

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Мирослав П. Црногорац

**ОПТИМИЗАЦИЈА ИЗБОРА МЕХАНИЧКЕ
МЕТОДЕ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ НАФТНИХ
БУШОТИНА ПРИМЕНОМ ФАЗИ ЛОГИКЕ**

докторска дисертација

Београд, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Miroslav P. Crnogorac

OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF THE
ARTIFICIAL LIFT METHOD OF OIL WELL
EXPLOITATION USING FUZZY LOGIC

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

КОМИСИЈА

Ментори:

др Милош Танасијевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Елементи машинских и енергетских система

др Душан Даниловић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Инжењерство нафте и гаса

Чланови комисије:

др Весна Каровић Маричић, редовни професор
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Инжењерство нафте и гаса

др Бранко Лековић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Инжењерство нафте и гаса

др Александар Миливојевић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет
Ужа научна област: Технологија материјала – погонски
материјали и сагоревање

Датум одбране: _____

ОПТИМИЗАЦИЈА ИЗБОРА МЕХАНИЧКЕ МЕТОДЕ ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ НАФТНИХ БУШОТИНА ПРИМЕНОМ ФАЗИ ЛОГИКЕ

САЖЕТАК

Механичке методе експлоатације нафте имају примјену у бушотинама у којима није могућа производња нафте енергијом лежишта, већ се та потребна енергија додаје увођењем ових метода. Да би се остварила оптимална производња важну улогу има избор механичке методе експлоатације нафте. Оптималним избором методе постиже се економична производња.

Утицајни параметри на избор методе дјелом су егзактни, а дјелом су описне природе. У релацијама између параметара доминира неизвјесност, вишезначност, субјективност и неодређеност. У дисертацији је као математички и концепцијски модел за оптимизацију коришћена фази логика. Као функција циља је уведена перформанса употребљивости. Исходи, односно „IF-THEN“ правила су формиран на бази искуства са више експлоатационих поља у свијету. Резултати су приказани на два начина, зависно од могућности интерпретације. Први начин приказа резултата дат је кроз дијаграме на којима су површине неправилних геометријских тијела. Поређењем преклапања површине нове бушотине са претходно добијеним површинама појединачних механичких метода добија се проценат примјењивости одређене методе на новој бушотини. Кад постоје мале разлике у излазима, примјењује се други начин тако што се претходно добијеним површинама одређује тежиште и расипање резултата. На крају је дата анализа осјетљивости развијеног модела.

Кључне речи: механичке методе експлоатације, производња нафте, фази логика, доношење одлука, оптимизација, употребљивост;

Научна област:

Рударско инжењерство

Ужа научна област:

Инжењерство нафте и гаса

УДК: 005.334:62-9

338.45:502/504:004

519.983:519.863

622:007.5

622.276/.277:622.313/.323

624.13:628.4(043.3)

OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF THE ARTIFICIAL LIFT METHOD OF OIL WELL EXPLOITATION USING FUZZY LOGIC

ABSTRACT

Artificial lift methods have applications in oil wells where oil production is not further possible due to natural reservoir energy, so this necessary energy is added by introducing lift methods. In order to achieve optimum production, the selection of an artificial lift method is very important. By selecting an optimal artificial lift method, cost - effective production is achieved.

Influential parameters in the selection of a method are measured partly accurately and partly descriptively, in relations between parameters dominated by uncertainty, ambiguity, subjectivity and indeterminacy. This paper uses fuzzy logic as a mathematical and conceptual model for optimization. Usability performance was introduced as the objective function. The outcome or IF-THEN rules, as the central part of the model, is based on empirical data from the selected oil fields. The results are presented in two ways, depending on the interpretability. The first way of showing the results is given through diagrams showing the surfaces of irregular geometric bodies. By comparing the overlap of the surface of the new well with the previously obtained surfaces of the individual artificial lift methods, the percentage of applicability of a particular method to the new well is obtained. When there are minor differences in outputs, another method is applied by calculating the areas of focus and scattering of the previously obtained surfaces. Finally, a sensitivity analysis of the model is presented.

Key words: artificial lift, oil production, fuzzy logic, decision making, optimization, usability;

Scientific field:

Mining engineering

Scientific subfield:

Petroleum Engineering

UDC: 005.334:62-9

338.45:502/504:004

519.983:519.863

622:007.5

622.276/.277:622.313/.323

624.13:628.4(043.3)

САДРЖАЈ

1. Увод	1
1.1. Предмет и циљ истраживања.....	2
1.2. Научне хипотезе истраживања.....	2
1.3. Структура дисертације са кратким прегледом поглавља.....	3
2. Производња нафте механичким методама експлоатације	4
2.1. Примјена механичких метода експлоатације у свјету	5
2.2. Кратак приказ механичких метода експлоатације нафте	7
2.2.1. Гас лифт.....	7
2.2.2. Дубинска пумпа са клипним шипкама.....	8
2.2.3. Електрична центрифугална пумпа	9
2.2.4. Завојне пумпе	11
2.2.5. Хидрауличке пумпе.....	13
2.3. Предности, недостаци и ограничења механичких метода	14
2.4. Историјат модела за избор механичких метода	18
2.4.1. Пресјек	21
3. Увод у основе теорије фази логике	23
3.1. Основи концепта фази теорије.....	23
3.1.1. Појам фази скупа и фази броја.....	23
3.1.2. Лингвистичка вриједност и лингвистичка промјенљива	31
3.1.3. Фази релације.....	33
4. Дефинисање параметара и индикатора за избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина.....	35
4.2.1. Анализа улазних параметара индикатора А.....	36
4.2.2. Анализа улазних параметара подскупова В и С.....	37
5. Фази модел оптимизације избора механичких метода експлоатације нафтне бушотине.....	41
5.1. Дефинисање правила пропозиције.....	42
5.2. Синтезни дио модела	48
6. Студија случаја и верификација развијеног модела.....	62
6.1. Анализа добијених резултата	63
6.2. Тест осјетљивости модела.....	79
7. Закључак	81
8. Литература	84

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1. Шематски приказ бушотина које производе механичким методама експлоатације (Production Technology, 2005).....	4
Слика 2.2. Заступљеност примјене механичких метода у производњи нафте у свијету (Langbauer & Kaserer, 2018; Rigzone)	6
Слика 2.3. Примјена механичких метода експлоатације по регионима и државама (Nguyen).....	6
Слика 2.4. Систем гаслифта (Parveen [Online]).....	8
Слика 2.5. Дубинска пумпа са клипним шипкама (Takacs, 2017)	9
Слика 2.6 - Типична композиција ЕСП система (Добыча нефти и газа)	10
Слика 2.7. Бушотина опремљена завојном пумпом (Production Technology, 2005)	12
Слика 2.8. Бушотина опремљена хидрауличном пумпом (Production Technology, 2005; Moon, 2016).....	13
Слика 2.9. Структура OPUS система (Valentin & Hoffmann, 1988)	18
Слика 2.10. Структура експертског система SEDLA (Espin et al, 1994)	19
Слика 2.11. Хијерархијска структура критеријума избора механичке методе (Alemi et al., 2011)	21
Слика 3.1. Графички приказ скупова А и В када јесу и када нису фази скупови	24
Слика 3.2. Функција припадности $\mu_C(x)$ фази скупа С.....	25
Слика 3.3. Примјер нормалног и суб-нормалног фази скупа	26
Слика 3.4. Конвексан фази скуп и неконвексан скуп.....	26
Слика 3.5. Унија фази скупова А и В.....	27
Слика 3.6. Пресјек фази скупова А и В.....	27
Слика 3.7. Комплемент фази скупа А (Subašić , 1997).....	28
Слика 3.8. Закон искључења трећег: класична теорија скупова (а) и фази теорија скупова (б).....	29
Слика 3.9. Фази скупови који јесу (А и В) и који нису фази бројеви (С и D) (Klir , 1997)	30
Слика 3.10. Фази број, интервал повјерења и степен сигурности	30
Слика 3.11. Троугласти и трапезоидни фази број А	31
Слика 3.12. Оператори модификације (Subašić, 1997)	33
Слика 4.1. Структура улазних параметара модела (Crnogorac et al, 2020).....	36
Слика 4.2. Оптималне и максималне дубине примјене механичких метода експлоатације	38
Слика 4.3. Оптималне и максималне количине флуида по механичким методама експлоатације нафте	38
Слика 4.4. Оптималне и максималне температуре по механичким методама експлоатације нафте	39
Слика 5.1. Шематски дијаграм фази модела (Crnogorac et al, 2020).....	42
Слика 5.2. Фази скупови (Crnogorac et al, 2020)	43
Слика 5.3. Хијерархијска структура фази композиције (Crnogorac et al, 2020)	48
Слика 5.4. Фази скуп индикатора А	56
Слика 5.5. Резултат индикатора М	56
Слика 5.6. Приказ резултата модела за све стандарде најзаступљенијих механичких метода експлоатације	58
Слика 5.7. Приказ резултата модела за стандард ГЛ	58
Слика 5.8. Приказ резултата модела за стандард ЕЦП	59

Слика 5.9. Приказ резултата модела за стандард ДПКШ.....	59
Слика 5.10. Приказ резултата модела за стандард ЗП.....	60
Слика 5.11. Приказ резултата модела за стандард ЗП.....	60
Слика 5.12. Тежиште и расипање излаза за стандарде механичких метода	61
Слика 6.1. Резултати избора механичких метода експлоатације на пољу Салман примјеном ELECTRE модела (Alemi et al, 2011)	63
Слика 6.2. Приказ резултата модела - стандарди за све методе експлоатације	64
Слика 6.3. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ГЛ са новом бушотином	65
Слика 6.4. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЕЦП са новом бушотином.....	66
Слика 6.5. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ДПКШ са новом бушотином.....	67
Слика 6.6. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ХП са новом бушотином.....	68
Слика 6.7. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЗП са новом бушотином.....	69
Слика 6.8. Тежиште и расипање излаза за нову бушотину у односу на стандарде за остале методе.....	71
Слика 6.9. Приказ резултата модела - стандарди за све методе експлоатације	72
Слика 6.10. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ГЛ са новом бушотином.....	73
Слика 6.11. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЕЦП са новом бушотином.....	74
Слика 6.12. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ДПКШ са новом бушотином.....	75
Слика 6.13. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ХП са новом бушотином.....	76
Слика 6.14. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЗП са новом бушотином.....	77
Слика 6.15. Тежиште и расипање излаза за нову бушотину у односу на стандарде за остале методе.....	79
Слика 6.16. Приказ осјетљивости модела при промјени параметара за -10% и +10% (Crnogorac et al, 2020).....	80

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1. Предности и недостаци гас лифта (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)	14
Табела 2.2. Предности и недостаци дубинских пумпи са клипним шипкама (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999).....	14
Табела 2.3. Предности и недостаци електричних уроњених центрифугалних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999).....	15
Табела 2.4. Предности и недостаци хидрауличних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)	15
Табела 2.5. Предности и недостаци завојних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)	16
Табела 2.6. Ограничења за избор механичке методе експлоатације (Lake & Clegg, 2007)	16
Табела 2.7. Методе избора према начину функционисања (Crnogorac et al, 2020)	22
Табела 5.1. Исходи и максимуми комбинација фази бројева	50
Табела 5.2. Груписане комбинације према исходима и њихови минимуми	53
Табела 6.1.Проценти преклапања површина пет механичких метода са новом бушотином.....	69
Табела 6.2. Вриједности тежишта и расипања за сваки од стандарда	70
Табела 6.3.Проценти преклапања површина пет механичких метода са новом бушотином.....	77
Табела 6.4. Вриједности тежишта и расипања за сваки од стандарда	78
Табела 6.5. Потребан проценат промјене параметара нове бушотине у циљу помјерања резултата ка познатим стандардима.....	79

1. Увод

Нафтне бушотине почињу производњу еруптивном методом тј. под дејством природне лежишне енергије. Када бушотина престане да производи еруптивно уводи се нека од механичких метода експлоатације. Најпримјењеније механичке методе експлоатације су: гас лифт (ГЛ), дубинске пумпе са клипним шипкама (ДПКШ), електричне уроњене центрифугалне пумпе (ЕЦП), завојне пумпе (ЗП) и хидрауличне пумпе (ХП).

ГЛ је једини облик механичке методе који не захтјева употребу пумпе на дну бушотине, па се због релативне једноставности опремања, флексибилности и способности да ради у различитим условима, често примјењује у „offshore“ бушотинама. И поред тога што представљају чешћи тип механичке методе која се користи у бушотинама испод површине мора, не значи да током њење примене не постоје проблеми. Гас лифт није у стању да генерише ниске притиске на дну бушотине за разлику од пумпи; неефикасна је метода за бушотине у којима постоји већа количина гаса; захтјева велику количину гаса под великим притиском (тј. компресије), а ако није добро пројектован долази до лоших или нестабилних перформанси (Bellarby 2009). Гас лифт може функционисати на два начина: континуално и повремено (Takacs 2005).

ДПКШ методом се механичка енергија трансформише у потенцијалну енергију и тако омогућује стварање притиска пумпања. Ова метода је једна од најпримјењенијих механичких метода експлоатације нафтних бушотина (Takacs 2015).

ЕЦП системи раде на принципу вишестепене центрифугалне пумпе, тј. електро мотор електричну енергију претвара у механичку енергију која затим покреће пумпу, а пумпа омогућује да се флуид подигне на површину (Crnogoras et al. 2015).

Примјена ЕЦП система посљедњих година у нафтној индустрији представља конвенционалан, ефикасан и економичан начин производње нафте из високо производних бушотина (Kumar 2013; Takacs 2017).

ЗП методом флуид у бушотини се подиже на површину завојним пумпама. Предност ових пумпи је могућност производње вискозних флуида, као и флуида са већим садржајем чврстих честица.

Дубинска ХП је систем који се састоји од повратно-транслаторног погонског мотора и пумпе. Погонски флуид (нафта или вода под притиском) доводи се у мотор једним водом, а искоришћени погонски флуид, заједно са производним флуидом се одводи на површину другим водом.

Избор оптималне механичке методе експлоатације врши се узимајући у обзир параметре лежишта, бушотине, услове средине, као и економске факторе (прије свега улагања и оперативне трошкове). Избор неадекватне методе може довести до смањења ефикасности и ниске профитабилности или неекономичне производње нафте.

Искусствено посматрано, избор механичке методе експлоатације у финалном дијелу процеса доношења одлуке је најчешће заснован на субјективним критеријумима тако што се бира метода:

- која може задовољити појединачне захтјеве произвођача опреме и експерата појединих компанија или
- која је највише прихваћена од руководећег оперативног кадра на пољу.

Избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина представља један од најважнијих фактора при остваривању економичне производње. Разматрање

критеријума у смислу њиховог дефинисања, разграничења, анализе и синтезе на ниво оптимизационог критеријума, у циљу добијања предности и недостатака појединачних механичких метода експлоатације представља кључни корак поступка избора адекватне механичке методе. У циљу избора оптималне методе мора се узети у обзир велики број критеријума којима се придружују одговарајући нивои значајности ради дефинисања синтезне оцјене. У овом типу приступа избору оптималне механичке методе производње нафтних бушотина користе се приступи на бази модела вишеатрибутивне и вишекритеријумске анализе, као и на бази статистичке обраде података из инжењерске праксе и на бази експертских система. У пракси не постоји општи модел и стандарди за избор механичких метода експлоатације нафте већ свака нафтна компанија користи експертски систем, а то су програми, или пак само таблице са дефинисаним границама примјене сваке од метода.

Конвенционална методологија избора одговарајуће механичке методе представља процес дефинисања и анализе различитих критеријума гдје се узимају у обзир опште предности и недостаци појединачних метода.

Развојем технологија у области производње нафте и гаса константно се помјерају границе примјењивости механичких метода што утиче на услове њихове примјене, као и на предности и недостатке у пракси.

1.1. Предмет и циљ истраживања

Избор механичких метода експлоатације нафте су вршили експерти у почетку разматрањем свих параметара бушотине и лежишта, ограничења примјене појединих метода, као и предности и недостатака истих. Напредовањем рачунарске технике на основу разматраних параметара креирани су експертски системи тј. програми који помажу при избору адекватне методе (OPUS, SEDLA). Примјењиване су и методе одлучивања као што су стабло одлука и у најскорије вријеме вишекритеријумске анализе (TOPSIS, ELECTRE, SAW и VIKOR).

У докторској дисертацији је дата детаљна анализа радова на тему избора механичких метода експлоатације нафтних бушотина. Урађен је пресјек коришћених математичких модела за доношење одлука. Примјетна је доминација експертских модела који се базирају на више-критеријумским и више-атрибутивним моделима. У наставку је дат приједлог унапрјеђења ових модела увођењем фази логике. Исход као централни дио модела закључивања је дефинисан на бази емпиријских података са изабраних нафтних поља. Резултати су приказани на два начина, зависно од могућности интерпретације. Први начин приказа резултата дат је кроз дијаграме на којима су површине неправилних геометријских тијела. Поређењем преклапања површине нове бушотине са претходно добијеним површинама појединачних механичких метода добија се проценат примјењивости одређене методе на новој бушотини. Кад постоје мале разлике у излазима примјењује се други начин, тако што се претходно добијеним површинама израчунава тежиште и расипање резултата. На крају је дата анализа осјетљивости развијеног модела.

1.2. Научне хипотезе истраживања

Циљ докторске дисертације је креирање математичког модела заснованог на фази логици којим би се примјеном различитих критеријумских и подкритеријумских

параметара вршило оцјењивање различитих механичких метода експлоатације ради избора оптималне механичке методе производње нафте. Научне хипотезе истраживања у дисертацији су:

- Досадашњи избор механичких метода експлоатације нафте се базира на примјени вишекритеријумских метода и експертских система које карактерише и субјективност.
- Напретком технологије у производњи нафте и гаса карактеристике и границе примјенљивости механичких метода експлоатације се мијењају тј. њихова могућност примјене се повећава.
- Кроз, до сада развијене начине избора механичке методе, дефинисан је скуп параметара на основу којих се врши избор примјењене методе експлоатације, тј. прије свега: карактеристике и услови у лежишту и бушотини, производни параметри.
- Параметре који дефинишу одлуку о избору методе експлоатације карактерише неизвјесност, вишезначност, субјективност и неодређеност. Са тог аспекта, фази логика представља концепт који потенцијално има велику примјену код доношења одлука ради вођења и управљања производњом.

1.3. Структура дисертације са кратким прегледом поглавља

Структуром дисертације дат је приказ тематских поглавља, кроз које се може упознати са значајем проблема, примјеном методологије и резултатима који су остварени.

У оквиру уводног поглавља образложен је проблем који се посматра, основне претпоставке, циљ истраживања и допринос дисертације.

У другом поглављу дат је хронолошки литературни преглед избора механичких метода и опште познате чињенице о механичким методама, гдје се истичу предности и недостаци појединачних метода, као и ниво њихове примјене у свијету.

Треће поглавље се односи на концепцијски и математички алат за моделирање различитих процеса тј. фази логику. У овом поглављу су дати основни појмови који се односе на фази логику.

У четвртном поглављу представљена је структура модела кроз улазне параметре. Дефинисан и описан је начин квантификовања нумеричких параметара и дефинисани су лингвистичким промјењивима параметри које није могуће нумерички приказати.

Пето поглавље обухвата развој математичког и концепцијског модела примјене фази логике за избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина. Овај модел примјеном различитих критеријумских и подкритеријумских параметара врши оцјењивање различитих механичких метода експлоатације у циљу избора оптималне механичке методе производње нафте. На крају овог поглавља су приказани резултати као графички и нумерички показатељи.

У шестом поглављу дата је валидација развијеног модела кроз верификацију добијених резултата. Урађен је и тест осјетљивости модела.

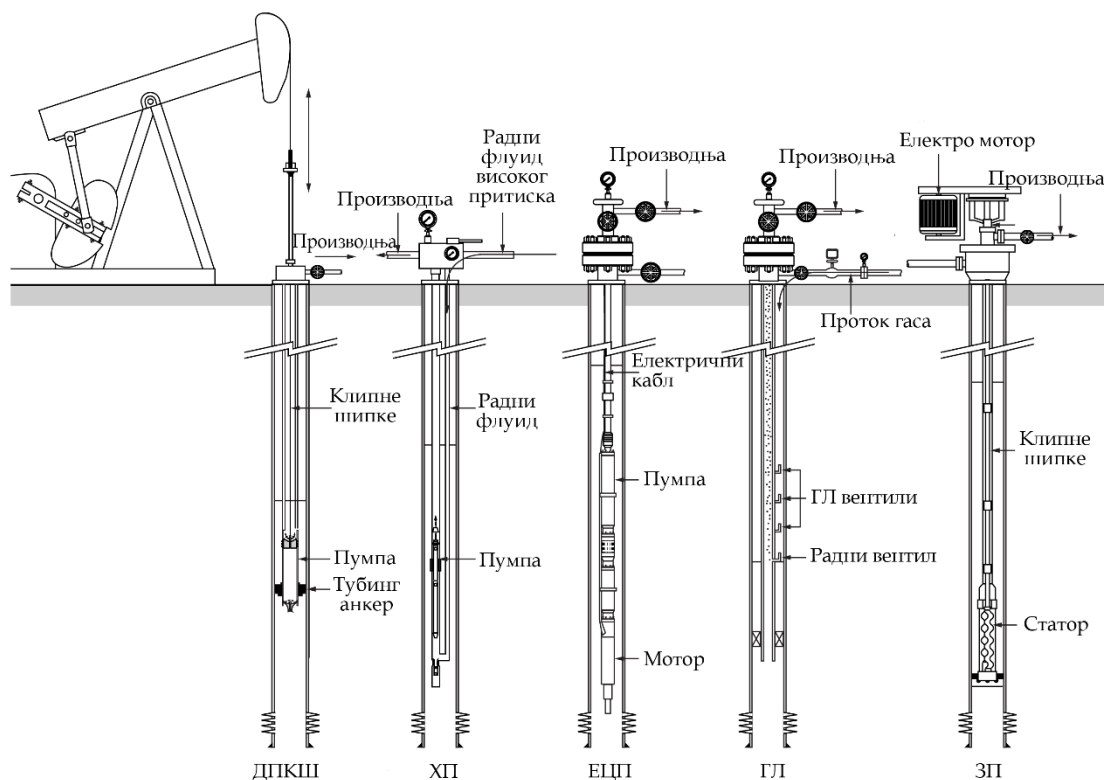
Седмо поглавље представља закључна разматрања уз дискусију и правце даљег развоја модела.

2. Производња нафте механичким методама експлоатације

У почетном периоду производње, нафта се производи еруптивном методом услјед дејства природне лежишне енергије. Врста лежишне енергије у зависности од типа нафтног лежишта може бити: експанзија стијене и флуида, ширење раствореног гаса у нафти, експанзија гаса из гасне капе, водени уток, гравитациона сила или комбинација енергетских режима. После одређеног периода, долази до природног пада енергије и лежишту што узрокује смањење производње, а затим и немогућност подизања флуида са дна бушотине на површину. У циљу обезбеђивања даље производње, као и њеног повећања приступа се примјени механичких метода експлоатације које се називају и вјештачким методама подизања флуида („artificial lift methods“) јер се уводи додатна енергија на артифицијелан начин (Crnogorac et al, 2016; Danilović et al, 2016).

Најпримјењеније механичке методе експлоатације нафте у свијету су (слика 2.1., Production Technology, 2005):

- гас лифт (ГЛ),
- дубинске пумпе са клипним шипкама (ДПКШ),
- електричне уроњене центрифугалне пумпе (ЕЦП),
- завојне пумпе (ЗП),
- хидрауличне млазне пумпе (ХП).



Слика 2.1. Шематски приказ бушотина које производе механичким методама експлоатације (Production Technology, 2005)

Према основном принципу функционисања у циљу повећања притиска у бушотини механичке методе производње нафте класификују се на двије групе:

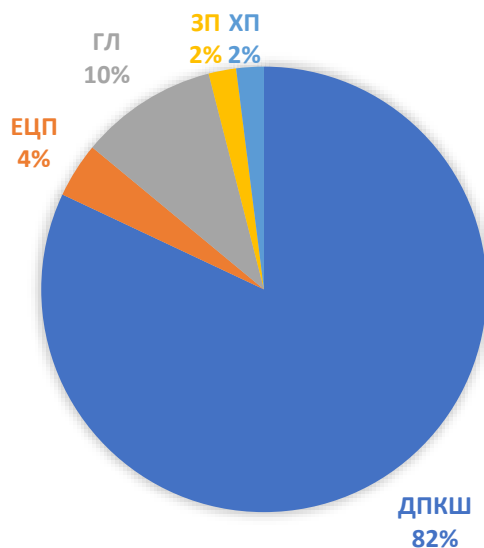
- метода дубинског пумпања гдје се повећање притиска постиже увођењем различитих типова пумпи, које својим радом преносе енергију на производни флуид и обезбјеђују подизање истог на површину. У ову групу спадају дубинске пумпе са клипним шипкама, хидрауличне млазне пумпе, електричне уроњене центрифугалне пумпе и завојне пумпе.
- Метода гас лифта гдје се повећање притиска остварује утискивањем гаса на одређеним дубинама и на тај начин олакшава се стуб флуида у бушотини и омогућава његово изношење на површину. Гас лифт метода може функционисати на два начина: континуално и повремено.

Прва примијењена механичка метода је производња нафте дубинским пумпама са клипним шипкама, која има и највећу примјену у односу на остале. Присутна је процјена да је учешће бушотина у производњи опремљених дубинским пумпама са клипним шипкама око 80% у укупном броју бушотина које производе механичким методама експлоатације (Zelić & Ćikeš, 2006).

Сваку механичку методу производње карактеришу одређене специфичности са аспекта конструкције, инсталације и примјене. Методологија избора одговарајуће механичке методе представља комплексно разматрање и анализу различитих фактора (параметара) узимајући у обзир предности, ограничења и недостатке појединачних метода.

2.1. Примјена механичких метода експлоатације у свјету

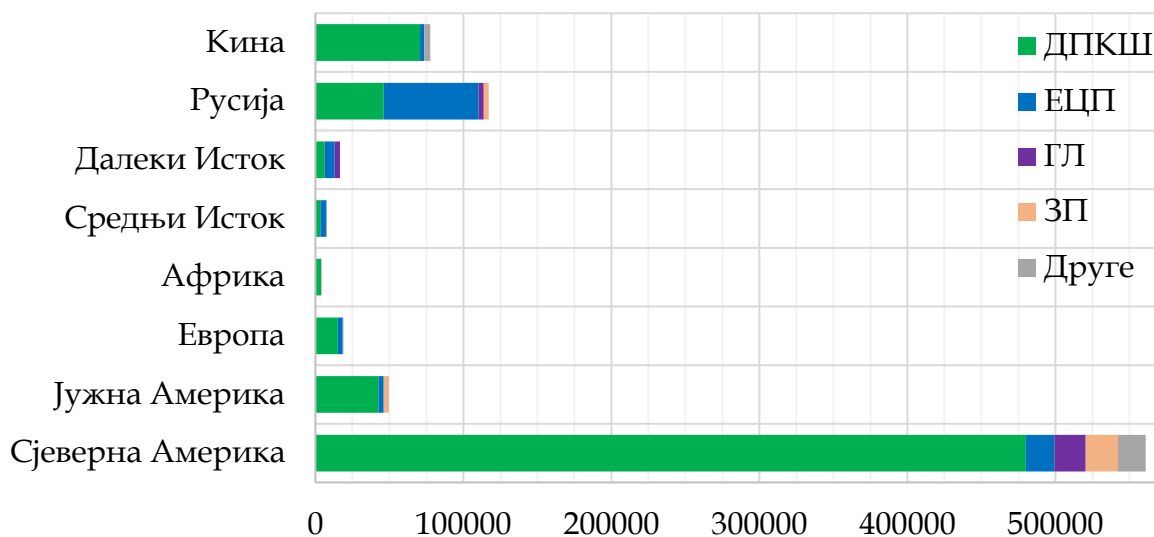
Удио у примјени појединачних механичких метода експлоатације на свјетском нивоу је тешко прецизно утврдити с обзиром на расположивост података, као и временски период анализе. Оно што се може сматрати извесним је да се од свих механичким метода производње нафте, највише примјењују у свјету данас дубинске пумпе са клипним шипкама. На слици 2.2. дата је апроксимативна процјена заступљености примјене механичких метода експлоатације у свјету, гдје дубинско пумпање на клипним шипкама има учешће од 82%, затим гас лифт метода са учешћем од 10% и дубинске електричне уроњене центрифугалне пумпе са учешћем од 4%. Хидрауличне и завојне пумпе у примјени учествују са по 2%.



Слика 2.2. Заступљеност примјене механичких метода у производњи нафте у свијету (Langbauer & Kaserer, 2018; Rigzone)

Тачније процјене примјене механичким метода се могу утврдити на нивоу региона или држава који су велики произвођачи нафте .

На слици 2.3. је приказан број бушотина и заступљеност појединих механичких метода експлоатације по подручјима богатим нафтом. Може се уочити да се у области Сјеверне и Јужне Америке, Европе, Африке и Кине највише примјењује метода дубинских пумпи са клипним шипкама док је у подручјима Блиског и Далеког истока и Русије најзаступљенија метода електричних уроњених центрифугалних пумпи.



Слика 2.3. Примјена механичких метода експлоатације по регионима и државама (Nguyen)

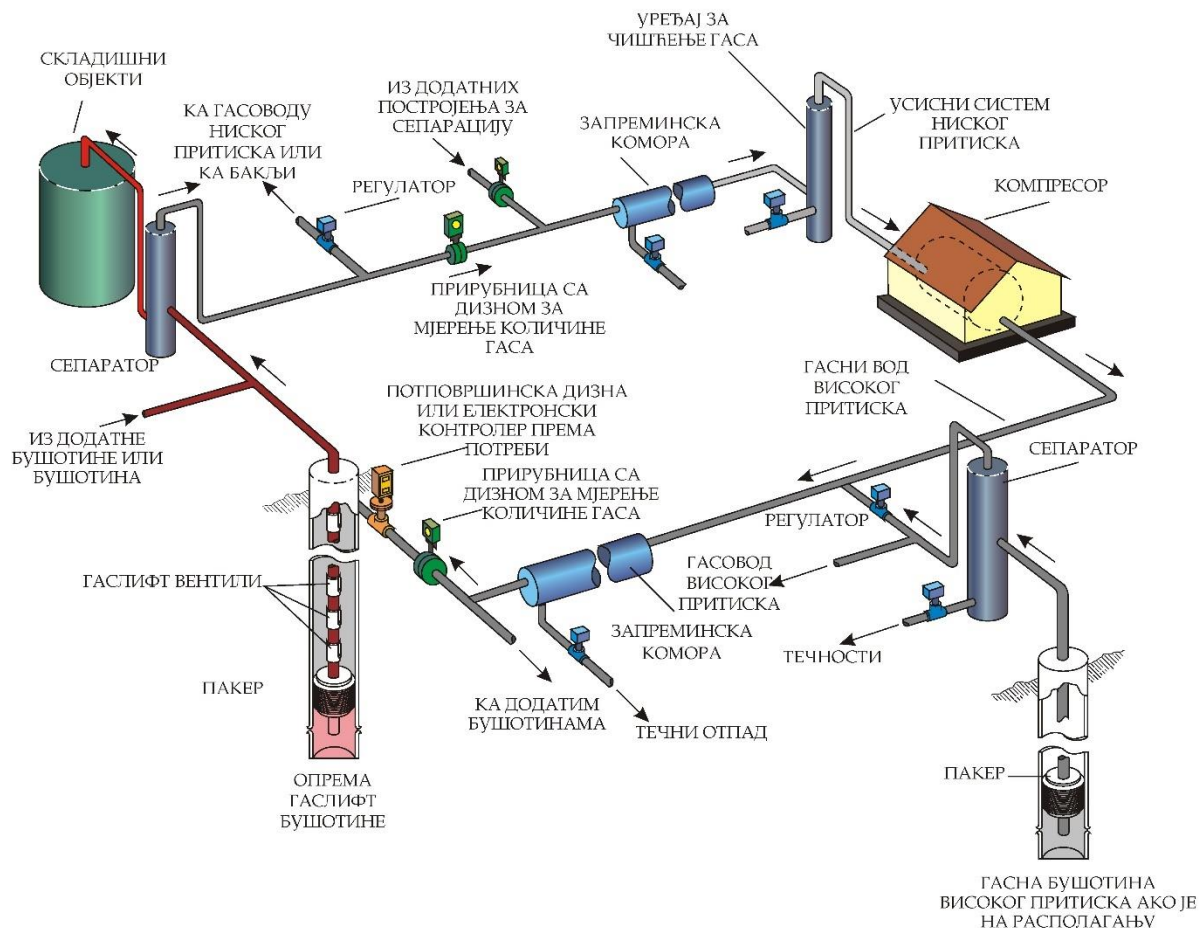
2.2. Кратак приказ механичких метода експлоатације нафте

2.2.1. Гас лифт

Karl Emanuel Lošer, рударски инжењер из Немачке, још 1797. године у својим експериментима примијенио је компримовани ваздух као методу лифтирања течности. Прва права примјена гаслифта била је у периоду од 1920-1929. године на пољу „Seminale“ у Оклахоми. У периоду од 1925. до 1945. године патентирано је око 25 000 различитих типова гаслифт вентила. Праву револуцију у нафтној индустрији је изазвао W.R.King (1940.године) уводећи вентил са комором испуњеном компримованим гасом. Овај вентил је основа свих садашњих типова вентила, са тим што се из године у годину унапрјеђују техничке особине ових вентила. (Beckwith, 2014).

