

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Лола Д. Томић

**ХИБРИДНИ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-
СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ УТИСКИВАЊА
УГЉЕН ДИОКСИДА У ГАСНО ЛЕЖИШТЕ „Л”**

Докторска дисертација

Београд, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Lola D. Tomić

**HYBRID MULTIDIMENSIONAL-SIMULATION
MODEL FOR CARBON DIOXIDE INJECTION
INTO THE „L” GAS RESERVOIR**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026

Ментор:

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

Чланови комисије:

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

др Зоран Глигорић, редовни професор
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
Ужа научна област: Подземна експлоатација лежишта
минералних сировина

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

Датум одбране: _____

Захвалност

Желим да изразим искрену захвалност свима који су својим знањем, подршком, саветима и вером у мене допринели да ова докторска дисертација буде завршена.

Пре свега, захвалност дугујем свом ментору, проф. др Весни Каровић Маричић, која је током читавог процеса израде докторске дисертације била уз мене, пружала ми несебичну подршку и драгоцене савете. Њено поверење у мој рад, спремност да саслуша, усмери и помогне у сваком тренутку, као и подршка онда када је било најтеже, били су ми од непроцењивог значаја. Захвална сам јој што ме је подстицала да верујем у свој рад и истрајем до самог краја.

Посебно захваљујем Ивану Ал-Цабурију, који ми је своје знање и искуство несебично преносио. Његова стручност имала је велики значај при изради лежишног симулационог модела. Стрпљиво ми је помагао, саветовао ме и усмеравао кроз разне изазове који су пратили израду модела. Његов допринос био је од великог значаја за квалитет и успешну реализацију ове докторске дисертације.

Велико хвала и професору др Зорану Глигорићу, који је својим знањем и искуством допринео делу рада који се односи на fuzzy вишекритеријумско одлучивање. Његови савети, сугестије и спремност да помогне били су ми од великог значаја, а његова подршка и вера у мој рад били су подстицај и ветар у леђа да истрајем и онда када није било лако.

Захвална сам свим својим колегама који су ме охрабривали и веровали у мене.

Од срца захваљујем својој породици, која је све време била уз мене, веровала у мене и пружала ми снагу у изазовним тренуцима. Хвала им на стрпљењу, разумевању, љубави и безусловној подршци.

Посебну захвалност дугујем и лекторки, Маши Карановић, на пажљивом читању, корисним сугестијама и помоћи у завршном обликовању дисертације.

Свима који су на било који начин били део овог пута, помогли ми, охрабривали ме или једноставно били ту када је било потребно – ХВАЛА.

ХИБРИДНИ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ УТИСКИВАЊА УГЉЕН ДИОКСИДА У ГАСНО ЛЕЖИШТЕ „Л”

Сажетак

Климатске промене представљају значајан глобални проблем, због чега технологије за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште имају све већи значај. Геолошко складиштење CO_2 представља перспективно решење смањења антропогених емисија. Имајући у виду да у Србији до сада није реализован ниједан пројекат геолошког складиштења CO_2 , постоји потреба за развојем поуздане методологије за избор најповољније геолошке формације и оптимизацију процеса утискивања.

Предмет истраживања у докторској дисертацији је развој интегрисаног модела за избор оптималног гасног лежишта за складиштење CO_2 и оптимизацију процеса утискивања. Развијени мултидимензионално-симулациони модел представља систематску интеграцију fuzzy логике, вишекритеријумских метода и нумеричке симулације у области вештачке интелигенције. За селекцију лежишта примењује се модел мултидимензионалног одлучивања тј. fuzzy TOPSIS метода, док се избор оптималне стратегије утискивања и складиштења врши упоредном применом нумеричке симулације и вишекритеријумског одлучивања.

Резултати истраживања показују да интеграција статичких геолошких и динамичких параметара добијених нумеричком симулацијом омогућава поузданији избор лежишта и оптимизацију стратегије утискивања у односу на постојеће конвенционалне приступе. Креирани модел омогућава да се приликом оптимизације истовремено разматрају количине утиснутог угљен диоксида, просторна расподела CO_2 , као и механизми акумулирања.

