9
75000	22.29	17.35	12.49	10.48	22.45	17.21	13.64	11.73	21.97	17.78	14.65	12.93	908.51	27.3529	7.7	13.8	0.7144	8.3	5.95	5.05	5.9
80000	22.11	17.84	13.14	11.07	22.37	17.34	13.71	11.53	22.09	18.04	14.58	13.04	908.47	27.3532	7.2	13.4	0.8353	8.3	5.95	5.05	5.9
85000	21.96	17.83	13.02	11.12	22.48	17.23	13.67	11.67	22.18	17.94	14.52	13.17	908.47	27.3532	7.6	13.7	0.6137	8.3	5.95	5.05	5.9
90000	21.99	17.61	13.14	11.02	22.34	17.16	13.59	11.83	22.34	17.86	14.78	13.25	908.47	27.3532	7.8	13.7	0.6679	8.3	5.95	5.05	5.9
95000	22.15	17.52	13.01	10.86	22.26	17.36	13.75	11.71	22.45	17.83	14.86	13.34	908.47	27.3532	8.3	13.5	0.5861	8.3	5.95	5.05	5.9
100000	22.33	17.49	12.3	10.05	22.48	17.31	13.95	12.25	22.59	18.02	15.07	13.46	908.48	27.3528	8.2	13.9	0.5273	8.5	6.1	5.1	6.05
105000	22.21	17.45	12.42	10.24	22.27	17.13	13.82	12.17	22.37	17.93	14.79	13.37	908.48	27.3528	8	14.4	0.5788	8.5	6.1	5.1	6.05
110000	22.34	17.37	12.51	10.28	22.38	17.21	13.86	12.24	22.46	17.91	14.81	13.43	908.48	27.3528	8.1	14.7	0.5813	8.5	6.1	5.1	6.05
115000	22.27	17.21	13.94	10.16	22.35	17.13	13.73	12.2	22.35	17.86	14.78	13.37	908.48	27.3528	8.3	14.9	0.6731	8.5	6.1	5.1	6.05

120000	22.31	17.24	12.02	9.83	22.35	16.89	13.15	11.31	22.42	17.91	14.12	12.39	908.48	27.3531	10	14	0.8632	8.5	6.1	5.1	6.05
125000	22.34	17.53	12.37	10.15	22.37	16.91	13.24	11.42	22.46	17.51	14.18	12.45	908.48	27.3531	9.1	14.3	0.7431	8.5	6.1	5.1	6.05
130000	22.41	17.57	12.41	10.27	22.44	17.05	13.32	12.11	22.51	17.42	14.29	12.51	908.48	27.3531	8.5	14.6	0.7447	8.5	6.1	5.1	6.05
135000	22.37	17.54	12.37	10.23	22.46	16.98	13.27	12.16	22.46	17.38	14.27	12.47	908.48	27.3531	8.4	14.4	0.6948	8.5	6.1	5.1	6.05
140000	22.55	17.84	13.84	12.35	22.5	17.35	13.8	12.15	22.75	17.5	14.37	12.72	908.47	27.3529	8.2	15.7	0.4833	8.5	6.1	5.1	6.05
145000	22.45	17.75	13.67	12.31	22.41	17.27	13.73	12.01	22.62	17.34	14.22	12.64	908.47	27.3529	8.6	14.3	0.6791	8.5	6.1	5.1	6.05
150000	22.41	17.28	13.73	12.27	22.34	17.15	13.6	11.97	22.54	17.49	14.2	12.59	908.47	27.3529	8.5	14.6	0.7114	8.5	6.1	5.1	6.05
155000	22.42	18.1	13.67	12.03	22.29	17.2	13.14	11.45	22.47	17.52	14.08	12.43	908.47	27.3529	8.3	14.3	0.5148	8.5	6.1	5.1	6.05
160000	22.41	18.05	13.57	11.24	22.35	17.26	12.95	10.82	22.43	17.49	13.96	12.18	908.5	27.3528	8.2	14.3	0.7736	8.5	6.1	5.1	6.05
165000	22.52	17.94	13.64	11.37	22.44	17.35	13.12	10.93	22.57	17.61	14.2	12.26	908.5	27.3528	8.4	14.5	0.4937	8.5	6.1	5.1	6.05
170000	22.51	17.85	13.58	11.4	22.45	17.33	13.15	11.01	22.53	17.57	14.13	12.31	908.5	27.3528	8.4	14.6	0.7671	8.5	6.1	5.1	6.05
175000	22.43	17.79	13.51	11.34	22.41	17.3	13.02	11.05	22.49	17.52	14.15	12.34	908.5	27.3528	8.5	14.5	0.5994	8.5	6.1	5.1	6.05
180000	22.34	17.49	14	11.7	22.4	17.3	13.16	11.28	22.48	17.48	13.82	12.02	908.47	27.353	7.8	13.5	0.7374	8.5	6.1	5.1	6.05
185000	22.37	17.53	13.65	11.83	22.51	17.44	13.17	11.32	22.57	18.03	13.94	12.11	908.47	27.353	8.1	13.8	0.5117	8.5	6.1	5.1	6.05
190000	22.28	17.61	13.61	11.78	22.49	17.41	13.18	11.28	22.6	17.91	13.87	12.05	908.47	27.353	8.3	14	0.7234	8.5	6.1	5.1	6.05
195000	22.35	17.42	13.67	11.81	22.24	17.47	13.23	11.32	22.64	17.95	13.91	12.06	908.47	27.353	8.6	14.3	0.6768	8.5	6.1	5.1	6.05
200000	22.2	17.56	12.42	10.09	22.4	17.23	13.79	12.05	22.62	17.85	14.87	13.33	908.45	27.3531	8	13.3	0.8887	10.4	7.5	5.1	6.55
205000	22.31	17.37	12.48	10.15	22.37	17.42	13.91	12.23	22.73	17.91	14.95	13.41	908.45	27.3531	8.4	14.1	0.7997	10.4	7.5	5.1	6.55
210000	22.34	17.42	12.51	10.16	22.28	17.46	13.93	12.28	22.77	17.99	14.98	13.46	908.45	27.3531	8.5	14.3	0.6371	10.4	7.5	5.1	6.55
215000	22.36	17.51	12.64	10.27	22.61	17.51	13.88	12.31	22.8	18.05	14.87	13.51	908.45	27.3531	9.2	14.6	0.7543	10.4	7.5	5.1	6.55
220000	22.16	17.65	12.6	10.26	22.3	16.98	13.31	11.55	22.5	17.39	14.31	12.65	908.42	27.3531	11.7	15.8	0.5374	10.4	7.5	5.1	6.55
225000	22.23	17.67	12.72	10.28	22.37	16.95	13.37	11.58	22.57	17.42	14.37	12.69	908.42	27.3531	9.5	14.9	0.7163	10.4	7.5	5.1	6.55
230000	22.18	17.56	12.71	10.23	22.34	16.88	13.33	11.51	22.55	17.38	14.32	12.64	908.42	27.3531	8.7	14.4	0.5567	10.4	7.5	5.1	6.55
235000	22.34	17.63	12.89	10.35	22.47	16.91	13.47	11.63	22.67	17.48	14.51	12.76	908.42	27.3531	8.7	14.8	0.6879	10.4	7.5	5.1	6.55
240000	22.26	17.55	13.75	11.91	22.3	17.06	12.49	10.46	22.4	17.4	13.5	11.63	908.43	27.3532	8.4	14.5	0.7221	10.4	7.5	5.1	6.55
245000	22.31	17.64	13.58	11.97	22.42	17.15	12.56	10.53	22.51	17.62	13.63	11.74	908.43	27.3532	8.8	14.9	0.7316	10.4	7.5	5.1	6.55
250000	22.34	17.79	13.63	12.01	22.48	17.21	12.62	10.67	22.57	17.71	13.69	11.81	908.43	27.3532	8.7	14.8	0.5732	10.4	7.5	5.1	6.55

255000	22.32	17.86	13.58	11.95	22.45	17.18	12.59	10.61	22.51	17.67	13.65	11.81	908.43	27.3532	8.9	15.1	0.7029	10.4	7.5	5.1	6.55
260000	22.03	17.81	13	10.6	22.32	16.92	13.02	11.08	22.5	17.57	13.89	12.05	908.44	27.3533	10.2	14.9	0.4377	10.4	7.5	5.1	6.55
265000	22.14	17.69	13.05	10.68	22.39	16.97	13.06	11.13	22.56	17.65	13.93	12.14	908.44	27.3533	9.3	15.3	0.6878	10.4	7.5	5.1	6.55
270000	22.18	17.85	13.14	11.03	22.46	17.12	13.08	11.17	22.62	17.73	14.02	12.25	908.44	27.3533	9	15.6	0.6971	10.4	7.5	5.1	6.55
275000	22.23	17.83	13.23	10.97	22.39	17.15	13.12	11.21	22.68	17.82	14.15	12.34	908.44	27.3533	9.1	15.2	0.7021	10.4	7.5	5.1	6.55
280000	22.28	17.56	12.19	9.94	22.25	16.78	12.65	10.76	22.6	17.15	13.26	11.58	908.4	27.3529	14.4	14.8	0.8351	10.4	7.5	5.1	6.55
285000	22.35	17.41	12.43	10.12	22.31	16.83	12.77	10.85	22.69	17.26	13.31	11.73	908.4	27.3529	11.5	15.1	0.7357	10.4	7.5	5.1	6.55
290000	22.38	17.46	12.49	10.24	22.38	16.91	12.86	10.94	22.78	17.35	13.46	11.79	908.4	27.3529	10.8	15.4	0.7534	10.4	7.5	5.1	6.55
295000	22.34	17.61	12.41	10.18	22.32	16.86	12.73	10.86	22.71	17.29	13.43	11.74	908.4	27.3529	11.3	15.3	0.7613	10.4	7.5	5.1	6.55
300000	22.34	17.31	12.18	9.84	22.37	17.15	13.6	11.93	22.31	16.86	13.02	11.4	908.37	27.3527	12	16.4	0.5571	10.8	8.2	5.5	6.85
305000	22.29	17.46	12.15	9.91	22.35	17.14	12.82	11.87	22.29	16.91	13.35	11.43	908.37	27.3527	11.6	15.8	0.6748	10.8	8.2	5.5	6.85
310000	22.26	17.59	12.08	10.01	22.34	17.11	12.78	11.84	22.28	16.87	13.33	11.41	908.37	27.3527	10.5	15.6	0.7132	10.8	8.2	5.5	6.85
315000	22.21	17.39	12.07	9.97	22.31	17.08	12.75	11.81	22.27	16.85	13.31	11.39	908.37	27.3527	11.3	15.7	0.7235	10.8	8.2	5.5	6.85
320000	22.34	17.31	12.15	10.11	22.32	17.16	12.82	11.88	22.34	16.92	13.37	11.48	908.39	27.3525	9.9	15.4	0.4699	10.8	8.2	5.5	6.85
325000	22.37	17.38	12.21	10.23	22.33	17.23	12.86	11.94	22.41	17.06	13.51	11.57	908.39	27.3525	9.8	15.7	0.7053	10.8	8.2	5.5	6.85
330000	22.25	17.49	11.92	9.63	22.2	16.53	12.42	10.7	21.72	16.89	13.98	12.61	908.39	27.3525	9.8	15	0.5848	10.8	8.2	5.5	6.85
335000	22.28	17.56	11.95	9.67	22.24	16.64	12.47	10.76	21.89	16.93	14.02	12.68	908.39	27.3525	10.2	15.8	0.6473	10.8	8.2	5.5	6.85
340000	22.32	17.61	12.02	9.86	22.28	16.76	12.54	10.83	22.42	17.06	14.11	12.79	908.41	27.3524	9.7	15.6	0.6971	10.8	8.2	5.5	6.85
345000	22.41	17.73	12.14	10.15	22.38	16.88	12.62	10.97	22.56	17.24	14.28	12.94	908.41	27.3524	10.7	15.9	0.5746	10.8	8.2	5.5	6.85
350000	22.36	17.68	12.05	10.08	22.35	16.91	12.6	10.95	22.52	17.21	14.26	12.91	908.41	27.3524	10.3	15.7	0.6599	10.8	8.2	5.5	6.85
355000	22.4	17.42	11.98	10.02	22.39	16.95	12.71	10.99	22.58	17.26	14.31	12.95	908.41	27.3524	10.5	14.6	0.7134	10.8	8.2	5.5	6.85
360000	22.38	17.08	11.7	9.33	22.4	16.83	13.32	11.62	22.3	16.53	12.69	10.88	908.34	27.3531	13	15.1	0.7496	10.8	8.2	5.5	6.85
365000	22.37	17.23	11.82	9.92	22.35	16.93	12.69	10.95	22.28	16.88	13.05	11.44	908.34	27.3531	11	15.2	0.6975	10.8	8.2	5.5	6.85
370000	22.24	17.37	11.91	9.98	22.18	16.5	12.39	10.68	22.26	16.87	13.04	11.43	908.34	27.3531	10.1	15.5	0.6899	10.8	8.2	5.5	6.85
375000	22.34	17.46	12.02	10.11	22.35	16.92	12.87	10.96	22.33	16.91	13.15	11.55	908.34	27.3531	11.5	15.9	0.7341	10.8	8.2	5.5	6.85
380000	22.38	17.51	12.15	10.25	22.41	16.86	12.91	10.99	22.31	16.89	13.51	11.84	908.31	27.3528	10.8	15.1	0.6618	10.8	8.2	5.5	6.85
385000	22.42	17.58	12.23	10.46	22.45	16.89	12.92	11.02	22.52	17.22	13.35	11.44	908.31	27.3528	9.7	15.8	0.7215	10.8	8.2	5.5	6.85