Гас лифт (слика 2.4.) омогућава наставак производње флуида тако што се у бушотину утискује гас високог притиска који олакшава стуб флуида у бушотини и истискује га на површину. Уколико гас има довољан сопствени притисак за рад гас лифта, након његове припреме директно се утискује у бушотине, док се у супротном случају мора обавити његово компримовање. У зависности да ли се утискивање гаса обавља континуално или повремено и гас лифт може бити континуални или повремен. Повремени гас лифт се примјењује када количина утиснутог гаса постане сувише велика у односу на произведену количину флуида (око $250 \text{ m}^3/\text{m}^3$ нафте) (Danilović, 2003; Soleša, 2003).

Гас лифт је једини облик механичке методе који не захтјева употребу пумпе на дну бушотине. Због релативне једноставности опремања на дну бушотине, флексибилности и способности да ради у различитим условима, примјењује се често у „offshore“ бушотинама (Takacs, 2005).



Слика 2.4. Систем гаслифта (Parveen [Online])

Гаслифт је техничко - технолошки комплексна метода експлоатације, која захтјева перманентно праћење, контролу, подешавање и одржавање свих параметара рада гаслифт система. На ефикасност примјене утиче читав низ фактора, од којих су најважнији: промјене лежишних услова, карактеристика протока у стубу бушотине и систему за сабирање и припрему, параметри рада система за утискивање гаса, начин опремања бушотина, примјењене методе прорачуна, итд (Soleša, 2003).

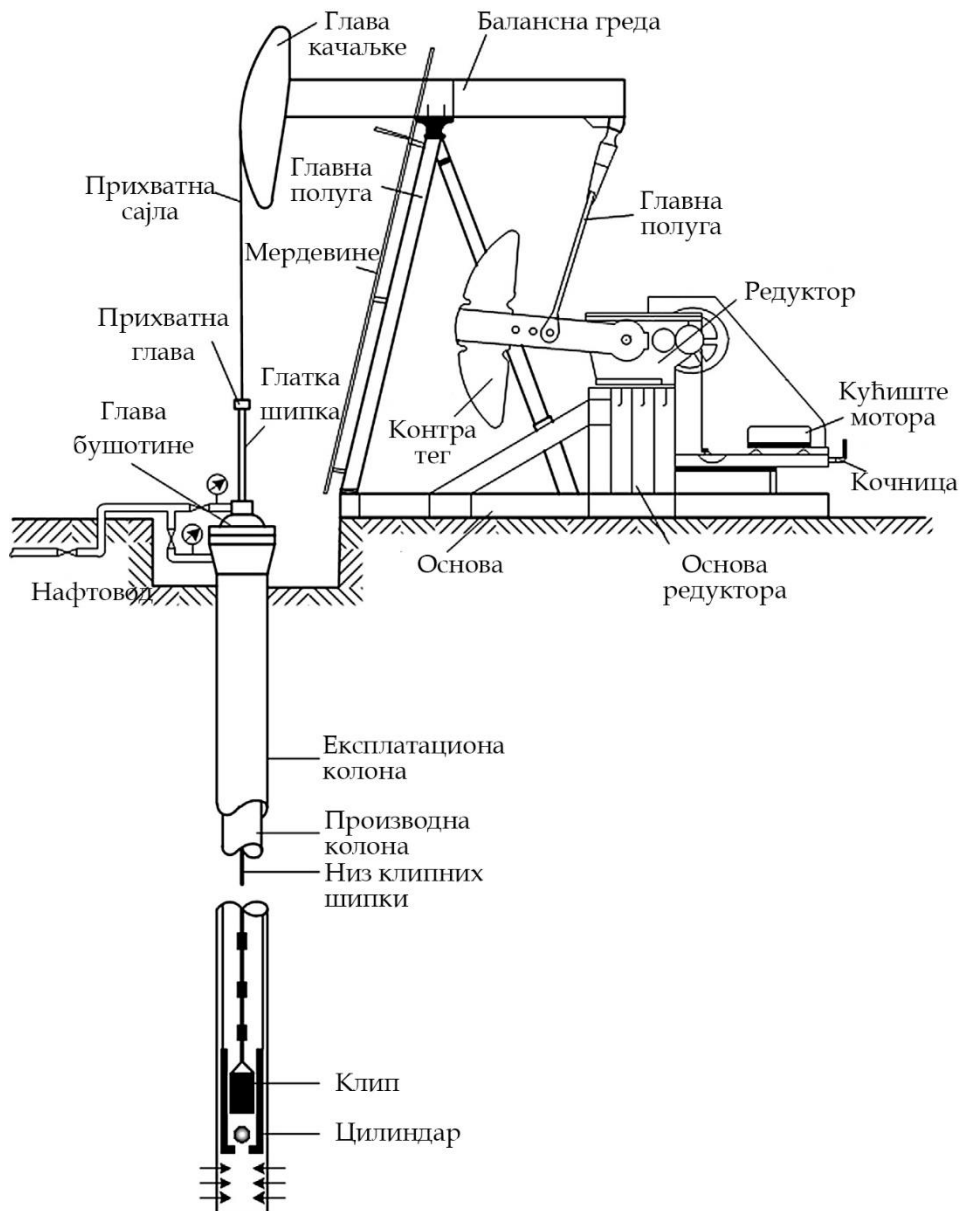
2.2.2. Дубинска пумпа са клипним шипкама

Дубинска пумпа са клипним шипкама (ДПКШ) је прва метода механичке експлоатације нафтних бушотина која је ушла у примјену (Production Technology, 2005). Механичка енергија се трансформише у потенцијалну енергију и тако омогућава повећање притиска у бушотини.

Дубинско пумпање на клипним шипкама (слика 2.5.) представља типичну клипну пумпу која ради на принципу позитивног дејства. Производња флуида обавља се подизањем стуба флуида клипом пумпе кроз производни тубинг на површину. Дубинска пумпа се покреће са површине, помоћу клипних шипки које повезују покретни дио пумпе са погонским механизмом - качаљком. Погонски механизам се може покретати електро, бензинским или гасним мотором (Danilović, 2003; Soleša, 2003).

Обртно кретање мотора се трансформише у наизмјенично кретање клипа који покреће дубинску пумпу постављену испод нивоа флуида у бушотини.

Ротационо кретање од мотора до редуктора омогућено је помоћу каиша којим се врши редукација великог броја обртаја електромотора. Дужина регулационе полуге и ход глатке шипке су променљиве унутар ограничења која зависе од конструктивних рјешења качалке. Регулација хода глатке шипке се обавља помоћу регулационе полуге, а у новије вријеме и помоћу фреквентне регулације (Takacs, 2015).



Слика 2.5. Дубинска пумпа са клипним шипкама (Takacs, 2017)

2.2.3. Електрична центрифугална пумпа

Електрична центрифугална пумпа трансформише ротациону енергију погонског мотора у потенцијалну, која потискује флуид на површину. Погонски мотор је електро мотор који са радним колом представља цјелину и заједно су монтирани на истој осовини. Помоћу кабла који је повезан са пумпом у бушотини доводи се електрична енергија потребна за њен рад (Danilović, 2003; Soleša, 2003).

Типична инсталација ЕСП система, приказана на Слика 2.6., која се спушта у бушотину на низу тубинга (производних цијеви) испод динамичког нивоа флуида, састоји се од:

- електро мотора, који се поставља на дну композиције. Његово хлађење постиже се струјањем бушотинског флуида око кућишта мотора. Напајање електричном енергијом се врши електричним каблом који се са површине кроз специјалну главу бушотине спушта дуж производне цијеви до електро мотора.
- протектора (хидро заштите) који обезбјеђује безбједан рад мотора. Најчешће се усисни дио налази на врху протектора, док се у случају високог гасног фактора уграђује сепаратор гаса, који издвајањем слободног гаса омогућује несметан рад пумпе. Издвојени гас иде кроз међупростор на површину.
- вишестепене центрифугалне пумпе, која подиже на површину флуид кроз производну цијев.



Слика 2.6 - Типична композиција ЕСП система (Добыча нефти и газа)

Између главе бушотине и контролног уређаја налази се разводни ормар у ком су спојени површински електрични каблови. Његова улога је спрјечавање могућих проблема услед тога што током експлоатације може доћи до пробоја гаса испод изолације кабла и кроз кабл гас може доспјети у контролни уређај и изазвати хаварију (Takacs, 2017).

2.2.4. Завојне пумпе

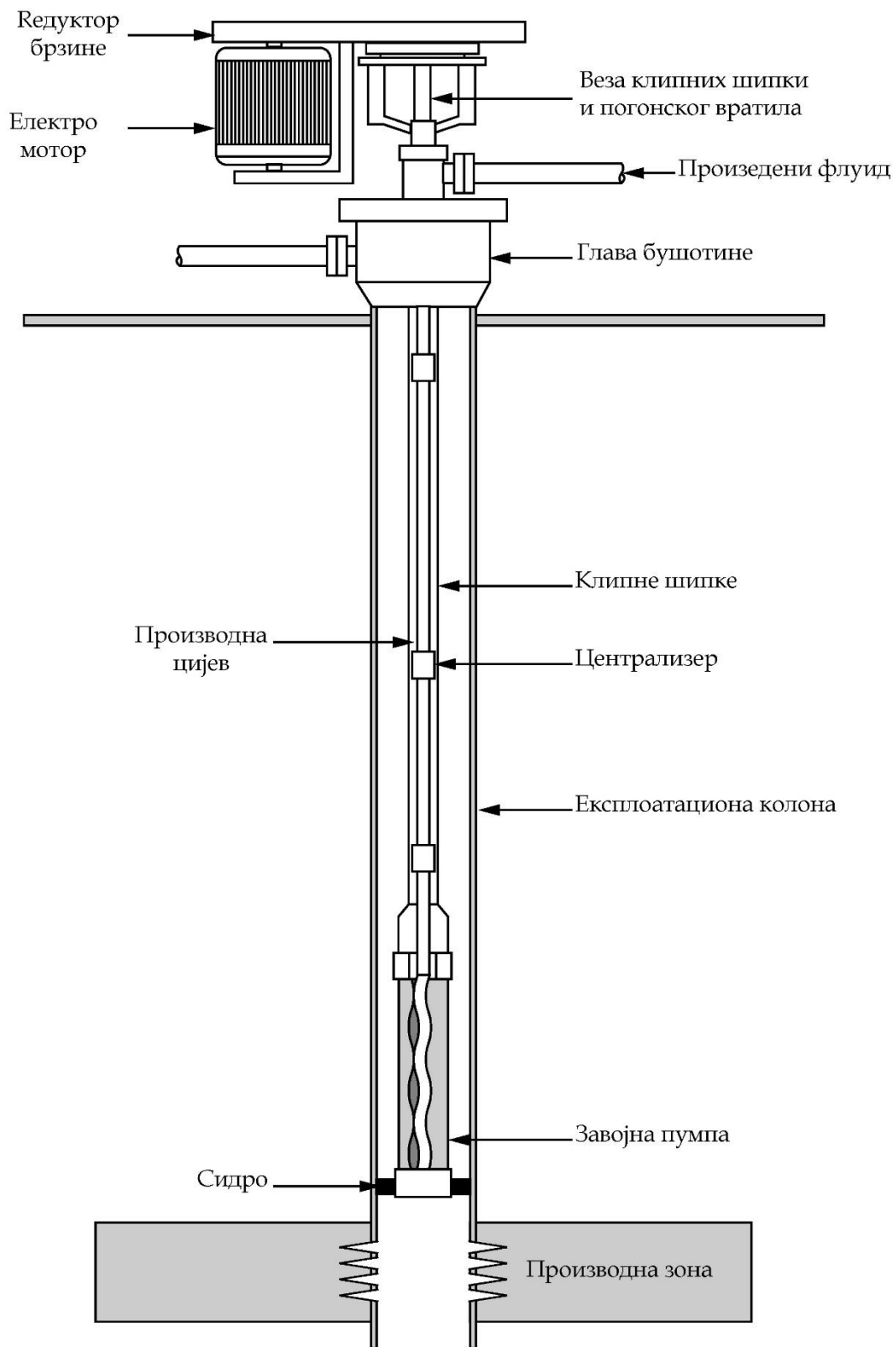
Завојну пумпу је осмислио и конструисао Frenchman René Moinea 1920 године. Развојем синтетичких еластомера ова пумпа од 1934 године почиње да се примјењује као механичка метода експлоатације нафте (Beckwith, 2014).

Завојне пумпе (слика 2.7.) омогућавају производњу флуида ротацијом завојног вретена. У односу на клипне пумпе омогућавају континуалну производњу флуида и погодне су за експлоатацију парафинских и вискозних нафти. Ротационо кретање погонског мотора на површини преноси се преко клипних шипки до завојног вретена, које узрокује појаву над притиска између њега и цилиндра потискујући флуид ка површини (Danilović, 2003; Soleša, 2003).

Завојна дубинска пумпа је запреминска пумпа. Код запреминских пумпа механичка погонска енергија претвара се у енергију притиска флуида тако што се периодично мијења запремина радног простора испуњена флуидом, а транспорт флуида се остварује периодичним понављањем тих запреминских промјена (Cholet, 1997).

Ове пумпе се састоје од завојнице, потисног елемента и кућишта. Између завојница и кућишта обртањем једне или више спрегнутих завојница ствара се покретни радни простор. Унутрашња страна кућишта је обложена еластомерима што омогућава дубљу уградњу пумпе у бушотини као и рад при високим температурама (Production Technology, 2005).

Рад завојне пумпе се остварује ротацијом ексцентричног једнозавојног челичног ротора унутар двозавојног еластомерног статора. Дужина хеликоидне завојнице статора је обично два пута већа од дужине завојнице ротора (Cholet, 1997).

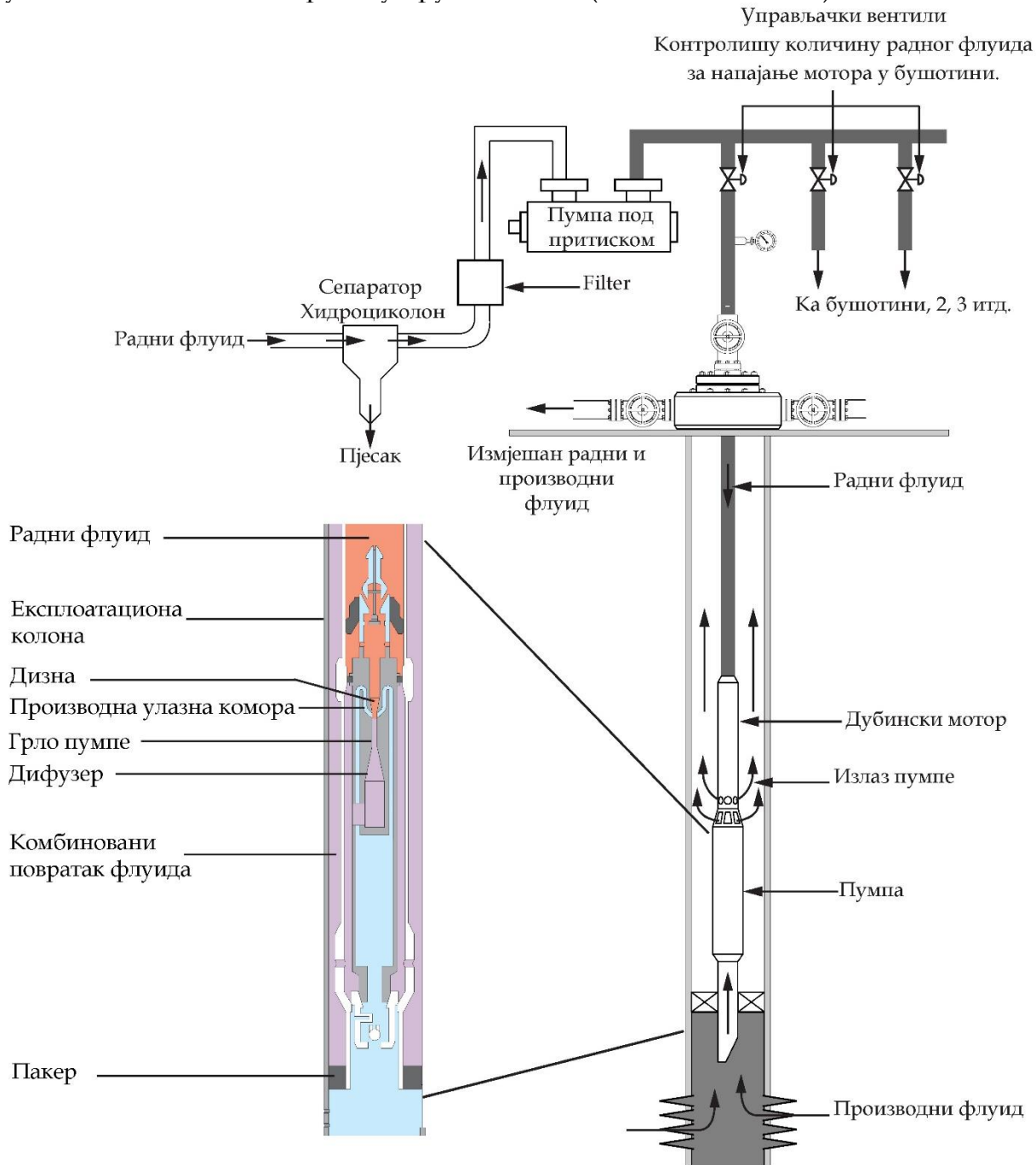


Слика 2.7. Бушотина опремљена завојном пумпом (Production Technology, 2005)

2.2.5. Хидрауличке пумпе

Хидрауличке пумпе (слика 2.8.) производњу флуида остварују кретањем клипа у цилиндру, с тим што се за његово покретање користи хидраулична енергија радног флуида. Ове пумпе су сложене конструкције и још су у фази испитивања. Погодне су за експлоатацију косих и хоризонталних бушотина, као и бушотина на великим дубинама (Danilović, 2003; Soleša, 2003).

Дубинска хидраулична пумпа је систем који се састоји од повратно-транслаторног погонског мотора и пумпе. Погонски флуид (нафта или вода под притиском) доводи се у мотор једним водом, а искоришћени погонски флуид, заједно са производним флуидом се одводи на површину другим водом (Zelić и Ćikeš, 2006).



Слика 2.8. Бушотина опремљена хидрауличном пумпом (Production Technology, 2005; Moon, 2016)

2.3. Предности, недостаци и ограничења механичких метода

Сваку механичку методу експлоатације карактеришу одређени предности и недостаци од којих зависи њихова примјенивост у специфичним лежишним условима.

У табели 2.1. дате су предности и недостаци гас лифт методе.

Табела 2.1. Предности и недостаци гас лифта (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)

Гас лифт метода	
Предности	Недостаци
Остварује високе производње код високо продуктивних бушотина	Извор гаса за утискивање није увијек на располагању
Једноставна за одржавање	Није погодна за високо вискозне нафте и појаве емулзија
Даљинска контрола утискивања гаса	Осјетљива на појаву хидрата и смрзавање гаса
Нагиб у каналу бушотине не представља проблем	Захтјева висок динамички притисак на дну бушотине
Примјенива у случајевима високе количине гаса	Међупростор изложен високим притисцима утискивања гаса.
Могућност сервисирања алатом на жици	
Толерише висок садржај чврстих честица	

У табели 2.2. дате су предности и недостаци дубинских пумпи са клипним шипкама.

Табела 2.2. Предности и недостаци дубинских пумпи са клипним шипкама (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)

Дубинске пумпе са клипним шипкама	
Предности	Недостаци
Пројектовање није комплексно	Услијед трења долази до проблема у косим бушотинама
Лако преносива погонска опрема	Појава пијеска у бушотини доводи до општећења бушотине
Једноставна за руковање	Таложјење парафина доводи до отежаног рада пумпе
Може да постигне низак динамички притисак на дну бушотине	Присуство слободног гаса смањује ефикасност пумпе
Примјенива код нафте на високим температурама и код вискозних нафти	Немогућност заштите од унутрашње корозије
Аутоматско праћење рада пумпе	Немогућност примјене у експлоатацији бушотина на мору

У табели 2.3. дате су предности и недостаци електричних уроњених центрифугалних пумпи.

Табела 2.3. Предности и недостаци електричних уроњених центрифугалних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)

Електричне уроњене центрифугалне пумпе	
Предности	Недостаци
Погодна за експлоатацију високопродуктивних бушотина	Није погодна за плитке бушотине са ниском производњом флуида
Прилагодљива условима у насељеним мјестима	Потребан комплетан ремонт да би се замјенила пумпа
Лако континуирано мјерење притиска на дну бушотине	Кабл подложен оштећењу током инсталације система
Нагиб у каналу бушотине не представља проблем	Долази до оштећења кабла при високим температурама
Оперативни проблеми (корозија, емулзије талози..) лако се рјешавају хемијским третманима	Проблеми у раду при појави чврстих честица и гаса
	Пречник експлоатационе колоне ограничавајући фактор примјене пумпе различитих пречника

У табели 2.4. дате су предности и недостаци хидрауличних пумпи.

Табела 2.4. Предности и недостаци хидрауличних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)

Хидрауличне пумпе	
Предности	Недостаци
Погодна за високопродуктивне бушотине	Потребни велики притисци у површинској инсталацији
Може да користи воду као погонски флуид	Осјетљивост на промјену притиска у површинској инсталацији
Даљинска контрола извора погонског флуида	Слободан гас смањује ефикасност пумпе
Нагиб у каналу бушотине не представља проблем	Систем за снабдијевање погонским флуидом захтјева велике мјере заштите
	Захтјева висок динамички притисак на дну бушотине

У табели 2.5. дате су предности и недостаци завојних пумпи.

Табела 2.5. Предности и недостаци завојних пумпи (Production Technology, 2005; Clegg et al., 1993; Soleša, 1999)

Завојне пумпе	
Предности	Недостаци
Висок садржај чврстих честица не представља проблем	Мала флексибилност система
Високовискозне нафте не представљају проблем	Искључена могућност аутоматског праћења рада пумпе
Висока енергетска ефикасност	Проблеми при ротирању завојнице повећавају се са дужином уградње пумпе
Не захтјева посебне услове на површини	
Једноставна инсталација и рад	

За избор оптималне методе експлоатације морају се узети у обзир ограничења примјене механичких метода. Особине флуида, лежишни услови, оперативни параметри и могући производни проблеми, укупна ефикасност која обухвата и процјену улагања разматрају се прије доношења одлуке о инвестирању у одређену методу. Особине флуида и лежишта која представљају ограничавајуће параметре примјене поједине методе су: густина, вискозност нафте и дубина. Продуктивност бушотине и евентуални производни проблеми такође су ограничавајући фактори. Поред тога, ту су и карактеристике опреме и цјелокупне инсталације, као и одржавање који могу ограничити примјену одређене методе. У табели 2.6. су дати квантитативни параметри и квалитативан опис ограничења примјене дубинских пумпи са клипним шипкама, електричних уроњених центрифугалних пумпи, хидрауличних пумпи, гас лифт методе и завојних пумпи.

Табела 2.6. Ограничења за избор механичке методе експлоатације (Lake & Clegg, 2007)

	Дубинске пумпе са клипним шипкама	Електричне уроњене центрифугалне пумпе	Хидрауличне пумпе	Гас лифт	Завојне пумпе
Типична оперативна дубина (m)	35 - 3828	348 - 3480	1740 - 3480	1740 - 3480	696 - 1566
Максимална оперативна дубина (m)	5568	5220	5220	5220	2088
Типична количина производње (m ³ /d)	0,8-267	18-5343	53-712	18-1781	0,89-392

Максимална количина производње (m³/d)	1069	7124	2672	5343	801
Типична оперативна температура (°C)	38-177	38-135	38-121	38-121	24-66
Максимална оперативна температура (°C)	288	204	260	204	121
Отпорност на корозију	Добра до одлична	Добра	Добра	Добра до одлична	Задовољавајућа
Могућност функционисања при појави слободног гаса	Задовољавајућа до добра	Лоша до задовољавајућа	Задовољавајућа	Одлична	Задовољавајућа до добра
Могућност функционисања при појави чврстих честица	Задовољавајућа до добра	Лоша до задовољавајућа	Лоша	Добра	Одлична
Густина флуида (kg/m³)	>1014,34	>1000	>1014,34	>965,85	<849,85
Нагиб уградње	<15°/100'	<10°/100'	<24°/100'	<70°	<15°/100'
Сервисирање	Ремонт или вађење цјеле композиције	Ремонт или вађење цјеле композиције	Хидрауличк и или алатом на жици	Алатом на жици или ремонтним постројењем	Ремонт или вађење цјеле композиције
Примарни извор енергије напајања	Гас или електрична енергија	Електро мотор	Електрична енергија	Компресор	Гас или електрична енергија
Укупна ефикасност система (%)	45-60	35-60	45-55	10-30	40-70

На основу података у табели може се видјети да могућност уградње на највећој дубини има ДПКШ (5568 m) док најмању дубину примјене има завојна пумпа (2088m). Примјеном ЕЦП се остварују највеће вриједности производње флуида (7124 m³/d) а завојним пумпама најниже количине (801 m³/d). С друге стране, при појави чврстих честица предност у примјени имају завојне пумпе, док највеће проблеме тада имају ЕЦП. Примјену алата на жици при ремонту тј. ремонт без вађења цијеле композиције алата имају само методе гас лифт и хидрауличне пумпе. Гас лифт метода одлично функционише при појави слободног гаса, док у том случају ЕЦП имају највише проблема. Завојне пумпе имају највећи степен укупне ефикасности, односно најмање губитке енергије при изношењу флуида на површину, док је метода гас лифта најмање ефикасна.

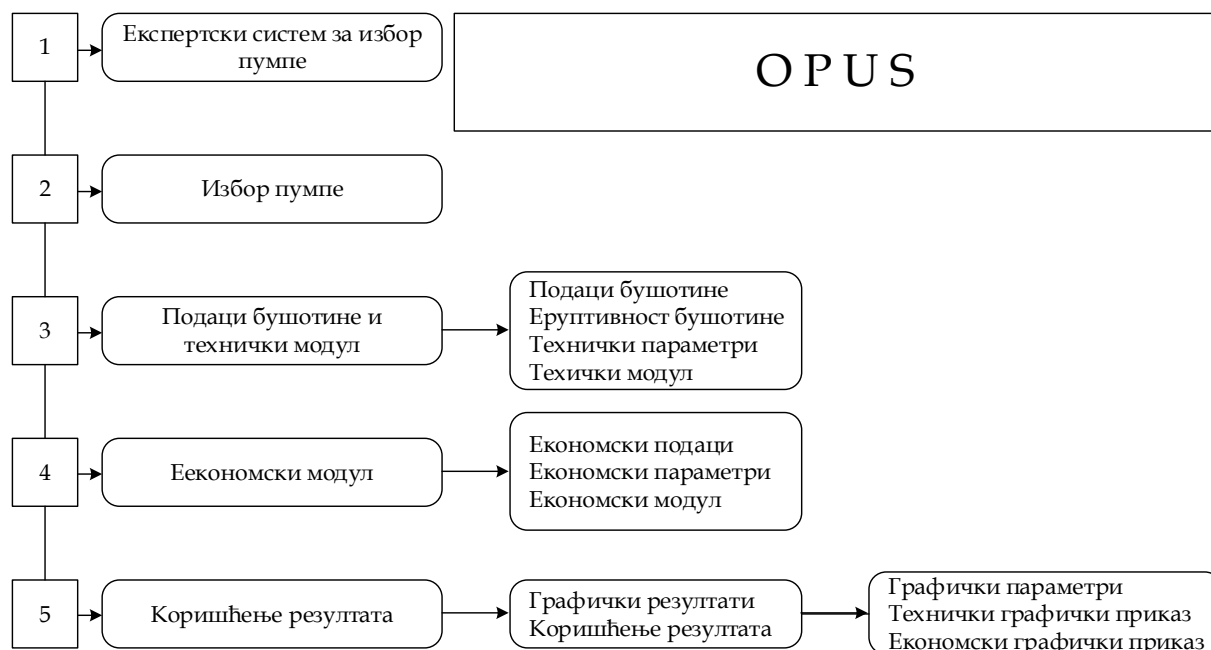
2.4. Историјат модела за избор механичких метода

Развијањем техника избора оптималних механичких метода бавило се више аутора.

Buford Neely и група аутора су 1981. године објавили сумирана опажања са панел дискусије на тему „Избор механичке методе“. Сваки од 5 експерата обрадио је по једну тему које чине и поглавља овог рада. Они су анализирали могућност примјене, предности, недостатке и ограничења неких метода механичке експлоатације (ДПКШ, ЕЦП, ХП, ГЛ). Buford Neely је изнио разматрања о лежишту и бушотини, Fred Gipson је представио дубинске пумпе са клипним шипкама, Joe Clegg одрадио тему гас лифта, Bill Carps описао електричне уроњене центрифугалне пумпе и Phil Wilson објаснио хидрауличне пумпе.

Као главне факторе узели су географска и еколошка ограничења а подређени фактори су били лежишни притисак, индекс продуктивности, карактеристике лежишних флуида, карактеристике продуктивности бушотине. Важност овог рада се огледа у томе што су у њему први пут на једном мјесту дефинисане границе примјена механичких метода експлоатације као и њихове предности и недостаци.

Е.Р. Valentin и F.C. Hoffmann су 1988. године развили паметни интегрисани систем „Optimal pumping unit search“ (OPUS) за избор механичких метода експлоатације. OPUS има могућност контроле техничких и финансијских аспеката избора механичких метода експлоатације. Избор механичких метода експлоатације се вршио на основу карактеристика сваке механичке методе, основне вриједности инвестиција и трошкова одржавања и опреме, користећи специфични компјутерски алгоритам. (слика 2.9.)

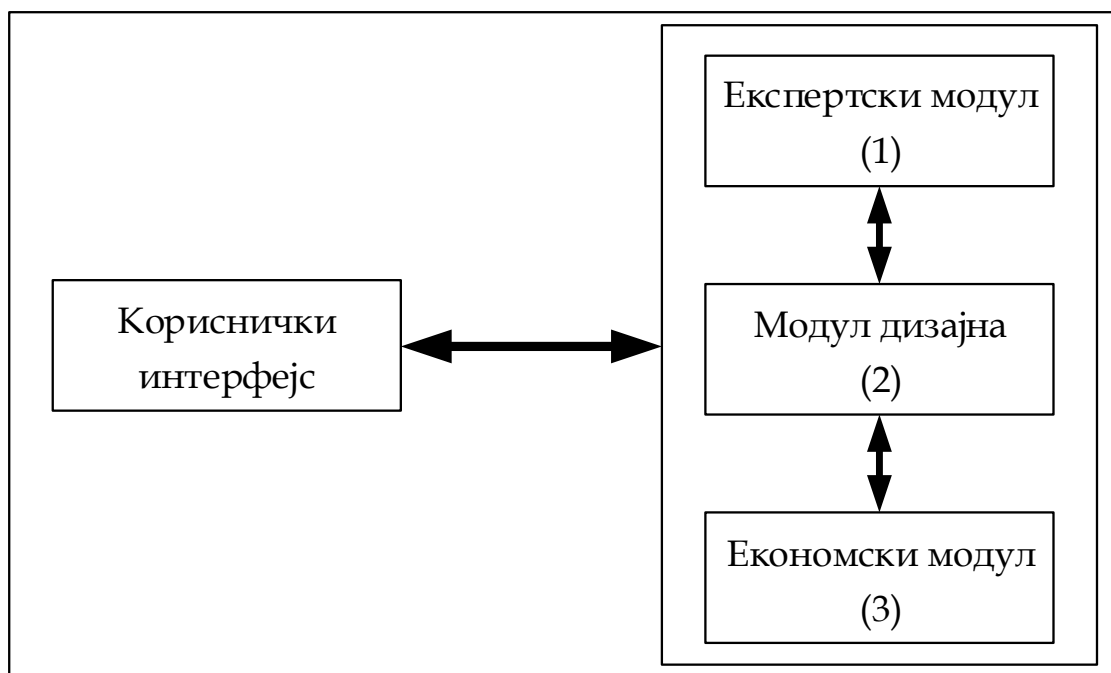


Слика 2.9. Структура OPUS система (Valentin & Hoffmann, 1988)

Joe Dunn Clegg се 1988. године бавио проблематиком избора механичких метода експлоатације и као критеријуме разматрао приход, оперативне и инвестиционе трошкове. Овај аутор је сматрао да оптимална изабрана метода треба да при најнижим оперативним трошковима постиже највећу производњу.