Приказан модел карактерише флексибилност и адаптивност што представља подршку стратешком одлучивању и решавању проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума. Развијени модел први пут је примењен за исцрпљена гасна лежишта у Србији и може послужити као стручна и научна основа за планирање будућих пројеката геолошког складиштења CO_2 у нашој земљи.

Кључне речи: геолошко складиштење CO_2 , исцрпљена гасна лежишта, вишекритеријумско одлучивање, fuzzy TOPSIS, нумеричка симулација, оптимизација геолошког складиштења, оптимизација утискивања CO_2

Научна област: Рударско инжењерство

Ужа научна област: Инжењерство нафте и гаса

УДК број: 622.324.6:66.076:510.644.4(043.3)

HYBRID MULTIDIMENSIONAL-SIMULATION MODEL FOR CARBON DIOXIDE INJECTION INTO THE „L” GAS RESERVOIR

Abstract

Climate change represents a major global challenge, making technologies for reducing greenhouse gas emissions increasingly important. Geological CO₂ storage is recognized as a promising solution for reducing anthropogenic emissions. Since no geological CO₂ storage project has yet been implemented in Serbia, there is a need to develop a reliable methodology for selecting the most suitable geological formation and optimizing the CO₂ injection process.

The subject of this doctoral dissertation is the development of an integrated model for selecting the optimal gas reservoir for geological CO₂ storage and optimizing the injection process. The developed multidimensional-simulation model represents a systematic integration of fuzzy logic, multi-criteria decision-making methods, and numerical simulation within the field of artificial intelligence. A multi-criteria decision-making model is applied for reservoir selection i.e. fuzzy TOPSIS method, while the optimal injection and storage strategy is determined through the combined application of numerical simulation and multi-criteria decision-making.

The research results demonstrate that integrating static geological and dynamic parameters obtained through numerical simulation enables more reliable reservoir selection and injection strategy optimization compared with conventional approaches. The created model allows the simultaneous consideration of the amount of injected CO₂, its spatial distribution, and the dominant trapping mechanisms.

The presented model is characterized by its flexibility and adaptability, supporting strategic decision-making involving multiple alternatives and criteria. The proposed approach has been applied for the first time to depleted gas reservoirs in Serbia and provides a scientific basis for planning future geological CO₂ storage projects.

Keywords: geological CO₂ storage, depleted gas reservoirs, multi-criteria decision-making, fuzzy TOPSIS, numerical simulation, geological storage optimization, CO₂ injection optimization.

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Petroleum engineering

UDK number: 622.324.6:66.076:510.644.4(043.3)

Садржај:

1. УВОД	1
1.1. Преглед литературе	2
1.2. Предмет и циљ истраживања	6
1.3. Полазне хипотезе	7
1.4. Постигнути научни доприноси	8
1.5. Структура дисертације	9
2. АНТРОПОГЕНЕ ЕМИСИЈЕ УГЉЕН ДИОКСИДА И ВОДЕЋА РЕШЕЊА ЗА УБЛАЖАВАЊЕ КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА.....	11
3. ГЕОЛОШКО СКЛАДИШТЕЊЕ УГЉЕН ДИОКСИДА	13
3.1. Критеријуми геолошког складиштења угљен диоксида.....	16
3.1.1. Геолошки критеријуми	16
3.1.2. Термодинамички и хидродинамички критеријуми.....	16
3.1.3. Техно-економски, друштвени и политички критеријуми.....	18
3.2. Вредности лежишних параметара и особина лежишног флуида као критеријума складиштења CO ₂	21
3.3. Аналитичке методе за одређивање капацитета складиштења угљен диоксида	29
3.3.1. Метода процене капацитета складиштења CO ₂ према US–DOE.....	29
3.3.2. Приступи процене капацитета складиштења CO ₂ у исцрпљена лежишта према CSFL методи.....	31
3.3.3. Метода процене капацитета складиштења CO ₂ у исцрпљена гасна лежишта према IEA–GHG.....	34
4. МЕТОДЕ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ОДЛУЧИВАЊА.....	35
4.1. АНР метода	36
4.2. PROMETHEE метода.....	38
4.3. ELECTRE метода	41
4.4. VIKOR метода	43
4.5. TOPSIS метода.....	45
4.6. Fuzzy вишекритеријумско одлучивање.....	48
4.6.1. Fuzzy TOPSIS.....	51
5. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА	55
5.1. Типови лежишних модела.....	55
5.2. Основни концепт математичког моделирања лежишта нафте и гаса	57
5.2.1. Закон о одржању масе.....	57
5.2.2. Дарсијев закон	58
5.2.3. Једначине стања	60
5.2.4. Нумеричке методе решавања парцијалних диференцијалних једначина	61
5.2.4.1. Просторна дискретизација	62