390000	22.41	17.48	13.21	11.79	22.37	17.27	13.23	12.08	22.6	17.52	14.09	12.22	908.31	27.3528	7.4	14.5	0.8894	10.8	8.2	5.5	6.85
395000	22.39	17.61	12.27	10.67	22.32	16.88	12.65	10.91	22.32	16.9	13.21	11.5	908.31	27.3528	10.4	14.9	0.8134	10.8	8.2	5.5	6.85
400000	22.34	17.54	12.28	10.59	22.28	16.79	12.61	10.86	22.33	16.92	13.24	11.53	908.26	27.3529	11.7	15.7	0.7764	11.9	9.8	6.1	6.9
405000	22.41	17.53	12.83	10.75	22.36	16.91	12.59	10.91	22.54	17.25	14.3	12.96	908.26	27.3529	10.3	16.1	0.5437	11.9	9.8	6.1	6.9
410000	22.46	17.61	12.32	10.67	22.41	16.87	12.64	10.94	22.61	17.35	14.42	13.05	908.26	27.3529	10.8	16.4	0.6981	11.9	9.8	6.1	6.9
415000	22.48	17.65	12.37	10.65	22.43	16.89	12.71	10.99	22.63	17.38	14.46	13.11	908.26	27.3529	11	16.8	0.7235	11.9	9.8	6.1	6.9
420000	22.56	17.84	12.87	10.34	21.9	16.95	13.25	11.25	22.45	17.04	12.95	10.9	908.25	27.3532	11.8	14.9	0.7515	11.9	9.8	6.1	6.9
425000	22.51	17.73	12.43	10.46	22.45	16.9	12.74	11.05	22.41	17.01	14.09	12.75	908.25	27.3532	10.6	15.7	0.7133	11.9	9.8	6.1	6.9
430000	22.43	17.57	12.48	10.43	22.37	16.92	12.77	11.1	22.49	17.08	14.15	12.79	908.25	27.3532	10.7	16.1	0.6943	11.9	9.8	6.1	6.9
435000	22.47	17.58	12.51	10.51	22.39	16.94	12.79	11.12	22.66	17.76	14.82	13.5	908.25	27.3532	10.9	15.8	0.6794	11.9	9.8	6.1	6.9
440000	22.39	17.53	12.42	10.47	22.28	16.78	12.58	10.92	22.31	16.92	13.26	11.56	908.19	27.3526	11.3	16.2	0.6998	11.9	9.8	6.1	6.9
445000	22.33	17.48	12.37	10.39	22.24	16.72	12.53	10.81	22.35	16.97	13.31	11.63	908.19	27.3526	11.5	15.3	0.8273	11.9	9.8	6.1	6.9
450000	22.37	17.5	12.28	9.66	22.4	16.84	12.76	10.85	21.84	16.6	13.18	11.43	908.19	27.3526	12.1	14.7	0.6242	11.9	9.8	6.1	6.9
455000	22.32	17.46	12.31	10.34	22.23	16.61	12.48	10.75	22.43	17.03	14.05	12.71	908.19	27.3526	10.6	15.1	0.6976	11.9	9.8	6.1	6.9
460000	22.35	17.43	12.27	10.31	22.29	16.82	12.73	11.07	22.37	16.96	13.29	11.6	908.22	27.3524	10.9	15.3	0.5543	11.9	9.8	6.1	6.9
465000	22.31	17.38	12.22	10.28	22.19	16.69	12.57	10.89	22.41	17.02	14.11	12.78	908.22	27.3524	11.5	16.7	0.5764	11.9	9.8	6.1	6.9
470000	22.28	17.35	12.18	10.23	22.25	16.75	12.56	10.88	22.38	16.99	13.36	11.67	908.22	27.3524	11.1	15.6	0.6713	11.9	9.8	6.1	6.9
475000	22.34	17.41	12.24	10.34	22.29	16.81	12.68	10.95	22.35	16.96	13.32	11.63	908.22	27.3524	12.4	15.9	0.6197	11.9	9.8	6.1	6.9
480000	22.4	17.32	12.08	9.56	22.38	17.14	12.73	10.67	22.4	16.82	12.82	10.75	908.24	27.353	9.1	17.2	0.6871	11.9	9.8	6.1	6.9
485000	22.38	17.45	12.28	10.43	22.32	16.84	12.76	10.99	22.37	16.97	13.29	11.58	908.24	27.353	10.7	16.8	0.6619	11.9	9.8	6.1	6.9
490000	22.45	17.53	12.43	10.59	22.37	16.87	12.62	10.94	22.51	17.22	14.28	12.92	908.24	27.353	10.5	16.2	0.6817	11.9	9.8	6.1	6.9
495000	22.51	17.59	12.57	10.68	22.42	16.98	12.86	11.07	22.58	17.25	14.33	12.99	908.24	27.353	9.9	16.7	0.4983	11.9	9.8	6.1	6.9
500000	22.48	17.55	12.59	10.75	22.35	16.89	12.65	10.92	22.68	17.39	14.48	13.12	908.23	27.3527	10.9	17.1	0.7161	13.9	14.0	6.5	7.0
505000	22.53	17.67	12.67	10.83	22.29	16.83	12.74	10.95	22.71	17.82	15.02	13.71	908.23	27.3527	11.3	16.9	0.7218	13.9	14.0	6.5	7.0
510000	22.45	17.16	11.76	9.06	22.26	16.48	12.68	11	22.22	16.76	13.62	12.07	908.23	27.3527	9.9	16.5	0.8055	13.9	14.0	6.5	7.0
515000	22.49	17.61	12.64	10.81	22.19	16.53	12.41	10.68	22.56	17.24	14.31	12.97	908.23	27.3527	10.7	16.3	0.7411	13.9	14.0	6.5	7.0
520000	22.53	17.65	12.73	10.92	22.24	16.67	12.53	10.75	22.69	17.41	14.54	13.21	908.21	27.3525	11.2	16.6	0.6815	13.9	14.0	6.5	7.0

525000	22.51	17.64	12.71	10.94	22.31	16.71	12.51	10.73	22.57	17.25	14.33	13.01	908.21	27.3525	10.7	16.8	0.6991	13.9	14.0	6.5	7.0
530000	22.55	17.73	12.83	11.03	22.35	16.88	12.66	10.93	22.63	17.36	14.45	13.09	908.21	27.3525	10.9	17.2	0.7243	13.9	14.0	6.5	7.0
535000	22.49	17.67	12.79	10.97	22.24	16.75	12.55	10.85	22.58	17.26	14.37	13.02	908.21	27.3525	11.8	17.8	0.7951	13.9	14.0	6.5	7.0
540000	22.76	17.84	13.79	12.18	22.51	16.67	12.78	12.34	22.75	17.53	16.26	14	908.27	27.3524	10.8	16.9	0.5119	13.9	14.0	6.5	7.0
545000	22.67	17.81	12.89	11.13	22.49	16.95	12.99	11.16	22.73	17.84	15.03	13.75	908.27	27.3524	11.5	17.4	0.622	13.9	14.0	6.5	7.0
550000	22.41	17.87	12.96	11.24	22.55	16.81	13.04	11.91	22.69	17.43	14.54	13.23	908.27	27.3524	8.9	16.8	0.7188	13.9	14.0	6.5	7.0
555000	22.69	17.84	13.04	11.39	22.48	16.92	13.01	11.89	22.71	17.84	15.08	13.82	908.27	27.3524	10.3	17.4	0.8171	13.9	14.0	6.5	7.0
560000	22.64	17.79	13.08	11.45	22.43	17.05	12.93	11.81	22.63	17.58	14.71	13.43	908.24	27.3529	11.9	16.9	0.6678	13.9	14.0	6.5	7.0
565000	22.61	17.75	12.97	11.31	22.37	16.81	12.75	11.63	22.56	17.37	14.49	13.19	908.24	27.3529	12.3	17.2	0.7341	13.9	14.0	6.5	7.0
570000	22.58	18.12	12.76	11.68	22.34	17.01	13.12	11.83	22.83	17.47	15.28	13.06	908.24	27.3529	9.6	17.4	0.7443	13.9	14.0	6.5	7.0
575000	22.78	18.02	13.14	11.53	22.61	16.81	13.15	11.51	22.75	17.79	14.96	13.72	908.24	27.3529	10.9	17.9	0.7312	13.9	14.0	6.5	7.0
580000	22.57	17.96	13.16	11.57	22.51	16.76	13.1	11.54	22.48	17.07	14.08	12.75	908.18	27.3527	11.2	17.5	0.6559	13.9	14.0	6.5	7.0
585000	22.43	17.87	13.19	11.64	22.78	16.86	13.28	11.67	22.46	17.05	14.03	12.72	908.18	27.3527	9.8	17.3	0.6813	13.9	14.0	6.5	7.0
590000	22.45	17.89	13.24	11.71	22.69	16.45	13.34	11.71	22.48	17.07	14.05	12.74	908.18	27.3527	10.1	16.8	0.8101	13.9	14.0	6.5	7.0
595000	22.38	17.75	13.18	11.62	22.71	16.69	13.46	11.82	22.35	16.95	13.98	12.15	908.18	27.3527	11	17.1	0.7311	13.9	14.0	6.5	7.0
600000	22.39	17.95	13.49	12.02	22.69	16.64	13.2	12.18	22.81	17.27	14.64	12.49	908.22	27.3522	7.6	16.2	0.6181	16.15	19.15	6.7	7.05
605000	22.47	17.91	13.25	11.78	22.31	16.84	13.24	11.86	22.53	17.23	14.29	12.93	908.22	27.3522	9.5	17.3	0.6819	16.15	19.15	6.7	7.05
610000	22.38	17.68	12.98	11.33	22.24	16.76	13.15	11.91	21.97	16.57	13.49	12.06	908.22	27.3522	10.2	17.7	0.7109	16.15	19.15	6.7	7.05
615000	22.43	17.81	13.06	11.41	22.31	16.79	13.21	11.62	22.38	16.97	13.99	12.21	908.22	27.3522	11.3	16.9	0.5868	16.15	19.15	6.7	7.05
620000	22.39	17.77	13.01	11.35	22.25	16.85	13.24	11.62	22.39	16.98	14.01	12.34	908.22	27.3527	10.8	17.2	0.6197	16.15	19.15	6.7	7.05
625000	22.51	17.89	13.16	11.55	22.61	16.73	13.31	11.69	22.56	17.37	14.43	13.05	908.22	27.3527	10.1	17.8	0.7319	16.15	19.15	6.7	7.05
630000	22.32	18	13.8	11.12	22.49	17.06	13.12	11.72	22.38	18	14.61	12.94	908.22	27.3527	10.7	18.4	0.4915	16.15	19.15	6.7	7.05
635000	22.63	17.87	13.05	11.41	22.76	16.93	13.15	11.5	22.51	17.29	14.41	13.02	908.22	27.3527	11	17.6	0.7641	16.15	19.15	6.7	7.05
640000	22.57	17.85	13.18	11.64	22.71	17.02	13.22	11.61	22.49	17.16	14.25	12.88	908.26	27.3521	11.6	18.1	0.5899	16.15	19.15	6.7	7.05
645000	22.49	17.78	13.13	11.51	22.34	16.89	13.06	11.51	22.51	17.27	14.38	12.98	908.26	27.3521	12.8	17.9	0.6412	16.15	19.15	6.7	7.05
650000	22.45	17.75	13.02	11.37	22.37	16.95	13.11	11.52	22.49	17.15	14.23	12.86	908.26	27.3521	11.7	16.9	0.6648	16.15	19.15	6.7	7.05
655000	22.39	17.73	12.98	11.28	22.29	17.12	13.07	11.48	22.4	17.01	13.99	12.35	908.26	27.3521	13.1	18.3	0.7108	16.15	19.15	6.7	7.05

660000	22.21	17.99	13.18	10.24	22.1	17.08	13.32	11.37	22.2	17.54	14.01	12.15	908.21	27.3524	11.3	20.3	0.7652	16.15	19.15	6.7	7.05
665000	22.68	17.91	13.09	11.47	22.43	17.33	13.24	11.62	22.75	17.59	14.07	12.41	908.21	27.3524	11.5	18.8	0.841	16.15	19.15	6.7	7.05
670000	22.59	17.86	13.01	11.36	22.46	17.38	13.25	11.63	22.5	17.27	13.41	12.03	908.21	27.3524	11.8	18.6	0.7252	16.15	19.15	6.7	7.05
675000	22.57	17.85	13.05	11.42	22.41	17.34	13.21	11.59	22.46	17.13	14.26	12.89	908.21	27.3524	11	17.9	0.7413	16.15	19.15	6.7	7.05
680000	22.48	17.79	12.95	11.29	22.35	17.29	13.12	11.52	22.58	17.61	14.78	13.45	908.25	27.3525	10.8	18.2	0.6818	16.15	19.15	6.7	7.05
685000	22.61	18.03	13.3	11.82	22.39	17.31	13.2	11.57	22.59	17.6	14.77	13.43	908.25	27.3525	11.3	19.5	0.7203	16.15	19.15	6.7	7.05
690000	22.76	17.95	12.99	10.19	22.31	17.05	13.16	11.04	22.25	17.12	13.55	11.79	908.25	27.3525	10.8	16.6	0.5281	16.15	19.15	6.7	7.05
695000	22.63	18.12	13.25	11.79	22.28	17.21	13.11	11.46	22.54	17.31	13.5	11.74	908.25	27.3525	12.1	18.9	0.7554	16.15	19.15	6.7	7.05
700000	22.58	18.05	13.19	11.64	22.25	17.15	13.04	11.41	22.49	17.19	14.25	12.83	908.2	27.3519	12.6	16.9	0.8102	17.55	19.7	6.75	7.3
705000	22.56	18.03	13.14	11.56	22.21	17.08	12.98	11.27	22.44	17.14	14.18	12.75	908.2	27.3519	11.5	18.5	0.7468	17.55	19.7	6.75	7.3
710000	22.51	18.08	13.27	11.84	22.19	17.03	12.95	11.15	22.47	17.08	14.05	12.69	908.2	27.3519	11.9	18.9	0.7141	17.55	19.7	6.75	7.3
715000	22.48	17.86	13.15	11.67	22.14	16.98	12.71	10.97	22.39	17.02	14.01	12.66	908.2	27.3519	13.1	19.2	0.6467	17.55	19.7	6.75	7.3
720000	22.85	18.25	12.79	10.16	22.18	16.85	12.68	10.55	22.41	17.01	13.43	11.71	908.19	27.3524	14	17.5	0.6925	17.55	19.7	6.75	7.3
725000	22.61	18.13	13.09	11.57	22.29	17.21	12.87	10.92	22.54	17.65	14.82	13.48	908.19	27.3524	12.4	18.6	0.7224	17.55	19.7	6.75	7.3
730000	22.57	18.07	12.89	11.34	22.24	17.15	12.76	11.03	22.51	17.62	14.79	13.46	908.19	27.3524	11.6	18.9	0.6898	17.55	19.7	6.75	7.3
735000	22.64	18.14	13.31	11.89	22.35	17.28	13.05	11.34	22.55	17.67	14.83	13.49	908.19	27.3524	11.3	19.1	0.7743	17.55	19.7	6.75	7.3
740000	22.59	18.09	13.28	11.87	22.31	17.22	13.01	11.28	22.52	17.63	14.8	13.43	908.23	27.3522	11.9	19.3	0.7355	17.55	19.7	6.75	7.3
745000	22.56	17.97	13.25	11.76	22.27	17.19	12.94	11.09	22.47	17.54	14.71	13.39	908.23	27.3522	10.8	18.9	0.8001	17.55	19.7	6.75	7.3
750000	22.63	18.02	12.35	10.76	22.11	16.65	12.57	10.72	22.15	16.82	13.25	12.99	908.23	27.3522	9.9	19	0.6273	17.55	19.7	6.75	7.3
755000	22.67	18.01	13.19	11.67	22.35	17.31	12.98	11.18	22.63	17.73	14.89	13.56	908.23	27.3522	10.6	19.8	0.7013	17.55	19.7	6.75	7.3
760000	22.63	17.99	13.26	11.86	22.31	17.23	13.13	11.38	22.59	17.69	14.85	13.52	908.18	27.3524	11.3	19.3	0.6547	17.55	19.7	6.75	7.3
765000	22.57	17.96	13.21	11.81	22.25	17.16	13.07	11.46	22.51	17.63	14.78	13.47	908.18	27.3524	11.9	19.8	0.7992	17.55	19.7	6.75	7.3
770000	22.48	17.89	13.18	11.74	22.16	17.01	12.95	11.04	22.48	17.55	14.69	13.36	908.18	27.3524	13.9	19.9	0.7504	17.55	19.7	6.75	7.3
775000	22.39	17.91	13.26	11.87	22.06	16.73	12.84	10.91	22.45	17.51	14.65	13.33	908.18	27.3524	10.9	18.8	0.7113	17.55	19.7	6.75	7.3
780000	22.39	17.87	13.06	11.45	22.13	16.98	12.91	10.97	22.41	17.46	14.61	13.28	908.2	27.3523	12.1	19.2	0.7648	17.55	19.7	6.75	7.3
785000	22.42	17.94	13.15	11.67	22.18	17.05	12.95	10.98	22.52	17.34	14.48	13.19	908.2	27.3523	12.6	19.3	0.7202	17.55	19.7	6.75	7.3
790000	22.38	17.85	13.11	11.61	22.15	16.95	12.89	10.95	22.3	17.18	14.24	12.95	908.2	27.3523	12.6	18.8	0.8204	17.55	19.7	6.75	7.3