У раду су описане методе експлоатације нафте са свим њиховом карактеристикама и ограничењима примјене у експлоатацији.

Espin, D.A. и група аутора су 1994. године користили за избор механичких метода експлоатације експертски систем SEDLA који се састоји из три модула: модул експертског знања, искуства и теоретског знања, модул симулације пројектовања и модул економске евалуације. (слика 2.10.)



Слика 2.10. Структура експертског система SEDLA (Espin et al, 1994)

Модул експертског знања се састоји од базе знања експерата тј. знања деветорице свјетски признатих експерата из одређених области механичких метода експлоатације нафте и начина којим они бирају најбољи методу механичке експлоатације нафте, опште познатог теоретског (уџбеничког) знања и основних калкулација које се користе уобичајеној пракси.

Модул симулације пројектовања служи да се пројектују методе изабране у претходном модулу. Резултати овог модула показују перформансе бушотине за изабрану појединачну методу.

Модул економске евалуације користи детаљно пројектовано опремање, површинску и подземну опрему, снабдијевање енергијом и претходно одређену оптималну производњу да израчуна профитабилност сваке методе. Калкулације које се користе су стандардни параметри евалуације пројекта: нето садашња вриједност, интерна стопа поврата итд. и обухватају инвестиционе трошкове као и трошкове поправке и одржавања.

Lloyd R. Heinze и група аутора су 1995. године користили су „стабло одлука“ за избор механичких метода експлоатације, гдје је главни фактор дугорочна економска анализа. Остали фактори који утичу на евалуацију метода су оперативни трошкови, примарне инвестиције, трошкови током радног вијека и енергетска ефикасност. Коришћена су три корака у одлучивању кроз стабло одлука.

Први корак сужава избор на основу техничких ограничења примјене метода. Разматрају се параметри: запремински капацитет пумпе, дубина у комбинацији са жељеним динамичким притиском на дну бушотине, девијација бушотине и карактеристике лежишта.

Други корак додатно сужава избор на основу секундарних техничких ограничења, као што су температурна ограничења, обученост оперативаца, доступност главног извора енергије или флуида, површински услови (ограничења простора, бука, видљивост, безбједност) и додатна ограничења на дну бушотине (висок GLR, каменац, пијесак, корозија).

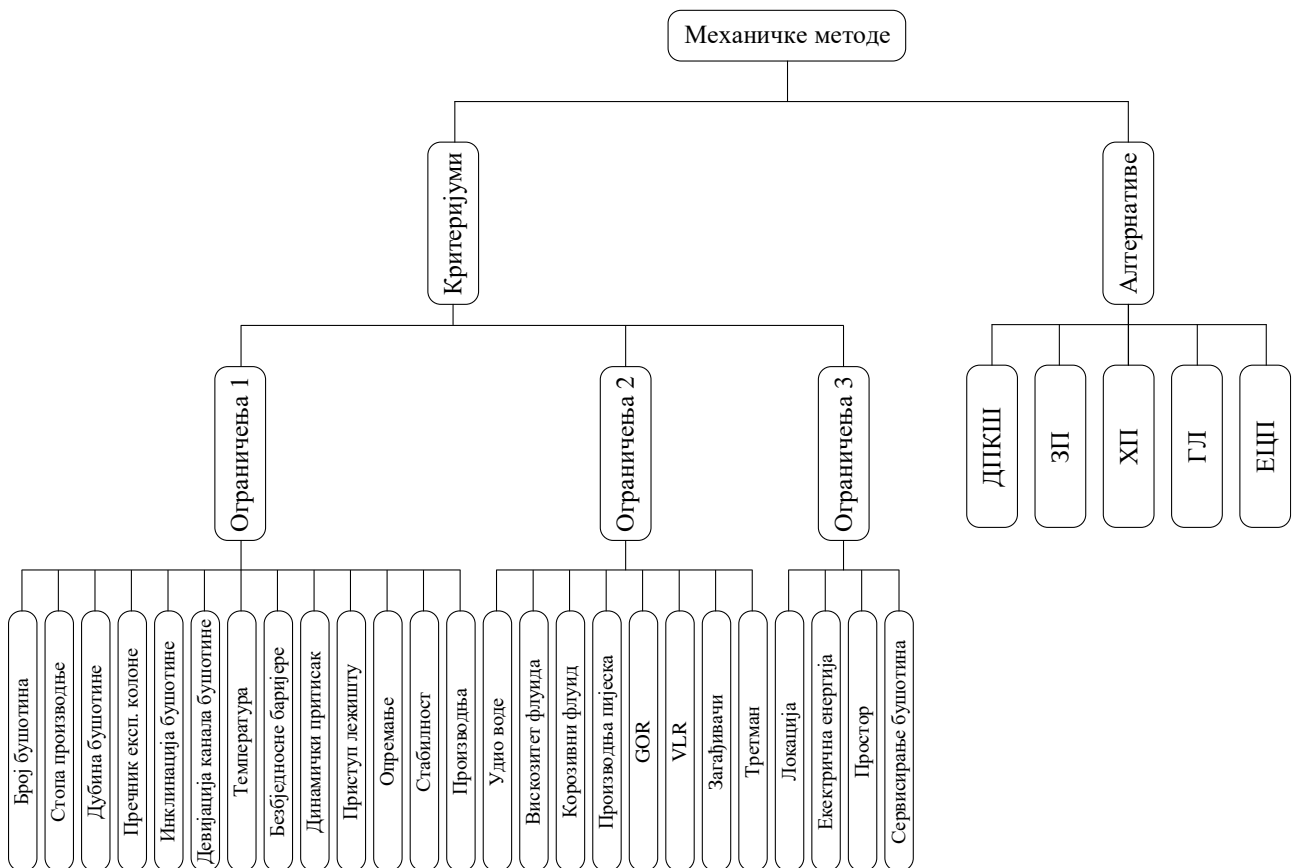
Трећи корак представља економске параметре технички примјенивих метода. За сваку кандидовану методу израчунава се садашња вриједност инвестиције током живота бушотине узимајући почетне трошкове, енергетске трошкове, трошкове поправке и одржавање.

Поређење трошкова је урађено на бази бушотина и на бази нафтног поља. Трошкови обухватају: трошкове инвестиције, трошкове ремонта и трошкове поправки, додатне трошкове особља, енергетске трошкове, трошкове одржавања, трошкове заустављања, трошкове инвентара и опште трошкове.

На крају разматрајући исход корака на стаблу, прави се коначни избор разматрањем субјективних ставки које не могу бити лако квантификоване.

Процес избора идеалне методе експлоатације је сложен и субјективан. Различити истраживачи могу одабрати различите методе користећи исте чињенице и информације. Ипак постоји процес мишљења који могу сви да прате како би се уклониле неке субјективности.

Mehrdad Alemi са групом аутора (2010, 2011, 2013) се бавио избором механичких метода експлоатације користећи више модела вишекритеријумске анализе: TOPSIS, ELECTRE, SAW и VIKOR, на примјеру нафтних поља у Ирану. Аутори су користили више сетова улазних података: ограничења производње, лежишта и бушотине; карактеристике производног флуида и инфраструктуре на површини (слика 2.11.).



Слика 2.11. Хијерархијска структура критеријума избора механичке методе (Alemi et al., 2011)

2.4.1. Пресјек

Neely се 1981. године бавио дефинисањем граничних вриједности параметара примјене механичких метода. Приоритет су му били технички параметри док је економски утицај у другом плану.

Slegg је 1988. године користио анализу свих граничних услова примјене метода експлоатације али је приоритет дао економским параметрима.

Valentin и Hoffman су 1988. године направили програм експертски систем OPUS који осим параметара самих метода и карактеристика бушотине и лежишта узима у обзир и економске аспекте (трошкове).

Espin и група аутора су 1994. године анализирали техничке карактеристике, а потом економске.

Loyd и група аутора 1995. године користе стабло одлука тако што у више корака примјењују групе критеријума. Прва два корака користе техничка ограничења док у трећем кораку се посматрају само економски параметри тј. трошкови.

Alemi и група аутора (2010, 2011, 2013a, 2013b) су за своје моделе користили три групе података: ограничења производње, лежишта и бушотине; карактеристике производног флуида и инфраструктуре на површини. Сви подаци су технички параметри, док економски параметри нису улазили у модел.

Улазни параметри могу се груписати у три групе:

1. Карактеристике лежишта, бушотине и флуида (дубина, притисак, производња, техничка ограничења механичких метода ...)
2. Услови у којима бушотина ради (локација, доступност енергије, обученост људства...)
3. Економски (капитални трошкови, оперативни трошкови и трошкови одржавања...)

Методe избора могу се подијелити према начину функционисања на три групе (табела 2.7.):

Прву групу представљају методе које користе сва ограничења карактеристика бушотине, лежишта, флуида и услова рада као техничким ограничењима механичких метода. Експерт сагледава све параметре и одлучује која је најбоља метода (Neely, 1981; Clegg et al., 1988; Loyd et al., 1995).

Друга група су експертски системи, то су програми који анализирају све параметре и техничке и економске, а у излазу дају најбољу механичку методу експлоатације. Користе се знањем експерата и неопходан је експерт да на крају анализира излаз програма и одлучи која метода је најпримјенивија (Valentin & Hoffman, 1988, Espin et al., 1994).

Трећа група метода су методе оптимизације избора механичких метода а то су модели настали промјеном вишекритеријумских анализа (TOPSIS, ELECTRE, SAW и VIKOR). На основу познатих параметара експерт даје оцјене које су улазни подаци за модел оптимизације а излаз је најадекватнија механичка метода експлоатације нафте. (Alemi et al., 2010; 2011; 2013a; 2013b)

Табела 2.7. Методе избора према начину функционисања (Crnogoras et al, 2020)

Метода избора	I група	II група	III група
Neely	x	x	
Valentin	x	x	x
Clegg	x	x	x*
Espin	x*	x*	x
Loyd	x	x	x
Alemi	x	x	

*приоритет

Анализа коришћених математичких и концепцијских модела

Евидентно је да:

- постоји више улазних параметара (I, II, III)
- код прве и треће групе параметри су мјерљиви и могу да се прикажу нумерички
- код друге групе, параметри су из различитих процеса у којима доминира неизвјесност, вишезначност, субјективност и неодређеност и могу да се прикажу само експертски.

Да би формирали модел оптимизације потребно је наведене параметре свести на исти облик у аналитичком смислу и наћи синтезни модел.

3. Увод у основе теорије фази логике

Фази (fuzzy) скупове на основу фази логике је увео Лофи А. Задех 1965. године комбинујући класичну логику и скупове дефинисане степеном припадности (Zadeh, 1965). Адекватан пријевод за ријеч фази у српском језику био би расплутан, замагљен, без јасних граница. С обзиром да се ријеч ``фази`` већ уобичајено користи у науци, и у овом раду биће коришћена изворно.

Фази логика представља генерализацију идеје класичних скупова. Код класичне логике вриједности истинитости су јасне („crisp“) тј. постоје само двије вриједности и то: истина (1) и лаж (0), док фази логика користи вриједност истинитости која је реални број између 0 и 1.

Фази логика пружа веома драгоцјену флексибилност у промишљању, што омогућава уважавање непрецизности и неизвјесности.

Једна предност нејасне логике за формализацију људског расуђивања је та што су правила постављена на природном језику.

Кроз фази логику Задех је успио да повеже језик и интелигенцију користећи математику. Ријечи боље приказују многе стварне ситуације него математичке формулације. Фази логика се често назива и умеће рачунања ријечима (Танасијевић, 2007.)

Примјена фази логике, фази алгебре, фази скупова присутно је у свим људским дјелатностима гдје је савремена наука нашла свој допринос. Фази логика представља неодвојиви дио вјештачке интелигенције. Концепт Industry4.0 у великој мјери се ослања на фази логичко закључивање у циљу формирања виртуелне реалности (Jovancic et al, 2020). Савремене машине већ увелико користе фази контролоре у процесима управљања, процесима доношења одлука. Модели оптимизације који су пројектовани у циљу управљања ризиком и сигурношћу заснивају се на фази min-max композицији (Wang, 200; Ivezic et.al., 2008; Tanasijevic et.al., 2012, Petrovic et al, 2014).

3.1. Основи концепта фази теорије

Под основним појмовима подразумијевају се особине, дефиниције, операције и принципи, који ће у наставку рада бити изложени на нивоу потребном за разумијевање фази скупова и њихову даљу примјену у циљу дефинисања параметара неопходних за избор механичких метода експлоатације нафтних бушотина .

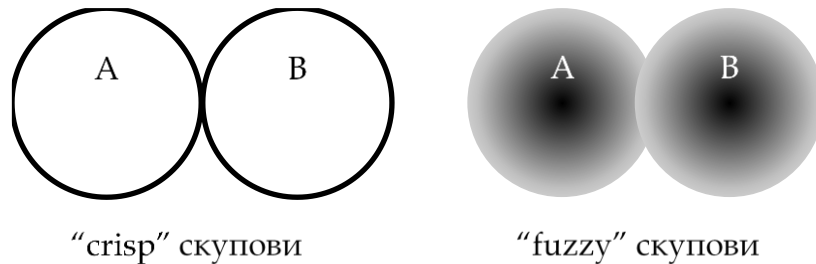
3.1.1. Појам фази скупа и фази броја

За разлику од класичне теорије скупова, која веома прецизно дефинише границу која раздваја елементе који припадају различитим скуповима, теорија фази скупова недовољно добро дефинише поменути границу. За разлику од дискретних скупова који садрже елементе са истим својствима, фази скупови садрже елементе са сличним својствима.

На примјер, уколико стандардној инжењерској комуникацији додамо изразе (скупове) као што су врло квалитетна, средње квалитетна и неквалитетна пумпа,

посљедица тога је да исту пумпу два инжењера могу да ставе у различите скупове. Са друге стране, могу да је ставе у исти скуп, али са различитим степеном припадности (нпр. 50% средње квалитетна, 30% неквалитетна).

На слици 3.1 дат је графички приказ скупова А и В (Венов дијаграм), за случај када јесу и када нису фази скупови. Интензитет сиве боје, у случају фази скупова, представља степен припадности скупу



Слика 3.1. Графички приказ скупова А и В када јесу и када нису фази скупови

Фази скуп А се дефинише као скуп уређених парова $\{X, \mu_A(x)\}$, где је X коначан скуп $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, а $\mu_A(x)$ функција припадности.

Припадност елемената x скупу А се у теорији фази скупова описује функцијом припадности $\mu_A(x)$ на следећи начин:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{ако и само ако } x \text{ припада скупу } A \\ 0, & \text{ако и само ако } x \text{ не припада скупу } A \end{cases}$$

Осим крајњих граница у теорији фази скупова, функција припадности може да узме и било коју другу вриједност из затвореног интервала $[0,1]$. Према томе, дефинисани фази скуп А је уређени пар $A = \{x, \mu_A(x)\}$, при чему је $\mu_A(x)$ степен припадности елемената x скупу А. Уколико је $\mu_A(x)$ веће, утолико има више истине у тврђењу да елемент x припада скупу А.

У претходно поменутом примјеру са квалитетом пумпе, величине $x_1 \dots x_N$ представљале би поједине пумпе. Врло квалитетна пумпа био би фази скуп А, средње квалитетна пумпа фази скуп В и неквалитетна пумпа фази скуп С. Вриједности функције припадности за ову пумпу x_3 би била: $\mu_B(x_3) = 0,5$, $\mu_C(x_3) = 0,3$, итд.

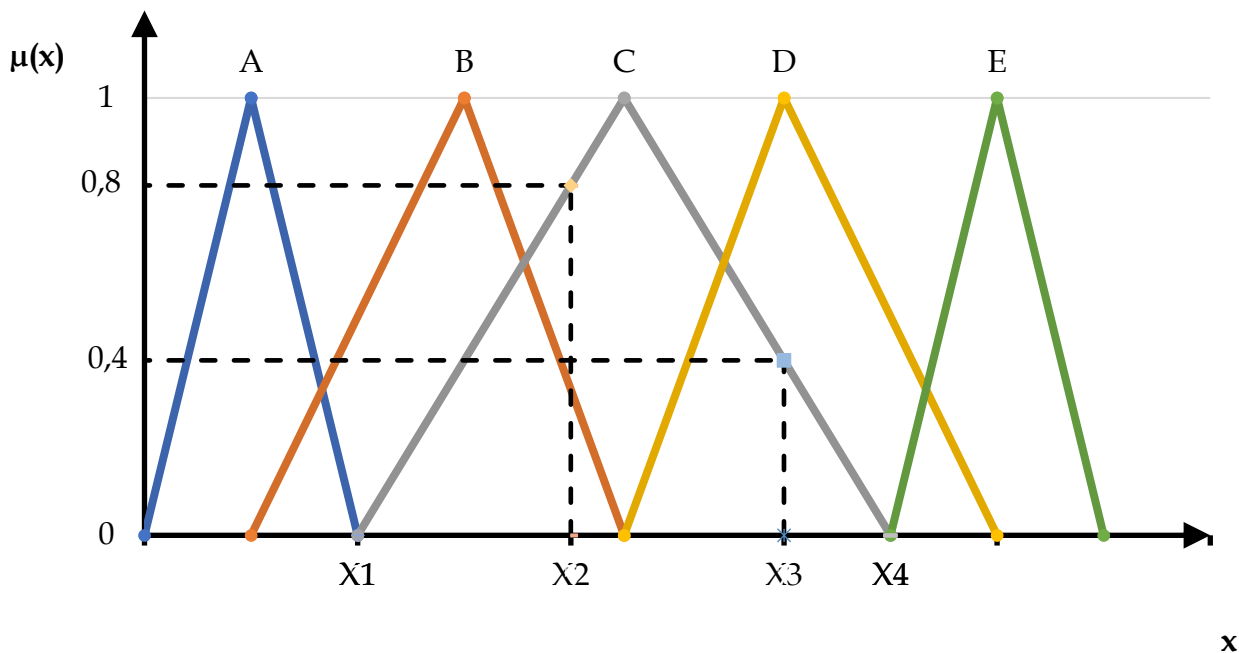
Скуп $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ је коначан скуп елемената $X_i, i=1, \dots, N$, и може да се представи и као унија елемената: x_1, x_2, \dots, x_N .

Фази скуп А дефинисан на скупу X се најчешће приказује на начин:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1, \mu_A(x_2)/x_2, \dots, \mu_A(x_n)/x_n$$

У случају да X није коначан скуп, фази скуп А дефинисан на скупу X се изражава као: $A = \int x [\mu_A(x)/x]$

Примјер фази скупа и функције припадности приказан је на слици 3.2.:



Слика 3.2. Функција припадности $\mu_C(x)$ фази скупа C

За дати примјер на слици 4.2., фази скупове A, B, C, D и E и елементе: x_1, x_2, x_3 и x_4 , може да се напише следеће:

$$A = (0/x_1; 0/x_2; 0/x_3; 0/x_4)$$

$$B = (0,5/x_1; 0,33/x_2; 0/x_3; 0/x_4)$$

$$C = (0/x_1; 0,8/x_2; 0,4/x_3; 0/x_4)$$

$$D = (0/x_1; 0/x_2; 1/x_3; 0,5/x_4)$$

$$E = (0/x_1; 0/x_2; 0/x_3; 0/x_4)$$

Основне особине фази скупова чине:

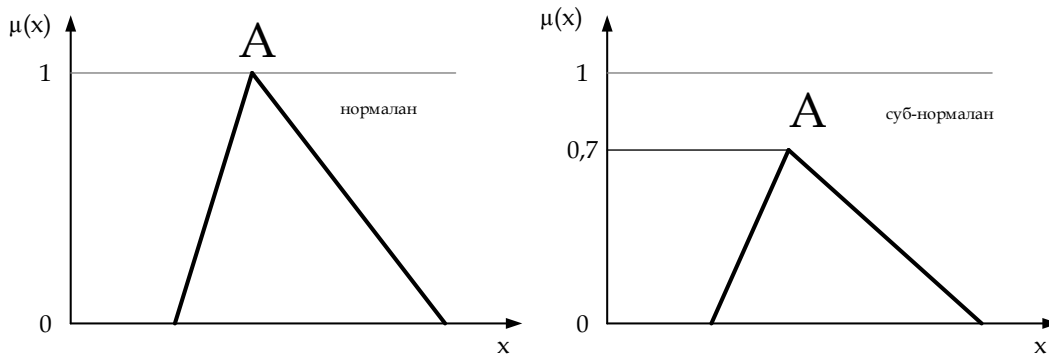
- нормалност,
- конвексност и
- кардиналност (број елемената) фази скупа.

Значења ових особина могу да се прикажу на следећи начин:

Нормалност

Нормализован фази скуп има степен припадности бар једног свог елемента једнак јединици: $\max_{x \in X} \mu_A(x) = 1$

Приказан је примјер нормализације суб-нормалног у нормални фази скуп (слика 3.3). Ако се све вриједности степена припадности подјеле са највећим степеном припадности суб-нормални фази скуп се може једноставно трансформисати у нормалан фази скуп, на слици то је 0,7.



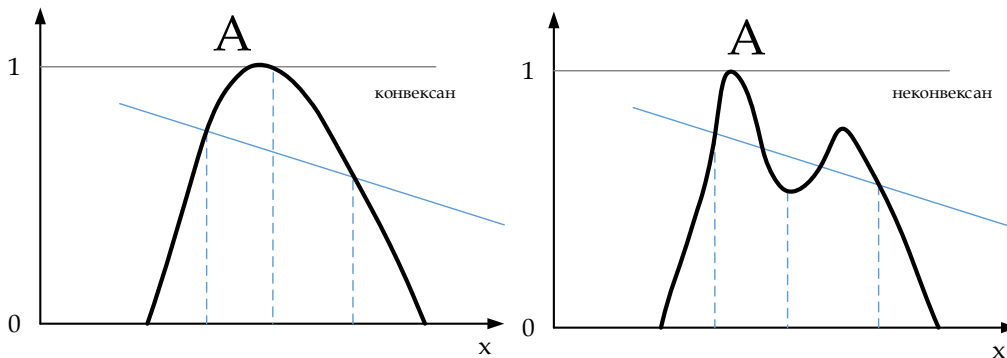
Слика 3.3. Примјер нормалног и суб-нормалног фази скупа

Конвексност

Фази скуп A је конвексан ако и само ако важи:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)), \text{ за свако } x_1, x_2 \in X, \text{ и за свако } \lambda \in [0, 1].$$

Примјер конвексног и неконвексног скупа дат је на слици 3.4.



Слика 3.4. Конвексан фази скуп и неконвексан скуп

Кардиналност

Ако је X коначан и дискретан скуп, онда се збиром степена припадности појединих елемената фази скупа изражава кардиналност фази скупа:

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x)$$

Овој дефиницији броја елемената фази скупа одговара дефиниција броја елемената дискретног скупа. Она се и своди на ту дефиницију када је A дискретан скуп, пошто се онда број елемената рачуна тако што се за сваки елемент рачуна степен припадности једнак јединици.

Релативна кардиналност фази скупа се добија када се кардиналност тог фази скупа подјели са кардиналношћу домена X тог скупа. Овај број може да покаже колико информација садржи фази скуп A (Subašić, 1997).

Релативна кардиналност фази скупа се за дискретан и коначан скуп X рачуна се као:

$$\|A\| = \frac{|A|}{|X|}$$

Операције на фази скуповима

Основне операције над фази скуповима су:

- унија,
- пресјек и
- комплемент,

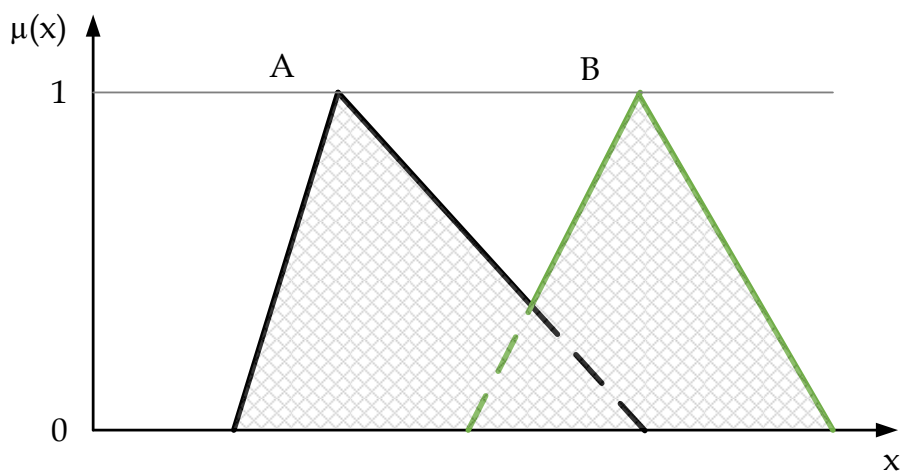
Уводе се и као модификатори функције припадности и дефинишу се помоћу следећих оператора.

Унија

Унија фази скупова A и B је фази скуп који истовремено садржи и A и B , и представљена је помоћу функција припадности:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

гдје је \vee логички оператор "или", односно оператор максимума. На слици 3.5. дата је унија фази скупова A и B .



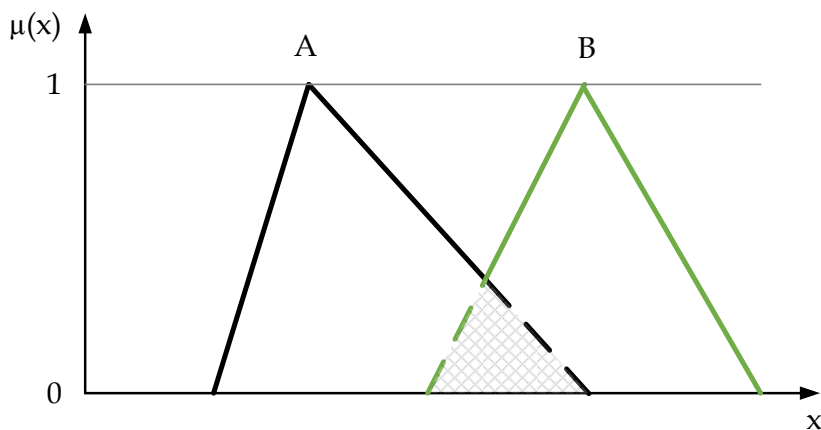
Слика 3.5. Унија фази скупова A и B

Пресјек

Пресјек фази скупова A и B је фази скуп у који се истовремено садржи и A и B , и представљен је помоћу функција припадности:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

гдје је \wedge логички оператор "и", односно оператор минимума. На слици 3.6. дат је пресјек фази скупова A и B .

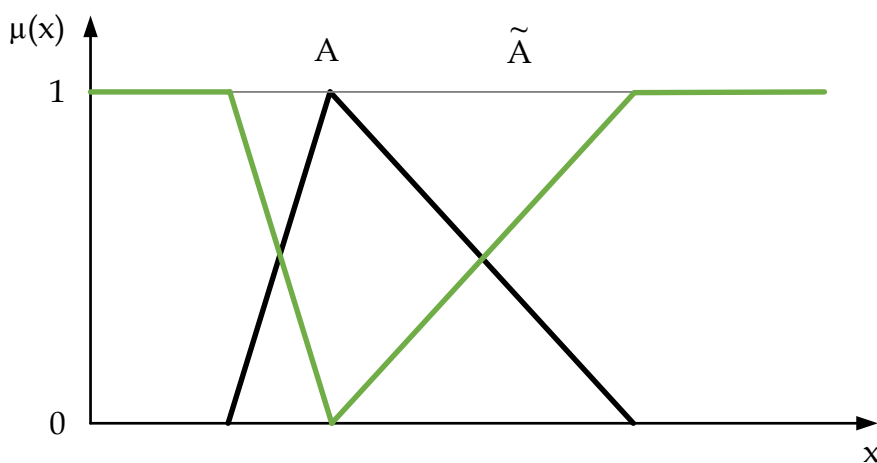


Слика 3.6. Пресјек фази скупова A и B

Комплемент

Скуп супротан фази скупу је комплемент фази скупа (слика 3.7). Комплемент фази скупа A је фази скуп \tilde{A} , такав да је:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$



Слика 3.7. Комплемент фази скупа A (Subašić, 1997)

Поређење фази скупова врши се на основу поређења њихових функција припадности.

Поређењем функција припадности фази скупова врши се и њихово поређење, на следећи начин:

једнакост фази скупова

$$A \text{ и } B: \quad A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

инклузија (укључење) фази скупова:

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

Може се примјетити да је за фази скупове као и за дискретне скупове највећи број особина исти (Ross, 2010):

идемпотентност:

$$A \cup A = A,$$

$$A \cap A = A$$

комуникативност:

$$A \cup B = B \cup A,$$

$$A \cap B = B \cap A$$

асоцијативност:

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C,$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

дистрибутивност:

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C),$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

двострука негација:

$$A = \tilde{A}$$

Де Морганов закон:

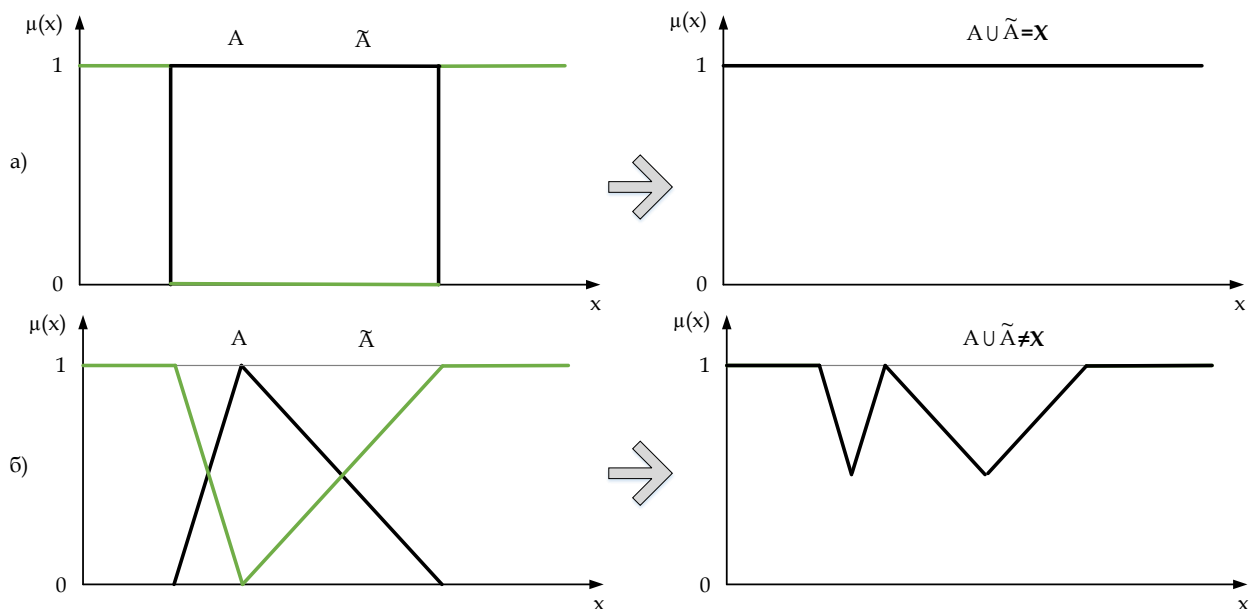
$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$$

$$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

Постоје и двије особине које не важе за дискретне, а важе за фази скупове:

- закон искључења трећег: $A \cup \tilde{A} \neq X$
- закон контрадикције: $A \cap \tilde{A} \neq \emptyset$

Ове двије особине су основа специфичности теорије фази скупова у односу на класичне скупове. На слици 3.8. приказана је илустрација закона искључења трећег за дискретне скупове (а), и илустрација која показује да овај закон не важи за фази скупове (б). У првом случају скуп надопуњује својим комплементом до цјелог скупа, док у другом случају се не допуњује (Subašić, 1997).