5.2.4.2.	Временска дискретизација	64
5.3.	Карактеризација лежишта, статички и динамички модел.....	66
5.3.1.	Статички модел	66
5.3.2.	Динамички модел.....	68
5.3.2.1.	Унос података за израду динамичког лежишног модела.....	69
5.3.2.2.	Усаглашавање („мечовање”) историјата производње и притиска	72
5.3.2.3.	Предвиђање будућег производног понашања лежишта	73
6.	ХИБРИДНИ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ИЗБОРА ГАСНОГ ЛЕЖИШТА ЗА СКЛАДИШТЕЊЕ УГЉЕН ДИОКСИДА	75
7.	РЕЗУЛТАТИ ХИБРИДНОГ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-СИМУЛАЦИОНОГ МОДЕЛА	79
7.1.	Статистичка анализа петрофизичких параметара лежишта - потенцијалних складишта угљен диоксида	79
7.1.1.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A1.....	79
7.1.2.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A2.....	84
7.1.3.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A3.....	88
7.1.4.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A4.....	92
7.1.5.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A5.....	96
7.1.6.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A6.....	100
7.1.7.	Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A7.....	104
7.2.	Примена fuzzy TOPSIS вишекритеријумске анализе	109
7.3.	Резултати примене симулационог модела гасног лежишта „Л”	118
7.3.1.	Улазни подаци за лежишну симулацију	119
7.3.1.1.	Особине колектор стене.....	119
7.3.1.2.	Особине гаса гасног лежишта „Л”	127
7.3.1.3.	Историјат производње и лежишног притиска гасног лежишта „Л”	128
7.3.2.	Усаглашавање историјата	130
7.3.3.	Прогноза утискивања угљен диоксида и праћење будућег понашања лежишта	133
7.3.3.1.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 1.....	134
7.3.3.2.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 2.....	136
7.3.3.3.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 3.....	139
7.3.3.4.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 4.....	142
7.3.3.5.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 5.....	145
7.3.3.6.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 6.....	148
7.3.3.7.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 7.....	151
7.3.3.8.	Резултати примене симулационог модела – сценарио 8.....	154

7.4. Вишекритеријумска анализа избора оптималне стратегије утискивања CO ₂	158
8. ДИСКУСИЈА И ИНТЕРПРЕТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА	164
9. ЗАКЉУЧАК	166
ЛИТЕРАТУРА	168

Списак слика:

Слика 2.1. Емисије угљен диоксида по становнику у европским земљама

Слика 2.2. Укупне емисије CO₂ у Србији за период од 1990. до 2024. године

Слика 2.3. Укупне емисије угљен диоксида у Србији из термоелектрана и топлана у 2024. години

Слика 2.4. Процентуално учешће емисија CO₂ по појединачним термоелектранама и ТЕ-ТО у односу на укупне количине емитованог угљен диоксида у Србији у 2024. години

Слика 3.1. Типови геолошког складиштења угљен диоксида

Слика 3.2. Утискивање CO₂ у делимично исцрпљена нафтна лежишта – „EOR–CO₂” процес

Слика 3.3. Фазни дијаграм угљен диоксида

Слика 3.4. Промена запремине угљен диоксида на површини и лежишним условима

Слика 3.5. Трошкови транспорта по тони CO₂

Слика 3.6. Трошкови складиштења угљен диоксида у зависности од типа геолошког складиштења

Слика 3.7. Тренд кретања цена емисионих дозвола (€/t CO₂) у ЕУ за период од априла 2021. до маја 2024. године

Слика 3.8. Техно-економска пирамида процене капацитета складиштења

Слика 3.9. Механизми акумулирања CO₂ у функцији времена

Слика 3.10. Структурно-стратиграфски механизам акумулирања угљен диоксида

Слика 3.11. Резидуално акумулирање угљен диоксида

Слика 3.12. Механизам акумулирања услед растварања угљен диоксида у лежишној води