795000	22.43	17.92	13.24	11.78	22.24	16.99	12.92	10.96	22.46	17.49	14.58	13.27	908.2	27.3523	11.7	19.6	0.6781	17.55	19.7	6.75	7.3
800000	22.64	17.73	12.55	11.31	22.69	16.62	12.23	10.28	22.21	16.78	13.7	13.11	908.21	27.3521	10.1	19	0.5639	18.5	25.8	6.85	7.55
805000	22.51	17.68	12.94	11.25	22.43	17.21	12.99	11.08	22.28	17.12	14.19	12.57	908.21	27.3521	10.9	19.1	0.7463	18.5	25.8	6.85	7.55
810000	22.47	17.65	12.89	11.17	22.41	17.16	13.07	11.18	22.61	17.67	14.82	13.45	908.21	27.3521	11.2	19.5	0.8304	18.5	25.8	6.85	7.55
815000	22.43	17.73	12.96	11.34	22.39	16.97	12.89	10.94	22.53	17.45	14.59	13.26	908.21	27.3521	12.6	19.8	0.7845	18.5	25.8	6.85	7.55
820000	22.52	17.88	12.99	11.43	22.47	17.06	12.96	11.08	22.49	17.53	14.67	13.35	908.21	27.3519	12.8	19.9	0.7211	18.5	25.8	6.85	7.55
825000	22.54	17.92	13.03	11.51	22.51	17.15	13.09	11.21	22.26	17.34	14.41	13.12	908.21	27.3519	12.7	20.6	0.6895	18.5	25.8	6.85	7.55
830000	22.49	17.86	13.1	11.59	22.53	17.21	13.15	11.34	22.31	17.41	14.53	13.17	908.21	27.3519	12.3	19	0.7712	18.5	25.8	6.85	7.55
835000	22.47	17.83	13.02	11.42	22.42	17.12	13.06	11.18	22.28	17.37	14.45	13.03	908.21	27.3519	13.1	18.7	0.8613	18.5	25.8	6.85	7.55
840000	22.57	17.98	13.16	11.48	22.49	17.17	13.09	11.2	22.29	17.38	14.46	12.97	908.17	27.3524	12.4	20.1	0.801	18.5	25.8	6.85	7.55
845000	22.53	17.94	13.09	11.43	22.45	17.15	13.07	11.18	22.43	17.35	14.42	13.01	908.17	27.3524	11.5	20.9	0.6455	18.5	25.8	6.85	7.55
850000	22.79	17.38	12.83	10.19	22.58	17.22	12.37	10.45	22.09	17.11	12.85	13.21	908.17	27.3524	20.5	21.9	0.7141	18.5	25.8	6.85	7.55
855000	22.49	17.46	12.45	11.34	22.55	17.16	13.01	11.12	22.3	17.39	14.48	13.04	908.17	27.3524	12.7	19.7	0.7437	18.5	25.8	6.85	7.55
860000	22.52	17.79	12.67	11.25	22.51	17.06	12.95	11.04	22.48	17.55	14.67	13.25	908.21	27.3519	11.6	19.9	0.7382	18.5	25.8	6.85	7.55
865000	22.47	17.72	12.62	11.31	22.43	16.95	12.81	10.87	22.36	17.37	14.44	12.95	908.21	27.3519	14.2	20.5	0.8114	18.5	25.8	6.85	7.55
870000	22.51	17.85	12.88	11.53	22.41	16.91	12.76	10.81	22.39	17.4	14.48	12.97	908.21	27.3519	13.3	20.8	0.6028	18.5	25.8	6.85	7.55
875000	22.53	17.91	13.05	11.34	22.45	16.79	12.67	10.77	22.42	17.41	14.49	12.99	908.21	27.3519	11.5	20	0.7541	18.5	25.8	6.85	7.55
880000	22.5	17.86	13.08	11.38	22.42	16.88	12.73	10.78	22.4	17.39	14.48	12.86	908.22	27.3526	11.9	20.6	0.7448	18.5	25.8	6.85	7.55
885000	22.48	17.82	12.97	11.27	22.37	16.94	12.79	10.83	22.18	17.28	14.36	12.79	908.22	27.3526	12.4	19.8	0.7953	18.5	25.8	6.85	7.55
890000	22.37	17.59	12.86	11.22	22.28	16.91	12.76	10.82	22.16	17.25	14.32	12.75	908.22	27.3526	12.9	21.1	0.6949	18.5	25.8	6.85	7.55
895000	22.39	17.57	12.83	11.18	22.26	16.83	12.68	10.79	22.13	17.21	14.27	12.43	908.22	27.3526	14.4	20.8	0.7341	18.5	25.8	6.85	7.55
900000	22.6	17.23	12.42	10.57	22.21	16.94	12.77	11.02	21.89	17.32	13.98	13.16	908.17	27.352	17	18.8	0.9105	19.95	31.05	7.45	7.7
905000	22.48	17.69	12.99	11.2	22.34	16.82	12.65	10.73	22.09	17.19	14.25	12.31	908.17	27.352	12.3	20.1	0.7545	19.95	31.05	7.45	7.7
910000	22.43	17.61	13.03	11.31	22.31	16.79	12.64	10.71	22.08	17.18	14.24	12.27	908.17	27.352	12.7	19.8	0.7681	19.95	31.05	7.45	7.7
915000	22.41	17.57	12.98	11.29	22.28	16.85	12.68	10.75	22.04	17.15	14.21	12.23	908.17	27.352	13.6	20.6	0.6799	19.95	31.05	7.45	7.7
920000	22.45	17.59	13.02	11.29	22.31	16.81	12.61	10.68	22.07	17.18	14.23	12.27	908.13	27.3524	12.2	20.9	0.7331	19.95	31.05	7.45	7.7
925000	22.43	17.55	12.96	11.26	22.25	16.78	12.59	10.67	22.67	17.78	14.93	13.05	908.13	27.3524	12.8	21.6	0.7612	19.95	31.05	7.45	7.7

930000	22.38	17.49	12.87	11.21	22.19	16.75	12.56	10.63	22.32	17.51	14.62	12.74	908.13	27.3524	11	20.7	0.7158	19.95	31.05	7.45	7.7
935000	22.29	17.43	12.78	11.17	22.15	16.69	12.49	10.61	22.34	17.55	14.65	12.76	908.13	27.3524	11.8	21.1	0.7329	19.95	31.05	7.45	7.7
940000	22.35	17.61	12.98	11.28	22.29	16.88	12.71	10.75	22.28	17.49	14.58	12.69	908.18	27.3522	14.5	20	0.7077	19.95	31.05	7.45	7.7
945000	22.38	17.65	13.12	11.36	22.34	16.89	12.73	10.76	22.33	17.54	14.67	12.77	908.18	27.3522	13.8	20.8	0.5938	19.95	31.05	7.45	7.7
950000	22.24	17.28	12.28	9.98	21.65	16.59	12.92	11.31	22.11	17.48	14.1	11.34	908.18	27.3522	11.7	26.4	0.8311	19.95	31.05	7.45	7.7
955000	22.36	17.88	13.21	11.71	22.41	16.95	12.81	10.85	22.27	17.48	14.59	12.71	908.18	27.3522	13.5	22.3	0.7355	19.95	31.05	7.45	7.7
960000	22.41	17.67	12.78	11.29	22.43	16.97	12.83	10.86	22.07	17.17	14.2	12.19	908.15	27.3524	12.2	21.5	0.7241	19.95	31.05	7.45	7.7
965000	22.43	17.72	12.69	11.24	22.38	16.92	12.79	10.83	22.15	17.22	14.25	12.23	908.15	27.3524	12.9	21.2	0.6594	19.95	31.05	7.45	7.7
970000	22.37	17.69	12.58	11.17	22.29	16.87	12.73	10.78	22.12	17.18	14.16	12.11	908.15	27.3524	13.7	21.5	0.7348	19.95	31.05	7.45	7.7
975000	22.33	17.64	12.53	11.12	22.18	16.78	12.6	10.65	22.09	17.15	14.11	12.05	908.15	27.3524	13.5	22.6	0.7455	19.95	31.05	7.45	7.7
980000	22.42	17.76	12.47	11.08	22.21	16.81	12.62	10.68	22.17	17.2	14.23	12.18	908.21	27.352	13.2	20.4	0.8344	19.95	31.05	7.45	7.7
985000	22.38	17.71	12.45	11.01	22.19	16.79	12.59	10.64	22.13	17.19	14.14	12.08	908.21	27.352	13.7	21.3	0.7332	19.95	31.05	7.45	7.7
990000	22.28	17.63	12.37	10.91	22.16	16.75	12.56	10.62	22.01	16.97	13.89	11.87	908.21	27.352	13.9	22	0.7586	19.95	31.05	7.45	7.7
995000	22.37	17.75	12.43	10.86	22.24	16.77	12.57	10.63	22.56	17.43	14.47	12.89	908.21	27.352	13.3	21.9	0.6735	19.95	31.05	7.45	7.7
1000000	22.46	17.39	12.62	10.49	22.35	16.89	12.1	10.34	22.24	17.24	13.57	12.28	908.18	27.3522	14	22.5	0.6887	22.35	32.5	7.6	7.7

Eksperimen 2 (ventil RV2)

BRC	CUS4	CUS6	CUS14	CUS21	CUUS4	CUUS6	CUUS14	CUUS21	CUUD4	CUUD6	CUUD14	CUUD21	MTV	MKV	ZIUS	ZIUD	PP	Z1	Z2	Z3	Z4
0	21.57	16.27	11.18	9.27	22.41	17.42	14.29	12.56	22.19	18.01	15.27	13.6	909.28	27.5891	6.8	12.2	0.56	6.15	4.95	5.4	5.45
5000	21.53	16.09	11.15	9.31	21.97	17.38	14.26	12.48	22.1	18.08	15.22	13.4	909.28	27.5891	6.2	10.3	0.5513	6.15	4.95	5.4	5.45
10000	21.47	16.11	11.16	9.18	21.89	17.4	14.19	12.35	22.12	17.86	15.15	13.07	909.28	27.5891	5.6	10.7	0.4915	6.15	4.95	5.4	5.45
15000	21.51	15.86	10.89	9.2	21.59	17.15	14.04	11.92	21.64	17.55	14.83	12.54	909.28	27.5891	6.1	10.1	0.4672	6.15	4.95	5.4	5.45
20000	21.35	17.14	12.7	10.89	22.6	17.44	14.28	12.65	21.92	16.16	14.03	13.82	909.30	27.5893	5.1	11.3	0.4163	6.15	4.95	5.4	5.45
25000	21.49	16.12	10.97	9.54	21.51	16.83	14.09	12.24	21.86	17.49	14.25	12.31	909.30	27.5893	5.8	10.9	0.4557	6.15	4.95	5.4	5.45
30000	21.34	16.08	11.05	9.45	21.69	16.79	14.1	12.35	21.75	17.89	15.01	12.81	909.30	27.5893	6.6	10.8	0.5597	6.15	4.95	5.4	5.45

35000	21.46	16.21	11.21	9.52	21.48	16.68	14.15	12.18	22.15	17.67	14.35	13.14	909.30	27.5893	6.8	10.1	0.6105	6.15	4.95	5.4	5.45
40000	21.44	16.48	12.06	10.3	21.39	16.35	13.72	12.15	21.68	16.96	14.69	12.88	909.32	27.5891	8	10.3	0.5245	6.15	4.95	5.4	5.45
45000	21.51	16.24	11.03	9.67	21.36	16.21	14.08	12.48	21.73	17.44	14.4	12.25	909.32	27.5891	7.1	10.5	0.5852	6.15	4.95	5.4	5.45
50000	21.49	16.26	10.97	9.61	21.56	16.17	14.01	12.06	21.69	17.18	15.05	12.51	909.32	27.5891	6.2	10.4	0.465	6.15	4.95	5.4	5.45
55000	21.53	16.2	10.89	9.58	21.42	16.13	13.94	12.35	21.46	17.09	14.25	13.69	909.32	27.5891	6.4	9.8	0.5516	6.15	4.95	5.4	5.45
60000	21.26	16.18	11.37	9.4	21.57	16.18	13.74	12.27	21.28	16.34	13.7	11.96	909.31	27.589	5.9	9.6	0.4688	6.15	4.95	5.4	5.45
65000	21.48	16.08	11.12	9.54	21.49	16.21	13.99	12.01	21.12	17.18	14.28	13.05	909.31	27.589	6.3	9.9	0.5618	6.15	4.95	5.4	5.45
70000	21.48	15.96	11.08	9.51	21.48	16.15	14.11	12.15	21.68	17.21	13.94	12.81	909.31	27.589	6.3	10	0.5711	6.15	4.95	5.4	5.45
75000	21.5	16.04	11.14	9.48	21.39	16.05	14.03	11.76	21.86	17.01	13.79	11.29	909.31	27.589	6.7	9.7	0.5991	6.15	4.95	5.4	5.45
80000	21.37	16.09	11.25	9.4	21.68	15.98	13.25	11.59	21.64	16.21	13.78	12.42	909.28	27.5886	6.2	8.8	0.6237	6.15	4.95	5.4	5.45
85000	21.29	15.93	10.99	9.39	21.51	16.01	13.9	11.89	21.55	16.93	14.08	12.36	909.28	27.5886	6.5	9.5	0.5748	6.15	4.95	5.4	5.45
90000	21.37	15.97	11	9.35	21.71	15.94	13.41	12.24	21.73	16.69	14.13	12.89	909.28	27.5886	6.1	9.9	0.6455	6.15	4.95	5.4	5.45
95000	21.52	15.86	11.06	9.31	21.29	15.84	13.84	12.08	21.64	16.81	13.78	11.96	909.28	27.5886	7.3	10.9	0.5486	6.15	4.95	5.4	5.45
100000	21.4	15.7	10.8	8.82	21.39	15.66	13.13	11.5	21.48	16.02	15.14	11.68	909.27	27.5891	7.1	10.2	0.5975	6.7	5.2	5.5	5.45
105000	21.53	15.75	10.95	9.26	21.38	15.71	13.89	11.26	21.59	16.51	13.89	12.45	909.27	27.5891	6.8	10.7	0.4862	6.7	5.2	5.5	5.45
110000	21.57	15.51	10.93	9.18	21.22	15.64	14.23	11.67	21.88	16.29	14.51	13.09	909.27	27.5891	7.2	10.4	0.4922	6.7	5.2	5.5	5.45
115000	21.48	15.59	10.85	9.11	21.37	15.68	13.35	11.5	21.34	16.89	14.31	12.68	909.27	27.5891	8.1	9.8	0.5133	6.7	5.2	5.5	5.45
120000	21.51	13.5	10.64	8.89	21.25	15.67	13.17	11.74	21.59	16.42	13.98	13.28	909.27	27.5887	8.2	10.5	0.4997	6.7	5.2	5.5	5.45
125000	21.49	15.52	10.79	8.97	21.06	15.61	13.67	11.98	21.51	16.37	13.75	12.59	909.27	27.5887	7.5	11.4	0.4571	6.7	5.2	5.5	5.45
130000	21.16	15.53	10.83	9.08	21.55	15.63	13.59	12.16	21.43	16.93	14.19	12.71	909.27	27.5887	6.9	10.6	0.5187	6.7	5.2	5.5	5.45
135000	21.47	15.48	10.77	8.87	21.38	15.59	13.41	11.84	21.37	17.11	13.61	12.34	909.27	27.5887	6.5	11.8	0.5312	6.7	5.2	5.5	5.45
140000	21.46	15.45	10.46	8.45	21.22	15.75	13.25	11.6	21.42	16.02	13.92	12.05	909.29	27.5887	8.4	11	0.5342	6.7	5.2	5.5	5.45
145000	21.53	15.49	11.05	8.69	21.14	15.67	13.22	11.37	21.53	15.91	13.51	12.15	909.29	27.5887	7.4	10.4	0.6133	6.7	5.2	5.5	5.45
150000	21.54	15.51	10.94	9.04	21.37	15.59	13.13	11.41	21.18	16.19	13.13	11.87	909.29	27.5887	7.6	10.6	0.5567	6.7	5.2	5.5	5.45
155000	21.22	15.39	10.88	8.95	21.19	15.45	12.99	11.13	21.41	16.37	13.35	11.69	909.29	27.5887	7.1	10.4	0.4975	6.7	5.2	5.5	5.45
160000	21.41	15.22	10.43	8.16	21.28	15.12	12.78	11.05	21.37	15.25	14.12	11.75	909.30	27.589	7.2	9.8	0.5114	6.7	5.2	5.5	5.45
165000	21.36	15.31	10.79	8.26	21.12	15.44	12.97	11.68	21.34	16.68	13.64	12.13	909.30	27.589	8.4	9.9	0.5128	6.7	5.2	5.5	5.45