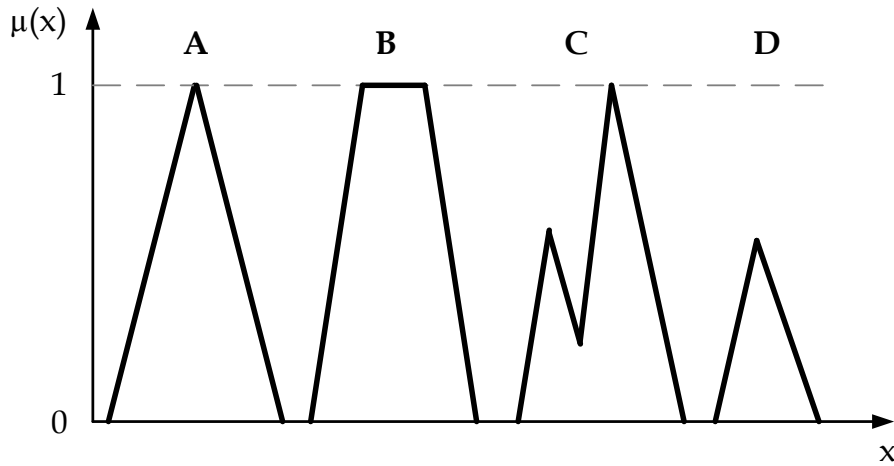


Слика 3.8. Закон искључења трећег: класична теорија скупова (а) и фази теорија скупова (б)

Фази број

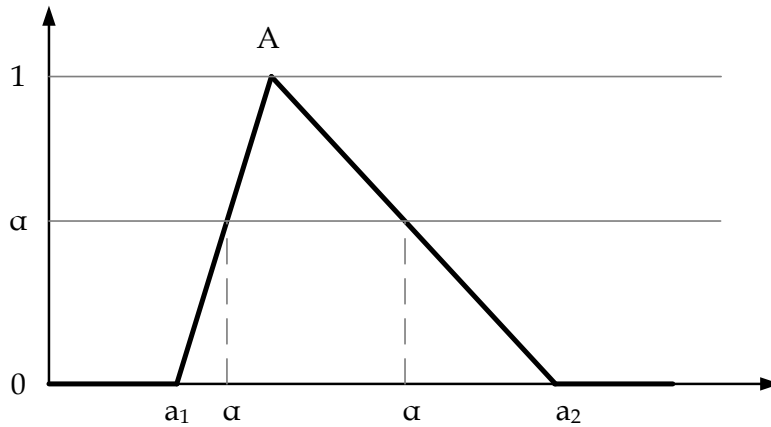
Један од основних концепата фази система је фази број. Фази број A је фази скуп представљен функцијом припадности $\mu_A(x)$ са особинама: дефинисана је над скупом \mathbb{R}_e , конвексна је, нормална је и дио по дио је непрекидна функција (Subašić, 1997).

На слици 3.9. је дат примјер фази скупова који испуњавају услове да буду фази бројеви (A и B) и оне који не испуњавају (C и D). Скуп C не испуњава услов конвексности док скуп D не испуњава услов нормалности.



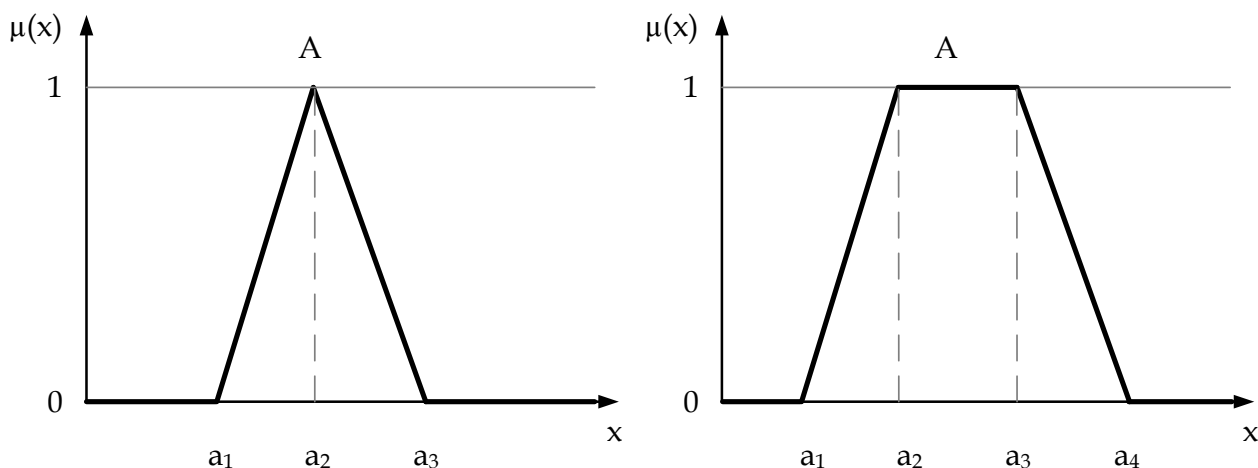
Слика 3.9. Фази скупови који јесу (A и B) и који нису фази бројеви (C и D) (Klir , 1997)

Фази број представља нормализован и конвексан фази скуп који карактерише интервал повјерења $[a_1, a_2]$ и степен сигурности α . На слици 3.10. приказан је фази број A и одговарајући интервал повјерења и степен сигурности.



Слика 3.10. Фази број, интервал повјерења и степен сигурности

Фази бројеви могу бити троугласти и трапезоидни (слика 3.11). Троугласти фази број, условљен је обликом функције припадности и окарактерисан је следећим обликом $A=(a_1, a_2, a_3)$. Трапезоидни фази бројеви, окарактерисани следећим обликом $A=(a_1, a_2, a_3, a_4)$.



Слика 3.11. Троугласти и трапезоидни фази број А

3.1.2. Лингвистичка вриједност и лингвистичка промјенљива

Лингвистичка промјењива (фази промјењива) је промјенљива чије су прихваћене вриједности ријечи или ријечи природног језика.

Да би ближе описали вриједности лингвистичке промјењиве и добили сложене лингвистичке изразе често се користе модификатори (веома, више, мање и сл.) и везници.

Зависно од употребе и намјене лингвистички модификатори се дефинишу, због чега се и употребљава велики број различитих лингвистичких модификатора и везника.

Да би на најбољи начин апсорбовали феномени који се анализирају треба дефинисати називе фази скупова.

Оператори модификације:

Нека је функција припадности $\mu_A(x)$, А представља фази скуп; $x \in X$, гдје је X универзални скуп и $A \subset X$.

Модификатори се могу дефинисати на следећи начин, за прву групу (Subašić, 1997):

1. Множење скаларом:

$$\mu_{aA}(x) = a\mu_A(x); \quad a > 0, a \in Re \text{ и } \forall x \in X \quad a\mu_A(x) \leq 1.$$

2. Степеновање:

$$\mu_{A^a}(x) = (\mu_A(x))^a; \quad a > 0, a \in Re$$

3. Нормализација:

$$NORM(A) = \frac{A}{\sup_x \mu_A(x)}; \quad \sup_x \mu_A(x) \neq 0$$

4. Концентрисање:

$$CONC(A) = A^2; \quad \mu_{CONC(A)} = (\mu_A(x))^2$$

5. Проширење:

$$DIL(A) = A^{0,5}; \quad \mu_{DIL(A)} = (\mu_A(x))^{0,5}$$

Друга група оператора модификације се може дефинисати на следећи начин:

1. Појачавање контраста: $\text{INT}(A)$;

$$\mu_{\text{INT}(A)} = \begin{cases} 2(\mu_A(x))^2 & \text{за } 0 \leq \mu_A(x) \leq 0,5 \\ 1-2(1-\mu_A(x))^2 & \text{за } 0,5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases}$$

2. Фазификација фази скупа A се врши помоћу другог фази скупа $K(x_i)$ и дефинише се на следећи начин:

$$\text{SF}(A; K) = \sum_i \mu_A(x_i) K(x_i),$$

гдје се $K(x_i)$ назива језгро фазификације.

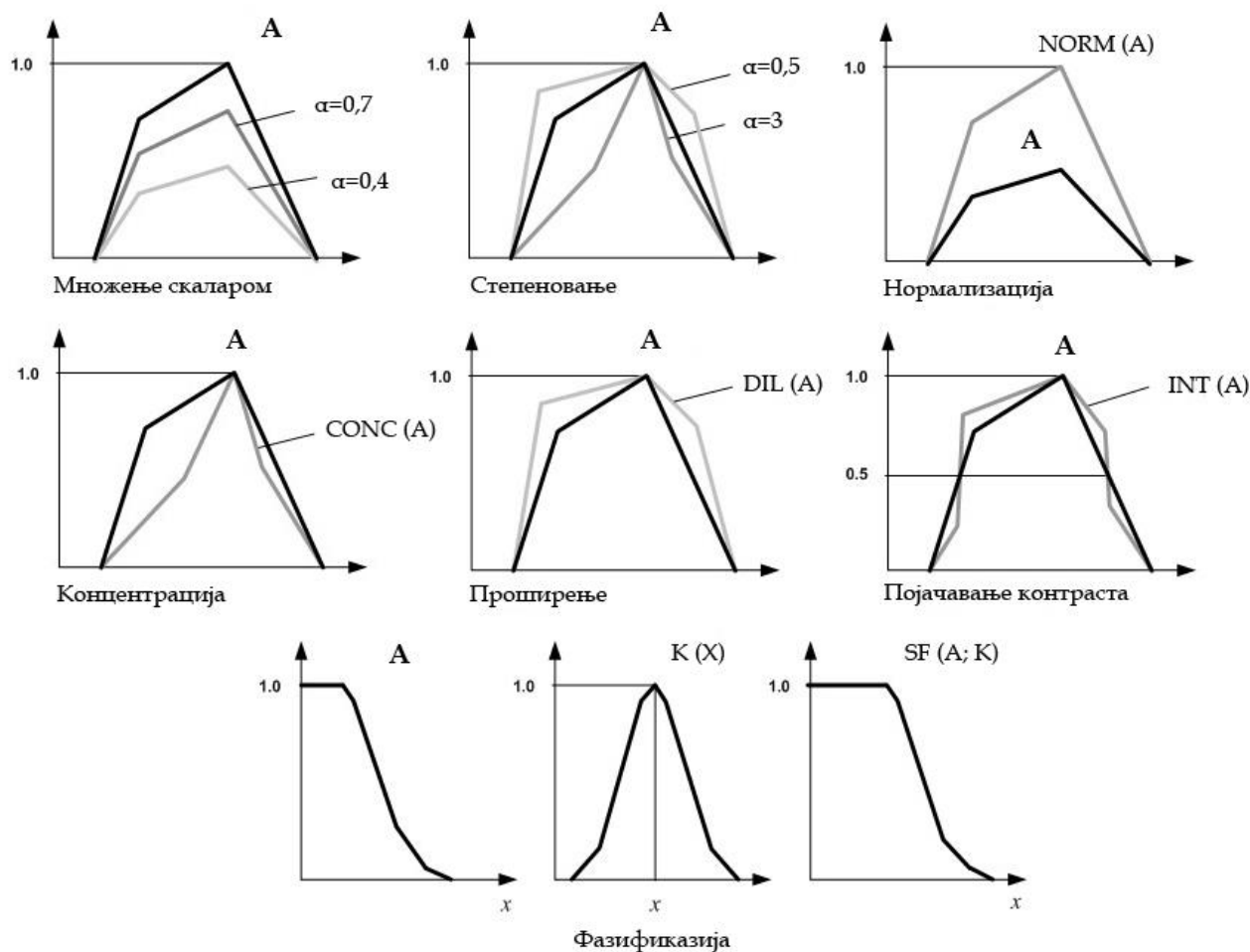
Наведени опште прихваћени модификатори лингвистичких вриједности се придружују оператору модификације и то најчешће на следећи начин:

- веома $A = \text{CONC}(A)$;
- мање-више $A = \text{DIL}(A)$;
- понешто $A = \text{NORM}(A \text{ и не}(\text{VEOMA}(A)))$;
- прилично $A = \text{NORM}\{\text{INT}(A) \text{ и не } \text{INT}[\text{CON}(A)]\}$;
- изузетно $A = \text{NORM}(\text{INT}(A))$.

У лингвистичким изразима дефинишу се везници (и, или, не) на следећи начин:

- $A \text{ и } B = A \cap B$;
- $A \text{ или } B = A \cup B$;
- не $A = \tilde{A}$.

На слици 3.12. дати су оператори модификације.



Слика 3.12. Оператори модификације (Subašić, 1997)

Тврдње које садрже лингвистичке вриједности представљају се кроз поступак фази пропозиције, који је најзахтијевнији корак при формирању финалне оцијене на темељу фази скупова. Захтјевност се огледа у комплексности систематизације знања, искустава, затим одговарајућих мјерења и сл.

3.1.3. Фази релације

Непрецизне односе између двије величине описују фази релације.

Нека су X и Y два универзална скупа. Тада је $R = \{(x, y), \mu R(x, y) \mid (x, y) \in X \times Y\}$ бинарна фази релација. $\mu R(x, y)$ је димензионална функција припадности (Zimmermann, 1996).

3.1.3.1. Композиција фази релација

Нека су дате двије бинарне фази релације R_1 дефинисана у $X \times Y$ и R_2 дефинисана у $Y \times Z$. Над производом $X \times Z$ дефинисана је композиција релација R_1 и R_2 и означава се са $R_1 \circ R_2$.

$$R_1 \circ R_2 = \{(x, z); (x, y) \in R_1, (y, z) \in R_2 \mid x \in X; y \in Y; z \in Z\}.$$

На основу датих релација R_1 и R_2 композиција двије релације може се посматрати као

израчунавање нове релације $R_1 \circ R_2$.

Max-min композиција је најпрепознатљивији и најчешће употребљавани принцип фази композиције. За дате опште услове композиција релација R_1 и R_2 дефинисана је на следећи начин:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ \left[(x, y); \max_y \min (\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)) \right] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\}.$$

Односно за конкретна израчунавања:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \left\{ \bigvee_y [(\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z))] \mid x \in X; y \in Y; z \in Z \right\}$$

- гдје су оператори: $\vee = \max$ и $\wedge = \min$.

Представљајући R_1 и R_2 у матричном облику, израчунавање веома личи на матрично множење. Знаци за множење и сабирање се мијењају са \vee и \wedge , респективно. То је разлог због ког се *max-min* композиција назива и *max-min* производ.

Нека су R_1, R_2, R_3 бинарне релације на $X \times Y$ и $Y \times Z$ и $Z \times W$. Тада важи следеће особине *max-min* композиције (Subašić, 1997):

асоцијативност:

$$R_1 \circ (R_2 \circ R_3) = (R_1 \circ R_2) \circ R_3;$$

дистрибутивност у односу на унију:

$$R_1 \circ (R_2 \cup R_3) = (R_1 \circ R_2) \cup (R_1 \circ R_3);$$

слаба дистрибутивност у односу на пресјек:

$$R_1 \circ (R_2 \cap R_3) \subseteq (R_1 \circ R_2) \cap (R_1 \circ R_3);$$

МОНОТОНОСТ:

$$R_2 \subseteq R_3 \Rightarrow (R_1 \circ R_2) \subseteq (R_1 \circ R_3)$$

Мах-производ композиција може да се дефинише примјеном исте нотације као и код *max-min* композиција.

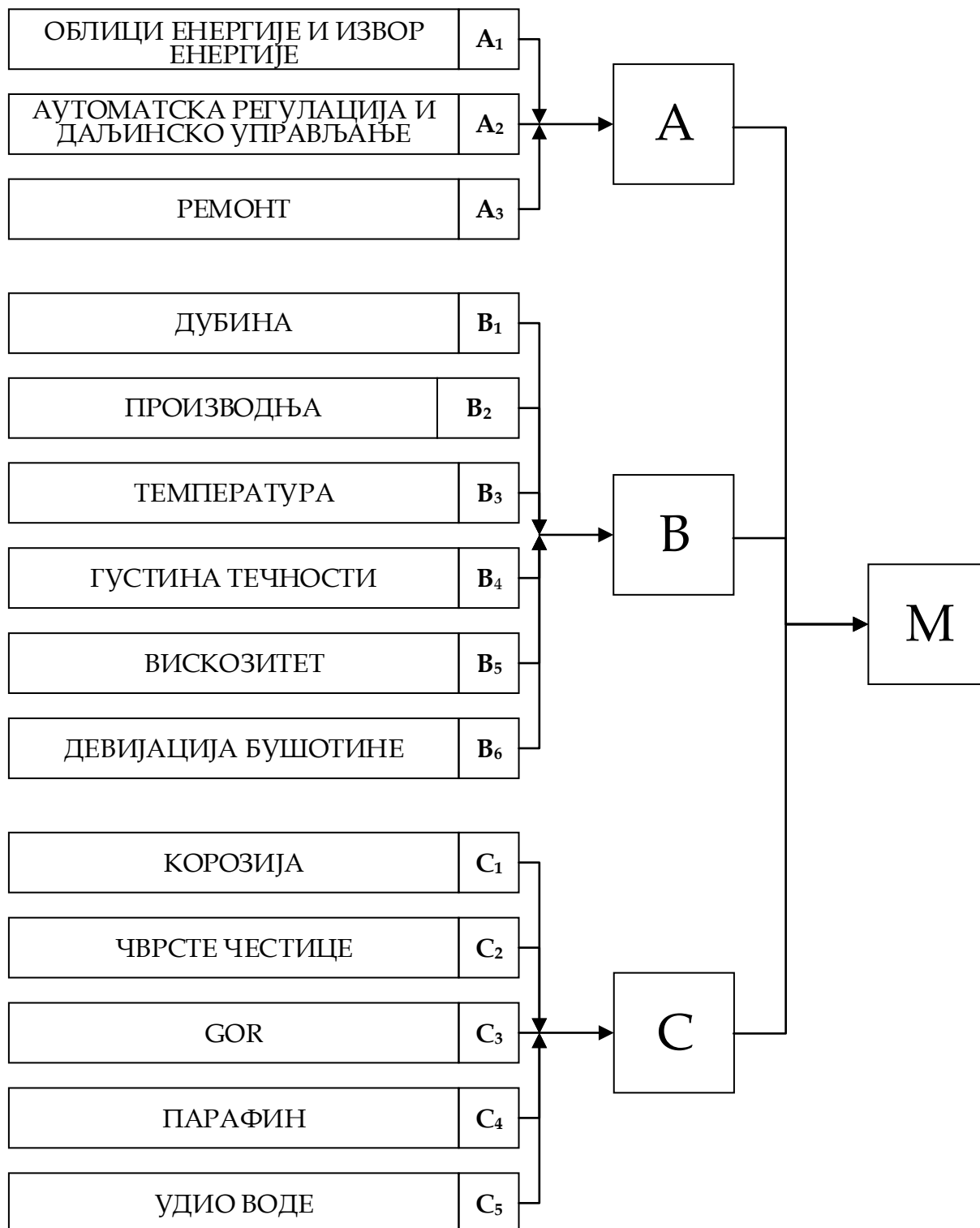
$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \bigvee_y [\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z)]$$

4. Дефинисање параметара и индикатора за избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина

Избор механичке методе може да се сагледа са два аспекта. Први аспект представљен је кроз процес оптимизације, гдје је као исход усвојен феномен употребљивост („serviceability“) као свеобухватни индикатор. Поступак оптимизације сам по себи представљен је кроз анализу више критеријума и индикатора и дефинисање функције циља којом се дефинише исход оптимизације. Други аспект представљен је кроз процес доношења одлуке. Циљ овог аспекта је дефинисање ограничења на основу којих би се дала препорука и перспектива коришћења одговарајуће оптималне механичке методе. У овом моделу, појмови параметар и индикатор имају хијерархијску структуру. Параметри представљају улазне величине (феномене) који у теоријском смислу утичу у већој или мањој мјери на ниво употребљивости одређене методе експлоатације. Даље, параметри се могу груписати према својим карактеристикама, функцији и природи. Овако груписани се зови индикатори. При дефинисању параметара неопходних за избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина анализирани су подаци о бушотини који се користе у претходно поменутом (поглавље 2.2), досада развијеним моделима. На овај начин, издвојено је 11 параметара (слика 4.1). Циљ је био: да се на основу анализе већег броја случајева из техничке праксе добије структура улазних података који покривају што већи број реалних случајева; да се дефинише структура формирања исхода у поступку оптимизације. Улазни параметри су хибридног карактера, неки се добијају експертском анализом (А индикатор, слика 4.1) а неки на основу емпиријске анализе (В, С индикатори, слика 4.1) (Crnogorac et al, 2020).

Параметри који могу да се сагледају кроз три структурне групе, односно кроз три индикатора су (слика 4.1):

- инфраструктурни индикатор (А), који се односи на следеће параметре: (А₁) облици енергије и извор енергије, (А₂) аутоматска регулација и аутоматско управљање, (А₃) ремонт;
- физичко-геолошки индикатор (В), односно: (В₁) дубина, (В₂) производња, (В₃) температура, (В₄) густина флуида, (В₅) вискозитет, (В₆) девијација бушотине;
- индикатор производног флуида (параметри оперативних проблема) (С) односно: (С₁) корозија, (С₂) чврсте честице, (С₃) GOR, (С₄) парафин, (С₅) удио воде.



Слика 4.1. Структура улазних параметара модела (Crnogorac et al, 2020)

4.1.1. Анализа улазних параметара индикатора А

Параметар А₁ представља облик и извор енергије. Експерт даје оцјену у зависности који облик енергије се користи колико је близу извор те енергије и могућност примјене другог извора енергије.

Фази скупови се према пропозицији ближе дефинишу на следећи начин и предочавају аналитичару.

$A_1 = \{ \text{веома низак ниво доступности енергената без могућности супституције; низак ниво доступности са могућношћу дјелимичне супституције; средњи ниво доступности са могућношћу потпуне супституције на захтев; висок ниво доступности енергената уз повремене предвидиве несташнице; веома висок ниво доступности без потребе за било какве додатне инвестиције} \};$

Параметар A_2 представља ниво аутоматске регулације и аутоматског управљања. Експерт даје оцјену у зависности од постојања аутоматске регулације и управљања и могућности примјене истих.

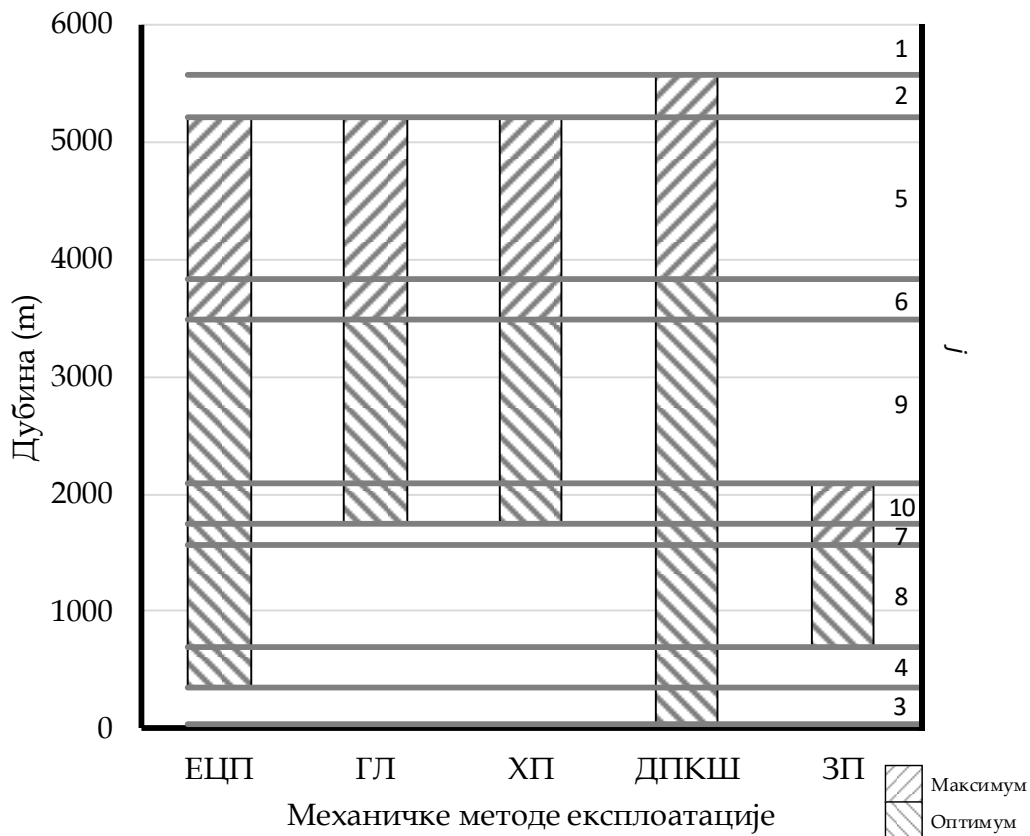
$A_2 = \{ \text{потпуно мануелно управљање; доминантно мануелно уз аутоматизоване поједине операције; полу-аутоматско; доминантно аутоматско уз споредне мануелне команде; потпуно аутоматизовано} \};$

Параметар A_3 представља ремонт („maintainability“). У себи садржи могућност подршке („supportability“) и конструкцијске предиспозиције за ремонт. Експерт даје оцјену од у зависности од географског положаја бушотине и самих карактеристика бушотине тј. од могућности брзог и једноставног сервисирања проблема у бушотини.

$A_3 = \{ \text{резервни дјелови, алата и људство потпуно дислоцирани, одржавање на захтев; присутно корективно одржавање; присутно корективно и сервисно одржавање; планско превентивно одржавање; проактивно одржавање} \};$

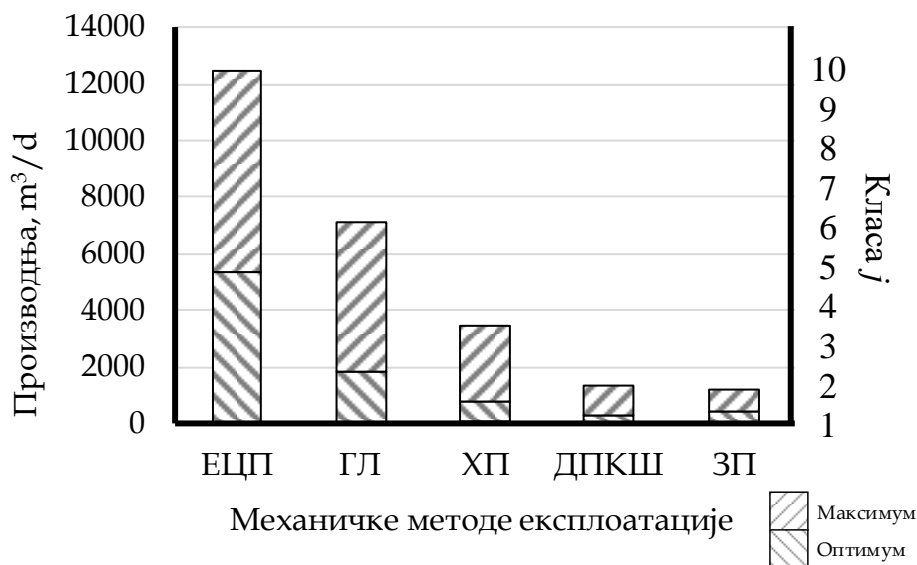
4.1.2. Анализа улазних параметара подскупова В и С

Параметар B_1 представља дубину бушотине. Вриједности дубине бушотине се преводе у оцијене на основу граничних вриједности оптималне и максималне дубине бушотине. Свака од посматраних механичких метода експлоатације има препоручену дубину (слика 4.2.):



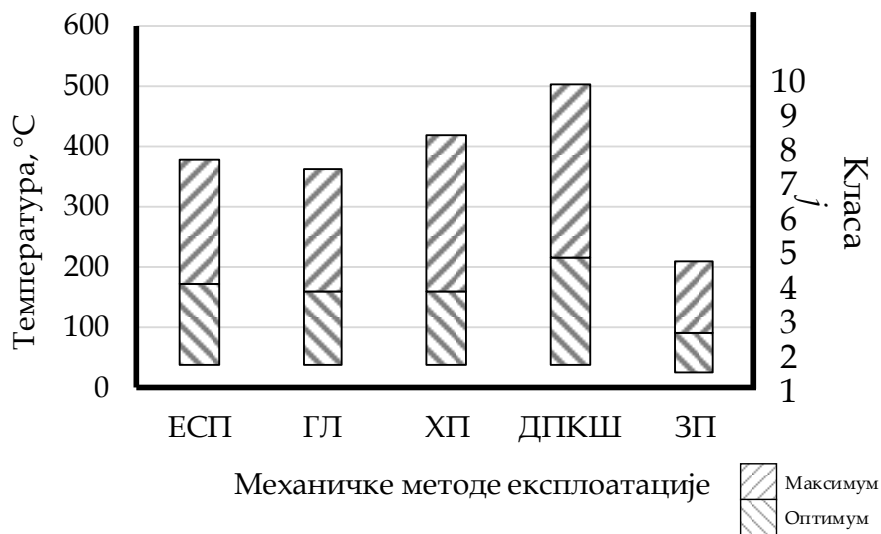
Слика 4.2. Оптималне и максималне дубине примјене механичких метода експлоатације

Параметар B_2 преставаља производњу бушотине. На основу оптималне и максималне количине флуида који свака од посматраних механичких метода може да произведе види се да што је већа количина произведеног флуида то се мањи број метода може примјенити. На основу тога вриједности производње се преводе у оцијене (слика 4.3.).



Слика 4.3. Оптималне и максималне количине флуида по механичким методама експлоатације нафте

Параметар V_3 представља температуру бушотине. На основу оптималне и максималне температуре флуида при којој се свака од посматраних механичких метода може примјенити види се да што је већа температура флуида то се мањи број метода може примјенити (слика 4.4.).



Слика 4.4. Оптималне и максималне температуре по механичким методама експлоатације нафте

Параметар V_4 представља густину производног флуида. Вриједности густине флуида се преводе у оцијене на основу подјеле нафте према густини: (Kostić A., 2015)

лаке	- 0,85 g/cm ³
средње тешке	0,85 - 0,93 g/cm ³
тешке	0,93 - 1,00 g/cm ³
веома тешке	1,00 - g/cm ³

Параметар V_5 представља вискозитет производног флуида. Вриједности вискозитета флуида се преводе у оцијене на основу подјеле угљоводоника према вискозитету (релативни): (Kostić A., 2015)

кондезати	0,5-1
бензин	0,6
керозин	2
лаке нафте	2-100
тешке нафте	100-1000

Параметар V_6 представља девијацију бушотине. Са порастом угла девијације бушотине смањује се број механичких метода које се могу користити.

Параметар C_1 представља присуство корозије. Са порастом удијела једињења која утичу на пораст корозије, у производном флуиду смањује се број механичких метода које се могу користити.

Параметар C_2 представља присуство чврстих честица. Са порастом чврстих честица у производном флуиду смањује се број механичких метода које се могу користити.

Параметар C_3 представља GOR. Са порастом гасног фактора у производном флуиду смањује се ефикасност механичких метода, које се могу користити, осим у случају гас лифта гдје повећање GOR-а има позитиван ефекат на рад система.

Параметар C_4 представља садржај парафина. Са порастом количине парафина у производном флуиду смањује се број механичких метода које се могу користити.

Параметар C_5 представља удио воде. Са порастом удијела воде у производном флуиду већу примјену имају методе које могу да производе веће количине флуида (слика 4.3.)

Анализирани параметри имају велики утицај на избор оптималне механичке методе експлоатације. Осим разматраних параметара који су синтетизовани у индикаторе нису узети у разматрање параметри економског индикатора због доминантног утицаја економских параметара на избор механичке методе. Економски индикатор као дио модела би утицао тако да не би било могуће процијенити која је механичка метода експлоатације најбоља са аспекта техничке примјене. У будућим корацима развоја овог модела економски индикатор могао би да постоје као додатни модул модела гдје би се од технички најбољих метода бирала економски најисплативија метода.

5. Фази модел оптимизације избора механичких метода експлоатације нафтне бушотине

Избор оптималне механичке методе експлоатације нафтне бушотине представља сложен проблем, који може бити правилно решен само мултидисциплинарним приступом. Као што је описано (поглавље 4) утицајни параметри, су појединачно комплексни, њихов међусобни утицај и интеракција нису теоријски описани до краја. Без обзира што у појединачним случајевима, сваки параметар јасно и недвосмислено позива одговарајућу методу експлоатације сходно сопственој актуелној вриједности; када се сви они заједно посматрају могућа је појава синергетског ефекта, међусобне искључивости, као и међусобне суперпозиције. У научној и стручној литератури није дефинисан модел који би давао обједињену вишепараметарску функцију која би рјешавала проблем избора оптималне (најбоље могуће или најмање лоше) методе експлоатације (Crnogorac et al, 2020).