Слика 3.13. Минерално акумулирање угљен диоксида

Слика 4.1. Схематски приказ поступка решавања вишекритеријумског проблема

Слика 4.2. Хијерархијска структура проблема

Слика 4.3. Схематски приказ алгорита АНР методе

Слика 4.4. Схематски приказ алгорита PROMETHEE II методе

Слика 4.5. Схематски приказ алгорита методе ELECTRE

Слика 4.6. Схематски приказ алгорита VIKOR методе

Слика 4.7. Графички приказ TOPSIS методе

Слика 4.8. Конвексан (лево) и неконвексан (десно) fuzzy скуп

Слика 4.9. Лево нормализован, десно субнормализован fuzzy скуп

Слика 4.10. Троугласти fuzzy број $\tilde{A}(a, b, c)$

Слика 4.11. Трапезоидни fuzzy број $\tilde{A}(a, b, c, d)$

Слика 5.1. Интегрисани лежишни симулациони модел

Слика 5.2. Закон о одржању масе у лежишном систему

Слика 5.3. Подела лежишта на блокове – 1D приказ

Слика 5.4. Подела лежишта на блокове – 2D приказ

Слика 5.5. Приказ временске дискретизације

Слика 5.6. Алгоритам експлицитног одређивања притиска

Слика 5.7. Алгоритам имплицитног одређивања притиска

Слика 5.8. Приказ скалирања модела – „upscaling” процеса

Слика 5.9. Блок-центрична и угао-центрична геометрија мреже

Слика 5.10. а) радијални и б) неструктурни тип геометрије мреже

Слика 5.11. Дистрибуција почетних услова притиска и засићења

Слика 5.12. Дефинисање засићења у прелазној зони

Слика 5.13. Поступак усаглашавања вредности притисака и засићења

Слика 6.1. Схематски приказ алгорита мултидимензионално-симулационог модела

Слика 7.1. Дистрибуција порозности гасног лежишта A1

Слика 7.2. Нормална расподела порозности гасног лежишта А1

Слика 7.3. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А1

Слика 7.4. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А1

Слика 7.5. Дистрибуција засићења водом лежишта А1

Слика 7.6. Дистрибуција података порозности гасног лежишта А2

Слика 7.7. Нормална расподела порозности гасног лежишта А2

Слика 7.8. Дистрибуција вредности пропусности гасног лежишта А2

Слика 7.9. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А2

Слика 7.10. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А2

Слика 7.11. Дистрибуција порозности гасног лежишта А3

Слика 7.12. Нормална расподела порозности гасног лежишта А3

Слика 7.13. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А3

Слика 7.14. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине лежишта А3

Слика 7.15. Дистрибуција засићења водом у лежишту А3

Слика 7.16. Дистрибуција вредности порозности гасног лежишта А4

Слика 7.17. Нормална расподела порозности гасног лежишта А4

Слика 7.18. Дистрибуција вредности пропусности гасног лежишта А4

Слика 7.19. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине лежишта А4

Слика 7.20. Дистрибуција засићења водом у лежишту А4

Слика 7.21. Дистрибуција вредности порозности гасног лежишта А5

Слика 7.22. Нормална расподела порозности гасног лежишта А5

Слика 7.23. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А5

Слика 7.24. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А5

Слика 7.25. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А5

Слика 7.26. Нормална расподела порозности гасног лежишта А6

Слика 7.27. Дистрибуција порозности гасног лежишта А6

Слика 7.28. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А6

Слика 7.29. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А6

Слика 7.30. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А6

Слика 7.31. Нормална расподела порозности гасног лежишта А7

Слика 7.32. Дистрибуција порозности гасног лежишта А7

Слика 7.33. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А7

Слика 7.34. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А7

Слика 7.35. Дистрибуција засићења водом гасног лежишта А7

Слика 7.36. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума дубине за седам лежишта, односно алтернатива

Слика 7.37. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума порозности за седам лежишта

Слика 7.38. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума пропусности за седам лежишта

Слика 7.39. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума ефективне моћности за седам лежишта

Слика 7.40. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума односа укупне и ефективне моћности за седам лежишта