170000	21.52	15.35	10.82	8.34	21.09	15.47	13.15	10.97	21.61	16.55	14.03	12.21	909.30	27.589	7.5	10.5	0.4791	6.7	5.2	5.5	5.45
175000	21.27	15.41	10.69	8.51	21.59	15.52	13.08	11.26	21.15	16.42	14.61	12.69	909.30	27.589	7.9	10.7	0.5222	6.7	5.2	5.5	5.45
180000	21.36	15.22	10.43	8.16	21.38	15.32	12.16	10.55	21.27	16.08	13.52	12.15	909.33	27.5882	8.9	10.9	0.4185	6.7	5.2	5.5	5.45
185000	21.41	15.38	10.85	8.26	21.13	15.51	12.67	11.79	21.52	16.39	13.65	12.1	909.33	27.5882	8.4	11.2	0.5677	6.7	5.2	5.5	5.45
190000	21.38	15.42	10.71	8.33	21.24	15.58	12.73	11.34	21.73	16.08	13.19	11.78	909.33	27.5882	7.6	11	0.5174	6.7	5.2	5.5	5.45
195000	21.42	15.51	10.75	8.37	21.16	15.78	12.81	11.21	21.19	15.88	14.83	12.73	909.33	27.5882	8.4	10.8	0.6188	6.7	5.2	5.5	5.45
200000	21.4	15.45	10.64	8.39	21.3	16.06	13.16	11.68	21.48	15.94	13.32	11.84	909.28	27.5895	8.9	12.1	0.6599	7.25	5.25	5.85	5.65
205000	21.52	15.48	10.69	8.46	21.13	15.81	13.08	11.25	21.27	16.21	14.57	11.59	909.28	27.5895	6.8	11.5	0.5975	7.25	5.25	5.85	5.65
210000	21.55	15.43	10.73	8.51	21.26	15.76	13.01	11.1	21.29	16.39	13.58	12.35	909.28	27.5895	7.1	10.9	0.6232	7.25	5.25	5.85	5.65
215000	21.48	15.47	10.79	8.59	21.49	15.79	13.24	11.64	21.75	16.83	13.69	12.23	909.28	27.5895	8.9	11.3	0.4828	7.25	5.25	5.85	5.65
220000	21.43	15.43	10.91	8.98	21.5	16.13	13.61	11.99	21.65	16.77	14.37	12.92	909.29	27.5889	9.7	12.9	0.5036	7.25	5.25	5.85	5.65
225000	21.47	15.51	10.88	8.69	21.48	15.82	13.47	11.86	21.61	16.69	14.13	12.68	909.29	27.5889	7.2	11.4	0.5546	7.25	5.25	5.85	5.65
230000	21.51	15.49	10.94	8.73	21.49	15.79	13.26	11.79	21.58	16.61	14.01	13.41	909.29	27.5889	8	10.8	0.5483	7.25	5.25	5.85	5.65
235000	21.46	15.58	10.97	8.81	21.24	15.95	12.89	11.61	21.43	16.57	13.88	12.48	909.29	27.5889	7.3	11.5	0.4828	7.25	5.25	5.85	5.65
240000	21.33	15.53	11.13	9.37	21.31	16.09	13.38	11.7	21.25	16.49	14.02	12.57	909.28	27.5888	8.1	11.1	0.5162	7.25	5.25	5.85	5.65
245000	21.38	15.57	11.06	8.88	21.45	15.97	12.96	11.86	21.68	16.33	13.96	12.34	909.28	27.5888	7.5	11	0.4619	7.25	5.25	5.85	5.65
250000	21.52	15.49	11.07	9.02	21.61	15.93	13.14	11.61	21.49	16.41	14.43	11.61	909.28	27.5888	8.6	11.3	0.6117	7.25	5.25	5.85	5.65
255000	21.55	15.52	11.13	8.75	21.42	15.96	13.1	11.5	21.17	16.38	13.79	12.24	909.28	27.5888	9.2	11.7	0.4299	7.25	5.25	5.85	5.65
260000	21.09	15.56	10.98	8.79	21.18	16.03	12.86	11.16	21.44	16.43	13.81	11.59	909.30	27.5889	8.7	12.3	0.4861	7.25	5.25	5.85	5.65
265000	21.48	15.54	10.95	8.81	21.37	15.98	13.07	11.27	21.74	16.26	14.26	11.49	909.30	27.5889	9.5	12.2	0.5192	7.25	5.25	5.85	5.65
270000	21.4	15.6	10.87	8.34	21.35	15.41	12.22	10.34	21.39	16.05	14.39	11.12	909.30	27.5889	8.4	12.8	0.6234	7.25	5.25	5.85	5.65
275000	21.49	15.71	11.02	8.58	21.34	15.58	12.75	10.64	21.51	16.18	13.15	11.67	909.30	27.5889	6.9	11.8	0.6225	7.25	5.25	5.85	5.65
280000	21.45	15.65	11.15	8.71	21.21	15.52	12.61	10.79	21.42	16.29	13.86	11.89	909.28	27.5889	7.6	11.2	0.5837	7.25	5.25	5.85	5.65
285000	21.51	15.68	11.08	8.84	21.06	15.61	12.57	11.21	21.19	16.35	14.38	12.08	909.28	27.5889	7.1	10.9	0.6158	7.25	5.25	5.85	5.65
290000	21.45	15.58	11.1	8.91	21.29	15.57	12.78	11.16	21.89	16.4	13.21	12.46	909.28	27.5889	8.3	11.2	0.5199	7.25	5.25	5.85	5.65
295000	21.42	15.59	11.21	9.06	21.13	15.59	12.86	11.34	21.15	16.62	13.78	11.38	909.28	27.5889	7.9	11.6	0.5824	7.25	5.25	5.85	5.65
300000	21.33	15.8	11.42	9.28	21.2	15.73	12.81	11.04	21.28	16.28	13.69	11.91	909.31	27.5889	7.6	11.6	0.6338	7.75	5.7	6.05	6.05

305000	21.24	15.76	11.35	9.11	21.32	15.69	12.64	11.28	21.36	16.18	13.27	11.88	909.31	27.5889	7.3	11.8	0.5131	7.75	5.7	6.05	6.05
310000	21.46	15.67	11.28	9.15	21.05	15.61	12.59	11.16	21.53	16.06	13.75	12.53	909.31	27.5889	8.2	12.4	0.5249	7.75	5.7	6.05	6.05
315000	21.48	15.58	11.31	9.09	21.34	15.57	12.61	11.09	21.41	16.59	14.28	11.56	909.31	27.5889	8.8	12.2	0.5844	7.75	5.7	6.05	6.05
320000	21.42	15.61	11.27	9.16	20.95	15.6	12.77	11.15	21.49	16.16	13.34	12.13	909.26	27.5887	8.4	12.5	0.4998	7.75	5.7	6.05	6.05
325000	21.18	15.64	11.33	9.14	21.01	15.61	12.69	11.27	21.25	16.37	14.15	12.1	909.26	27.5887	8.3	12.8	0.5217	7.75	5.7	6.05	6.05
330000	21.29	15.89	11.44	9.19	21.25	15.69	12.99	11.19	21.03	16.21	13.56	12.01	909.26	27.5887	9.5	12.4	0.4829	7.75	5.7	6.05	6.05
335000	21.38	15.73	11.15	9.21	21.24	15.53	12.85	10.78	21.19	16.51	13.47	11.87	909.26	27.5887	9.1	12.8	0.5119	7.75	5.7	6.05	6.05
340000	21.35	15.71	11.19	9.18	21.11	15.5	12.83	11.34	21.37	16.29	13.61	11.69	909.27	27.5886	7.5	13.1	0.4982	7.75	5.7	6.05	6.05
345000	21.47	15.82	11.17	9.16	21.15	15.61	12.75	11.45	21.53	16.65	13.12	11.73	909.27	27.5886	9.3	11.8	0.5334	7.75	5.7	6.05	6.05
350000	21.49	15.65	11.23	9.08	20.94	15.44	12.54	11.61	21.61	16.69	14.64	11.49	909.27	27.5886	8.8	11.9	0.5574	7.75	5.7	6.05	6.05
355000	21.51	15.71	11.19	9.12	21.37	15.51	12.39	11.31	21.18	16.58	13.38	12.12	909.27	27.5886	8.4	11.5	0.5835	7.75	5.7	6.05	6.05
360000	21.38	15.73	11.07	9.13	20.87	15.52	12.45	11.08	21.39	16.61	13.79	12.49	909.29	27.5885	9.1	11.6	0.6307	7.75	5.7	6.05	6.05
365000	21.43	15.68	11.15	9.1	21.38	15.47	12.38	10.86	21.34	16.2	13.21	11.51	909.29	27.5885	9.7	11.6	0.5031	7.75	5.7	6.05	6.05
370000	21.22	15.69	11.13	8.84	21.12	15.42	12.45	10.63	21.19	15.79	14.23	11.04	909.29	27.5885	8.2	11.4	0.5054	7.75	5.7	6.05	6.05
375000	21.38	15.75	11.18	8.95	21.18	15.48	12.36	10.98	21.28	16.37	13.11	11.62	909.29	27.5885	8.6	11.7	0.5263	7.75	5.7	6.05	6.05
380000	21.39	15.74	11.21	8.99	20.86	15.47	12.33	10.99	21.21	16.49	13.64	11.05	909.29	27.5891	7.9	12.5	0.5819	7.75	5.7	6.05	6.05
385000	21.42	15.64	11.35	9.08	21.05	15.38	12.41	11.21	21.16	16.51	13.81	11.46	909.29	27.5891	8.3	12.1	0.6815	7.75	5.7	6.05	6.05
390000	21.37	15.69	11.28	9.03	21.25	15.43	12.59	11.34	21.34	16.47	13.28	11.29	909.29	27.5891	9.4	12.2	0.6381	7.75	5.7	6.05	6.05
395000	21.39	15.83	11.23	8.91	21.19	15.58	12.81	10.68	21.31	16.12	13.14	11.37	909.29	27.5891	8.7	13.1	0.4835	7.75	5.7	6.05	6.05
400000	21.22	15.91	11.18	8.85	21.18	15.23	12.26	10.44	21.42	15.82	14.15	12.21	909.26	27.5892	9.8	14	0.4773	7.95	7.45	6.05	6.15
405000	21.28	15.87	11.19	9.09	21.05	15.19	13.1	10.53	21.26	16.11	13.45	11.46	909.26	27.5892	8.8	13.5	0.5492	7.95	7.45	6.05	6.15
410000	21.26	15.85	11.24	9.13	20.97	15.17	12.75	10.15	21.22	15.98	13.31	11.59	909.26	27.5892	8.5	13.2	0.6719	7.95	7.45	6.05	6.15
415000	21.34	15.79	11.26	9.07	20.91	15.43	12.49	10.79	21.65	15.79	13.81	12.38	909.26	27.5892	7.6	13.3	0.4956	7.95	7.45	6.05	6.15
420000	21.35	15.91	11.34	9.06	21.17	15.38	12.37	10.64	21.03	15.64	14.09	11.43	909.25	27.5894	9.4	13.4	0.5434	7.95	7.45	6.05	6.15
425000	21.38	15.86	11.28	9.15	21.1	15.34	12.62	10.78	20.79	15.81	13.33	11.37	909.25	27.5894	8.6	14.5	0.5182	7.95	7.45	6.05	6.15
430000	21.41	15.84	11.31	9.13	21.13	15.45	12.59	10.69	21.33	16.13	13.69	12.61	909.25	27.5894	8.1	13.2	0.6527	7.95	7.45	6.05	6.15
435000	21.43	15.85	11.36	9.17	21.31	15.53	12.87	10.59	21.19	16.55	14.27	11.89	909.25	27.5894	9.3	12.9	0.5724	7.95	7.45	6.05	6.15

440000	21.22	15.9	11.44	9.25	21.08	16.02	13.14	11.45	21.22	15.82	13.35	12.14	909.28	27.5889	8.2	13.8	0.4917	7.95	7.45	6.05	6.15
445000	21.35	15.91	11.42	9.18	21.11	15.61	12.95	11.02	21.27	16.81	13.67	11.87	909.28	27.5889	9.6	13.2	0.6158	7.95	7.45	6.05	6.15
450000	21.38	15.93	11.39	9.15	20.99	15.62	12.31	11.15	21.07	16.65	13.98	11.73	909.28	27.5889	8.6	13.3	0.5184	7.95	7.45	6.05	6.15
455000	21.43	15.98	11.34	9.11	21.04	15.58	12.19	10.94	21.48	16.43	13.59	12.43	909.28	27.5889	8.8	13.4	0.4996	7.95	7.45	6.05	6.15
460000	21.49	15.79	11.29	9.24	21.06	15.52	12.24	10.36	21.51	15.94	13.27	11.23	909.26	27.5893	8.1	13.3	0.5348	7.95	7.45	6.05	6.15
465000	21.47	15.84	11.25	9.18	21.01	15.37	12.31	11.26	21.47	16.52	13.86	11.37	909.26	27.5893	7.9	13.5	0.6482	7.95	7.45	6.05	6.15
470000	21.43	15.85	11.31	9.21	20.98	15.41	12.23	11.16	21.39	15.99	13.45	11.41	909.26	27.5893	9.1	11.9	0.6426	7.95	7.45	6.05	6.15
475000	21.45	15.78	11.37	9.16	20.98	15.45	12.16	10.92	20.82	16.38	13.24	11.69	909.26	27.5893	6.5	12.9	0.5786	7.95	7.45	6.05	6.15
480000	21.31	15.87	11.32	9.04	20.79	15.38	11.31	10.85	20.94	16.41	13.05	11.15	909.25	27.5891	8	11.4	0.6288	7.95	7.45	6.05	6.15
485000	21.37	15.69	11.29	9.11	21.19	15.27	12.11	11.61	21.11	16.29	13.29	11.37	909.25	27.5891	8.3	13.5	0.6284	7.95	7.45	6.05	6.15
490000	21.39	15.81	11.25	9.15	20.71	15.67	12.43	10.69	21.22	16.15	14.12	11.59	909.25	27.5891	7.9	13.7	0.5735	7.95	7.45	6.05	6.15
495000	21.46	15.73	11.25	9.17	21.04	15.51	12.39	10.54	21.13	16.37	13.24	11.89	909.25	27.5891	8.8	13.4	0.7151	7.95	7.45	6.05	6.15
500000	21.49	15.75	11.24	9.22	20.79	15.32	12.25	10.61	21.29	16.18	13.48	11.75	909.28	27.5888	9.2	12.8	0.6382	8.4	7.85	6.35	6.25
505000	21.47	15.84	11.19	9.16	21.02	15.21	12.28	10.49	20.79	16.21	13.81	12.45	909.28	27.5888	9.5	12.9	0.5998	8.4	7.85	6.35	6.25
510000	21.51	15.67	11.23	9.19	20.86	15.35	12.34	10.87	21.18	16.27	13.68	11.46	909.28	27.5888	8.7	13.5	0.6431	8.4	7.85	6.35	6.25
515000	21.38	15.73	11.15	9.14	20.96	15.41	12.41	10.91	20.99	16.58	13.61	11.91	909.28	27.5888	8.4	13.3	0.5722	8.4	7.85	6.35	6.25
520000	21.49	15.79	11.24	9.1	20.83	15.47	12.36	10.78	21.67	16.34	13.35	11.65	909.26	27.5886	8.2	13.8	0.5167	8.4	7.85	6.35	6.25
525000	21.35	15.84	11.27	9.18	21.04	15.32	12.29	11.04	21.35	16.42	13.57	11.93	909.26	27.5886	8.6	13.4	0.5432	8.4	7.85	6.35	6.25
530000	21.28	15.83	11.35	9.08	20.92	15.15	12.83	11.02	21.29	15.95	13.61	11.06	909.26	27.5886	8.9	11.4	0.484	8.4	7.85	6.35	6.25
535000	21.31	15.88	11.34	9.15	20.81	15.23	12.28	11.13	21.35	16.23	13.46	11.19	909.26	27.5886	9.2	13.8	0.6112	8.4	7.85	6.35	6.25
540000	21.38	15.78	11.31	9.11	20.93	15.34	12.26	10.96	21.47	16.17	14.25	11.78	909.26	27.5887	9.1	13.3	0.5846	8.4	7.85	6.35	6.25
545000	21.49	15.83	11.28	9.13	21.08	15.46	12.31	10.87	21.38	16.71	13.55	11.64	909.26	27.5887	9	12.7	0.5731	8.4	7.85	6.35	6.25
550000	21.46	15.84	11.25	9.17	20.94	15.59	12.37	10.78	21.69	16.11	14.07	12.23	909.26	27.5887	8.9	13.7	0.5279	8.4	7.85	6.35	6.25
555000	21.48	15.88	11.32	9.17	20.77	15.21	12.43	10.99	21.14	16.37	13.44	11.62	909.26	27.5887	9.5	13.5	0.5377	8.4	7.85	6.35	6.25
560000	21.53	15.79	11.3	9.15	20.81	15.19	12.24	11.03	20.57	16.09	13.95	12.04	909.25	27.5883	8.7	13.9	0.5282	8.4	7.85	6.35	6.25
565000	21.52	15.81	11.27	9.16	20.64	15.27	12.21	10.76	20.69	16.15	13.19	11.64	909.25	27.5883	8.9	13.4	0.4957	8.4	7.85	6.35	6.25
570000	21.48	15.86	11.24	9.21	20.89	15.36	12.15	10.83	20.73	15.83	13.37	11.78	909.25	27.5883	8.4	13.3	0.5374	8.4	7.85	6.35	6.25