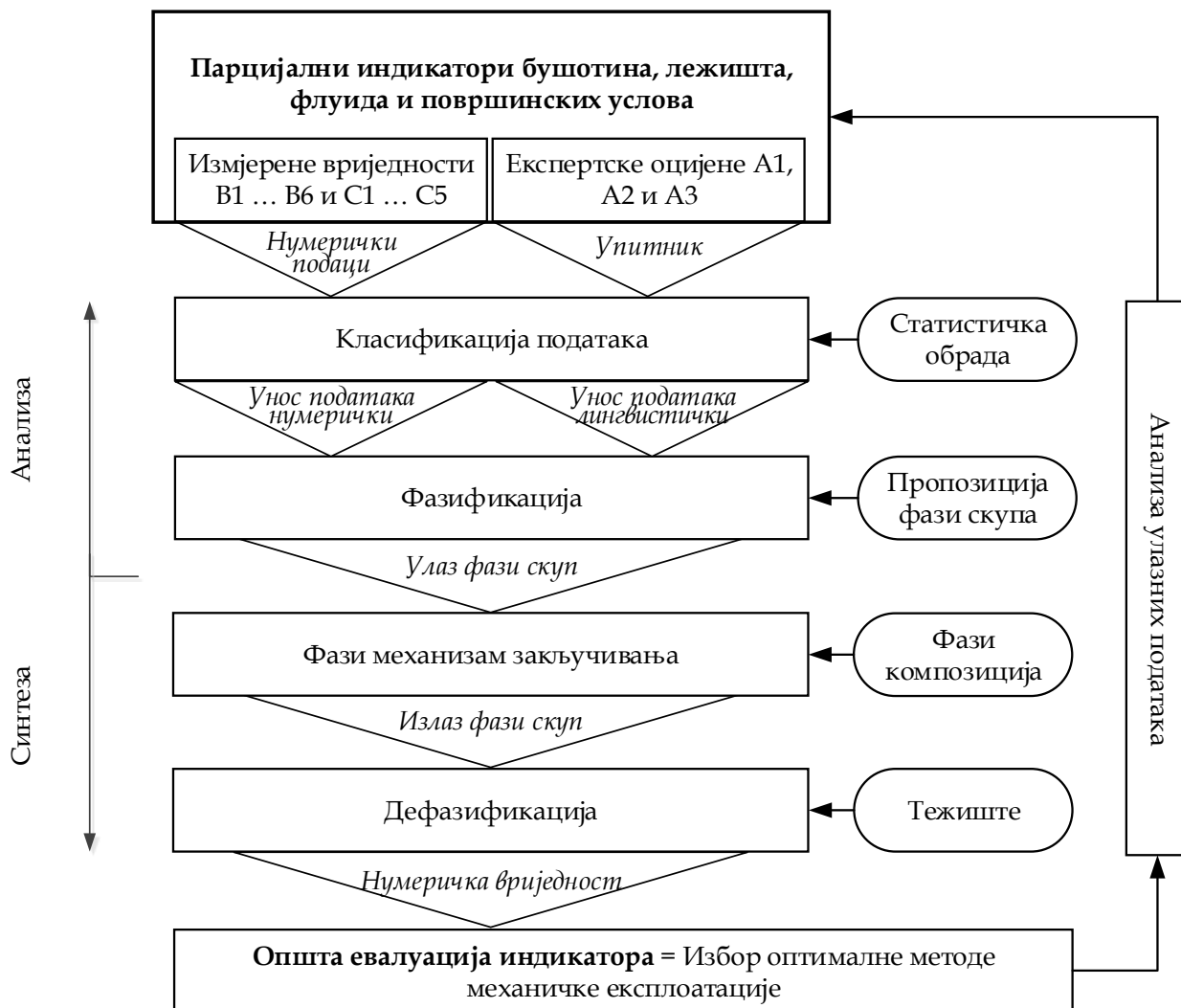
Евидентно је следеће: улазни подаци су хибридног карактера; међу собом су често несагласни, неконзистентни; не постоји функционална зависност између параметара и индикатора; не постоји теоријски и стручно препоручена функција циља у поступку избора оптималне методе експлоатације; верификација се може обавити само емпиријски и то уз одговарајући ниво повјерења.

У овом истраживању биће приказан модел који се заснива на фази теорији. Модел има прије свега могућност да апсорбује све параметре без обзира на њихову форму, даје могућност свођења више параметара у један и даје излаз који има континуалну форму. На овај начин се добија могућност синтезе прикупљених знања и искуства запослених на експлоатацији нафте као и егзактних величина које дефинишу бушотину, до оцјене нивоа употребљивости одговарајуће методе. Наведена оцјена која је у континуалној форми, поред препоруке која је метода оптимална, даје тренд и тенденцију оцјене као и близину граничним условима за примјену дате методе у форми стандардне математичке дисперзије.

На слици 5.1. приказан је алгоритам фази модела избора оптималне механичке методе за експлоатацију нафте. Модел се састоји из аналитичког и синтезног дијела. Аналитички дио се суштински састоји из пропозиције улазних параметара. При томе се користе уобичајене методе статистичке анализе и фазификације добијених статистичких параметара на ниво лингвистичке променљиве у форми уређених парова (функција припадности – класа). Фази синтезни модел је хијерархијски и концептуално креиран у два корака. Први корак представља композицију параметара $A_1, A_2, A_3, B_1, \dots, B_6$ и C_1, \dots, C_5 , који се синтетишу у инфраструктурни индикатор (А), физичко-геолошки индикатор (В) и индикатор производног флуида (С), респективно. У другом кораку се три индикатора А, В и С синтетишу у један М. Током израде модела на основу научне и стручне анализе одабрани су заједнички параметри за најчешће примјењиване механичке методе експлоатације.

Параметри (В и С) су егзактни подаци и мјерљиви су, док параметри (А) могу да се представе на основу искуства запослених на бушотини и могу да се искажу једино лингвистичким описима. Модел садржи аналитички дио који треба да сагледа све улазне параметре у оквиру референтних вриједности и синтезни који треба улазне

параметре да сведе у један. Евидентно је да модел обилује неизвјесношћу, неодређеношћу, вишезначношћу и релативношћу. Модел садржи механизам закључивања који на основу улазних података и практичног знања о посматраном проблему даје рјешење. За рјешавање овакве проблематике коришћена је фази теорија (поглавље 3).



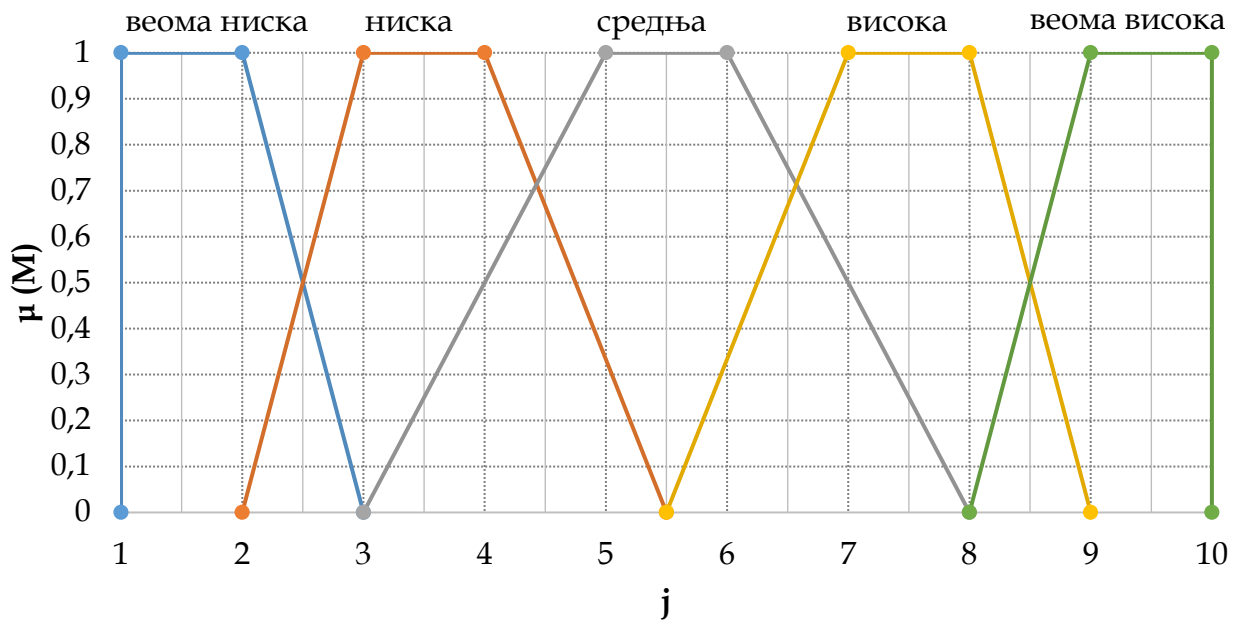
Слика 5.1. Схематски дијаграм фази модела (Crnogoras et al, 2020)

5.1. Дефинисање правила пропозиције

У дјелу модела који се односи на анализу, најважнији корак је фази пропозиција. Фази пропозиција је поступак представљања исказа који укључује језичке варијабле на основу доступних информација о разматраном инжењерском систему (Klir & Yan, 1995). Дефиниција структуре и међузависности језичких варијабли врши се у координатном систему функције припадности (μ), узимајући у обзир класу (j) као синоним за мјерење посматраних појава.

Што се тиче броја језичких варијабли, може се пронаћи у литератури да је седам максимални број рационално препознатљивих израза које човјек може истовремено идентификовати (Wang et.al. 1995). Неки аутори (Tanasiјević et al, 2019) иду корак даље у анализи броја седам у овом контексту, па на овај начин објашњавају због чега у седмици постоје седам дана или због чега у нотном систему има седам нота.

У овом истраживању, прихваћено је пет језичких варијабли (слика 5.2) за представљање перформанси синетзног модела (М) на нивоу употребљивости. У следећем кораку неопходно је дефинисати пет језичких варијабли, тј. фази скупове: веома ниска, ниска, средња, висока, веома висока. Оцјена се састоји у процјени којој лингвистичкој променљивој и којој мјери припада посматрана бушотина.



Слика 5.2. Фази скупови (Crnogorac et al, 2020)

У зависности од μ , фази број (FN) може бити представљен у облику (1):

$$FN = (\mu_{j=1}, \dots, \mu_{j=10}) \quad (1)$$

Лингвистичке променљиве (H) могу бити представљене у истом облику. На примјер, ако је $H =$ веома ниска, $\mu = 1$ за $j = 1, 2$, $\mu = 0$ за $j = 3, \dots, 10$.

Остали фази скупови (слика 6.2) могу се записати као:

ниска = (0/1, 0/2, 1/3, 1/4, 0,33/5, 0/6, 0/7, 0/8, 0/9, 0/10)

средња = (0/1, 0/2, 0/3, 0,5/4, 1/5, 1/6, 0,5/7, 0/8, 0/9, 0/10)

висока = (0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0,33/6, 1/7, 1/8, 0/9, 0/10)

веома висока = (0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0/6, 0/7, 0/8, 1/9, 1/10)

Примјер фази скупа за бушотину са ГЛ:

$$A1 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,3947/j=4; 0,7895/j=5; 0,7895/j=6; 0,3947/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=5; 0,0702/j=6; 0,205/j=7; 0,21051/j=8; 0/j=9; 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \end{cases}$$

$$A2 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=5; 0,2796/j=6; 0,8387/j=7; 0,8387/j=8; 0/j=9; \\ & 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=8; 0,1613/j=9; 0,1613/j=10 \end{cases}$$

$$A3 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,7059/j=3; 0,7059/j=4; 0,2353/j=5; 0/j=6; \dots \\ & 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,1471/j=4; 0,2941/j=5; 0,2941/j=6; 0,1471/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \end{cases}$$

$$B1 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=4; 0/j=5; 0,1586/j=6; 0,4759/j=7; 0,4759/j=8; \\ & 0/j=9; 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1 \dots 0/j=8; 0,5241/j=9; 0,5241/j=10 \end{cases}$$

$$B2 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0,9528/j=1; 0,9528/j=2; 0/j=3; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,0472/j=3; 0,0472/j=4; 0,0157/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$B3 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,7306/j=3; 0,7306/j=4; 0,2435/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; 0/j=2; 0/j=3; 0,1347/j=4; 0,2694/j=5; 0,2694/j=6; \\ & 0,1347/j=7; 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$B4 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0,0168/j=1; 0,0168/j=2; 0/j=3; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,9832/j=3; 0,9832/j=4; 0,3277/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$B5 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots; 0/j=5; 0,0157/j=6; 0,0472/j=7; 0,0472/j=8; 0/j=9; \\ & 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=8; 0,9528/j=9; 0,9528/j=10 \end{cases}$$

$$B6 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,6154/j=3; 0,6154/j=4; 0,2051/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,1923/j=4; 0,3846/j=5; 0,3846/j=6; 0,1923/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$C1 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,9197/j=3; 0,9197/j=4; 0,3066/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,0401/j=4; 0,0803/j=5; 0,0803/j=6; 0,0401/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$C2 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,5932/j=3; 0,5932/j=4; 0,1977/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,2034/j=4; 0,4068/j=5; 0,4068/j=6; 0,2034/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

$$C3 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,5932/j=3; 0,5932/j=4; 0,1977/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,2034/j=4; 0,4068/j=5; 0,4068/j=6; 0,2034/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=10 \end{cases}$$

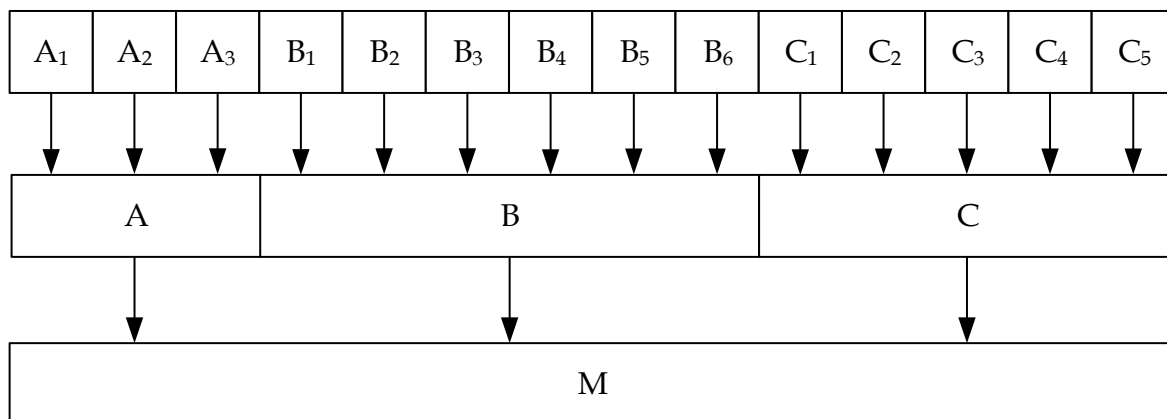
$$C4 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; 0/j=2; 0,5932/j=3; 0,5932/j=4; 0,1977/j=5; 0/j=6; \dots 0/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0/j=3; 0,2034/j=4; 0,4068/j=5; 0,4068/j=6; 0,2034/j=7; \\ & 0/j=8; \dots 0/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \end{cases}$$

$$C5 = \begin{cases} \text{веома ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{ниска} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{средња} & 0/j=1; \dots 0,/j=10 \\ \text{висока} & 0/j=1; \dots 0/j=5; 0,0159/j=6; 0,0476/j=7; 0,0476/j=8; 0/j=9; 0/j=10 \\ \text{веома висока} & 0/j=1; \dots 0/j=8; 0,9524/j=9; 0,9524/j=10 \end{cases}$$

5.2. Синтезни дио модела

Синтеза парцијалних индикатора (А, В, С) у један (М) обавља се помоћу фази композиције. Фази композиција је модел који обезбјеђује структуру утицаја индикатора на перформансе М. Другим ријечима, уколико показатељи утицаја А, В и С су представљени као фази бројеви (Teodorović & Vukadinović, 1998), њихова композиција даје фази број који представља М. Мах-мин композиција се често користи у фази алгебри као модел синтезе (Ivezic et.al., 2008; Miodragovic et.al. 2012; Tanasijevic et.al., 2012; Tanasijevic et.al., Wang et.al., 1995; Wang, 2000).

Фази синтеза обавља се у два нивоа. У првом се параметри A_1, A_2, A_3 синтетизују у А, односно $V_1 \dots V_6$ у В и $C_1 \dots C_5$ у С. На другом нивоу синтезе А, В, С у М (слика 5.3) Циљ синтезе је да представи рјешење оптимизационог модела у форми нпр., ако је A_1 - средње, A_2 - високо, A_3 - ниско, V_1 - веома високо, V_2 - веома ниско, V_3 - ниско, V_4 - ниско, V_5 - веома високо, V_6 - ниско, C_1 - веома високо, C_2 - веома ниско, C_3 - веома високо, C_4 - веома високо, C_5 - ниско, добија се метода гас лифт.



Слика 5.3. Хијерархијска структура фази композиције (Crnogoras et al, 2020)

Парцијални индикатори избора оптималне методе, А,В и С представљени су као функције припадности μ :

$$A = (\mu_{A^1}, \dots, \mu_{A^j}, \dots, \mu_{A^n}); B = (\mu_{B^1}, \dots, \mu_{B^j}, \dots, \mu_{B^n}); C = (\mu_{C^1}, \dots, \mu_{C^j}, \dots, \mu_{C^n}); \quad (2)$$

Такве функције припадности могу створити међусобне комбинације $x = n^3$. Свака комбинација представља један могући улаз за синтезу и процјену M .

$$M = [\mu_A^{j=1, \dots, n}, \mu_B^{j=1, \dots, n}, \mu_C^{j=1, \dots, n}], \text{ за све } x = 1 \text{ до } x \quad (3)$$

Ако се само вриједности $\mu_{A,B,C}^{j=1, \dots, 5} \neq 0$ узимају у обзир, исход o ($o = 1$ до O , гдје $O \subseteq x$) се добијају.

Поред тога, за сваки исход израчунавају се његове вриједности (Ω_x). Исход који одговара x -тој комбинацији израчунава се на основу једначина:

$$\Omega_x = \frac{[\sum_{A,B,C} j]_x}{3} \quad (4)$$

$$\Omega_x = \frac{[\sum_{A_1,A_2,A_3} j]_x}{3} \quad (5)$$

$$\Omega_x = \frac{[\sum_{B_1, \dots, B_6} j]_x}{6} \quad (6)$$

$$\Omega_x = \frac{[\sum_{C_1, \dots, C_5} j]_x}{5} \quad (7)$$

Величина O представља исход који се дефинише за сваку могућу комбинацију улазних параметара. Исход се дефинише на бази правила АКО-Онда („IF-THEN“) који су дефинисани на бази емпирије.

Тражи се минимум међу претходно идентификованим максимумима (9) за сваку групу исхода. Минимална одговарајућа j -та вриједност израчунава се према једначинама:

$$MIN_j = \min\{MAX_o\}, \text{ за свако } j \quad (8)$$

и

$$MAX_o = \max\{\mu_A^{j=1, \dots, 10}, \mu_B^{j=1, \dots, 10}, \mu_C^{j=1, \dots, 10}\}, \text{ за све } o = 1 \text{ до } O \quad (9)$$

M оцена се добија у облику:

$$\mu_M = (MIN_{j=1}, \dots, MIN_{j=10}) = (\mu_M^1, \dots, \mu_M^{10}) \quad (10)$$

Приказ min-max композиције на примјеру индикатора А за бушотину са гас лифт методом.

Индикатор А је дефинисан са три фази броја (параметра):

- Облици и извор енергије (OI)
- Аутоматска регулација даљинско управљање (RU)
- Ремонт (RE)

$$OI = (0, 0, 0, 0,3947, 0,7895, 0,8596, 0,6053, 0,2105, 0, 0)$$

$$RU = (0, 0, 0, 0, 0,2796, 0,8387, 0,8387, 0,1613, 0,1613)$$

$$RE = (0, 0, 0,7059, 0,8529, 0,5294, 0,2941, 0,1471, 0, 0, 0)$$

Ови фази бројеви имају је $10^3=1000$ комбинација. У даљем прорачуну се узимају у обзир само комбинације у којима ниједан члан није једнак нули, којих има $5 \times 5 \times 5 = 125$ (табела 5.1.). За сваку комбинацију се одређује исход (Ω), који се рачуна као средња вриједност. Нпр. $\Omega = (3+2+3)/3=3$, за комбинацију $(oi_3, ru_2, re_3) = (0,71, 0,95, 0,95)$. За сваку комбинацију одређује се и максимум (табела 5.1.).

Табела 5.1. Исходи и максимуми комбинација фази бројева

oi_i	ru_i	re_i	Исход (Ω)	max
$oi_3 = 0,71$	$ru_2 = 0,95$	$re_3 = 0,95$	3	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_2 = 0,95$	$re_4 = 0,2$	3	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_2 = 0,95$	$re_5 = 0,2$	3	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_2 = 0,95$	$re_6 = 0,39$	4	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_2 = 0,95$	$re_7 = 0,61$	4	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_3 = 0,38$	$re_3 = 0,95$	3	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_3 = 0,38$	$re_4 = 0,2$	3	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_3 = 0,38$	$re_5 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_3 = 0,38$	$re_6 = 0,39$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_3 = 0,38$	$re_7 = 0,61$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_4 = 0,26$	$re_3 = 0,95$	3	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_4 = 0,26$	$re_4 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_4 = 0,26$	$re_5 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_4 = 0,26$	$re_6 = 0,39$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_4 = 0,26$	$re_7 = 0,61$	5	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_5 = 0,26$	$re_3 = 0,95$	4	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_5 = 0,26$	$re_4 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_5 = 0,26$	$re_5 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_5 = 0,26$	$re_6 = 0,39$	5	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_5 = 0,26$	$re_7 = 0,61$	5	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_6 = 0,49$	$re_3 = 0,95$	4	0,95
$oi_3 = 0,71$	$ru_6 = 0,49$	$re_4 = 0,2$	4	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_6 = 0,49$	$re_5 = 0,2$	5	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_6 = 0,49$	$re_6 = 0,39$	5	0,71
$oi_3 = 0,71$	$ru_6 = 0,49$	$re_7 = 0,61$	5	0,71
$oi_4 = 0,29$	$ru_2 = 0,95$	$re_3 = 0,95$	3	0,95
$oi_4 = 0,29$	$ru_2 = 0,95$	$re_4 = 0,2$	3	0,95

oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re5 = 0,2	4	0,95
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re6 = 0,39	4	0,95
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re7 = 0,61	4	0,95
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re3 = 0,95	3	0,95
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re4 = 0,2	4	0,38
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re5 = 0,2	4	0,38
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re6 = 0,39	4	0,39
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re7 = 0,61	5	0,61
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re3 = 0,95	4	0,95
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re4 = 0,2	4	0,29
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re5 = 0,2	4	0,29
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re6 = 0,39	5	0,39
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re7 = 0,61	5	0,61
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re3 = 0,95	4	0,95
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re4 = 0,2	4	0,29
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,29
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re6 = 0,39	5	0,39
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re7 = 0,61	5	0,61
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re3 = 0,95	4	0,95
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re4 = 0,2	5	0,49
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re5 = 0,2	5	0,49
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re6 = 0,39	5	0,49
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	6	0,61
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re3 = 0,95	3	0,95
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re4 = 0,2	4	0,95
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re5 = 0,2	4	0,95
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re6 = 0,39	4	0,95
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re7 = 0,61	5	0,95
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re3 = 0,95	4	0,95
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re4 = 0,2	4	0,38
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re5 = 0,2	4	0,38
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re6 = 0,39	5	0,39
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re7 = 0,61	5	0,61
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re3 = 0,95	4	0,95
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re4 = 0,2	4	0,26
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,26
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re6 = 0,39	5	0,39
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re7 = 0,61	5	0,61
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re3 = 0,95	4	0,95
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re4 = 0,2	5	0,26
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,26
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re6 = 0,39	5	0,39
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re7 = 0,61	6	0,61
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re3 = 0,95	5	0,95
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re4 = 0,2	5	0,49
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re5 = 0,2	5	0,49
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re6 = 0,39	6	0,49

oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	6	0,61
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re3 = 0,95	4	0,95
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re4 = 0,2	4	0,95
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re5 = 0,2	4	0,95
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re6 = 0,39	5	0,95
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re7 = 0,61	5	0,95
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re3 = 0,95	4	0,95
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re4 = 0,2	4	0,39
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re5 = 0,2	5	0,39
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re6 = 0,39	5	0,39
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re7 = 0,61	5	0,61
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re3 = 0,95	4	0,95
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re4 = 0,2	5	0,39
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,39
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re6 = 0,39	5	0,39
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re7 = 0,61	6	0,61
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re3 = 0,95	5	0,95
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re4 = 0,2	5	0,39
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,39
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re6 = 0,39	6	0,39
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re7 = 0,61	6	0,61
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re3 = 0,95	5	0,95
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re4 = 0,2	5	0,49
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re5 = 0,2	6	0,49
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re6 = 0,39	6	0,49
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	6	0,61
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re3 = 0,95	4	0,95
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re4 = 0,2	4	0,95
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re5 = 0,2	5	0,95
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re6 = 0,39	5	0,95
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re7 = 0,61	5	0,95
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re3 = 0,95	4	0,95
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re4 = 0,2	5	0,53
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re5 = 0,2	5	0,53
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re6 = 0,39	5	0,53
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re7 = 0,61	6	0,61
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re3 = 0,95	5	0,95
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re4 = 0,2	5	0,53
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re5 = 0,2	5	0,53
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re6 = 0,39	6	0,53
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re7 = 0,61	6	0,61
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re3 = 0,95	5	0,95
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re4 = 0,2	5	0,53
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re5 = 0,2	6	0,53
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re6 = 0,39	6	0,53
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re7 = 0,61	6	0,61
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re3 = 0,95	5	0,95

oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re4 = 0,2	6	0,53
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re5 = 0,2	6	0,53
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re6 = 0,39	6	0,53
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	7	0,61

Комбинације се разврставају према исходима. У овом случају исходи су 3,4,5,6 и 7, за које се појединачно одређује минимум од претходно одређених максимума (табела 5.2.).

Табела 5.2. Груписане комбинације према исходима и њихови минимуми

oi _i	ru _i	re _i	Исход (Ω)	Минимум
oi3 = 0,71	ru2 = 0,95	re3 = 0,95	3	0,71
oi3 = 0,71	ru2 = 0,95	re4 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru2 = 0,95	re5 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru3 = 0,38	re3 = 0,95		
oi3 = 0,71	ru3 = 0,38	re4 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru4 = 0,26	re3 = 0,95		
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re3 = 0,95		
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re3 = 0,95		
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re3 = 0,95		
oi3 = 0,71	ru2 = 0,95	re6 = 0,39	4	0,26
oi3 = 0,71	ru2 = 0,95	re7 = 0,61		
oi3 = 0,71	ru3 = 0,38	re5 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru3 = 0,38	re6 = 0,39		
oi3 = 0,71	ru3 = 0,38	re7 = 0,61		
oi3 = 0,71	ru4 = 0,26	re4 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru4 = 0,26	re5 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru4 = 0,26	re6 = 0,39		
oi3 = 0,71	ru5 = 0,26	re3 = 0,95		
oi3 = 0,71	ru5 = 0,26	re4 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru5 = 0,26	re5 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru6 = 0,49	re3 = 0,95		
oi3 = 0,71	ru6 = 0,49	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re5 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re6 = 0,39		
oi4 = 0,29	ru2 = 0,95	re7 = 0,61		
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re5 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re6 = 0,39		
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re3 = 0,95		
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re5 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re3 = 0,95		
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re3 = 0,95		
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re4 = 0,2		

oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re5 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re3 = 0,95		
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re4 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re5 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re3 = 0,95		
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re4 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re3 = 0,95		
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re3 = 0,95		
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re4 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re5 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re3 = 0,95		
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re4 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re3 = 0,95		
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re3 = 0,95		
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re3 = 0,95		
oi3 = 0,71	ru4 = 0,26	re7 = 0,61		
oi3 = 0,71	ru5 = 0,26	re6 = 0,39		
oi3 = 0,71	ru5 = 0,26	re7 = 0,61		
oi3 = 0,71	ru6 = 0,49	re5 = 0,2		
oi3 = 0,71	ru6 = 0,49	re6 = 0,39		
oi3 = 0,71	ru6 = 0,49	re7 = 0,61		
oi4 = 0,29	ru3 = 0,38	re7 = 0,61		
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re6 = 0,39		
oi4 = 0,29	ru4 = 0,26	re7 = 0,61		
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re5 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re6 = 0,39		
oi4 = 0,29	ru5 = 0,26	re7 = 0,61		
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re4 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re5 = 0,2		
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru2 = 0,95	re7 = 0,61		
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru3 = 0,38	re7 = 0,61		
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re5 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru4 = 0,26	re7 = 0,61		
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re4 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re5 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re3 = 0,95		
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re4 = 0,2		
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re5 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re6 = 0,39		
oi6 = 0,39	ru2 = 0,95	re7 = 0,61		
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re5 = 0,2		

5

0,26

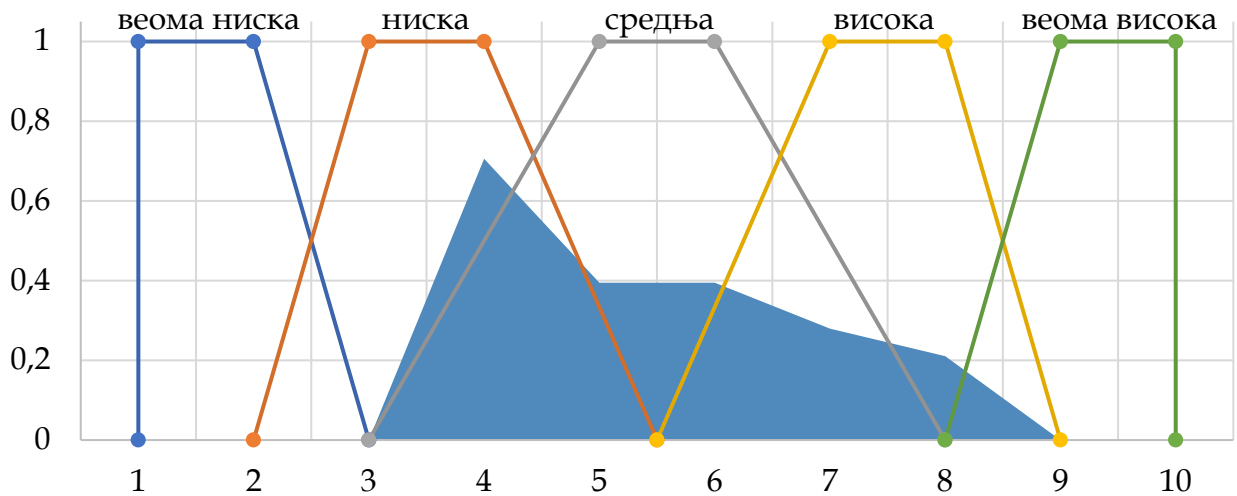
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re6 = 0,39		
oi6 = 0,39	ru3 = 0,38	re7 = 0,61		
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re4 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re5 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re6 = 0,39		
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re3 = 0,95		
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re4 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re5 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re3 = 0,95		
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re5 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re6 = 0,39		
oi7 = 0,53	ru2 = 0,95	re7 = 0,61		
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re5 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re6 = 0,39		
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re3 = 0,95		
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re5 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re3 = 0,95		
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re3 = 0,95		
oi4 = 0,29	ru6 = 0,49	re7 = 0,61		
oi5 = 0,21	ru5 = 0,26	re7 = 0,61		
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re6 = 0,39		
oi5 = 0,21	ru6 = 0,49	re7 = 0,61		
oi6 = 0,39	ru4 = 0,26	re7 = 0,61		
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re6 = 0,39		
oi6 = 0,39	ru5 = 0,26	re7 = 0,61		
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re5 = 0,2		
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re6 = 0,39		
oi6 = 0,39	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	6	0,39
oi7 = 0,53	ru3 = 0,38	re7 = 0,61		
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re6 = 0,39		
oi7 = 0,53	ru4 = 0,26	re7 = 0,61		
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re5 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re6 = 0,39		
oi7 = 0,53	ru5 = 0,26	re7 = 0,61		
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re4 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re5 = 0,2		
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re6 = 0,39		
oi7 = 0,53	ru6 = 0,49	re7 = 0,61	7	0,61

Min-max композиција индикатора A може да се запише:

$$\max(\min(OI, RU, RE)) = (0,71, 0,26, 0,26, 0,39, 0,71)$$

Добијени резултат за индикатор А може да се запише као израз испод и да се представи сликом 5.4.

$$A=(0/1; 0/2; 0,71/3; 0,26/4; 0,26/5; 0,39/6; 0,61/7; 0/8; 0/9; 0/10)$$

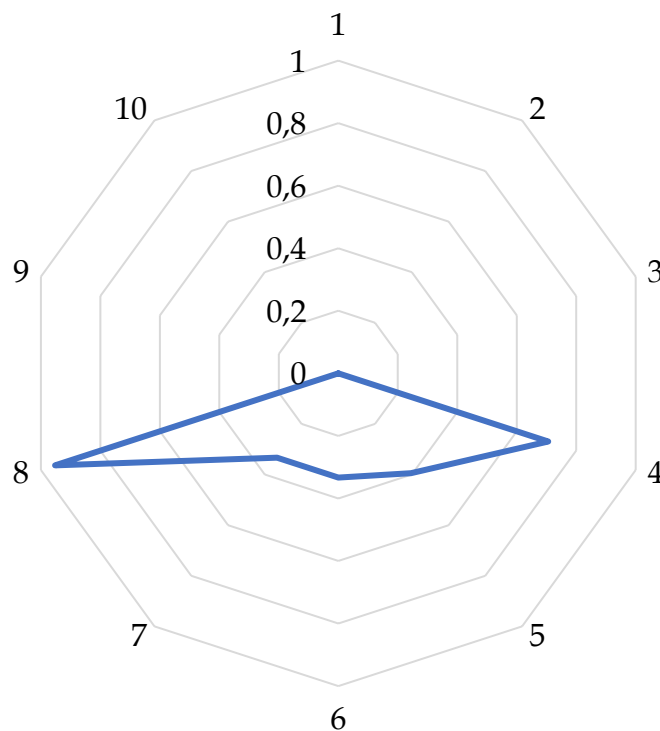


Слика 5.4. Фази скуп индикатора А

Овај поступак се понавља за још три синтетзна индикатора В, С и М. Да би се одредио записао резултат за индикатор В укупни број комбинација је $10^6=1.000.000$, док је број оних у којима ниједан члан није једнак 0 веома велики и износи $5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5 = 15.625$ комбинација.

Коначно резултат индикатора М тј. модела може се записати изразом и приказати сликом 5.5.

$$M=(0/1, 0/2, 0/3, 0,7059/4, 0,3947/5, 0,3333/6, 0,3333/7, 0,9524/8, 0/9, 0/10)$$



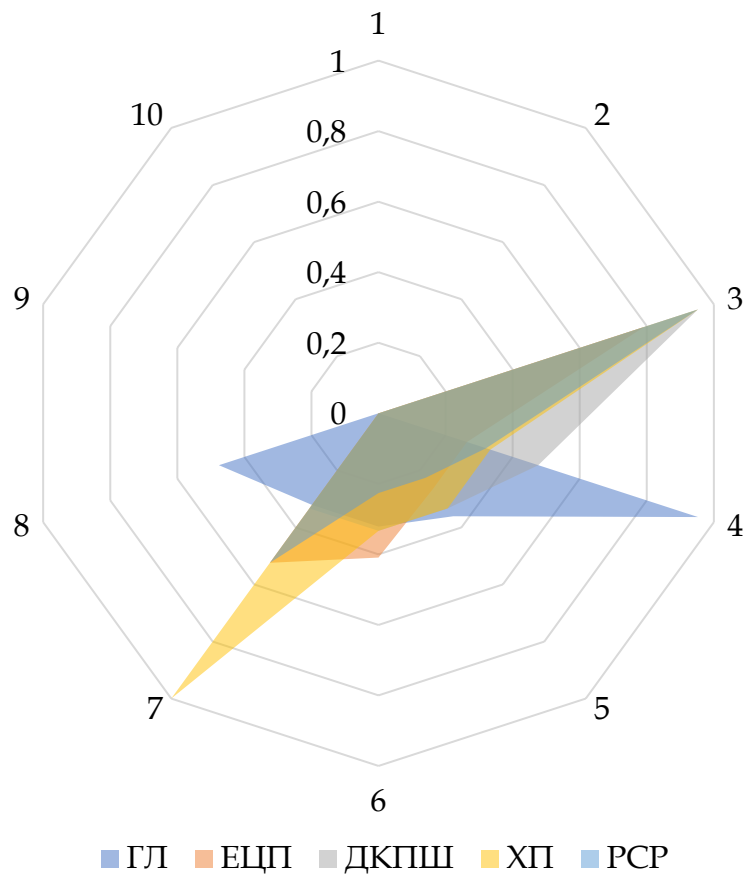
Слика 5.5. Резултат индикатора М

Као улазни подаци за модел коришћени су подаци са различитих нафтних поља Србије, Либије, Азербејдана и Ирана. Уношењем података у модел добија се резултат који се представља графички у виду површина неправилних облика презентованих на дијаграму типа „*Radar*“. Ове површине представљају случајеве кад је примијењена адекватна метода.

Подаци узети за формирање модела налазе се у опсегу:

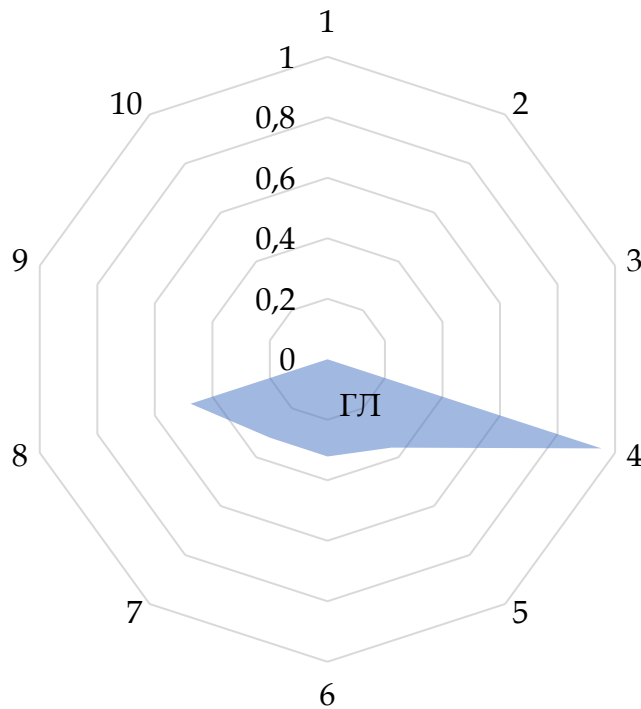
- Дубина: 506 – 3500 m
- Производња флуида: 1,5 – 2340 m³/d
- Температура: 50 – 180 °C
- Густина: 810,89 - 1014,34 kg/m³
- Вискозитет 2 – 681 mPas
- Девијација бушотине 0,00 - 35,00°
- Удио корозивних супстанци 0 – 5%
- Удио чврстих честица 0 – 16%
- Гасни фактор 10 - 458
- Удио парафина 0,00 - 20,00%
- Садржај воде 0,00 - 93,00%
- Облици енергије и извор: експертске оцјене 8 - 9
- Могућност ремонта: експертске оцјене 5 - 7
- Могућност аутоматске регулације и даљинског управљања: експертске оцјене 4 - 9

На основу унијетих података великог броја различитих бушотина добијен је графички излаз за сваку методу у виду геометријски неправилних облика (мапа) (слика 5.6). Преклапање облика појединачних метода представља бушотине у којима се могу примијенити подједнако методе чији се облици на дијаграму преклапају. Уношењем података за нове бушотине у модел добијају се резултати који се пореде са постојећим мапама примјене механичких метода експлоатације. Процентуално највеће преклапање са фигуром неке од механичких метода представља и најбоље рјешење за нову бушотину.



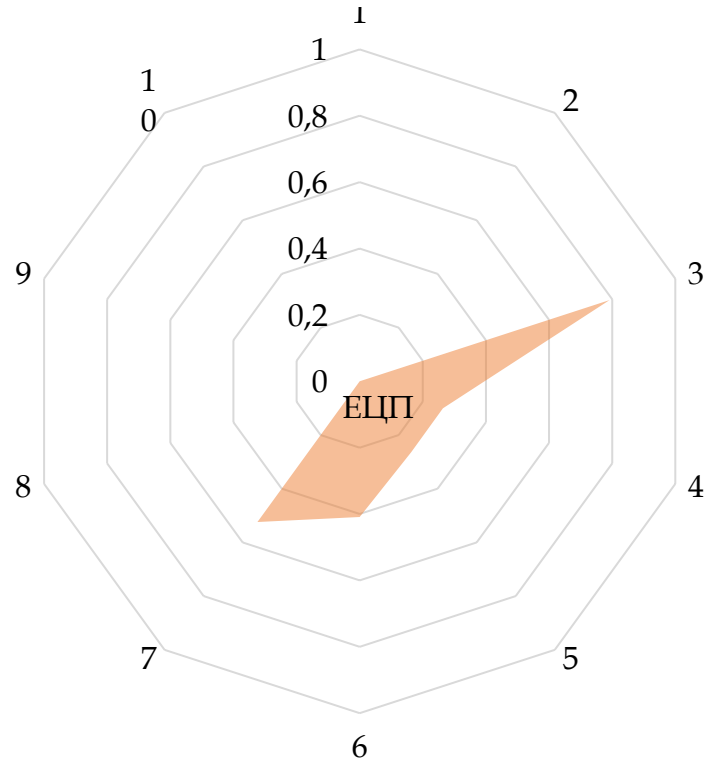
Слика 5.6. Приказ резултата модела за све стандарде најзаступљенијих механичких метода експлоатације

Резултат модела за стандард ГЛ дат је на слици 5.7.



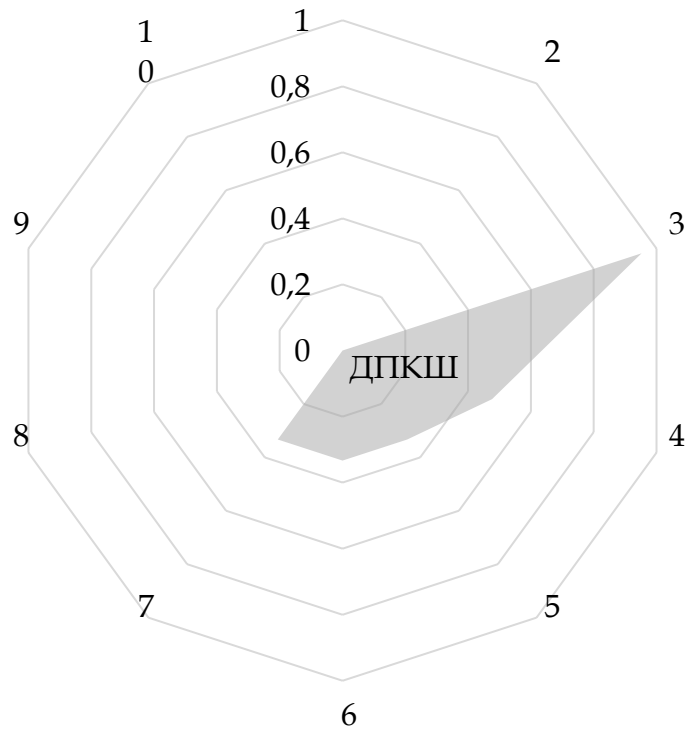
Слика 5.7. Приказ резултата модела за стандард ГЛ

Резултат модела за стандард ЕЦП дат је на слици 5.8.



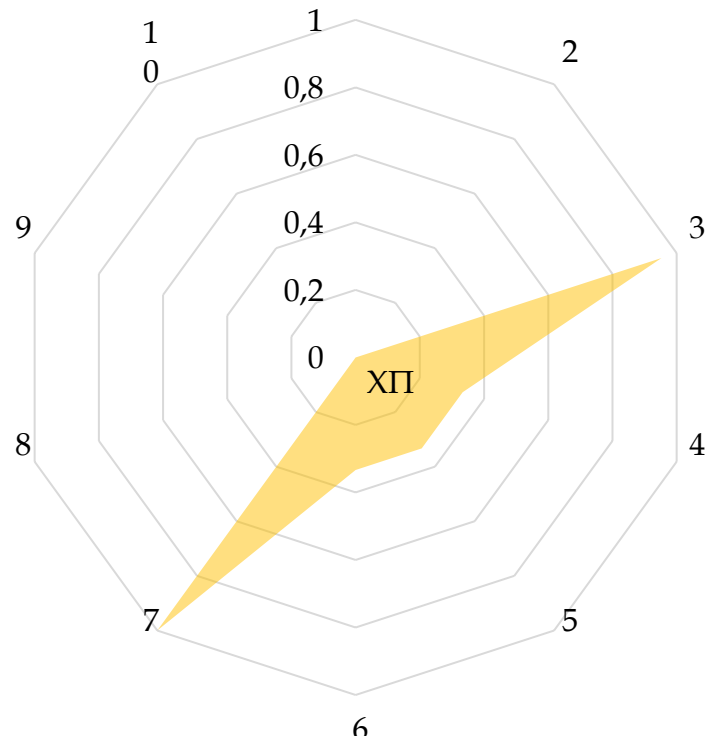
Слика 5.8. Приказ резултата модела за стандард ЕЦП

Резултат модела за стандард ДПКШ дат је на слици 5.9.



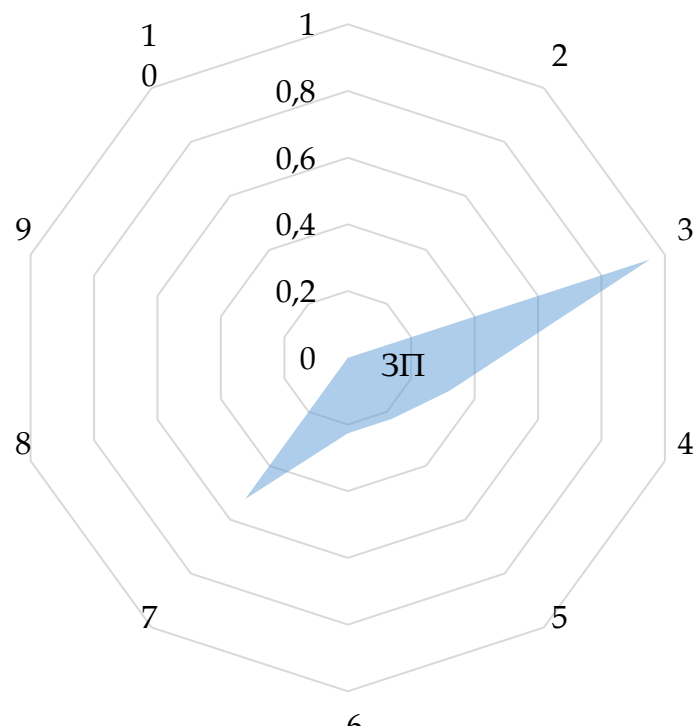
Слика 5.9. Приказ резултата модела за стандард ДПКШ

Резултат модела за стандард ХП дат је на слици 5.10.



Слика 5.10. Приказ резултата модела за стандард ЗП

Резултат модела за стандард ЗП дат је на слици 5.11.



Слика 5.11. Приказ резултата модела за стандард ЗП

Уколико процентуално преклапање резултата за нову бушотину и стандарда појединачних механичких метода експлоатације буде врло близу и није могуће на основу тога направити рангирање, тада се резултати могу приказати још прецизније.

Резултати се могу дати и као тежишта (једначина 11) добијених резултата тј. неправилних геометријских фигура и расипања (једначина 12) резултата (слика 5.12).

Тежиште

Израчунавањем тежишта дефазификација је завршена, и добијене су вриједност класе и фази скуп, коме добијени резултат и припада. Тежиште се израчунава на основу следеће формуле (Bowles & Pelaez, 1995, Petrović et al, 2014.):

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{10} \mu_i x_i}{\sum_{i=1}^{10} \mu_i} \quad (11)$$

гдје је:

x_i - подржана вриједност при којој функција припадности достиже своју максималну вриједност

μ_i - степени истине функције припадности

Z - тежиште

Стандардна девијација

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{sr})^2}{N - 1}} \quad (12)$$

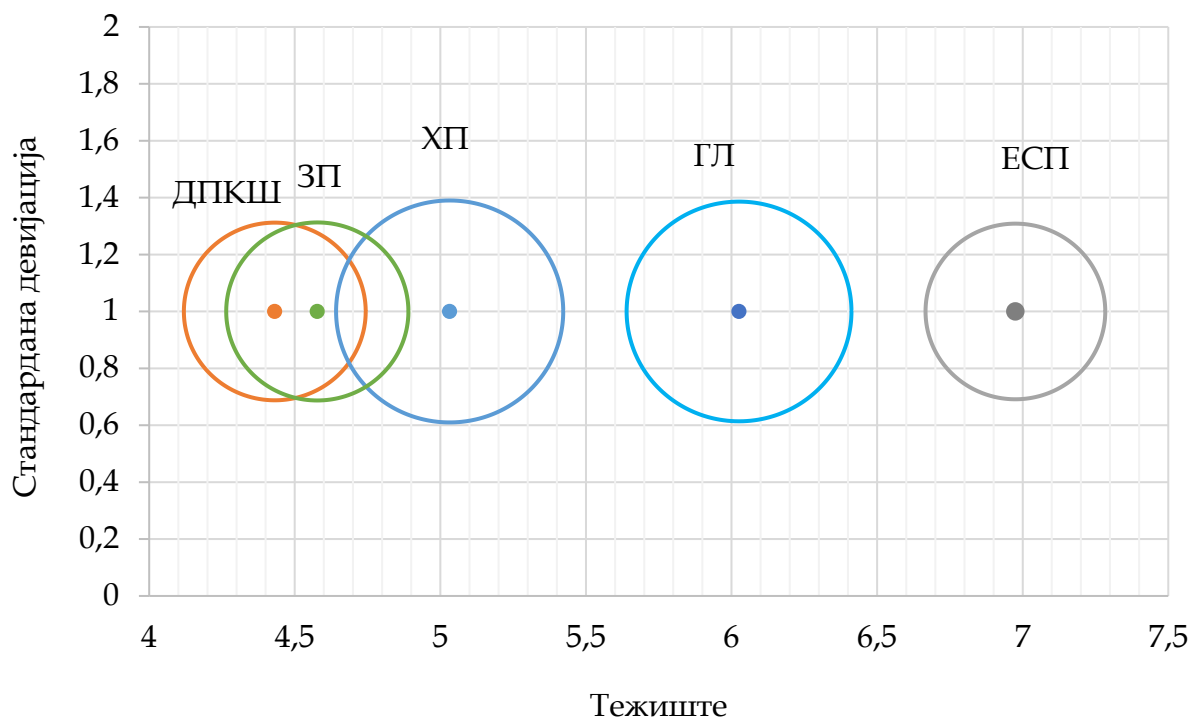
гдје је:

S - стандардна девијација

N - број експеримената

x_i - посматране вриједности

x_{sr} - средња вриједност свих опажања



Слика 5.12. Тежиште и расипање излаза за стандарде механичких метода

6. Студија случаја и верификација развијеног модела

Развијени модел избора оптималне механичке методе за експлоатацију нафте је условно примјенљив у свим радним условима. Идеја је да примјена модела буде у фази планирања и пројектовања система експлоатације нафте. Поступак верификације модела овдје ће бити урађен за већ постојећа нафтна поља са већ разријешеним системом експлоатације. Верификација је урађена на примјеру двије бушотине. Прва бушотина је са нафтног поља Салман које се налази у Ирану, а експлоатише се примјеном гас лифта. Друга бушотина је са истражног подручја Србије и експлоатише се методом ДПКШ.

Бушотине на пољу Салман су опремљене класичном методом. На овом пољу примијењена је секундарна метода искоришћења лежишта нафте на бази утискивања воде. Бушотине су лоциране на мору. Подаци поља Салман о производњи и бушотини су следећи:

- производња флуида: 178 m³,
- дубина бушотине: 2438,4 - 3352,8 m,
- пречник бушотине: 0,36576 m,
- девијација канала бушотине: 0-10 / 0,3048 m,
- температура: 82,22 - 98,89 ° C,
- динамички притисак: 68,95 bar,
- садржај воде у производњи: 70%,
- вискозитет флуида: мањи од 0,1 Pas,
- некорозивни флуид,
- садржај пијеска и абразивних материја: мањи од 10 ppm,
- GOR: 650 m³/m³,
- VLR: мањи од 0,1.

Избор наведене методе урађен је оптимизационим моделом базираним на вишекритеријумској анализи, конкретно коришћењем метода ELECTRE (Alemi et al, 2011).

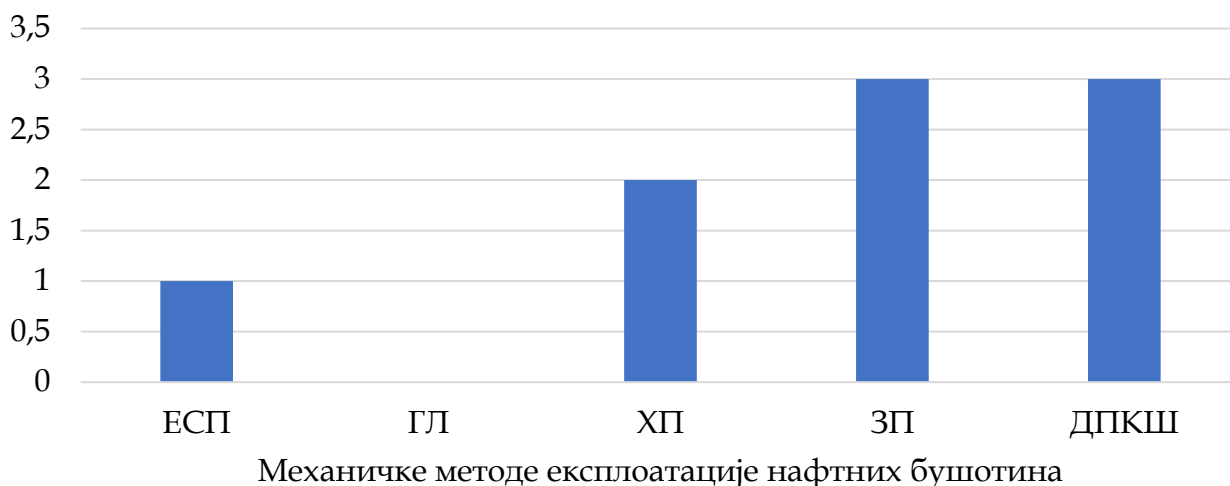
Бушотина X са истражног подручја Србије је опремљена класичном методом (Danilović, 2001). Подаци о производњи и бушотини су следећи (Danilović, 2001):

- производња флуида: 11,23 m³,
- дубина бушотине: 1187 m,
- пречник експлоатационе колоне: 139,7 m,
- мала девијација канала бушотине,
- температура: 110,7 ° C,
- динамички притисак: 35,1 bar,
- садржај воде у производњи: 10%,
- вискозитет флуида: 0,025567 Pas,
- корозивни флуид: до 3%,
- проблем појаве пијеска и абразивних материја: ,
- GOR: 38,17 m³/m³,
- садржај парафина: 17,365%.

6.1. Анализа добијених резултата

Први примјер:

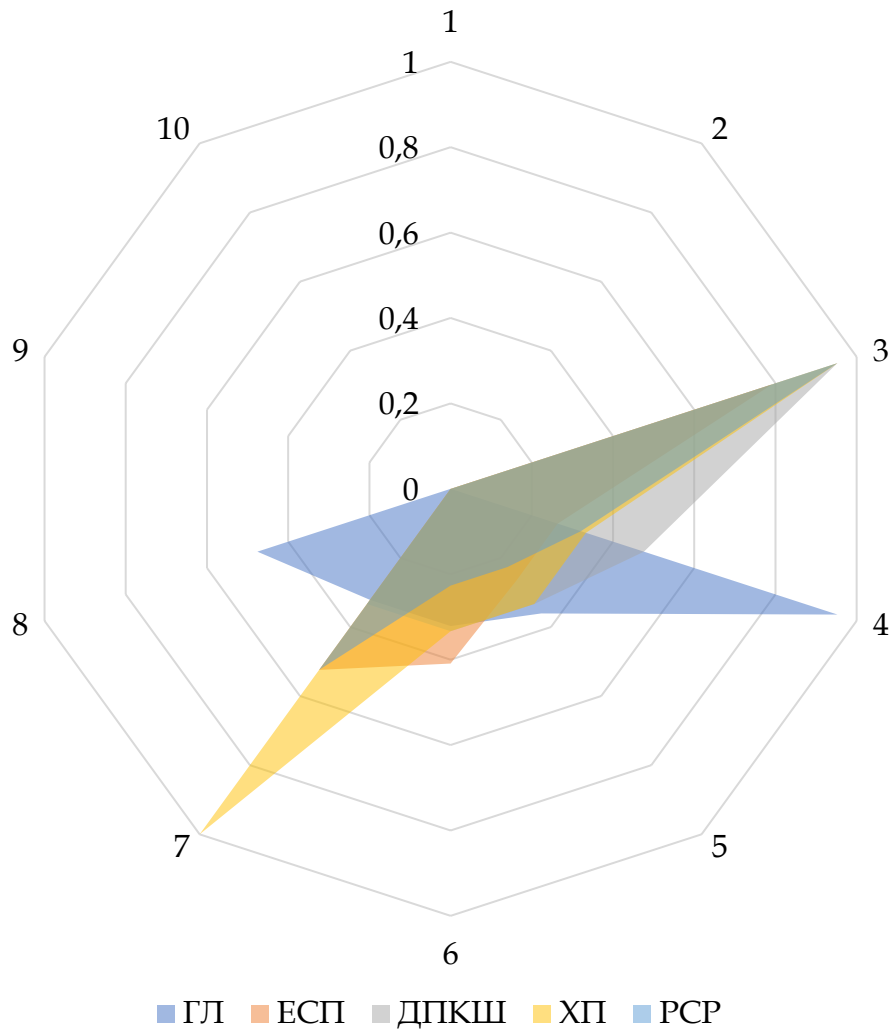
Као излаз модела рангиране су методе експлоатације по адекватности примјене (**Error! Reference source not found.**). Види се да су као најпримјењивије методе експлоатације за услове анализираниог поља оцијењене: метода гас лифт са оцјеном 0, ЕЦП (оцјена 1), ХП (оцјена 2) и на крају ЗП и ДПКШ (оцјена 3).



Слика 6.1. Резултати избора механичких метода експлоатације на пољу Салман примјеном ELECTRE модела (Alemi et al, 2011)

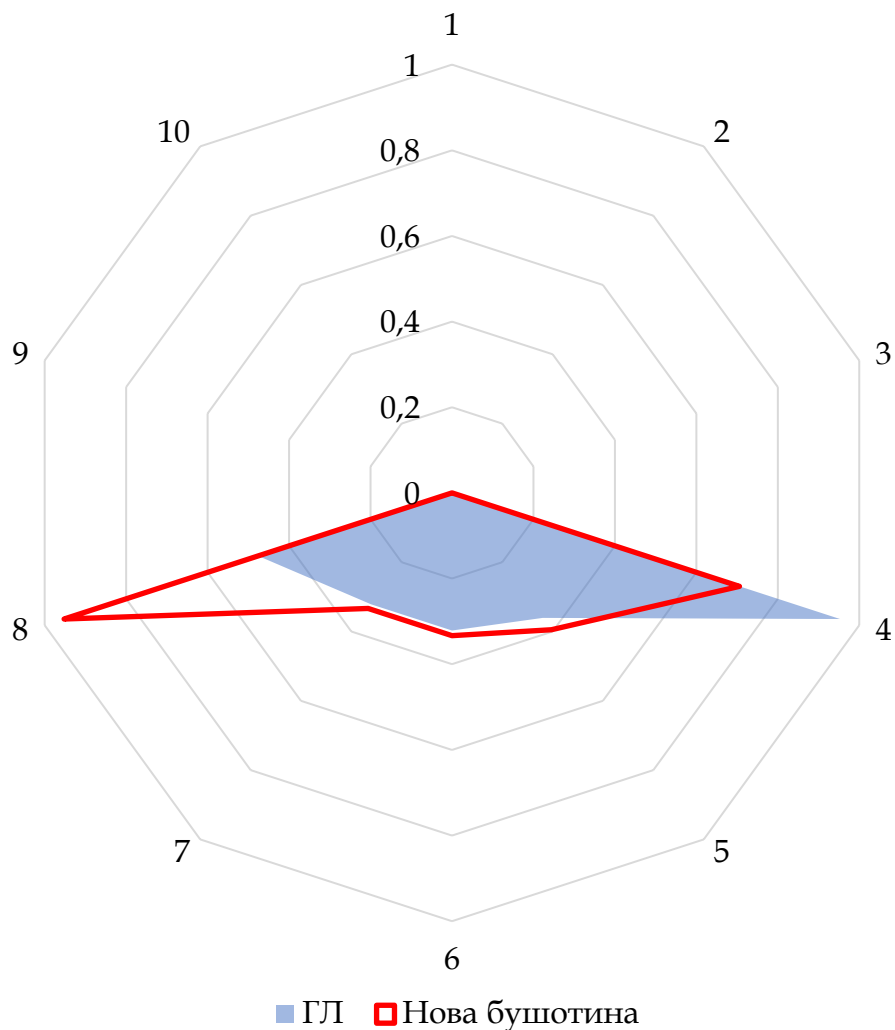
Подаци са нафтног поља Салман унијети су у модел, описан у претходном поглављу и добијени су резултати приказани на сликама 6.2.-6.7. На сликама је дат координатни систем типа радар са означеним површинама. Површине представљају сваку од пет разматраних метода механичке експлоатације у зависности од функције припадности (μ) у радијалном смјеру и класе (j) у кружном смјеру. Свака од пет уобичајено коришћених метода (ГЛ, ЕЦП, ДПКШ, ХП, ЗП) дефинише одређену површину која је стандард. Ниво преклапања површина фигуре, која представља резултате за нову бушотину и неке од стандардних површина, представља ниво примјењивости стандардне методе за услове нове бушотине.

На Слика 6.2. дат је приказ стандарда, односно свих метода. На сликама 6.3.-6.7. дат је приказ поређења примјењивости појединачних стандардних метода са новом бушотином. Ниво преклапања може се изразити у процентима што је дато у табели 6.1.



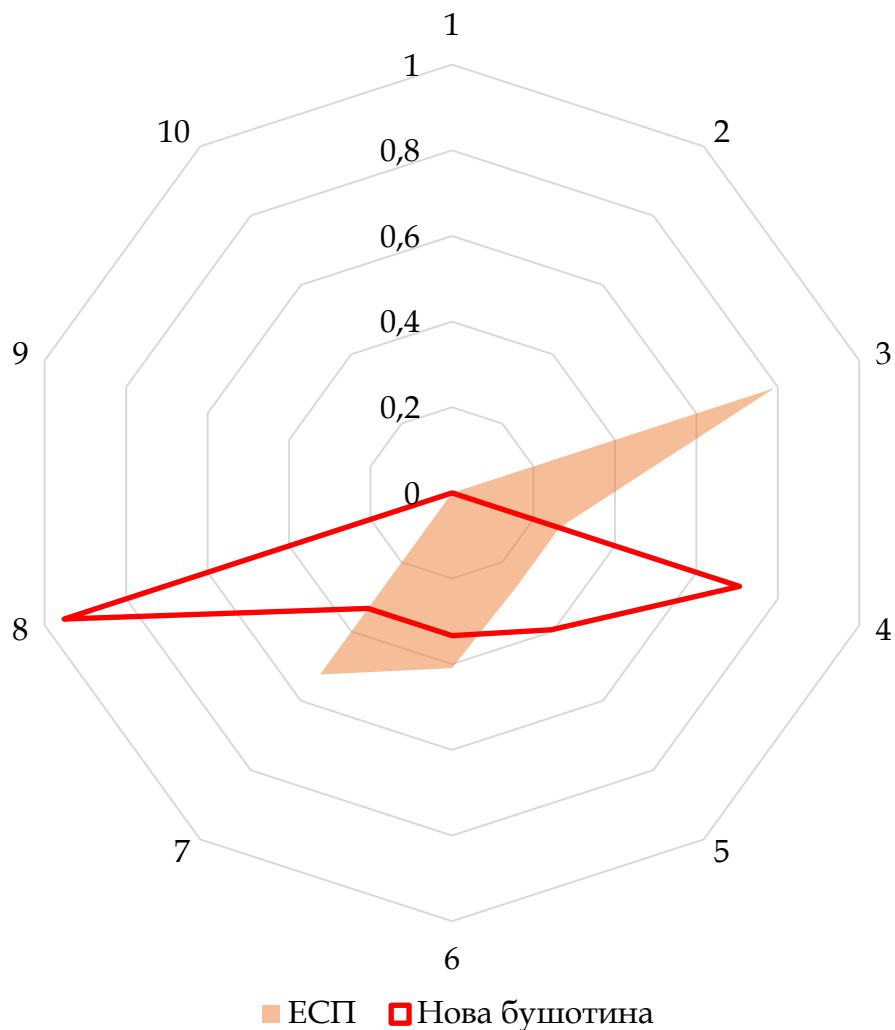
Слика 6.2. Приказ резултата модела - стандарди за све методе експлоатације

На слици 6.3. види се преклапање површине стандарда ГЛ и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ГЛ и нове бушотине може се изразити у процентима који износи 80,35%. То значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударање са стандардом ГЛ од 80,35%.



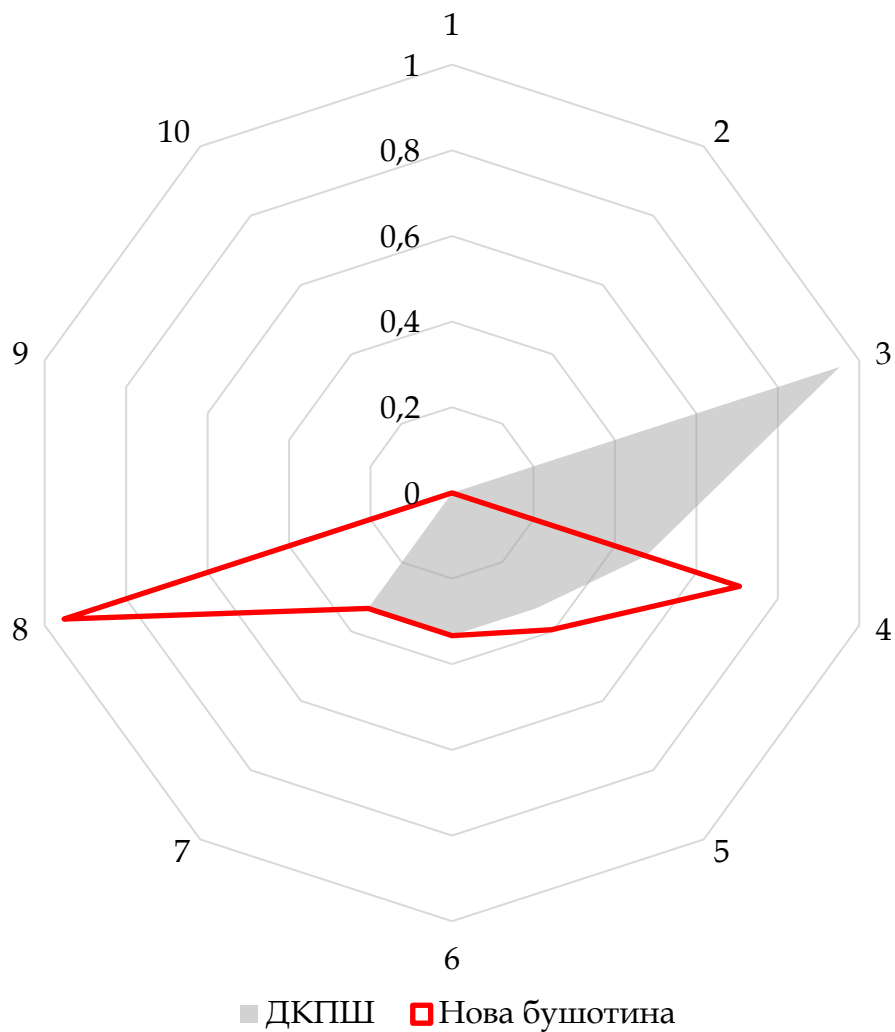
Слика 6.3. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ГЛ са новом бушотином

На слици 6.4. уочава се преклапање површине стандарда ЕЦП и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ЕЦП и нове бушотине може се изразити у процентима и износи 43,91%. То подразумева да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударње са стандардом ЕЦП од 43,91%.