575000	21.44	15.83	11.21	9.15	20.78	15.29	12.2	10.75	20.91	16.21	13.08	11.53	909.25	27.5883	8	12.9	0.5528	8.4	7.85	6.35	6.25
580000	21.35	15.8	11.27	9.11	20.93	15.61	11.71	10.37	20.69	16.18	14.02	12.02	909.26	27.5889	7.5	12.7	0.5436	8.4	7.85	6.35	6.25
585000	21.43	15.82	11.19	9.13	21.03	15.3	12.09	10.61	21.13	16.35	13.5	11.67	909.26	27.5889	8.3	13.5	0.5491	8.4	7.85	6.35	6.25
590000	21.48	15.79	11.13	9.15	20.93	15.11	12.32	10.59	21.06	15.91	13.19	11.89	909.26	27.5889	9.1	13.8	0.5618	8.4	7.85	6.35	6.25
595000	21.13	15.77	11.18	9.18	20.95	15.21	12.5	10.47	21.01	15.84	13.67	11.54	909.26	27.5889	9.5	14.1	0.6398	8.4	7.85	6.35	6.25
600000	21.42	15.81	11.14	9.21	21.1	15.18	12.31	10.62	21.28	16.1	13.51	10.59	909.25	27.5887	8.6	13.2	0.6294	10.45	9.15	6.55	6.4
605000	21.38	15.83	11.21	9.18	20.91	15.08	12.07	10.65	21.19	15.82	13.46	11.61	909.25	27.5887	8.7	13.1	0.4672	10.45	9.15	6.55	6.4
610000	21.36	15.88	11.25	9.18	21.08	15.11	12.16	10.45	20.84	15.7	13.69	11.28	909.25	27.5887	8.8	12.9	0.5116	10.45	9.15	6.55	6.4
615000	21.37	15.79	11.28	9.12	21.13	14.91	12.09	10.41	21.03	15.78	14.13	10.97	909.25	27.5887	9.3	12.8	0.6243	10.45	9.15	6.55	6.4
620000	21.29	15.85	11.33	9.15	21.07	15.13	12.35	10.38	20.97	16.35	13.42	11.53	909.27	27.5888	8.9	13.1	0.5061	10.45	9.15	6.55	6.4
625000	21.35	15.81	11.28	9.17	20.89	15.18	12.26	10.42	20.85	16.13	13.17	12.08	909.27	27.5888	9.4	12.9	0.5371	10.45	9.15	6.55	6.4
630000	21.29	15.76	11.31	9.13	20.65	15.61	11.22	10.51	21.26	16.38	13.59	11.67	909.27	27.5888	8.8	13.4	0.7334	10.45	9.15	6.55	6.4
635000	21.45	15.82	11.35	9.14	20.88	15.34	11.79	10.01	21.46	15.88	13.04	11.18	909.27	27.5888	9.1	13.6	0.628	10.45	9.15	6.55	6.4
640000	21.38	15.79	11.42	9.16	20.79	15.39	11.83	9.95	21.3	16.22	13.33	11.24	909.26	27.5886	9	13.3	0.5743	10.45	9.15	6.55	6.4
645000	21.35	15.76	11.37	9.11	21.05	15.26	11.94	10.64	20.66	16.41	13.88	11.91	909.26	27.5886	8.6	13.5	0.5513	10.45	9.15	6.55	6.4
650000	21.34	15.73	11.34	9.12	20.86	15.17	12.21	10.57	20.69	16.01	13.09	11.25	909.26	27.5886	9.7	13.8	0.6104	10.45	9.15	6.55	6.4
655000	21.43	15.83	11.28	9.11	20.94	15.11	11.92	10.49	20.81	16.31	14.06	12.24	909.26	27.5886	10.5	14.2	0.6913	10.45	9.15	6.55	6.4
660000	21.45	15.81	11.29	9.13	20.91	15.31	12.18	10.73	20.96	16.29	13.51	11.46	909.27	27.5885	9.7	13.4	0.671	10.45	9.15	6.55	6.4
665000	21.48	15.85	11.25	9.12	20.84	15.29	12.13	10.78	21.11	16.17	13.12	11.84	909.27	27.5885	9.6	13.5	0.5237	10.45	9.15	6.55	6.4
670000	21.35	15.81	11.22	9.13	20.69	15.2	12.06	10.83	21.28	16.11	13.15	10.73	909.27	27.5885	9.2	13.8	0.5819	10.45	9.15	6.55	6.4
675000	21.38	15.76	11.28	9.15	21.03	15.43	12.08	10.79	20.78	15.76	13.08	11.27	909.27	27.5885	8.9	14.1	0.6013	10.45	9.15	6.55	6.4
680000	21.25	15.79	11.34	9.15	20.79	15.37	11.17	10.77	20.69	15.79	13.49	11.13	909.23	27.5886	9.7	14.5	0.6792	10.45	9.15	6.55	6.4
685000	21.29	15.83	11.29	9.17	20.83	15.15	11.53	10.91	20.91	15.59	13.2	11.28	909.23	27.5886	9.7	14.8	0.4973	10.45	9.15	6.55	6.4
690000	21.41	15.76	11.25	9.18	20.88	15.17	11.61	10.56	20.65	15.85	13.94	11.34	909.23	27.5886	10.3	13.7	0.5433	10.45	9.15	6.55	6.4
695000	21.37	15.77	11.24	9.23	20.75	15.24	11.34	10.31	21.34	15.29	14.21	11.44	909.23	27.5886	11.2	13.9	0.5709	10.45	9.15	6.55	6.4
700000	21.32	15.81	11.23	9.18	20.69	15.3	12.15	10.45	21.11	16.02	12.94	12.01	909.24	27.5887	9.9	14.2	0.6172	10.9	9.3	6.8	6.45
705000	21.34	15.8	11.23	9.17	20.98	15.06	12.13	10.57	21.34	15.84	13.46	11.28	909.24	27.5887	9.4	14.5	0.6514	10.9	9.3	6.8	6.45

710000	21.35	15.78	11.23	9.11	21.03	15.13	12.23	10.61	21.29	15.92	13.27	11.37	909.24	27.5887	8.8	13.9	0.4835	10.9	9.3	6.8	6.45
715000	21.25	15.79	11.25	9.08	20.74	15.19	12.18	10.54	20.99	15.69	14.02	12.31	909.24	27.5887	9.3	14.4	0.4855	10.9	9.3	6.8	6.45
720000	21.28	15.82	11.28	9.12	20.59	15.22	12.05	10.49	20.96	16.17	13.21	11.26	909.23	27.5887	9.7	15.1	0.5107	10.9	9.3	6.8	6.45
725000	21.29	15.81	11.24	9.13	21.01	15.05	11.97	10.31	21.18	15.81	13.14	10.51	909.23	27.5887	10.1	15.6	0.5817	10.9	9.3	6.8	6.45
730000	21.21	15.82	11.37	9.08	20.68	15.09	11.89	10.46	20.95	15.92	12.86	11.58	909.23	27.5887	10.2	14.8	0.5492	10.9	9.3	6.8	6.45
735000	21.18	15.75	11.33	9.14	20.55	15.14	12.15	10.58	20.61	15.86	13.59	11.64	909.23	27.5887	10	14.6	0.6217	10.9	9.3	6.8	6.45
740000	21.27	15.74	11.29	9.15	20.69	15.27	12.06	10.53	20.86	15.93	13.17	10.95	909.24	27.5885	9.8	13.9	0.5548	10.9	9.3	6.8	6.45
745000	21.26	15.73	11.26	9.21	20.81	15.21	12.13	10.51	20.76	15.76	13.99	11.38	909.24	27.5885	10.5	14	0.5691	10.9	9.3	6.8	6.45
750000	21.23	15.71	11.24	9.17	20.73	15.14	12.21	10.49	20.82	16.32	13.21	11.82	909.24	27.5885	9.3	15.1	0.5208	10.9	9.3	6.8	6.45
755000	21.25	15.69	11.23	9.18	20.67	15.22	12.18	10.57	20.79	15.66	12.76	11.42	909.24	27.5885	10.6	15.1	0.5949	10.9	9.3	6.8	6.45
760000	21.31	15.73	11.27	9.19	20.83	15.31	11.87	10.67	21.05	15.67	13.62	11.02	909.24	27.5888	10.8	14.2	0.6221	10.9	9.3	6.8	6.45
765000	21.33	15.78	11.31	9.18	20.75	15.43	12.31	10.71	21.15	16.23	13.51	11.27	909.24	27.5888	9.9	14.4	0.5518	10.9	9.3	6.8	6.45
770000	21.3	15.75	11.28	9.18	20.71	15.31	12.25	10.93	21.04	15.55	13.18	11.16	909.24	27.5888	10	14.6	0.6433	10.9	9.3	6.8	6.45
775000	21.28	15.77	11.3	9.16	20.93	15.37	12.18	10.91	21.51	15.97	13.86	11.29	909.24	27.5888	9.2	15.7	0.6184	10.9	9.3	6.8	6.45
780000	21.24	15.79	11.41	9.15	20.52	15.21	12.22	11.18	20.48	15.61	14.12	11.79	909.26	27.5883	10.5	15.2	0.5382	10.9	9.3	6.8	6.45
785000	21.27	15.78	11.35	9.16	20.47	15.11	12.13	10.87	21.16	15.94	13.34	11.27	909.26	27.5883	9.9	14.6	0.4998	10.9	9.3	6.8	6.45
790000	21.32	15.82	11.37	9.15	20.95	15.17	12.01	10.76	21.24	15.99	13.68	12.02	909.26	27.5883	10.8	14.8	0.5119	10.9	9.3	6.8	6.45
795000	21.26	15.81	11.34	9.09	20.82	15.22	11.94	10.64	21.09	15.48	12.69	11.34	909.26	27.5883	10.1	15.1	0.5716	10.9	9.3	6.8	6.45
800000	21.23	15.74	11.29	9.1	20.69	15.2	11.99	10.55	20.97	15.84	12.97	12.34	909.23	27.5886	9.6	14.9	0.6337	11.4	10	7.15	6.5
805000	21.18	15.73	11.25	9.13	20.73	15.18	12.15	10.34	20.83	15.88	12.69	11.49	909.23	27.5886	11.3	15.5	0.6672	11.4	10	7.15	6.5
810000	21.23	15.78	11.27	9.17	20.49	15.04	12.11	10.27	21.12	15.73	13.04	11.51	909.23	27.5886	9.5	14.9	0.5208	11.4	10	7.15	6.5
815000	21.41	15.74	11.21	9.15	20.91	15.09	12.04	10.06	20.89	15.81	13.29	11.92	909.23	27.5886	9.9	15.2	0.5495	11.4	10	7.15	6.5
820000	21.35	15.77	11.21	9.18	20.64	15.01	11.87	9.89	20.83	15.79	13.71	11.83	909.26	27.5882	9.1	15.7	0.5618	11.4	10	7.15	6.5
825000	21.32	15.69	11.15	9.09	20.54	14.89	11.45	10.46	21.23	16.25	13.43	10.98	909.26	27.5882	10.5	15.9	0.5529	11.4	10	7.15	6.5
830000	21.12	15.72	10.82	8.35	20.61	14.95	11.8	9.94	20.91	16.05	12.78	10.13	909.26	27.5882	11.9	16.5	0.6394	11.4	10	7.15	6.5
835000	21.29	15.75	11.18	8.87	20.66	14.91	12.15	10.31	21.01	15.86	13.69	11.91	909.26	27.5882	10.9	15.7	0.5327	11.4	10	7.15	6.5
840000	21.26	15.76	11.14	8.91	20.86	14.72	12.18	10.28	20.85	15.62	13.27	11.84	909.24	27.5884	10.8	16.3	0.6952	11.4	10	7.15	6.5

845000	21.21	15.72	11.09	8.99	20.81	14.37	12.24	10.67	20.76	15.84	13.92	11.29	909.24	27.5884	11.5	17.1	0.6348	11.4	10	7.15	6.5
850000	21.25	15.68	11.21	9.01	20.51	14.69	12.14	10.84	20.61	16.31	13.41	11.68	909.24	27.5884	10.4	16.4	0.5829	11.4	10	7.15	6.5
855000	21.19	15.61	11.17	9.05	20.48	14.87	12.06	10.76	21.14	15.61	13.15	10.78	909.24	27.5884	10	15.5	0.6137	11.4	10	7.15	6.5
860000	21.17	15.66	11.09	9.03	20.83	14.83	11.94	10.61	20.79	15.96	12.84	11.15	909.24	27.5885	9.7	14.9	0.5524	11.4	10	7.15	6.5
865000	21.27	15.68	11.15	9.01	20.79	14.94	11.57	10.57	20.85	15.45	13.62	11.07	909.24	27.5885	10.3	15.3	0.4924	11.4	10	7.15	6.5
870000	21.23	15.69	11.05	8.78	20.95	14.99	11.69	10.64	20.92	15.63	12.69	10.85	909.24	27.5885	11.1	13.9	0.5107	11.4	10	7.15	6.5
875000	21.22	15.71	11.01	8.69	21.03	15.12	12.25	10.71	20.64	16.13	13.12	11.26	909.24	27.5885	10.6	14.8	0.5822	11.4	10	7.15	6.5
880000	21.2	15.65	10.74	8.44	20.59	14.96	12.05	10.35	21.09	15.73	13.21	12.09	909.22	27.5887	10.4	15.1	0.5654	11.4	10	7.15	6.5
885000	21.27	15.76	11.03	8.68	20.61	14.99	11.86	10.27	20.82	15.95	13.15	11.23	909.22	27.5887	9.8	15.1	0.6713	11.4	10	7.15	6.5
890000	21.25	15.74	10.97	8.72	20.73	15.18	11.95	10.16	20.73	15.55	12.79	11.51	909.22	27.5887	11.3	16.2	0.6535	11.4	10	7.15	6.5
895000	21.23	15.79	10.93	8.78	20.62	14.76	12.11	10.37	20.68	15.82	13.45	11.58	909.22	27.5887	11	16	0.5976	11.4	10	7.15	6.5
900000	21.26	15.62	11.06	8.81	20.58	14.85	12.07	10.67	21.02	15.61	13.71	11.35	909.24	27.5884	10.6	15.9	0.4942	12.05	10.15	7.3	6.65
905000	21.29	15.69	11.12	8.95	20.82	14.91	11.79	10.59	20.79	15.57	12.96	11.48	909.24	27.5884	9.9	16.4	0.5359	12.05	10.15	7.3	6.65
910000	21.27	15.68	11.08	9.03	20.63	14.81	11.56	10.47	20.83	15.53	13.18	11.51	909.24	27.5884	11.4	16.6	0.5764	12.05	10.15	7.3	6.65
915000	21.18	15.72	11.05	9.12	20.61	14.93	11.78	10.37	20.91	15.94	12.67	11.25	909.24	27.5884	11.2	16.2	0.5918	12.05	10.15	7.3	6.65
920000	21.13	15.7	11.07	9.15	20.59	14.62	11.94	10.51	20.85	15.77	12.83	10.79	909.22	27.5888	10.8	16.1	0.6381	12.05	10.15	7.3	6.65
925000	21.09	15.75	11.14	9.16	20.62	14.59	11.83	10.08	20.78	15.76	13.16	11.51	909.22	27.5888	10.2	16.3	0.5184	12.05	10.15	7.3	6.65
930000	20.81	15.79	11.26	9.55	20.68	14.68	11.93	9.94	20.69	15.84	13.48	10.97	909.22	27.5888	9.8	14.6	0.5381	12.05	10.15	7.3	6.65
935000	21.2	15.81	11.13	9.14	20.59	14.71	11.45	10.21	20.71	15.71	12.69	10.99	909.22	27.5888	10.5	16.8	0.4916	12.05	10.15	7.3	6.65
940000	21.16	15.73	11.08	9.11	20.68	15.02	11.28	10.33	20.69	15.56	12.42	10.86	909.25	27.5887	10.5	16.5	0.6271	12.05	10.15	7.3	6.65
945000	21.15	15.75	11.03	9.08	20.55	14.86	11.64	10.41	21.03	15.49	12.83	11.06	909.25	27.5887	10.4	16	0.5227	12.05	10.15	7.3	6.65
950000	21.24	15.69	11.21	9.13	20.91	14.54	11.33	10.46	20.82	15.69	13.24	11.12	909.25	27.5887	10.7	15.9	0.5816	12.05	10.15	7.3	6.65
955000	21.22	15.65	11.23	9.15	20.57	14.69	11.46	10.37	21.1	15.57	13.67	11.05	909.25	27.5887	12.1	16.1	0.5548	12.05	10.15	7.3	6.65
960000	21.17	15.68	11.18	9.21	20.58	14.54	11.37	10.52	20.84	15.83	13.12	11.26	909.23	27.5887	11.6	16.2	0.6384	12.05	10.15	7.3	6.65
965000	21.07	15.59	11.13	9.09	20.53	14.68	12.05	10.48	20.43	15.91	12.56	11.21	909.23	27.5887	10.6	16.6	0.6653	12.05	10.15	7.3	6.65
970000	21.24	15.63	11.09	9.01	20.76	14.59	11.26	10.39	20.68	15.78	13.18	10.93	909.23	27.5887	11.3	16.8	0.5947	12.05	10.15	7.3	6.65
975000	21.22	15.65	11.01	8.95	20.55	14.83	11.54	10.27	20.73	15.43	12.83	11.15	909.23	27.5887	10.8	15.9	0.6142	12.05	10.15	7.3	6.65