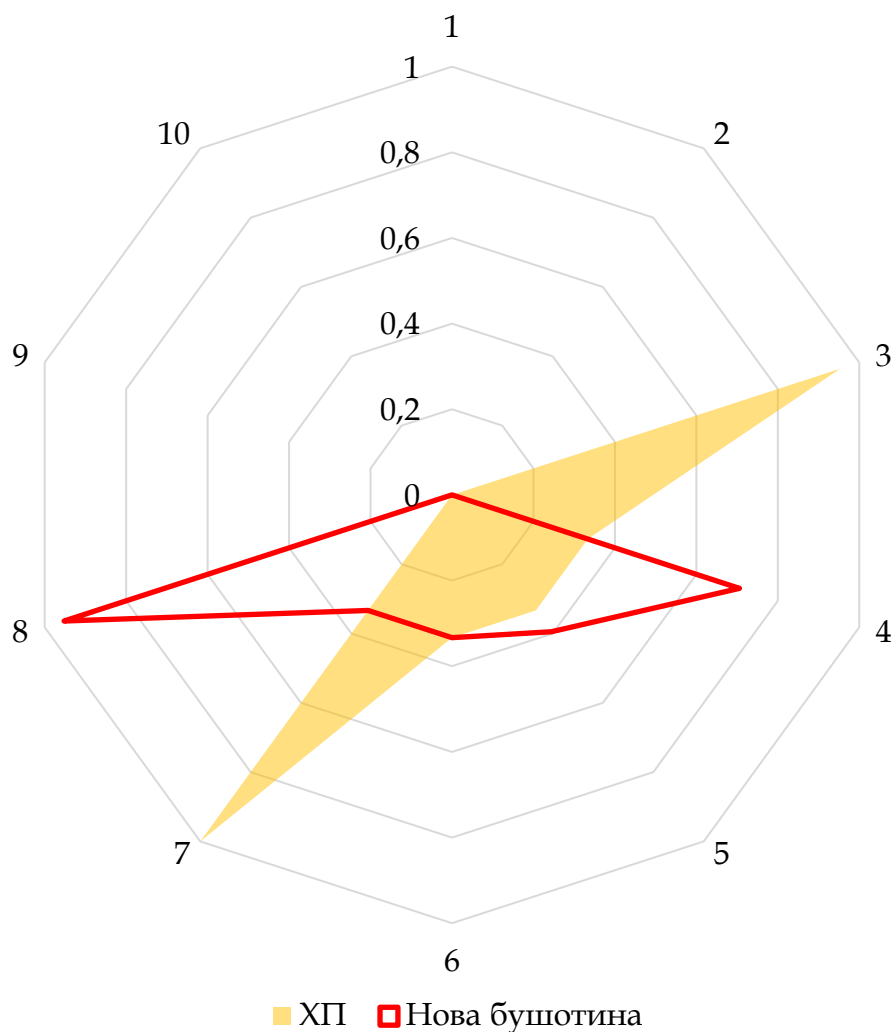
Слика 6.4. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЕЦП са новом бушотином

На слици 6.5. види се преклапање површине стандарда ДПКШ и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ДПКШ и нове бушотине у процентима износи 54,28%, што указује на то да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударање са стандардом ДПКШ од 54,28%.



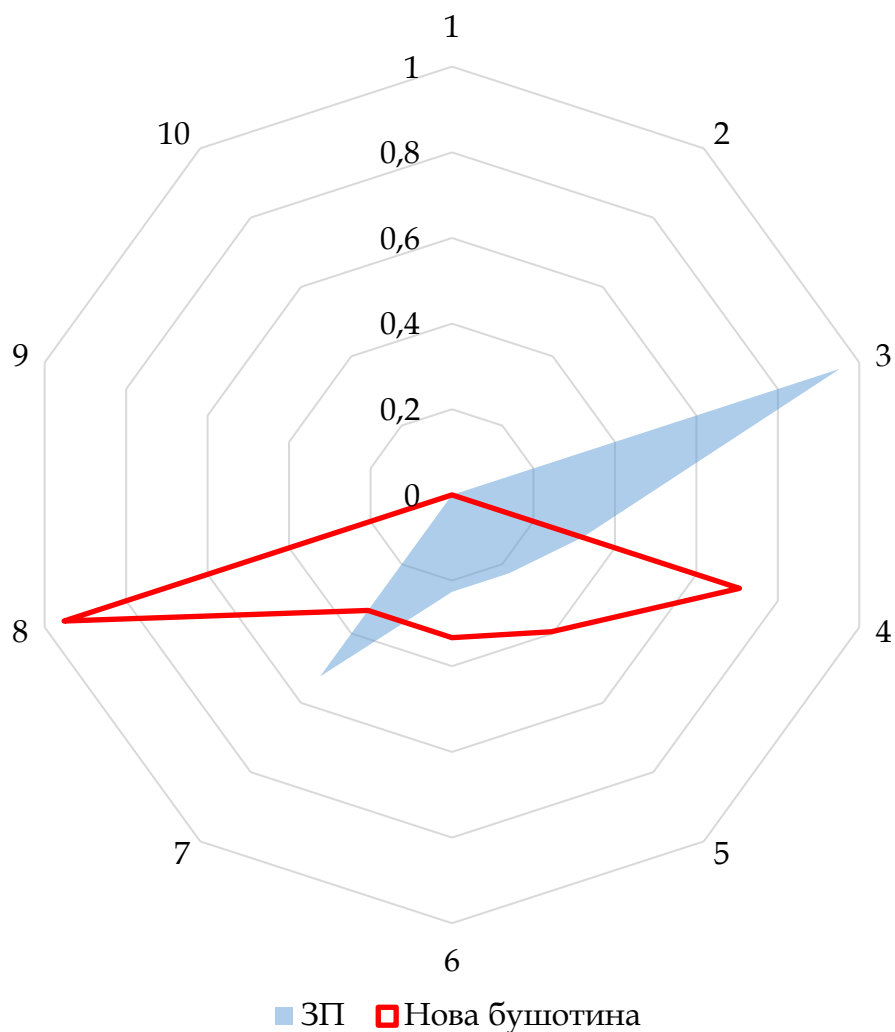
Слика 6.5. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ДПКШ са новом бушотином

На слици 6.6. приказано је преклапање површине стандарда ХП и нове бушотине из лежишта Салман које износи 49,03%. Овај проценат значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударање са стандардом ХП од 49,03%.



Слика 6.6. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ХП са новом бушотином

На слици 6.7. види се преклапање површине стандарда ЗП и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ЗП и нове бушотине износи 40,70%, што значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударње са стандардом ЗП од 40,70%.



Слика 6.7. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЗП са новом бушотином

Табела 6.1.Проценти преклапања површина пет механичких метода са новом бушотином (Crnogorac et al, 2020)

Метода	Преклапање методе са новом бушотином (%)
ГЛ	80,35
ДПКШ	54,28
ЕЦП	43,91
ХП	49,03
ЗП	40,70

На основу графичких и аналитичких резултата види се да је метода ГЛ на првом мјесту тј. најпримјењивија је за разматрани случај у износу од 80,35 %. Остале 4 методе су примјењиве у опсегу од 40 – 55 %.

Евидентно је да су параметри који разграничавају стандардне методе експлоатације доста блиски осим код методе ЕЦП. Преклапања која су међусобно блиска су честа.

Овај проблем се може ријешити ако се резултати прикажу у координатном систему које чини тежиште добијених површина Z и расипања (стандардна девијација) S (Error! Reference source not found..).

Користећи једначине (11) и (12) дат је примјер рачунања тежишта и расипања за нову бушотину:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{10} \mu_i x_i}{\sum_{i=1}^{10} \mu_i}$$

$$= \frac{0 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 3 + 0,706 \cdot 4 + 0,395 \cdot 5 + 0,333 \cdot 6 + 0,333 \cdot 7 + 0,952 \cdot 8 + 0 \cdot 9 + 0 \cdot 10}{0 + 0 + 0 + 0,706 + 0,395 + 0,333 + 0,333 + 0,952 + 0 + 0}$$

$$= 6,159$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_{sr})^2}{10 - 1}}$$

$$= \sqrt{\frac{(0 - 0,272)^2 + (0 - 0,272)^2 + (0 - 0,272)^2 + (0,706 - 0,272)^2 + (0,395 - 0,272)^2 + (0,333 - 0,272)^2 + (0,333 - 0,272)^2 + (0,952 - 0,272)^2 + (0 - 0,272)^2 + (0 - 0,272)^2}{9}}$$

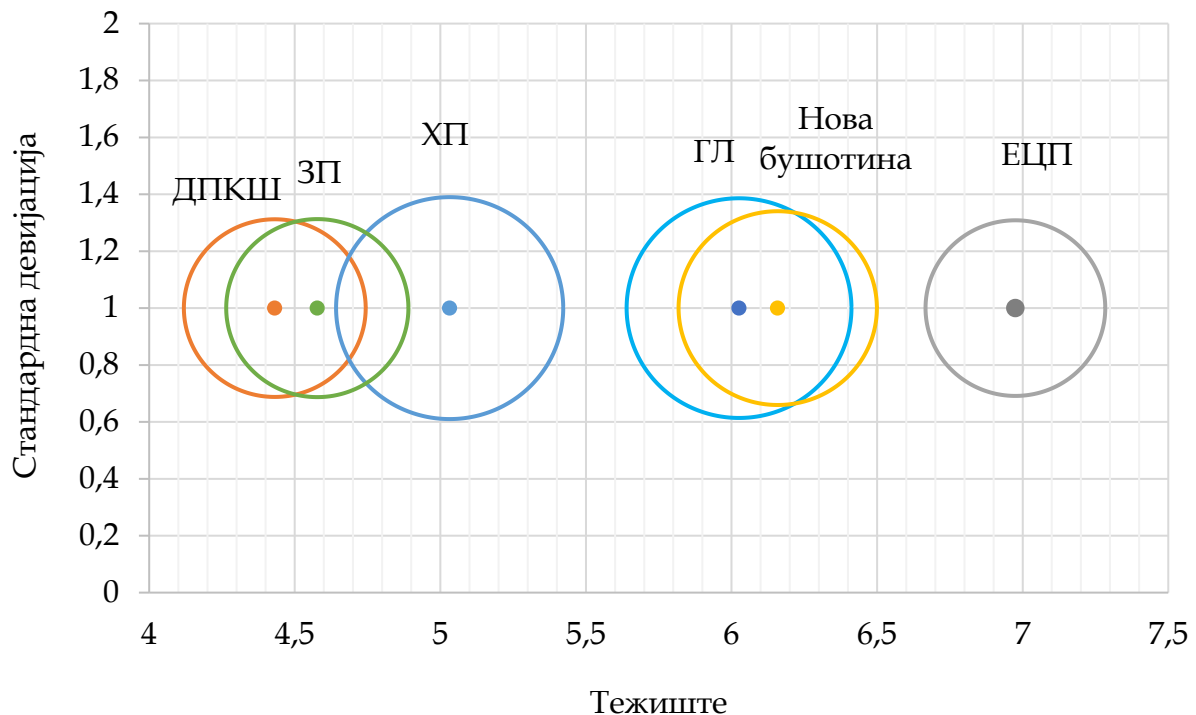
$$= 0,341$$

На основу једначина (11) и (12) израчуната су тежишта и расипање за сваки од резултата модела. Стандарди механичких метода су добијени сумирањем великог броја излаза за бушотине са добрим резултатима примјене одговарајуће методе. За сваку сумирану површину израчунати су тежиште и расипање (табела 6.2.).

Табела 66.2. Вриједности тежишта и расипања за сваки од стандарда (Crnogoras et al, 2020)

Механичка метода експлоатације	Тежиште	Стандардна девијација
ГЛ	6,0258	0,3861
ДПКШ	4,4314	0,3122
ЕЦП	6,9750	0,3086
ХП	5,0320	0,3901
ЗП	4,5774	0,3128

На слици 6.8 се види да је позиција нове бушотине блиска позицији стандарда за методу ГЛ са врло благим нагињањем ка методи ЕЦП.

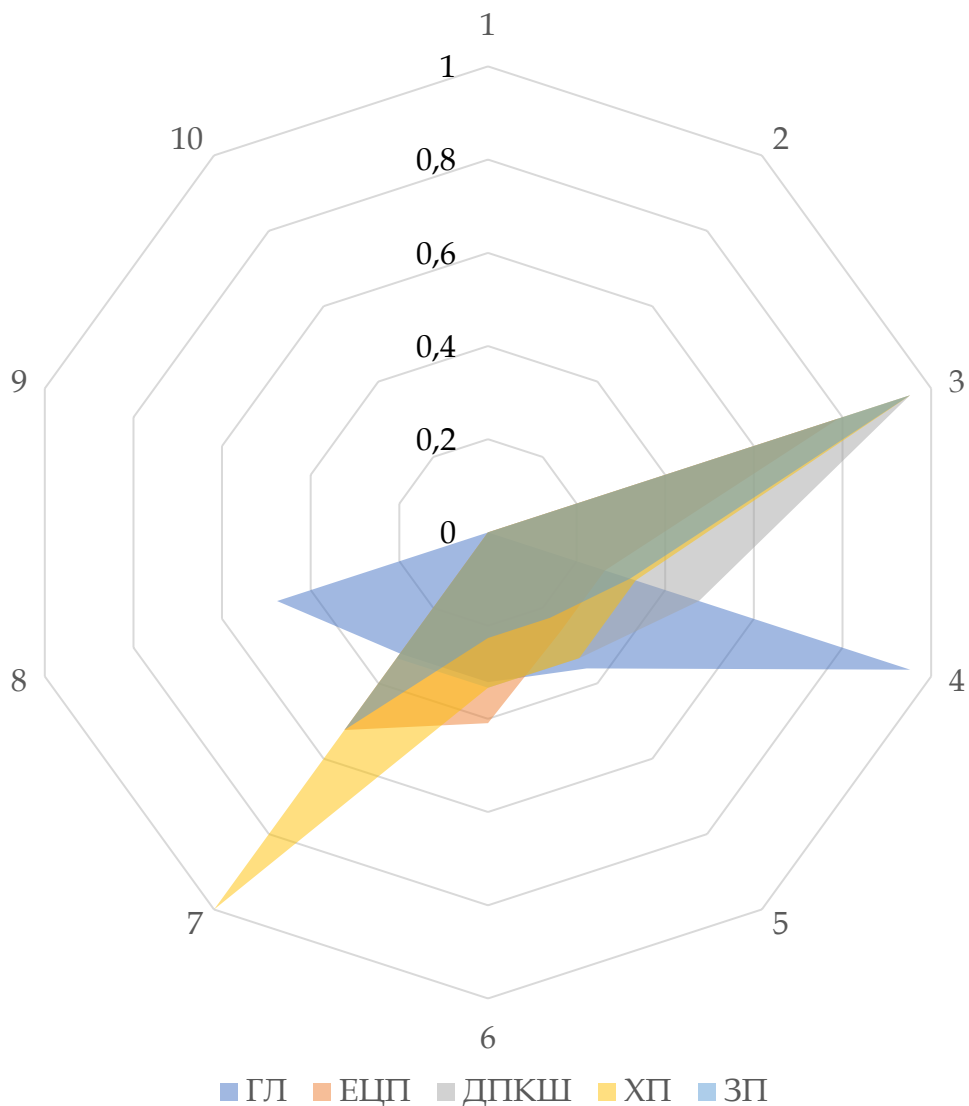


Слика 6.8. Тежиште и расипање излаза за нову бушотину у односу на стандарде за остале методе

Други примјер:

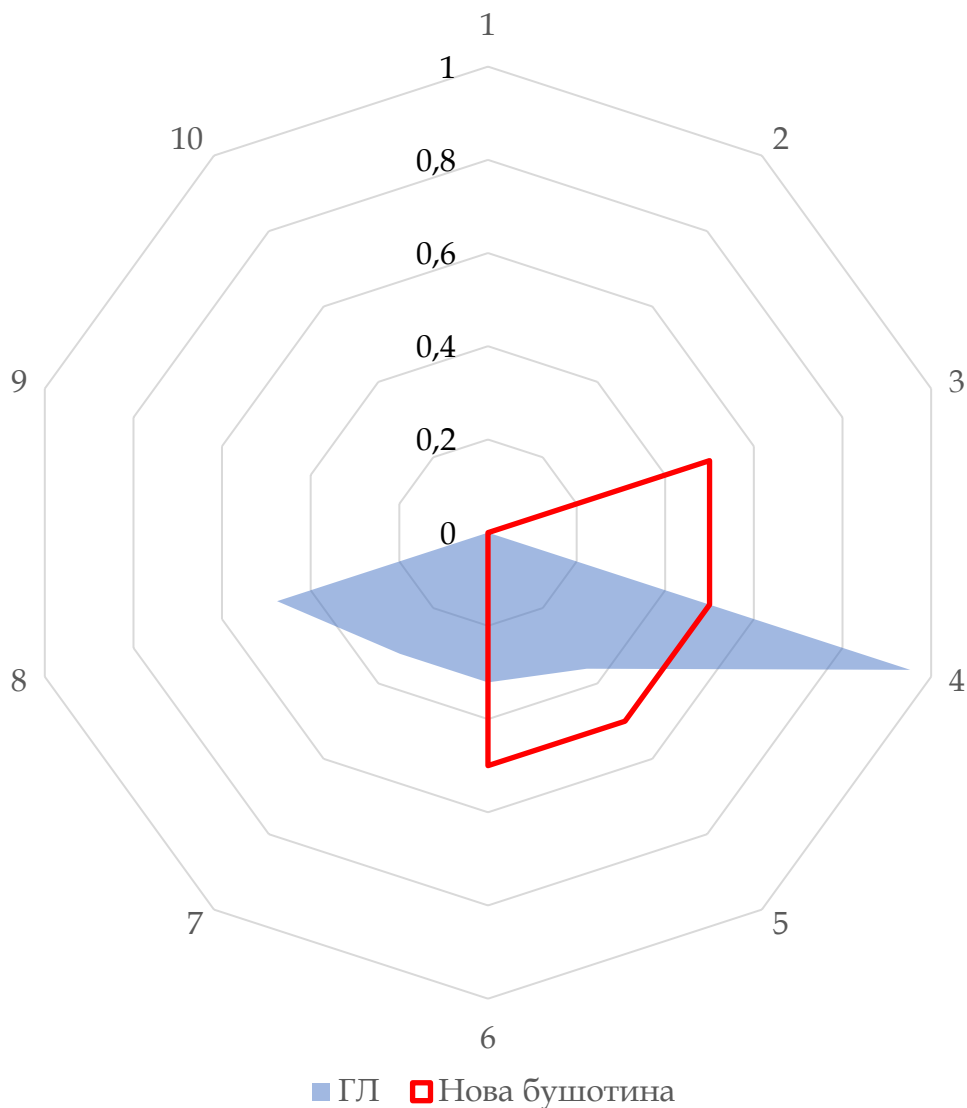
Подаци са истражног подручја Србије унијети су у модел, описан у претходном поглављу и добијени су резултати приказани на сликама 6.9.-6.14. На сликама је дат координатни систем типа радар са означеним површинама. Површине представљају сваку од пет разматраних метода механичке експлоатације у зависности од функције припадности (μ) у радијалном смјеру и класе (j) у кружном смјеру. Свака од пет уобичајено коришћених метода (ГЛ, ЕЦП, ДПКШ, ХП, ЗП) дефинише одређену површину која је стандард. Ниво преклапања површина фигуре, која представља резултате за нову бушотину и неке од стандардних површина, представља ниво примјенљивости стандардне методе за услове нове бушотине.

На Слика 6.2.9. дат је приказ стандарда, односно свих метода. На сликама 6.10.-6.14. дат је приказ поређења примјенљивости појединачних стандардних метода са новом бушотином. Ниво преклапања може се изразити у процентима што је дато у табели 6.3.



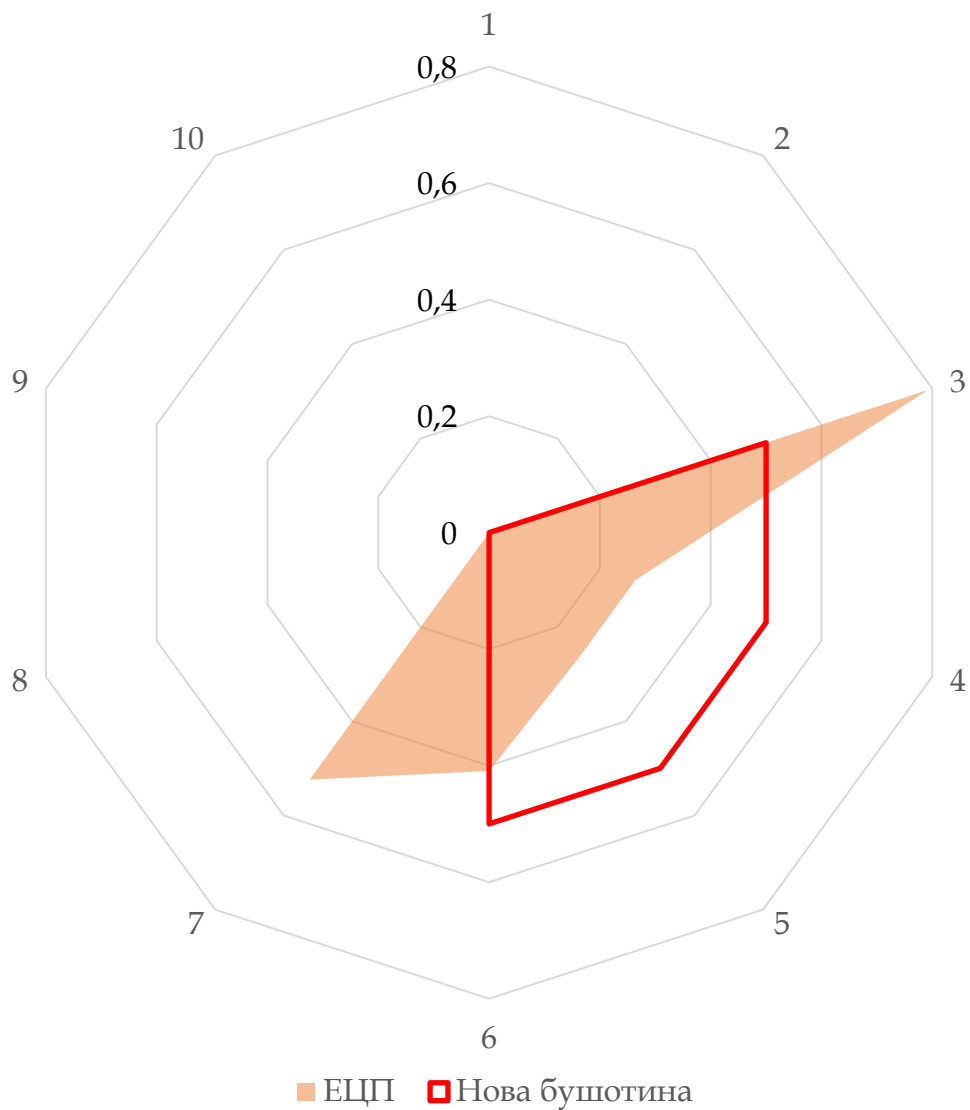
Слика 6.9. Приказ резултата модела - стандарди за све методе експлоатације

На слици 6.10. види се преклапање површине стандарда ГЛ и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ГЛ и нове бушотине може се изразити у процентима који износи 59,11%. То значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударање са стандардом ГЛ од 59,11%.



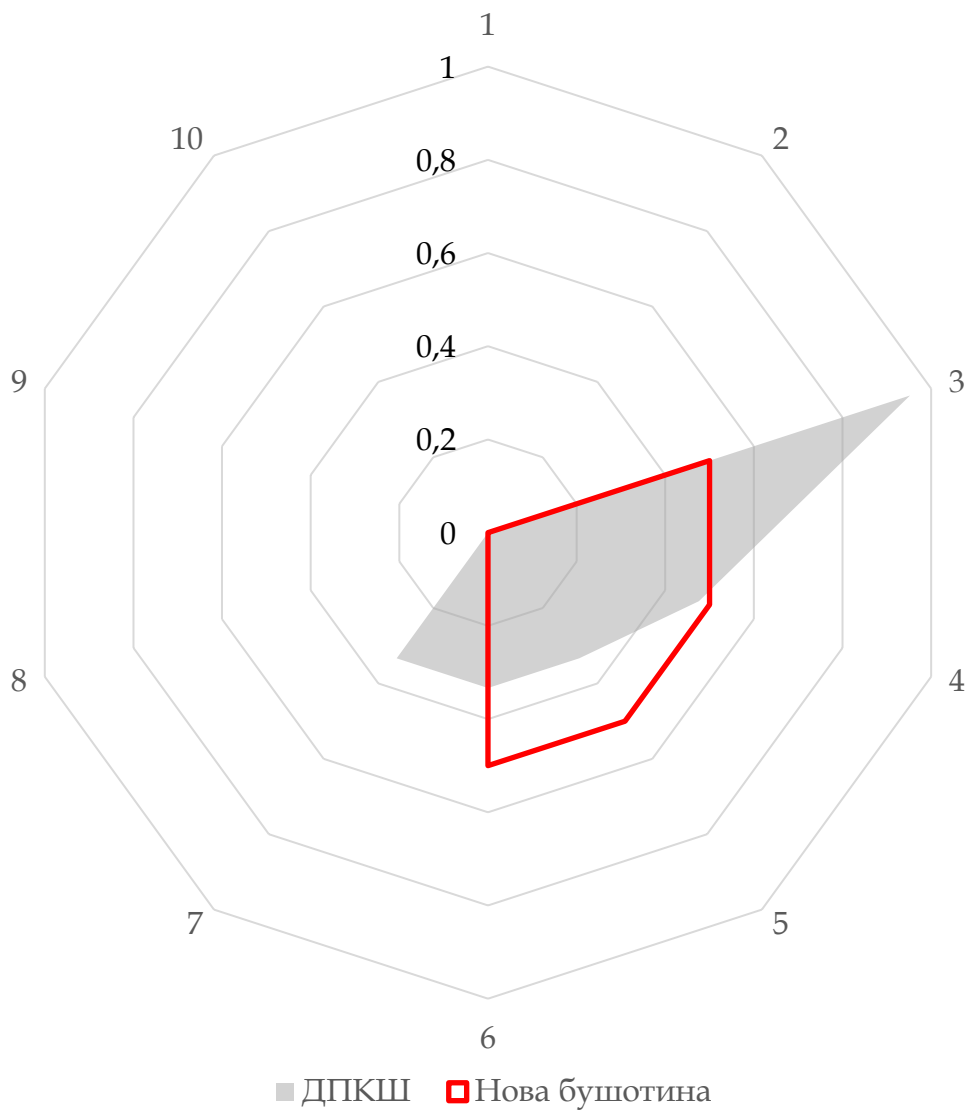
Слика 6.10. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ГЛ са новом бушотином

На слици 6.11. уочава се преклапање површине стандарда ЕЦП и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ЕЦП и нове бушотине може се изразити у процентима и износи 71,84%. То подразумева да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударане са стандардом ЕЦП од 71,84%.



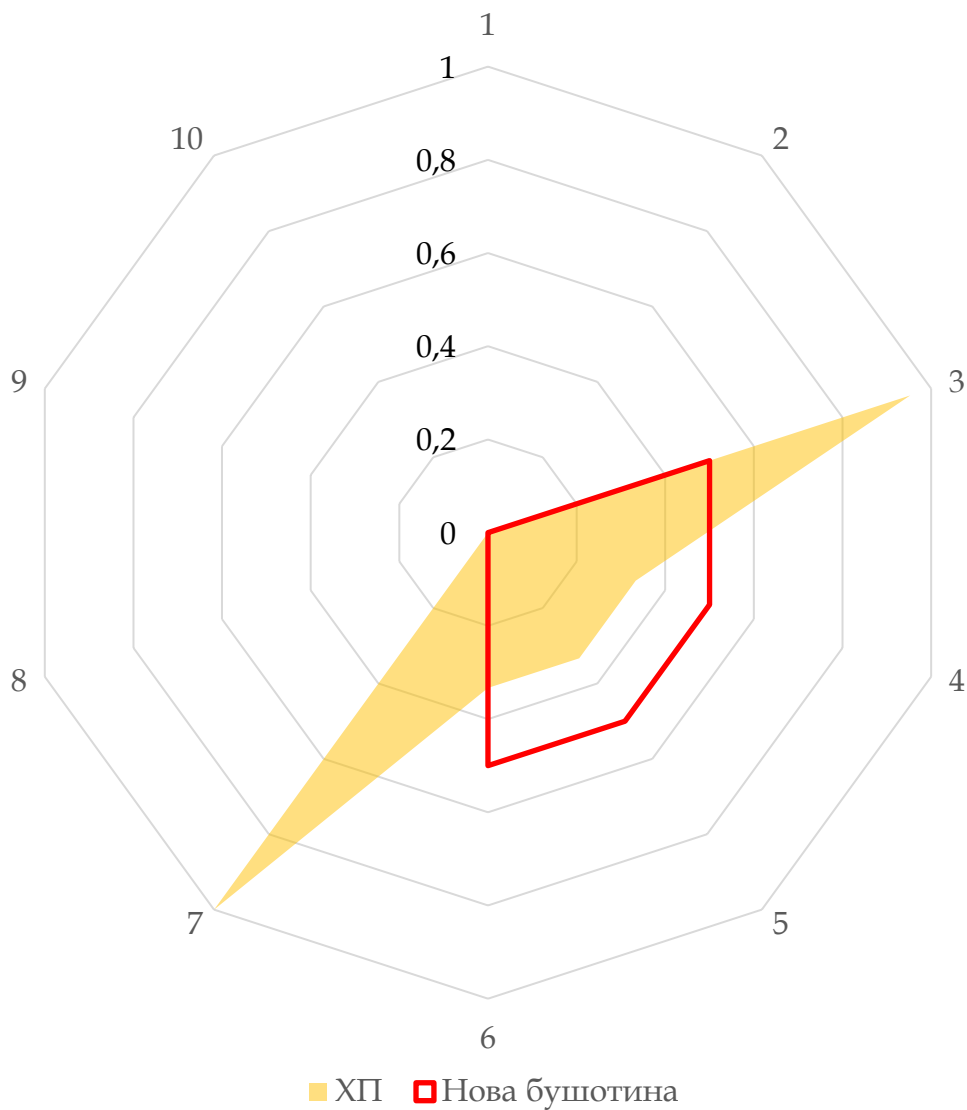
Слика 6.11. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЕЦП са новом бушотином

На слици 6.12. види се преклапање површине стандарда ДПКШ и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ДПКШ и нове бушотине у процентима износи 82,14%, што указује на то да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударане са стандардом ДПКШ од 82,14%.