980000	21.2	15.61	10.79	8.23	20.48	14.67	11.78	10.04	20.59	15.51	12.91	10.35	909.22	27.5884	9.4	16.6	0.6173	12.05	10.15	7.3	6.65
985000	21.28	15.71	10.93	8.94	20.51	14.73	11.81	10.16	21.23	15.79	13.12	11.69	909.22	27.5884	10.2	16.7	0.6311	12.05	10.15	7.3	6.65
990000	21.13	15.59	10.99	8.99	20.84	14.56	11.49	10.11	20.92	15.49	12.81	10.86	909.22	27.5884	9.9	16.4	0.5745	12.05	10.15	7.3	6.65
995000	21.11	15.63	11.07	9.06	20.73	14.82	11.25	9.82	21.05	15.57	13.29	10.94	909.22	27.5884	12.1	16.5	0.5346	12.05	10.15	7.3	6.65
1000000	21.08	15.76	11.25	9.33	20.57	14.73	12.1	9.38	21.03	15.84	13.37	11.36	909.22	27.5888	10	15.7	0.4578	12.05	11	7.45	6.85

Ekspiriment 3 (ventil RV3)

BRC	CUS4	CUS6	CUS14	CUS21	CUUS4	CUUS6	CUUS14	CUUS21	CUUD4	CUUD6	CUUD14	CUUD21	MTV	MKV	ZIUS	ZIUD	PP	Z1	Z2	Z3	Z4
0	20.61	15.58	10.81	8.95	20.4	14.12	11.3	9.03	21.45	15.24	12.06	10.28	905.21	26.9448	6.4	9.8	0.4629	6.05	6.4	5.75	5.3
5000	20.58	15.47	10.78	8.91	20.38	14.1	11.28	9.21	21.23	15.71	11.84	10.06	905.21	26.9448	6.6	9.5	0.4428	6.05	6.4	5.75	5.3
10000	20.61	15.62	10.61	9.12	20.69	14.05	11.52	9.15	21.25	15.31	11.69	9.97	905.21	26.9448	5.9	9.9	0.4379	6.05	6.4	5.75	5.3
15000	20.59	15.11	10.59	8.87	20.24	14.16	11.26	9.08	21.43	15.69	12.24	9.76	905.21	26.9448	6.1	9.1	0.5217	6.05	6.4	5.75	5.3
20000	20.55	15.13	10.67	9.13	20.42	14.11	11.25	9.13	21.34	15.51	11.78	10.5	905.19	26.9446	7.2	9.7	0.4837	6.05	6.4	5.75	5.3
25000	20.49	15.45	10.59	8.99	20.35	13.98	11.01	9.08	20.98	15.15	11.89	10.07	905.19	26.9446	6.3	9.4	0.4552	6.05	6.4	5.75	5.3
30000	20.57	15.43	10.76	8.97	20.39	14.06	11.28	9.11	21.18	15.23	12.15	11.03	905.19	26.9446	5.9	8.3	0.4819	6.05	6.4	5.75	5.3
35000	20.46	15.47	10.76	8.59	20.43	13.95	11.26	9.18	21.43	15.24	11.94	9.48	905.19	26.9446	6.7	10.2	0.6137	6.05	6.4	5.75	5.3
40000	20.58	15.81	10.49	8.59	20.57	14.03	11.21	8.95	21.33	15.09	12.37	10.55	905.18	26.9448	6.5	9.6	0.5241	6.05	6.4	5.75	5.3
45000	20.55	15.49	10.68	8.79	20.25	14.14	11.39	9.05	21.5	15.12	11.87	11.2	905.18	26.9448	6.6	9.9	0.5092	6.05	6.4	5.75	5.3
50000	20.61	15.51	10.91	8.68	20.57	14.02	11.15	9.15	21.29	15.01	12.34	10.43	905.18	26.9448	6.7	8.6	0.4719	6.05	6.4	5.75	5.3
55000	20.37	15.55	10.48	8.81	20.61	14.07	11.34	9.23	21.19	15.05	11.91	10.15	905.18	26.9448	6.8	8.9	0.4956	6.05	6.4	5.75	5.3
60000	20.43	15.48	10.59	8.77	20.31	14.11	11.15	9.01	21.24	15.63	11.98	10.43	905.20	26.9445	7.2	9.1	0.5417	6.05	6.4	5.75	5.3
65000	20.52	15.53	10.73	8.95	20.38	14.11	11.16	9.03	21.35	15.52	11.97	9.68	905.20	26.9445	7.4	9	0.5322	6.05	6.4	5.75	5.3
70000	20.43	15.67	10.78	8.91	20.35	14.06	11.18	9.14	21.27	15.31	11.61	10.11	905.20	26.9445	7.7	9.5	0.3941	6.05	6.4	5.75	5.3
75000	20.35	15.52	10.74	8.69	20.35	13.89	11.08	9.23	21.25	15.18	11.82	9.95	905.20	26.9445	8.3	8.8	0.4738	6.05	6.4	5.75	5.3
80000	20.52	15.49	10.65	8.84	20.37	14.01	11.21	8.97	21.26	14.84	11.23	10.69	905.21	26.9447	7.1	9.3	0.4419	6.05	6.4	5.75	5.3

85000	20.58	15.22	10.62	8.83	20.41	14.18	10.97	9.01	21.22	15.42	11.94	10.43	905.21	26.9447	6.8	9.7	0.4858	6.05	6.4	5.75	5.3
90000	20.43	15.38	10.59	8.86	20.47	13.88	11.15	8.89	21.38	14.95	12.01	10.48	905.21	26.9447	7.4	9.5	0.5311	6.05	6.4	5.75	5.3
95000	20.51	15.43	10.66	8.89	20.73	13.91	11.05	8.91	21.28	15.27	11.65	10.81	905.21	26.9447	7.2	9.8	0.5716	6.05	6.4	5.75	5.3
100000	20.53	15.58	10.81	8.95	20.64	14.09	11.38	9.03	20.89	14.92	11.62	9.86	905.20	26.9447	8	9.4	0.6789	6.1	6.45	5.9	5.55
105000	20.36	15.49	10.67	8.79	20.37	14.03	11.13	8.93	21.18	15.17	11.51	9.97	905.20	26.9447	7.5	9.9	0.5618	6.1	6.45	5.9	5.55
110000	20.57	15.52	10.71	8.75	20.49	14.13	11.24	9.34	21.16	15.33	11.75	10.14	905.20	26.9447	8.2	9.4	0.5543	6.1	6.45	5.9	5.55
115000	20.34	15.73	10.82	8.84	20.31	13.79	11.12	9.06	21.25	15.12	12.13	11.03	905.20	26.9447	7.7	8.6	0.4619	6.1	6.45	5.9	5.55
120000	20.49	15.48	10.75	8.76	20.29	14.06	11.26	8.95	21.15	14.89	11.76	10.67	905.18	26.9446	7.8	9.1	0.4276	6.1	6.45	5.9	5.55
125000	20.51	15.43	10.77	8.59	20.36	14.1	11.19	9.01	21.05	14.93	11.37	10.58	905.18	26.9446	8.3	9.5	0.532	6.1	6.45	5.9	5.55
130000	20.46	15.29	10.76	8.71	20.41	14.08	11.49	8.96	21.35	15.42	11.57	11.16	905.18	26.9446	6.9	9.9	0.4729	6.1	6.45	5.9	5.55
135000	20.55	15.59	10.71	8.88	20.38	13.99	11.27	8.57	21.11	14.97	11.42	10.48	905.18	26.9446	7.3	10.1	0.4691	6.1	6.45	5.9	5.55
140000	20.63	15.48	10.65	8.76	20.28	14.13	11.25	8.73	21.13	15.13	11.79	10.61	905.17	26.9446	8.7	9.6	0.3766	6.1	6.45	5.9	5.55
145000	20.41	15.43	10.69	8.79	20.4	14.06	11.53	8.94	20.98	15.1	11.84	10.63	905.17	26.9446	7.4	9.7	0.4507	6.1	6.45	5.9	5.55
150000	20.48	15.37	10.57	8.73	20.29	13.71	11.29	8.91	20.99	15.02	12.05	10.59	905.17	26.9446	7.6	9.6	0.5224	6.1	6.45	5.9	5.55
155000	20.5	15.51	10.64	8.69	20.31	14.11	11.37	9.15	21.11	15.63	11.78	10.11	905.17	26.9446	7.7	9.9	0.4826	6.1	6.45	5.9	5.55
160000	20.61	15.61	10.58	8.76	20.35	14.01	11.41	8.99	21.08	15.12	11.86	10.37	905.18	26.9445	8.4	10.3	0.4993	6.1	6.45	5.9	5.55
165000	20.58	15.59	10.61	8.82	20.29	14.15	11.24	9.09	20.95	15.26	11.99	9.88	905.18	26.9445	8.2	9.7	0.4618	6.1	6.45	5.9	5.55
170000	20.49	15.53	10.66	8.85	20.25	13.88	11.22	8.86	21.28	15.13	11.78	11.04	905.18	26.9445	8.6	9.5	0.5722	6.1	6.45	5.9	5.55
175000	20.56	15.73	10.58	8.81	20.51	13.79	11.26	8.73	21.26	15.06	11.85	9.61	905.18	26.9445	7.6	9.6	0.5358	6.1	6.45	5.9	5.55
180000	20.59	15.49	10.63	8.79	20.31	13.94	11.15	8.89	21.11	14.92	11.69	9.95	905.18	26.9445	7.9	9.8	0.5481	6.1	6.45	5.9	5.55
185000	20.65	15.43	10.67	8.77	20.38	14.05	11.17	8.93	21.3	15.59	11.45	9.84	905.18	26.9445	8.1	10.5	0.5664	6.1	6.45	5.9	5.55
190000	20.72	15.48	10.72	8.83	20.36	13.95	11.15	8.97	21.1	15.12	11.28	10.18	905.18	26.9445	8	9.9	0.4705	6.1	6.45	5.9	5.55
195000	20.74	15.52	10.76	8.86	20.37	13.81	11.07	9.2	20.94	15.26	11.79	10.49	905.18	26.9445	9.1	9.6	0.4371	6.1	6.45	5.9	5.55
200000	20.43	15.58	10.81	8.95	20.48	13.67	11.2	8.88	21.06	15.18	11.79	10.82	905.16	26.9448	7.6	9	0.5844	6.15	7.75	6.1	5.6
205000	20.47	15.34	10.79	8.87	20.35	13.74	11.16	8.89	21.12	15.03	11.68	10.65	905.16	26.9448	7.9	9.7	0.5287	6.15	7.75	6.1	5.6
210000	20.51	15.29	10.65	8.76	20.51	13.75	11.24	8.85	21.08	14.89	11.45	9.98	905.16	26.9448	8.4	9.9	0.4931	6.15	7.75	6.1	5.6
215000	20.31	15.41	10.61	8.81	20.49	14.02	11.42	8.61	20.84	15.37	11.58	9.53	905.16	26.9448	8.8	10.6	0.4614	6.15	7.75	6.1	5.6

220000	20.51	15.2	10.55	8.39	20.37	13.69	11.25	8.93	21.24	15.02	11.49	9.46	905.17	26.9444	8.3	9.8	0.5107	6.15	7.75	6.1	5.6
225000	20.34	15.28	10.64	8.77	20.46	13.92	11.15	8.97	20.91	15.09	11.67	9.79	905.17	26.9444	8.5	10.2	0.4295	6.15	7.75	6.1	5.6
230000	20.49	15.34	10.67	8.86	20.59	14.1	11.21	9.19	21.31	15.58	11.81	10.49	905.17	26.9444	10.1	9.7	0.4558	6.15	7.75	6.1	5.6
235000	20.42	15.27	10.59	8.87	20.31	13.87	11.14	8.81	21.11	15.01	11.91	9.82	905.17	26.9444	8.2	9.7	0.4324	6.15	7.75	6.1	5.6
240000	20.51	15.26	10.68	8.67	20.27	13.67	11.23	8.95	21	15.21	11.28	10.36	905.16	26.9445	9.5	10.5	0.4937	6.15	7.75	6.1	5.6
245000	20.6	15.22	10.73	8.59	20.64	13.36	11.19	8.62	20.95	14.86	11.37	10.43	905.16	26.9445	8.6	10	0.4681	6.15	7.75	6.1	5.6
250000	20.38	15.34	10.74	8.81	20.54	13.85	11.24	8.79	21.22	15.16	11.59	10.48	905.16	26.9445	7.5	9.6	0.4979	6.15	7.75	6.1	5.6
255000	20.57	15.28	10.68	8.69	20.49	13.38	11.16	8.83	20.78	15.18	11.47	10.13	905.16	26.9445	8.1	9.9	0.5248	6.15	7.75	6.1	5.6
260000	20.53	15.49	10.66	8.79	20.7	13.55	11.26	8.49	21.18	15.21	11.61	10.47	905.16	26.9447	8.3	10.3	0.5513	6.15	7.75	6.1	5.6
265000	20.48	15.44	10.59	8.97	20.53	13.67	11.27	8.88	20.73	15.69	11.83	9.59	905.16	26.9447	7.9	9.8	0.4816	6.15	7.75	6.1	5.6
270000	20.28	15.57	10.48	8.89	20.39	13.59	11.21	9.05	21.16	14.81	11.64	9.91	905.16	26.9447	8.5	10.1	0.492	6.15	7.75	6.1	5.6
275000	20.49	15.73	10.27	8.78	20.38	13.71	11.13	8.77	21.21	15.11	11.49	9.83	905.16	26.9447	9.1	10	0.5045	6.15	7.75	6.1	5.6
280000	20.55	15.56	10.35	8.69	20.39	13.76	11.04	8.83	20.75	14.95	11.76	10.17	905.16	26.9443	9.9	10.5	0.5716	6.15	7.75	6.1	5.6
285000	20.49	15.58	10.44	8.56	20.25	13.71	11.27	8.98	20.64	15.38	11.68	10.29	905.16	26.9443	7.7	10.7	0.5322	6.15	7.75	6.1	5.6
290000	20.54	15.49	10.56	8.46	20.24	13.77	11.06	8.85	21.01	15.13	11.54	10.67	905.16	26.9443	7.9	9.4	0.418	6.15	7.75	6.1	5.6
295000	20.62	15.47	10.35	8.35	20.34	13.51	11.25	9.01	20.84	15.28	11.55	10.37	905.13	26.9443	7.4	10.2	0.4724	6.15	7.75	6.1	5.6
300000	20.24	15.13	9.97	8.08	20.35	14.01	11.21	8.86	20.69	14.94	11.37	10.48	905.13	26.9445	6.8	8.8	0.3595	6.4	8.75	6.15	5.65
305000	20.26	15.34	10.46	8.49	20.26	13.69	11.23	8.83	21.14	15.02	11.69	10.51	905.13	26.9445	8.5	10.6	0.4519	6.4	8.75	6.15	5.65
310000	20.37	15.51	10.28	8.48	20.38	13.81	11.08	8.26	20.94	14.92	11.57	9.69	905.13	26.9445	8.7	10.3	0.4483	6.4	8.75	6.15	5.65
315000	20.58	15.36	10.34	8.53	20.29	13.58	11.2	8.78	21.07	15.48	11.15	9.93	905.15	26.9445	8.3	10.7	0.4725	6.4	8.75	6.15	5.65
320000	20.55	15.34	10.36	8.57	20.35	13.68	10.95	8.81	20.86	15.19	11.52	9.48	905.15	26.9446	6.9	9.7	0.3992	6.4	8.75	6.15	5.65
325000	20.56	15.38	10.33	8.59	20.35	13.74	11.22	8.88	20.74	15.1	11.77	9.57	905.15	26.9446	7.6	10.4	0.4351	6.4	8.75	6.15	5.65
330000	20.48	15.33	10.39	8.67	20.13	13.72	11.15	8.99	20.82	15.22	11.64	9.83	905.15	26.9446	7.9	9.9	0.5027	6.4	8.75	6.15	5.65
335000	20.51	15.28	10.42	8.73	20.26	13.57	10.91	8.51	20.96	15.03	11.92	10.15	905.13	26.9446	8.4	9.8	0.5183	6.4	8.75	6.15	5.65
340000	20.53	15.42	10.47	8.71	20.39	13.84	11.06	8.71	21.03	14.76	11.81	10.06	905.13	26.9443	8.8	9.9	0.4648	6.4	8.75	6.15	5.65
345000	20.48	15.49	10.44	8.76	20.74	13.75	11.13	8.81	20.78	15.05	11.69	10.52	905.13	26.9443	9.1	10.5	0.5629	6.4	8.75	6.15	5.65
350000	20.47	15.55	10.51	8.77	20.59	13.68	11.09	8.79	21.12	14.93	11.55	9.94	905.13	26.9443	8.6	10.2	0.5571	6.4	8.75	6.15	5.65

355000	20.39	15.49	10.55	8.82	20.28	13.59	11.21	9.12	20.79	15.04	11.87	10.24	905.16	26.9443	8.9	10.8	0.5264	6.4	8.75	6.15	5.65
360000	20.46	15.38	10.52	8.91	20.61	13.47	11.15	8.83	21.02	14.98	11.75	10.31	905.16	26.9445	8.9	10.6	0.5491	6.4	8.75	6.15	5.65
365000	20.51	15.46	10.57	8.95	20.34	13.68	11.21	8.88	20.93	15.29	11.49	9.86	905.16	26.9445	9.3	11.5	0.4938	6.4	8.75	6.15	5.65
370000	20.43	15.44	10.54	8.69	20.13	13.58	11.16	8.84	20.76	14.99	11.57	9.73	905.16	26.9445	7.6	10.6	0.5011	6.4	8.75	6.15	5.65
375000	20.48	15.41	10.51	8.78	20.11	13.61	11.15	8.61	20.95	15.01	11.21	10.06	905.14	26.9445	9.1	10.7	0.4857	6.4	8.75	6.15	5.65
380000	20.39	15.38	10.49	8.79	20.51	13.59	11.05	8.71	20.73	14.87	11.48	10.29	905.14	26.9446	8.7	10.3	0.5237	6.4	8.75	6.15	5.65
385000	20.45	15.52	10.46	8.86	20.37	13.71	11.11	8.69	21.13	14.91	11.39	9.94	905.14	26.9446	8.2	10.9	0.4512	6.4	8.75	6.15	5.65
390000	20.47	15.4	10.53	8.83	20.36	13.51	11.01	8.85	20.67	14.73	11.49	9.69	905.14	26.9446	8.5	11.1	0.4769	6.4	8.75	6.15	5.65
395000	20.53	15.45	10.51	8.59	20.38	13.49	11.14	8.37	20.86	15.02	11.51	10.28	905.16	26.9446	8.9	10.8	0.4375	6.4	8.75	6.15	5.65
400000	20.54	15.15	10.58	8.96	20.29	13.68	11.1	8.94	21	14.61	11.18	10.37	905.16	26.9442	9.1	10.4	0.624	6.6	8.85	6.3	5.95
405000	20.58	15.25	10.53	8.71	20.15	13.83	10.89	8.74	20.73	15.13	11.67	10.11	905.16	26.9442	9.5	10.7	0.5518	6.6	8.85	6.3	5.95
410000	20.61	15.38	10.47	8.91	20.19	13.75	10.94	9.02	20.94	14.95	11.34	10.09	905.16	26.9442	9.9	11.2	0.4853	6.6	8.85	6.3	5.95
415000	20.56	15.48	10.46	8.59	20.05	13.51	11.2	8.95	21.02	14.43	11.48	10.01	905.16	26.9442	8.7	10.9	0.5374	6.6	8.85	6.3	5.95
420000	20.27	15.49	10.44	8.67	20.09	13.81	10.96	8.81	20.81	15.04	11.56	10.37	905.16	26.9443	7.3	11	0.4517	6.6	8.85	6.3	5.95
425000	20.66	15.43	10.48	8.49	20.84	13.49	11.13	8.43	20.65	14.61	11.79	10.43	905.16	26.9443	7.7	11.4	0.4492	6.6	8.85	6.3	5.95
430000	20.57	15.51	10.41	8.76	20.11	13.52	10.99	8.23	20.79	14.62	11.46	9.81	905.16	26.9443	8.5	10.6	0.5108	6.6	8.85	6.3	5.95
435000	20.54	15.29	10.38	8.59	20.15	13.43	11.08	8.75	20.89	14.75	11.59	9.53	905.16	26.9443	8.1	10.9	0.4967	6.6	8.85	6.3	5.95
440000	20.58	15.37	10.45	8.67	20.04	13.58	10.91	8.83	20.85	14.43	11.45	9.77	905.16	26.9445	8.6	11.7	0.4725	6.6	8.85	6.3	5.95
445000	20.5	15.36	10.37	8.82	19.92	13.43	11.03	9.05	20.53	14.68	11.32	10.17	905.15	26.9445	8.8	11.3	0.5411	6.6	8.85	6.3	5.95
450000	20.46	15.45	10.33	8.73	20.01	13.34	10.93	8.81	20.79	15.02	11.16	9.49	905.15	26.9445	8.4	11.5	0.5618	6.6	8.85	6.3	5.95
455000	20.49	15.49	10.39	8.76	19.8	13.69	10.98	8.69	20.92	14.97	11.48	10.05	905.15	26.9445	8.6	11	0.4952	6.6	8.85	6.3	5.95
460000	20.43	15.45	10.51	8.78	19.86	13.51	10.99	8.73	20.55	14.83	11.69	9.73	905.15	26.9443	8.6	10.9	0.5327	6.6	8.85	6.3	5.95
465000	20.44	15.42	10.37	8.82	19.85	13.31	10.84	8.23	20.84	15.01	11.81	9.84	905.17	26.9443	8.8	11.8	0.5194	6.6	8.85	6.3	5.95
470000	20.51	15.51	10.36	8.59	19.83	13.38	10.9	8.86	20.61	14.81	11.74	10.13	905.17	26.9443	9.2	12.1	0.4377	6.6	8.85	6.3	5.95
475000	20.49	15.49	10.42	8.67	19.94	13.4	11.05	8.67	20.66	14.68	11.21	10.41	905.17	26.9443	9.1	11.5	0.4659	6.6	8.85	6.3	5.95
480000	20.52	15.43	10.44	8.69	20.07	13.42	10.82	8.59	20.76	15.15	11.68	10.35	905.17	26.9441	8.9	10.9	0.4772	6.6	8.85	6.3	5.95
485000	20.56	15.38	10.34	8.75	19.79	13.37	11.06	8.37	20.63	14.85	11.59	10.07	905.18	26.9441	9.5	11.6	0.5328	6.6	8.85	6.3	5.95

490000	20.49	15.36	10.38	8.71	20.02	13.51	10.76	8.83	20.69	14.96	11.78	9.51	905.18	26.9441	10.1	12.5	0.4199	6.6	8.85	6.3	5.95
495000	20.54	15.43	10.29	8.69	20.04	13.31	11.09	8.72	20.82	15.13	11.69	9.86	905.18	26.9441	9.4	11.3	0.4759	6.6	8.85	6.3	5.95
500000	20.51	14.98	10.11	8.22	19.98	13.59	10.95	8.81	20.79	14.82	11.52	9.27	905.18	26.9441	8.7	10.2	0.4903	6.8	8.9	6.6	6.05
505000	20.38	15.18	10.18	8.45	20.1	13.35	10.89	8.42	21.04	15.48	11.12	10.59	905.16	26.9441	9.7	11.4	0.5328	6.8	8.9	6.6	6.05
510000	20.44	15.38	10.35	8.56	20	13.48	10.91	8.79	20.79	14.59	11.48	10.79	905.16	26.9441	8.8	11.8	0.4726	6.8	8.9	6.6	6.05
515000	20.46	15.35	10.34	8.38	19.73	13.35	10.84	8.61	20.65	14.83	11.37	10.21	905.16	26.9441	7.9	12.1	0.5369	6.8	8.9	6.6	6.05
520000	20.42	15.24	10.49	8.29	19.86	13.42	10.99	8.93	20.93	14.95	11.49	10.19	905.16	26.9443	8.3	11.6	0.4724	6.8	8.9	6.6	6.05
525000	20.39	15.39	10.52	8.49	19.69	13.37	11.04	8.99	20.58	15.01	11.43	9.59	905.18	26.9443	8.7	11.9	0.4955	6.8	8.9	6.6	6.05
530000	20.35	15.52	10.42	8.37	19.81	13.41	11.08	8.78	20.62	14.86	11.58	9.43	905.18	26.9443	8.8	12.8	0.5813	6.8	8.9	6.6	6.05
535000	20.18	15.29	10.47	8.19	19.89	13.28	10.74	8.7	20.61	14.75	11.46	10.22	905.18	26.9443	9.2	12.5	0.4926	6.8	8.9	6.6	6.05
540000	20.48	15.49	10.38	8.34	19.84	13.38	10.94	8.61	20.69	14.86	11.76	10.39	905.18	26.9445	10.1	11.8	0.5264	6.8	8.9	6.6	6.05
545000	20.47	15.37	10.41	8.29	20.05	13.53	10.86	8.69	20.61	15.23	11.59	9.48	905.17	26.9445	9.4	12.1	0.5715	6.8	8.9	6.6	6.05
550000	20.56	15.34	10.35	8.46	19.68	13.42	10.81	8.79	21.03	14.59	11.73	9.82	905.17	26.9445	9.6	11.5	0.4935	6.8	8.9	6.6	6.05
555000	20.48	15.56	10.31	8.53	19.57	13.34	10.92	8.37	20.55	15.02	11.77	9.71	905.17	26.9445	9.8	12	0.4628	6.8	8.9	6.6	6.05
560000	20.51	15.49	10.28	8.57	19.62	13.29	10.89	8.87	20.94	14.61	11.69	10.12	905.17	26.9442	8.9	12.6	0.5349	6.8	8.9	6.6	6.05
565000	20.57	15.61	10.33	8.61	19.67	13.32	10.93	8.65	20.68	14.84	11.49	9.92	905.16	26.9442	9.3	12.4	0.4824	6.8	8.9	6.6	6.05
570000	20.62	15.5	10.37	8.53	19.81	13.37	11.05	8.49	20.56	14.52	11.58	9.34	905.16	26.9442	9.4	12.8	0.5317	6.8	8.9	6.6	6.05
575000	20.34	15.48	10.29	8.55	19.79	13.27	10.97	8.53	20.59	14.85	11.45	10.07	905.16	26.9442	9.4	12.9	0.4955	6.8	8.9	6.6	6.05
580000	20.47	15.38	20.19	8.49	19.86	13.41	10.86	8.67	20.27	14.89	11.32	9.71	905.16	26.9443	9.4	12.8	0.5657	6.8	8.9	6.6	6.05
585000	20.49	15.29	10.15	8.73	19.71	13.32	10.95	8.53	20.83	15.38	11.38	9.59	905.18	26.9443	9.6	12.8	0.4873	6.8	8.9	6.6	6.05
590000	20.53	15.35	10.26	8.61	19.73	13.35	11.01	8.68	20.54	14.81	11.49	10.27	905.18	26.9443	9.2	12.4	0.5288	6.8	8.9	6.6	6.05
595000	20.51	15.34	10.31	8.59	19.69	13.41	10.78	8.79	20.67	15.12	11.39	9.84	905.18	26.9443	10	12.5	0.5746	6.8	8.9	6.6	6.05
600000	20.47	15.61	10.2	8.53	19.82	13.52	10.84	8.27	20.64	14.58	11.39	9.59	905.18	26.9443	10.5	11.2	0.578	6.9	9.1	6.75	6.05
605000	20.49	15.37	10.34	8.63	20.05	13.61	10.97	8.59	20.52	14.66	11.35	9.91	905.18	26.9443	9.9	12.7	0.5427	6.9	9.1	6.75	6.05
610000	20.58	15.38	10.36	8.67	19.76	13.43	10.81	8.56	20.53	14.81	11.41	10.53	905.18	26.9443	9.7	12.4	0.4653	6.9	9.1	6.75	6.05
615000	20.54	15.33	10.43	8.73	19.74	13.34	10.74	8.47	20.48	14.73	11.32	10.27	905.18	26.9443	9.3	12.8	0.4829	6.9	9.1	6.75	6.05
620000	20.61	15.47	10.38	8.8	19.67	13.33	10.82	8.89	20.97	14.92	11.25	10.04	905.16	26.9446	8.9	12	0.5137	6.9	9.1	6.75	6.05