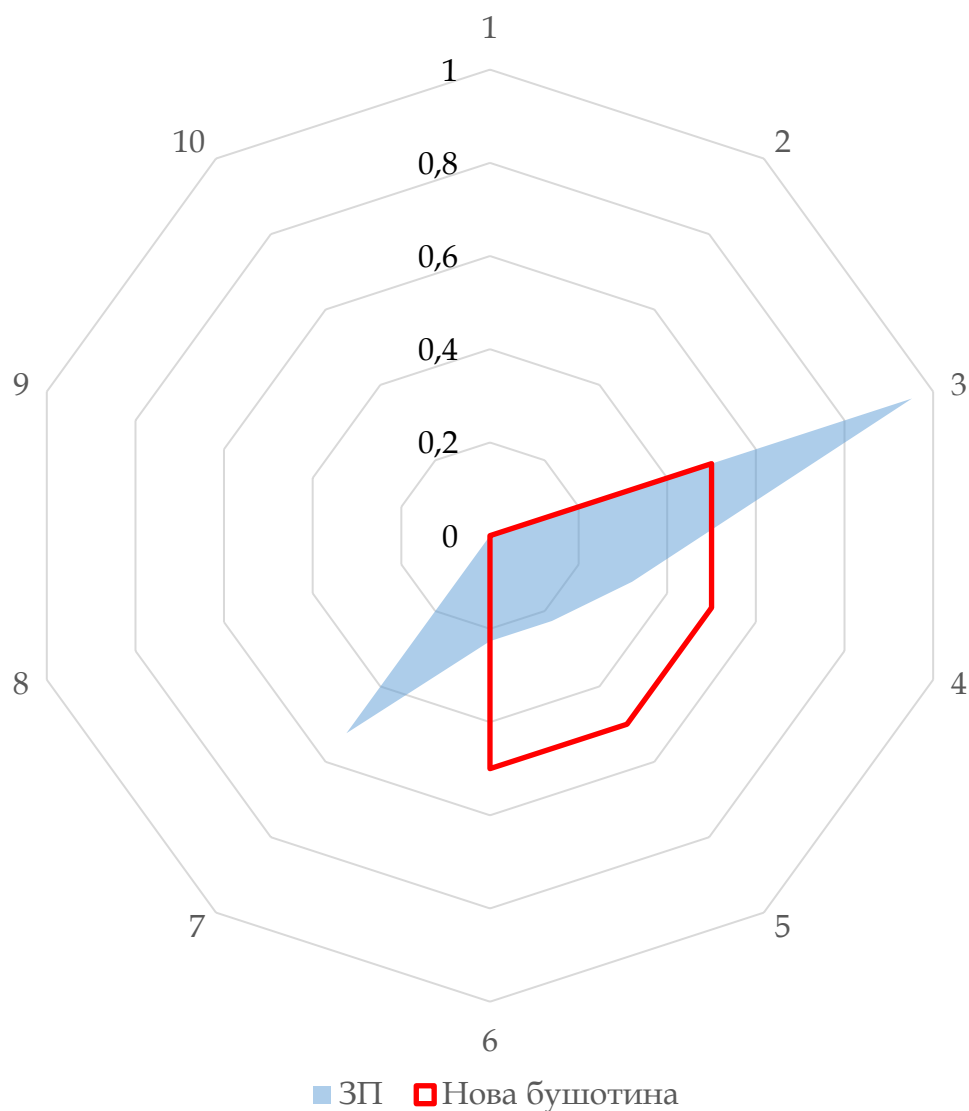
Слика 6.12. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ДПКШ са новом бушотином

На слици 6.13. приказано је преклапање површине стандарда ХП и нове бушотине из лежишта Салман које износи 75%. Овај проценат значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударање са стандардом ХП од 75%.



Слика 6.13. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ХП са новом бушотином

На слици 6.14. види се преклапање површине стандарда ЗП и нове бушотине лежишта Салман. Ово преклапање површина стандарда ЗП и нове бушотине износи 63,68%, што значи да улазни параметри нове бушотине дају излаз из модела који има подударане са стандардом ЗП од 63,68%.



Слика 6.14. Приказ резултата модела - преклапање стандарда ЗП са новом бушотином

Табела 6.3.Проценти преклапања површина пет механичких метода са новом бушотином

Метода	Преклапање методе са новом бушотином (%)
ДПКШ	82,14
ХП	75,00
ЕЦП	71,84
ЗП	63,68
ГЛ	59,11

На основу графичких и аналитичких резултата види се да је метода ДПКШ на првом мјесту тј. најпримјењивија је за разматрани случај у износу од 82,14 %. Остале 4 методе су примјењиве у опсегу од 60 – 75 %.

Евидентно је да су параметри који разграничавају стандардне методе експлоатације доста блиски. Преклапања која су међусобно блиска су честа. Овај проблем се може ријешити ако се резултати прикажу у координатном систему које чини тежиште добијених површина Z и расипања (стандардна девијација) S (**Error! Reference source not found.15.**).

Користећи једначине (11) и (12) дат је примјер рачунања тежишта и расипања за нову бушотину:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{10} \mu_i x_i}{\sum_{i=1}^{10} \mu_i} = \frac{0 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 0,5 \cdot 3 + 0,5 \cdot 4 + 0,5 \cdot 5 + 0,5 \cdot 6 + 0 \cdot 7 + 0 \cdot 8 + 0 \cdot 9 + 0 \cdot 10}{0 + 0 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0 + 0 + 0 + 0} = 4,5$$

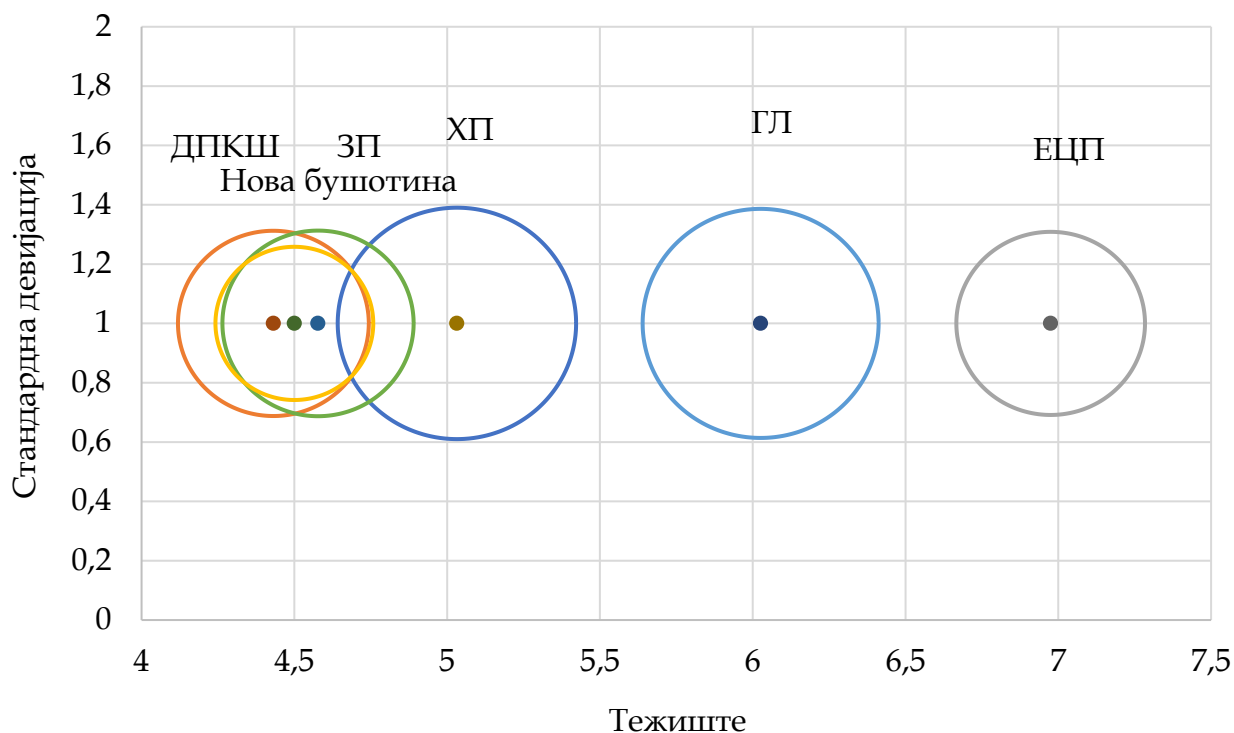
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - x_{sr})^2}{10 - 1}} = \sqrt{\frac{(0 - 0,2)^2 + (0 - 0,2)^2 + (0,5 - 0,2)^2 + (0,5 - 0,2)^2 + (0,5 - 0,2)^2 + (0,5 - 0,2)^2 + (0 - 0,2)^2 + (0 - 0,2)^2 + (0 - 0,2)^2 + (0 - 0,2)^2}{9}} = 0,2582$$

На основу једначина (11) и (12) израчуната су тежишта и расипање за сваки од резултата модела. Стандарди механичких метода су добијени сумирањем великог броја излаза за бушотине са добрим резултатима примјене одговарајуће методе. За сваку сумирану површину израчунати су тежиште и расипање (табела 6.4.).

Табела 66.4. Вриједности тежишта и расипања за сваки од стандарда

Механичка метода експлоатације	Тежиште	Стандардна девијација
ГЛ	6,0258	0,3861
ДПКШ	4,4314	0,3122
ЕЦП	6,9750	0,3086
ХП	5,0320	0,3901
ЗП	4,5774	0,3128

На слици 6.15 се види да је позиција нове бушотине блиска позицији стандарда за методу ДПКШ са значајним нагињањем ка методи ЗП.



Слика 6.15. Тежиште и расипање излаза за нову бушотину у односу на стандарде за остале методе

6.2. Тест осјетљивости модела

Осјетљивост овог модела може се испитати на основу интензитета промјена улазних параметара за нову бушотину са нафтног поља Салман и интензитета промјене резултата. Да би се излазни резултат Z (тежиште) помјерио ка стандарду за ЕЦП, потребно је се улазни параметри под индикатором А и С промјене у мјери од -10%, а параметри под индикатором В за 25%. За случај да се Z помјери ка стандарду ДПКШ, потребно је да се у износу од -20% промјене параметри под индикатором В, док остали параметри остају непромјењени. Уочава се осјетљивост са промјеном параметара за одређени проценат (-20, -15, -10, 10, 15, 20).

Промјеном параметара под одређеним индикатором А, В и С може се постићи да се излаз модела за нову бушотину преклопи са стандардима метода (табела 6.5.).

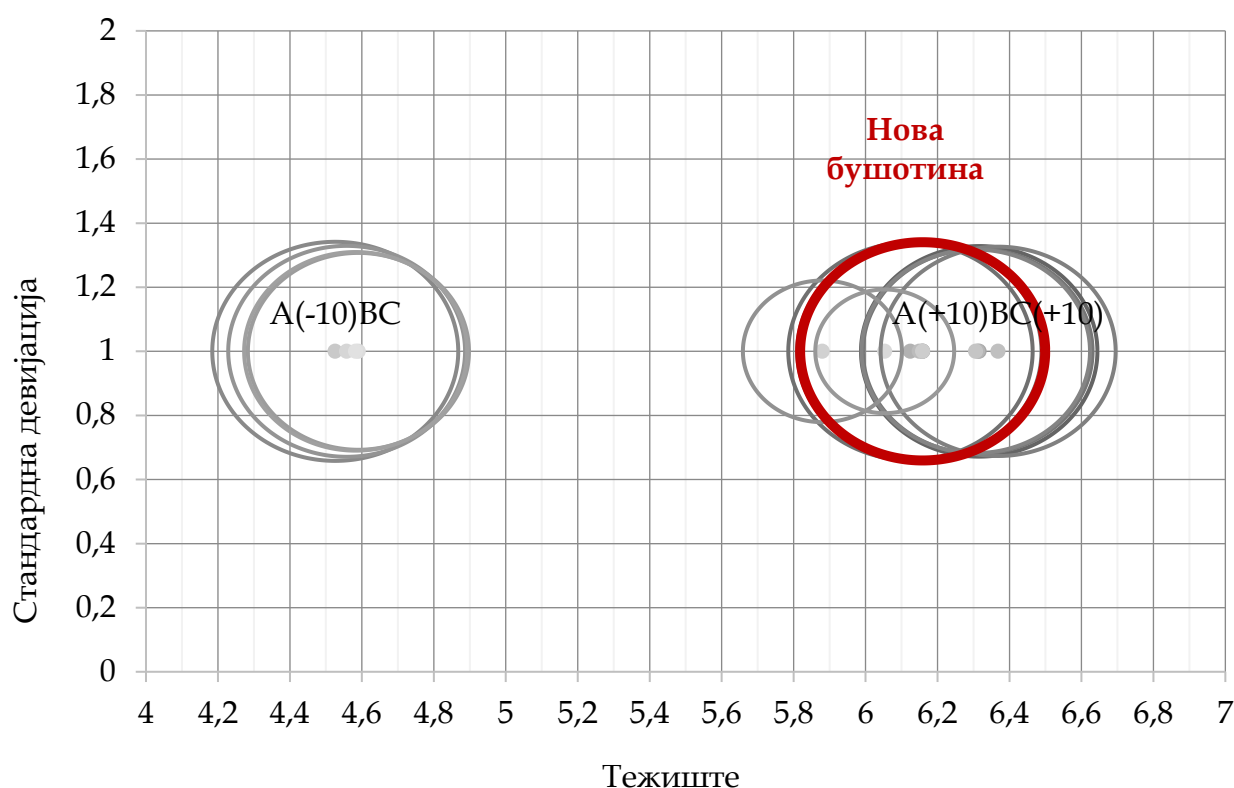
Табела 6.5. Потребан проценат промјене параметара нове бушотине у циљу помјерања резултата ка познатим стандардима (Crnogoras et al, 2020)

А	В	С	Механичка метода
30	20	10	ГЛ
0	-20	0	ДПКШ
-10	25	-10	ЕЦП
-10	-20	-20	ХП

-15	0	0	ЗП
-----	---	---	----

На дијаграму датом на слици 6.16. види се да уколико се параметри повећавају долази до помјерања тежишта у десну страну. Приликом смањивања параметара долази до помјерања тежишта у лијеву страну дијаграма. Неравномјерно помјерање тежишта у лијеву страну дијаграма је посљедица тога што се већи број параметара налази на граничним вриједностима (1 или 10).

На основу изнијетих запажања везано за тестирање осјетљивости модела, може се закључити да излазни резултат прати промјене улазних података у очекиваној мјери. Највеће промјене у дисперзији резултата су при промјени параметара индикатора С за -10%, што произлази из тога што индикатор С има највише параметара на граничним вриједностима. Ограничење овог модела је то што није флексибилан. Пројектован је у односу на емпиријске податке. Може да се користи у односу на најпримјењеније механичке методе и за радне услове који нису екстремни. Овај недостатак би могао да се избјегне другачијим обликом и распоредом улазних фази скупова кроз процес пропозиције. На овај начин би се изгубила прецизност крајњег резултата за уобичајене и највише коришћене методе експлоатације. На овај начин се иде у смислу поштовања Паретовог принципа. Основна предност је у томе што модел даје могућност синтезе великог броја разноликих улазних података, техничких, геолошких, економских итд., који могу бити дефинисани и као егзактне вриједности и као лингвистички описи.



Слика 6.16. Приказ осјетљивости модела при промјени параметара за -10% и +10% (Crnogorac et al, 2020)

7. Закључак

Ефикасна производња нафте данас представља један од кључних аспеката енергетске политике у многим земљама. Ефикасност се може мјерити и анализирати кроз читав низ критеријума и показатеља. У том смислу производња нафте може се посматрати кроз вертикалну и хоризонталну димензију. У наведеном контексту експлоатација је сачињена од низа сегмената као што су истраживање, разрада и производња; и сваки сегмент се може анализирати кроз читав низ индикатора и показатеља, као што су технички, економски, енергетски и други. При томе треба нагласити да постоји и трећа димензија – временска. Односно, сегменти производње и показатељи који их описују нису константе, већ се мијењају са вријемом.

Управљање процесом производње намеће доношење одговарајућих одлука, рјешавање низа недоумица, а све у циљу повећања ефикасности. Један од иницијалних задатака у процесу управљања је проналажење и дефинисање функције циља, која ће за дати сегмент производње најбоље да опише утицајне параметре на њену ефикасност. У овој дисертацији, посматран је избор механичке методе експлоатације као сегмент производње а као функција циља изабрана је перформанса употребљивости или употребног квалитета. Функција циља је при томе посматрана кроз техничке, геолошке и енергетске индикаторе употребљивости изабране методе. У пракси је развијено више метода експлоатације, у зависности од енергије која се користи. Хронолошки најстарија је примарна метода на принципу коришћења природне енергије лежишта, а касније су развијене механичке методе експлоатације тј. доводи се додатна енергија када енергија лежишта није довољна. Данас, с обзиром на нижи потенцијал лежишта, у највећој мјери се користе механичке методе, односно око 75% свих бушотина на свијету користе неку од ових метода. Избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина представља један од најважнијих фактора при остваривању ефикасне а самим тим и економичне производње. Разматрање утицајних индикатора у смислу њиховог дефинисања, разграничења, анализе и синтезе на ниво синтезног индикатора, у циљу добијања приједности и недостатака појединачних механичких метода експлоатације представља кључни корак поступка избора адекватне механичке методе. Другим ријечима адекватна значи и оптимална метода сходно функцији циља која се постави као критеријум избора. У циљу избора оптималне методе мора се узети у обзир велики број критеријума којима се придружује одговарајући ниво значајности ради дефинисања синтезне оцјене. У овом типу приступа избору оптималне механичке методе производње нафтних бушотина у научним и стручним радовима уобичајено се користе приступи на бази модела вишеатрибутивне и вишекритеријумске анализе, као и на бази статистичке обраде података из инжењерске праксе и на бази експертских система.

Анализирани су радови на тему избора механичких метода експлоатације нафтних бушотина. Урађен је пресјек коришћених математичких и концепцијских модела за доношење одлука. Примјетна је доминација експертских модела који се базирају на више-критеријумским и више-атрибутивним моделима. На основу спроведене анализе могу се извући следећи закључци:

- Не постоји стандард који би тачно дефинисао параметре који одређују услове за избор методе експлоатације;
- Параметри су израженог хибридног карактера са присутном неконзистентношћу:

- Не постоји тачно и једнозначно изражена међузависност између утицајних параметара приликом избора методе експлоатације;
- Избор методе експлоатације се заснива на искуству;
- Евидентно је да сваки примијењени модел за избор методе обилује неизвјесношћу, неодређеношћу, вишезначношћу и релативношћу.

Дат је приједлог унапрјеђења постојећих модела и развоја новог модела увођењем фази теорије. Поступци фази пропозиције, фазификације, фази композиције и фази закључивања, фази идентификације у највећој мјери рјешавају проблеме који се намећу на основу изнијетих закључака. Исход као централни дио модела фази закључивања је дефинисан на бази емпиријских података са изабраних нафтних поља. Емпиријски подаци са изабраних поља доносе у модел квалитет који му даје дубину по све три димензије понашања процеса експлоатације.

Модел има оптимизациони карактер у циљу избора механичке методе експлоатације нафте. Излаз је у континуалној форми која рангира методе према критеријуму употребљивости и даје тенденцију сваке методе ка граничним условима. За разлику од уобичајених модела који се базирају на више-критеријумској оптимизацији, предложени модел смањује субјективност у дефинисању приоритета приликом дефинисања улазних параметра у модел избора.

Модел садржи аналитички дио који сагледава све улазне параметре у оквиру референтних вриједности и синтезни који улазне параметре своди у један. Модел садржи механизам закључивања који на основу улазних података и практичног знања о посматраном проблему даје рјешење. За рјешавање овакве проблематике коришћена је фази теорија, односно модел композиције који поступак оптимизације своди на идеју избора најмање лошег рјешења у односу на постојеће емпиријске податке.

Истраживања која су спроведена у дисертацији у научном и стручном смислу могу да се сагледају кроз резиме:

- Удио примјене механичких метода експлоатације нафтних бушотина у свијету је велики
- Избор механичке методе експлоатације нафтних бушотина представља један од најважнијих фактора при остваривању ефикасне а самим тим и економичне производње.
- У пракси не постоји општи модел и стандарди за избор механичких метода експлоатације нафте већ свака нафтна компанија користи експертске системе и моделе, које најчешће сама развија за услове бушотина са подручја њеног ангажовања.
- Развијен је нови модел са перформансом употребљивости као функцијом циља.
- Модел смањује субјективност у дефинисању приоритета приликом дефинисања улазних параметра, за разлику од уобичајених модела који се базирају на више-критеријумској оптимизацији.
- Модел даје могућност синтезе великог броја различитих улазних података, техничких, геолошких, економских итд., који могу бити дефинисани и као егзактне вриједности и као лингвистички описи.
- Модел спада у моделе одлучивања и условно може да спада у моделе за предикцију. Уколико за улазне параметре предвидимо колике вриједности ће

имати у неком будућем интервалу, за те вриједности модел може да предложи оптималну механичку методу експлоатације.

Модел може да има широку примјену, јер стандарде механичке методе експлоатације је могуће креирати посебно за свако нафтно поље. На основу параметара бушотине за коју се врши избор механичке методе експлоатације могуће је изабрати стандарде метода са улазним подацима који најсличнији новој бушотини. На овај начин се може одредити оптимална механичка метода експлоатације још прецизније.

Резултати се представљају на два начина површинама неправилних геометријских тијела и њиховим тежиштем са расипањем резултата. Први начин приказа резултата даје процентуално преклапање нове бушотине и стандарда. У ситуацији да првим начином није лако интерпретирати резултате користи се други начин који даје излаз који се лако интерпретира.

Креирани модел је верификован на више примјера гдје је резултат потврдио да су већ примијењене методе гас лифт и ДПКШ и најадекватније методе експлоатације. Урађено је и поређење са резултатима других модела за избор механичких метода за поменута нафтна поља. Поређење показује да се резултати у потпуности поклапају. На крају, дата је и анализа осјетљивости развијеног модела

Модел може да нађе примјену као дио софтвера база података нафтних компанија, гдје би на основу постојећих података могао да дефинише приједлог избора механичке методе експлоатације у сваком тренутку животног вијека бушотине. Поред тога кроз филтрирањем података могао би да оптимизује резултате тј. прилагоди их свакој ситуацији узевши у обзир специфичности бушотине за коју се врши избор механичке методе експлоатације.

8. Литература

- Alemi, M., Jalalifar, H., Kamali, G. R., & Kalbasi, M. (2011). A mathematical estimation for artificial lift systems selection based on ELECTRE model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(1), 193-200.
- Alemi, M.; Jalalifar, H.; Kamali, G.; Kalbasi, M., (2010). A prediction to the best artificial lift method selection on the basis of TOPSIS model. *J. Pet. Gas Eng.*, 1, 009-015.
- Alemi, M.; Kalbasi, M.; Rashidi, F., (2013). A mathematical prediction based on SAW model. *Middle East J. Sci. Res.*, 18, 1077-1082.
- Alemi, M.; Kalbasi, M.; Rashidi, F., (2013). A mathematical prediction based on VIKOR model. *Middle East J. Sci. Res.*, 18, 1035-1041.
- Beckwith, R. (2014). Pumping oil: 155 years of artificial lift. *Journal of Petroleum Technology*, 66(10), 101-107.
- Bellarby, J. (2009). *Well Completion Design*, Elsevier
- Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2), 203-213.
- Bowles, J. B.; Peláez, C. E., (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50 (2), 203-213.
- Cholet, H. (1997). *Progressing cavity pumps*. Paris: Éditions Technip.
- Clegg, J. D., Bucaram, S. M., & Hein, N. W. (1993). Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods (includes associated papers 28645 and 29092). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/24834-PA
- Clegg, J.D., (1988). High-rate artificial lift. *J. Pet. Technol.*, 40, 277-282.
- Crnogorac M., Tanasijević M., Danilović D., Maričić V.K., & Leković B. (2020). Selection of Artificial Lift Methods: A Brief Review and New Model Based on Fuzzy Logic. *Energies*. 13(7):1758.
- Crnogorac, M., Danilović, D., Karović-Maričić, V., & Leković, B. (2016). Analiza primene višekriterijumskih modela u cilju izbora optimalne mehaničke metode za proizvodnju nafte. *Tehnika*, 71(3), 381-388.
- Crnogorac, M., Karović Maričić, V., Leković, B. and Danilović, D. (2015). Analiza primene električnih uronjenih centrifugalnih pumpi na eksploatacionom prostoru južnog dela Panonskog basena. *Energija*, 17 (1-2): 192-196.
- Danilović, D. (2003). *Mehaničke metode eksploatacije nafte i gasa*, monografija, NIS Novi Sad, 181.
- Danilović, D., (2001). *Optimizacija proizvodnje malih naftnih polja primenom modela integralnog upravljanja*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko Geološki Fakultet.
- Danilović, D., Karović-Maričić, V., Leković, B., Crnogorac, M., & Tanasijević, M. (2016). Parametri koji definišu optimalnu proizvodnju naftnih bušotina pri primeni mehaničke metode eksploatacije. *Tehnika*, 71(2), 209-214.
- Espin, D.A.; Gasbarri, S.; Chacin, J.E.,(1994). Expert System for Selection of Optimum Artificial Lift Method. In *SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Society of Petroleum Engineers: Buenos Aires, Argentina, 9.
- Heinze, L.R.; Winkler, H.W.; Lea, J.F.(1995). Decision Tree for Selection of Artificial Lift Method. In *SPE Production Operations Symposium*, Society of Petroleum Engineers: Oklahoma City, Oklahoma, 8.

- Jovančić, P., Tanasijević, M., Milisavljević, V., Cvjetić, A., Ivezić, D. & Bugarić, U. (2020). Applying the Fuzzy Inference Model in Maintenance Centered to Safety: Case Study - Bucket Wheel Excavator, Applications and Challenges of Maintenance and Safety Engineering in Industry 4.0. Hershey, PA: IGI Global. doi:10.4018/978-1-7998-3904-0
- Klir, G., (1997). Fuzzy sets and fuzzy logic, Prentice Hall P T R , Neew Jersey, USA
- Klir, G.J.; Yuan, B.,(1996). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 36 (3), 619-619.
- Kostić, A., (2015). *Ležišta i istraživanje nafte i gasa [Deposits and exploration of oil and gas]*. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki Fakultet: Beograd, Serbia, 260.
- Kumar, S. (2013). Designing Of An Electrical Submersible Pump. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(9), 874-878.
- Lake, L. W., & Clegg, J. D. (2007). *Petroleum engineering handbook*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- Langbauer, C., & Kaserer, G. (2018). *Industrial application of a linear drive system in a pump testing facility*. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). doi:10.1109/aced.2018.8341726
- Miodragovic, R.; Tanasijevic, M.; Mileusnic, Z.; Jovancic, P., (2012). Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory. *Expert Syst. Appl.*, 39, 8940-8946.
- Miodragovic, R.; Tanasijevic, M.; Mileusnic, Z.; Jovancic, P.,(2012). Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory. *Expert Systems with Applications*, 39 (10), 8940-8946.
- Moon, T. (2016). The Defining Series: Jet Pumps [Online]. Available: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-jet-pumps/> [Accessed 15.11.2019].
- Neely, B.; Gipson, F.; Clegg, J.; Capps, B.; Wilson, P., (1981). Selection of Artificial Lift Method. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*; Society of Petroleum Engineers: San Antonio, TX, USA, 11.
- Nguyen, T., *Advanced Artificial Lift Methods - PE 571 Chapter 1 - Electrical Submersible Pump Introduction*, New Mexico Tech University. <https://documents.pub/document/advanced-artificial-lift-methods-electrical-submersible-pump-advanced-artificial.html>
- Parveen, *Gas lift Equipment - Completion System*. [Online]. Available: <https://parveen.in/wp-content/uploads/2019/12/Completion-Systems31.pdf> [Accessed 05.02.2020].
- Petrović, D. V., Tanasijević, M., Milić, V., Lilić, N., Stojadinović, S., & Svrkota, I. (2014). Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. *Expert Systems with Applications*, 41(18), 8157-8164.
- Production Technology*, (2005). Edinburgh: Heriot Watt University.
- Rigzone, *How Does Artificial Lift Work?* [Online]. Available: https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=315&c_id=
- Ross, T.J., (2010). *Fuzzy logic with engineering applications*. Third Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- Soleša, M. (2003). *Mehaničke metode eksploatacije nafte i gasa*. NIS Novi Sad.
- Soleša, M., Danilović, D., Buza, Ž.(1999). *Sistem analiza proizvodnje nafte i gasa eruptivnom metodom*. DIT Novi Sad, Rudarsko-geološki fakultet Beograd. ISBN 86-7352-024-X
- Subašić, P., (1997). *Fazi logika i neuronske mreže*, Tehnička knjiga Beograd, Beograd.
- Takacs, G. (2005). *Gas lift manual*. PennWell Books.

- Takács, G. (2015). *Sucker-Rod Pumping Handbook: Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping*.
- Takacs, G. (2015). *Sucker-rod pumping handbook: production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping*. Gulf Professional Publishing.
- Takacs, G. (2017). *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*. Gulf professional publishing.
- Tanasijevic M, Jovancic P, Ivezic D, Bugaric U, Djuric R, (2019) A fuzzy-based decision support model for effectiveness evaluation - A case study of the examination of bulldozers. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice* Vol 26, No 6
- Tanasijevic, M., Jovancic, P., Ivezic, D., Bugaric, U., & Djuric, R. (2019). A FUZZY-BASED DECISION SUPPORT MODEL FOR EFFECTIVENESS EVALUATION - A CASE STUDY OF EXAMINATION OF BULLDOZERS. *International Journal Of Industrial Engineering: Theory, Applications And Practice*, 26(6). Retrieved from <http://journals.sfu.ca/ijietap/index.php/ijie/article/view/3304>
- Tanasijević, M., (2007). Sigurnost funkcionisanja mehaničkih komponenti rotornog bagera. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- Tanasijević, M.; Ivezić, D.; Jovančić, P.; Čatić, D.; Zlatanovic, D., (2013). Study of Dependability Evaluation for Multi-hierarchical Systems Based on Max-Min Composition. *Quality and Reliability Engineering International*, 29.
- Tanasijević, M.; Ivezić, D.; Jovančić, P.; Ignjatović, D.; Bugaric, U., (2013). Dependability assesment of open-pit mines equipment - Study on the bases of fuzzy algebra rules. *Eksploatacija i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, 15, 66-74.
- Teodorovic, D.; Vukadinovic, K., (1998). Traffic Control and Transport Planning: a Fuzzy Sets and Neural Networks Approach.
- Teodorovic, D.; Vukadinovic, K., (1998). Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach. *Int. Ser. Intell. Technol.*, doi:10.1007/978-94-011-4403-2.
- Valentin, E.P.; Hoffmann, F.C., (1988). OPUS: An Expert Advisor for Artificial Lift. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers: Houston, TX, USA, 8.
- Wang, J., (2000). A subjective modeling tool applied to formal ship safety assessment. *Ocean Engineering*, 27, 1019-1035.
- Wang, J.; Yang, J. B.; Sen, P.,(1995). Safety analysis and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 47 (2), 103-118.
- Zadeh, L., (1965). Fuzzy sets, *Information and Control*, Volume 8, 338-353
- Zelić, M., & Čikeš, M. (2006). Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama. 329 pp. *INA-Naftaplin, Zagreb*.
- Zimmermann, H.J., (1996). Fuzzy set theory - and its application. Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London.
- Добыча нефти и газа[Online]. Конструкция и технические характеристики модулей УЭЦН.. Available: <http://oilloot.ru/84-oborudovanie-truby-materialy-dlya-nefti-i-gaza/125-konstruktsiya-i-tekhnicheskie-kharakteristiki-modulej-uetsn/> [Accessed 05.11.2019].

БИОГРАФИЈА

Мирослав Црногорац је рођен 10. јула 1985. године у Сарајеву. Похађао је Гимназију „Стојан Церовић“ у Никшићу, природно-математички смјер. Основне академске студије на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, смјер Инжењерство нафте и гаса уписао је 2006. године и завршио је у року, са просјечном оцјеном 9,07 (девет и 7/100). Завршни рад је одбранио у октобру 2010. године, под називом „Оптимална сигурносна опрема на ушћу бушотине“, са оцјеном 10. Школске 2010/2011. године уписао је Дипломске академске студије – Мастер на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, смјер Инжењерство нафте и гаса, које је завршио у року, са просјечном оцјеном 10 (десет) и у јулу 2011. године је одбранио завршни мастер рад под називом „Одређивање оптималних параметара рада бушотина у гаслифту“, са оцјеном 10. Тиме је стекао звање Мастер инжењер рударства. Школске 2011/2012. уписао је докторске студије на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, на студијском програму Рударско инжењерство. У току докторских студија је положио све испите са просјечном оцјеном 9,93.

Од октобра 2011. године је запослен на Рударско-геолошком факултету у звању истраживача-приправника, а од маја 2013. године као истраживач-сарадник финансиран са пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Од марта 2014. године је на позицији асистента на Рударско-геолошком факултету.

Аутор је или коаутор 20 радова објављених у међународним и домаћим часописима као и на међународним или домаћим научно-стручним скуповима из области експлоатације нафтних и гасних бушотина.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Мирослав Црногорац

Број индекса Р703/11

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Оптимизација избора механичке методе експлоатације нафтних бушотина
применом фази логике

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 09.04.2020. год.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Мирослав Црногорац

Број индекса Р703/11

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Оптимизација избора механичке методе експлоатације нафтних бушотина применом фази логике

Ментор проф. др Душан Даниловић и проф. др Милош Танасијевић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 09.04.2020. год.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Оптимизација избора механичке методе експлоатације нафтних бушотина
применом фази логике

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 09.04.2020. год.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.