625000	20.26	15.27	10.29	8.74	19.92	13.35	10.76	8.88	20.75	14.79	11.48	9.69	905.16	26.9446	9.7	11.8	0.5512	6.9	9.1	6.75	6.05
630000	20.48	15.29	10.45	8.77	19.65	13.59	10.94	8.75	20.31	14.83	11.37	9.81	905.16	26.9446	10.5	12.5	0.4681	6.9	9.1	6.75	6.05
635000	20.49	15.51	10.37	8.64	20.04	13.31	10.86	8.49	20.73	15.15	11.43	11.01	905.16	26.9446	9.7	11.9	0.5228	6.9	9.1	6.75	6.05
640000	20.55	15.21	10.26	8.67	19.79	13.21	10.59	8.91	20.46	14.73	11.59	9.56	905.15	26.9443	9.8	12.3	0.4813	6.9	9.1	6.75	6.05
645000	20.58	15.43	10.44	8.61	19.81	13.38	10.77	8.62	20.61	14.86	11.33	9.64	905.15	26.9443	10.1	12.5	0.5349	6.9	9.1	6.75	6.05
650000	20.51	15.12	10.29	8.58	19.68	13.34	10.92	8.55	20.34	14.71	11.29	11.04	905.15	26.9443	9.6	12.8	0.5742	6.9	9.1	6.75	6.05
655000	20.47	15.64	10.37	8.67	19.71	13.24	10.84	8.79	21.06	15.24	11.67	10.34	905.15	26.9443	10.5	12.1	0.5946	6.9	9.1	6.75	6.05
660000	20.43	15.24	10.33	8.19	19.59	13.61	11.02	8.22	20.49	14.63	11.34	10.09	905.14	26.9443	10.3	12.5	0.5438	6.9	9.1	6.75	6.05
665000	20.52	15.46	10.34	8.37	19.72	13.34	10.84	8.88	20.69	14.78	11.36	9.35	905.14	26.9443	9.9	12.2	0.4736	6.9	9.1	6.75	6.05
670000	20.37	15.34	10.29	8.46	19.64	13.37	10.78	8.59	20.58	15.19	11.04	9.47	905.14	26.9443	10.7	12.7	0.4925	6.9	9.1	6.75	6.05
675000	20.41	15.36	10.41	8.53	19.66	13.71	10.94	8.67	20.51	14.96	11.35	10.15	905.14	26.9443	9.4	12.3	0.4877	6.9	9.1	6.75	6.05
680000	20.15	15.38	10.36	8.59	19.68	13.65	10.87	8.94	20.79	14.49	11.42	10.28	905.14	26.9444	9.7	12.6	0.5235	6.9	9.1	6.75	6.05
685000	20.35	15.41	10.38	8.55	19.67	13.51	10.78	8.76	20.41	15.29	11.51	9.61	905.14	26.9444	9.8	12.7	0.5018	6.9	9.1	6.75	6.05
690000	20.43	15.38	10.29	8.49	19.73	13.25	10.69	8.67	20.85	14.73	11.58	9.37	905.14	26.9444	10.6	12.9	0.4962	6.9	9.1	6.75	6.05
695000	20.45	15.34	10.25	8.61	19.57	13.43	10.81	8.63	20.41	14.81	11.69	10.57	905.15	26.9444	10.9	12.7	0.5643	6.9	9.1	6.75	6.05
700000	20.38	15.43	11.11	9.39	19.72	13.28	10.74	8.97	20.37	14.75	11.13	10.32	905.15	26.9441	11.9	13.6	0.4565	7.0	9.2	6.9	6.15
705000	20.49	15.37	10.29	8.99	19.89	13.37	10.71	8.69	20.69	15.02	11.24	9.37	905.15	26.9441	10.8	12.6	0.5155	7.0	9.2	6.9	6.15
710000	20.46	15.34	10.35	9.15	19.91	13.45	10.77	8.43	20.73	14.32	11.43	9.51	905.15	26.9441	10.6	13	0.4853	7.0	9.2	6.9	6.15
715000	20.34	15.43	10.33	9.24	19.64	13.41	10.65	8.65	20.52	14.82	11.22	9.83	905.15	26.9441	10.8	12.9	0.5449	7.0	9.2	6.9	6.15
720000	20.28	15.47	10.37	8.87	19.69	13.38	10.69	8.31	20.49	14.81	11.43	10.19	905.15	26.9442	9.5	13.4	0.5611	7.0	9.2	6.9	6.15
725000	20.35	15.41	10.42	8.86	19.53	13.32	10.48	8.59	20.35	15.13	11.24	10.07	905.15	26.9442	10.3	12.8	0.5725	7.0	9.2	6.9	6.15
730000	20.38	15.42	10.44	8.95	19.79	13.26	10.79	8.66	20.81	14.76	11.05	9.68	905.14	26.9442	9.9	12.6	0.5341	7.0	9.2	6.9	6.15
735000	20.46	15.53	10.49	8.94	19.62	13.27	10.57	8.59	20.73	14.31	11.16	9.89	905.14	26.9442	10.4	13.3	0.4962	7.0	9.2	6.9	6.15
740000	20.51	15.38	10.51	8.91	19.51	13.19	10.44	8.55	20.36	14.21	11.19	10.31	905.14	26.9441	9.5	13.1	0.4839	7.0	9.2	6.9	6.15
745000	20.56	15.4	10.68	8.88	19.64	13.24	10.74	8.63	20.61	14.61	10.97	10.69	905.14	26.9441	9.8	12.7	0.5307	7.0	9.2	6.9	6.15
750000	20.67	15.44	10.57	8.79	19.49	13.22	10.81	8.28	20.59	14.73	11.43	10.18	905.13	26.9441	10.1	13.5	0.5845	7.0	9.2	6.9	6.15
755000	20.58	15.39	10.55	8.77	19.69	13.48	10.65	8.67	20.37	15.05	11.31	9.6	905.13	26.9441	9.7	13.2	0.5437	7.0	9.2	6.9	6.15

760000	20.59	15.51	10.49	8.83	19.57	13.23	10.66	8.71	20.41	14.69	11.24	10.21	905.13	26.944	10.6	13.3	0.4895	7.0	9.2	6.9	6.15
765000	20.62	15.51	10.46	8.84	19.86	13.37	10.85	8.37	20.83	14.82	11.59	9.69	905.13	26.944	10.8	12.9	0.4738	7.0	9.2	6.9	6.15
770000	20.48	15.53	10.47	8.79	19.59	13.43	10.58	8.55	20.35	14.53	11.15	9.48	905.13	26.944	10.5	13.1	0.5108	7.0	9.2	6.9	6.15
775000	20.43	15.49	10.43	8.91	19.76	13.45	10.67	8.79	20.41	15.25	11.08	10.43	905.13	26.944	10	13.8	0.5934	7.0	9.2	6.9	6.15
780000	20.58	15.46	10.39	8.59	19.68	13.61	10.74	8.42	20.76	14.61	11.1	10.21	905.13	26.9443	9.9	12.8	0.4955	7.0	9.2	6.9	6.15
785000	20.54	15.61	10.44	8.67	19.91	13.52	10.89	8.41	20.31	14.27	10.85	10.19	905.13	26.9443	10.3	13.4	0.5472	7.0	9.2	6.9	6.15
790000	20.51	15.37	10.45	8.61	19.56	13.75	10.66	8.44	20.69	14.59	11.06	10.03	905.15	26.9443	10.7	13.2	0.5349	7.0	9.2	6.9	6.15
795000	20.47	15.24	10.39	8.54	19.55	13.26	10.58	8.75	20.37	14.79	11.03	10.18	905.15	26.9443	10.2	12.9	0.4771	7.0	9.2	6.9	6.15
800000	20.38	15.48	10.34	8.46	19.64	13.5	10.76	8.61	20.59	14.52	11.28	9.61	905.15	26.9442	9.8	12.6	0.4575	7.25	9.5	6.95	6.2
805000	20.29	15.19	10.41	8.53	19.75	13.25	10.69	8.34	20.25	14.86	11.12	9.31	905.15	26.9442	10.6	13.1	0.4791	7.25	9.5	6.95	6.2
810000	20.39	15.29	10.38	8.61	18.98	13.24	10.48	8.38	20.49	14.12	11.21	9.28	905.17	26.9442	9.9	13.3	0.4926	7.25	9.5	6.95	6.2
815000	20.42	15.34	10.4	8.64	19.61	13.2	10.55	8.25	20.51	14.91	10.84	10.94	905.17	26.9442	10.7	13.7	0.5241	7.25	9.5	6.95	6.2
820000	20.47	15.29	10.38	8.47	19.84	13.18	10.83	8.42	20.38	14.53	10.91	10.48	905.17	26.9442	10.9	13.5	0.5448	7.25	9.5	6.95	6.2
825000	20.49	15.47	10.42	8.41	19.51	13.16	10.63	8.51	20.62	14.73	10.75	10.05	905.17	26.9442	11.3	13.6	0.5329	7.25	9.5	6.95	6.2
830000	20.57	15.34	10.35	8.49	19.95	13.37	10.57	8.43	20.49	14.79	11.21	9.37	905.13	26.9442	9.8	13.6	0.5284	7.25	9.5	6.95	6.2
835000	20.51	15.24	10.11	8.54	19.45	13.61	10.47	8.48	20.49	14.76	11.17	9.61	905.13	26.9442	10.3	13.8	0.5571	7.25	9.5	6.95	6.2
840000	20.5	15.23	10.24	8.59	19.66	13.21	10.38	8.44	20.53	14.91	11.16	10.98	905.13	26.9439	10.5	12.9	0.5349	7.25	9.5	6.95	6.2
845000	20.39	15.32	10.38	8.62	19.73	13.15	10.53	8.38	20.61	14.25	11.04	11.04	905.13	26.9439	10.9	13.2	0.5846	7.25	9.5	6.95	6.2
850000	20.46	15.19	10.19	8.57	19.67	13.13	10.57	8.34	20.55	14.82	11.13	10.56	905.14	26.9439	11	13.5	0.4861	7.25	9.5	6.95	6.2
855000	20.43	15.49	10.05	8.48	19.37	13.05	10.68	8.51	20.23	14.64	10.98	10.21	905.14	26.9439	10.4	13.6	0.4799	7.25	9.5	6.95	6.2
860000	20.41	15.22	10.34	8.44	19.34	13.09	10.54	8.46	20.61	14.49	11.09	9.83	905.14	26.9444	10.8	13.4	0.5008	7.25	9.5	6.95	6.2
865000	20.37	15.33	10.26	8.51	19.38	12.97	10.46	8.78	20.43	14.37	11.37	9.34	905.14	26.9444	10.6	13.9	0.5348	7.25	9.5	6.95	6.2
870000	20.45	15.31	10.28	8.57	19.43	13.51	10.48	8.48	20.59	14.43	11.04	10.18	905.13	26.9444	11.4	14.2	0.4329	7.25	9.5	6.95	6.2
875000	20.52	15.25	10.34	8.55	19.45	13.42	10.39	8.53	20.37	14.35	11.21	9.61	905.13	26.9444	10.7	13.5	0.4952	7.25	9.5	6.95	6.2
880000	20.48	15.26	10.11	8.5	19.44	13.45	10.47	8.55	20.52	14.51	11.15	9.49	905.13	26.9442	9.9	13.8	0.5447	7.25	9.5	6.95	6.2
885000	20.46	15.12	10.26	8.57	19.41	13.36	10.62	8.83	20.37	14.62	11.48	9.51	905.13	26.9442	10.5	13.3	0.5528	7.25	9.5	6.95	6.2
890000	20.38	15.58	10.18	8.63	19.51	13.38	10.73	8.49	20.2	14.82	11.51	10.43	905.13	26.9442	10.9	13.8	0.5831	7.25	9.5	6.95	6.2

895000	20.34	14.91	10.23	8.42	19.54	13.32	10.51	8.61	20.37	14.55	10.95	9.68	905.13	26.9442	11.3	14	0.4883	7.25	9.5	6.95	6.2
900000	20.22	15.27	10.19	8.66	19.6	13.35	10.39	8.43	20.43	14.48	11.06	10.17	905.13	26.9441	11.8	14.4	0.4615	7.3	10.55	7.3	6.35
905000	20.29	15.19	10.67	8.37	19.62	13.23	10.45	8.51	20.73	14.37	11.04	9.95	905.13	26.9441	11.5	14.1	0.4775	7.3	10.55	7.3	6.35
910000	20.36	15.37	10.51	8.49	19.67	13.21	10.29	8.15	20.46	15.06	11.12	10.08	905.14	26.9441	10.6	13.7	0.5214	7.3	10.55	7.3	6.35
915000	20.38	15.49	10.33	8.43	19.64	13.15	10.41	8.31	20.61	14.57	11.49	10.27	905.14	26.9441	10.8	13.5	0.5011	7.3	10.55	7.3	6.35
920000	20.34	15.21	10.29	8.49	19.59	13.17	10.48	8.44	20.35	14.43	11.21	10.83	905.14	26.9441	10.1	13.8	0.4897	7.3	10.55	7.3	6.35
925000	20.31	15.11	10.41	8.57	19.57	13.09	10.37	8.41	20.49	14.69	11.04	9.59	905.14	26.9441	10.9	13.8	0.4958	7.3	10.55	7.3	6.35
930000	20.39	15.49	10.35	8.26	19.55	13.25	10.42	8.51	20.26	14.59	10.93	11.04	905.14	26.9441	11.5	14	0.5549	7.3	10.55	7.3	6.35
935000	20.52	15.1	10.41	8.1	19.53	13.17	10.32	8.47	20.31	14.43	11.31	10.59	905.14	26.9441	11.3	14.3	0.5371	7.3	10.55	7.3	6.35
940000	20.48	15.18	10.15	8.29	19.49	13.04	10.37	8.26	20.41	14.36	11.12	11.04	905.14	26.9441	12	13.9	0.5826	7.3	10.55	7.3	6.35
945000	20.6	15.29	10.27	8.24	19.51	13.31	10.31	8.39	20.24	14.96	11.08	10.45	905.14	26.9441	11.8	14.5	0.4524	7.3	10.55	7.3	6.35
950000	20.53	15.43	10.38	8.34	19.55	12.96	10.22	8.45	20.35	14.67	11.18	10.12	905.15	26.9441	12.8	14.8	0.4788	7.3	10.55	7.3	6.35
955000	20.47	15.11	10.16	8.51	19.48	13.06	10.26	8.52	20.56	14.53	10.97	9.79	905.15	26.9441	10.7	14.3	0.5352	7.3	10.55	7.3	6.35
960000	20.44	15.19	10.28	8.26	19.43	12.89	10.29	8.45	20.49	14.21	10.92	10.89	905.15	26.9442	10.8	14.7	0.4973	7.3	10.55	7.3	6.35
965000	20.41	15.02	10.23	8.37	19.47	12.99	10.31	8.39	20.61	14.37	11.43	9.35	905.15	26.9442	11.6	14.5	0.4886	7.3	10.55	7.3	6.35
970000	20.38	15.31	10.34	8.41	19.37	13.05	10.27	8.36	20.48	14.16	11.27	10.27	905.14	26.9442	11.1	14.1	0.5841	7.3	10.55	7.3	6.35
975000	20.34	15.22	10.28	8.29	19.29	13.01	10.22	8.29	20.36	14.54	11.03	9.61	905.14	26.9442	12.1	14.4	0.5134	7.3	10.55	7.3	6.35
980000	20.28	15.15	10.36	8.45	19.38	13.15	10.3	8.23	20.74	14.29	10.96	9.49	905.14	26.9444	10.9	14.8	0.4975	7.3	10.55	7.3	6.35
985000	20.46	15.17	10.33	8.39	19.42	13.13	10.27	8.46	20.38	14.84	11.21	10.81	905.14	26.9444	10.5	15.1	0.4435	7.3	10.55	7.3	6.35
990000	20.38	15.27	10.49	8.44	19.48	13.1	10.19	8.34	20.25	15.03	10.84	10.73	905.13	26.9444	11.4	14.9	0.4827	7.3	10.55	7.3	6.35
995000	20.25	15.12	10.37	8.49	19.53	13.09	10.24	8.51	20.28	14.27	11.06	10.91	905.13	26.9444	11.9	14.7	0.4682	7.3	10.55	7.3	6.35
1000000	20.16	15.11	10.33	8.48	19.6	13.05	10.26	8.48	20.49	14.22	11.12	10.85	905.13	26.9443	11.7	16	0.5195	7.7	11	7.55	6.5

Napomene:

1. Broj čestica, iskazan parametrima CUS, CUUS i CUUD, predstavljen je ISO kodnim brojem prema ISO 4406/99,
2. Vrednosti mase, iskazane parametrima MTV i MKV, izražene su u gramima,
3. Vrednosti protoka kroz zazor, iskazane parametrima ZIUS i ZIUD, izražene su u ml/min,
4. Vrednosti zazora, iskazane parametrima Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_4 , izražene su u μm .