Слика 7.41. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума потенцијалних капацитета складиштења за све алтернативе осим алтернативе А1

Слика 7.42. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума потенцијалних капацитета складиштења за алтернативу А1

Слика 7.43. Тежински коефицијенти критеријума

Слика 7.44. Удаљеност алтернатива од позитивно идеалног решења

Слика 7.45. Удаљеност алтернатива од негативно идеалног решења

Слика 7.46. Графички приказ вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу

Слика 7.47. Рангирање алтернатива

Слика 7.48. Веза између порозности и пропусности

Слика 7.49. Веза између резидуалног засићења водом и $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$

Слика 7.50. Веза између резидуалног засићења гасом и $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$

Слика 7.51. Винландов дијаграм са дефинисаним изолинијама величине порних грла

Слика 7.52. Криве капиларних притисака у функцији засићења водом мерене на језгрима из бушотине X-4

Слика 7.53. log-log дијаграм капиларног притиска у функцији ефективног засићења водом

Слика 7.54. Релативне пропусности за воду и гас

Слика 7.55. Нормализоване вредности релативних пропусности за гас и воду за бушотину X-4

Слика 7.56. Средња нормализована вредност релативне пропусности за воду и гас (бушотина X-4)

Слика 7.57. Денормализоване криве релативних пропусности

Слика 7.58. Подударање моделоване криве применом Коријевих експонената са кривом релативних пропусности

Слика 7.59. PVT карактеристике гаса

Слика 7.60. Годишња производња гаса и воде

Слика 7.61. „Мечовање” производног историјата и историјата модела за гасно лежиште „Л”

Слика 7.62. „Мечовање” производног историјата и историјата модела за бушотине: а) X-4, б) X-6, в) X-7, г) X-10, д) X-12, ђ) X-13, е) X-16 и ж) Xs-001

Слика 7.63. „Мечовање” мереног притиска и притиска добијеног моделом за бушотине: а) X-4, б) X-6, в) X-16, г) X-2 и д) X-13

Слика 7.64. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 1)

Слика 7.65. Процентуално учешће механизма акумулирања CO₂ (сценарио 1)

Слика 7.66. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 1

Слика 7.67. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 2)

Слика 7.68. Процентуално учешће механизма акумулирања CO₂ (сценарио 2)

Слика 7.69. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 2

Слика 7.70. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 3)

Слика 7.71. Процентуално учешће механизма акумулирања CO₂ (сценарио 3)

Слика 7.72. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 3

Слика 7.73. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 4)

Слика 7.74. Процентуално учешће механизма акумулирања CO₂ (сценарио 4)

Слика 7.75. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 4

Слика 7.76. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 5)

Слика 7.77. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 5)

Слика 7.78. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 5

Слика 7.79. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 6)

Слика 7.80. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 6)

Слика 7.81. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 6

Слика 7.82. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 7)

Слика 7.83. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 7)

Слика 7.84. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 7

Слика 7.85. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 8)

Слика 7.86. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 8)

Слика 7.87. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 8

Слика 7.88. Тежинско учешће критеријума

Слика 7.89. Удаљеност алтернатива од позитивно идеалног решења

Слика 7.90. Удаљеност алтернатива од негативно идеалног решења

Слика 7.91. Графички приказ вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу

Слика 7.92. Поредак алтернатива

Списак табела:

Табела 3.1. Вредности општих критеријума за прелиминарну селекцију геолошке формације за складиштење угљен диоксида

Табела 3.2. Оптималне вредности притиска и температуре за складиштење угљен диоксида у суперкритичном стању

Табела 3.3. Оптимални параметри за складиштење CO₂ у исцрпљена нафта и гасна лежишта

Табела 3.4. Оптималне вредности лежишних параметара и особина флуида током „EOR-CO₂” процеса

Табела 3.5. Оптимални параметри аквифера и воде

Табела 3.6. Оптимални параметри лежишта угља

Табела 4.1. Сатијева скала релативних важности

Табела 7.1. Средње пондерисане вредности петрофизичких параметара лежишта A1

Табела 7.2. Статистичка анализа порозности гасног лежишта A1

Табела 7.3. Вредности перцентиала порозности гасног лежишта A1

Табела 7.4. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта A1

Табела 7.5. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта A1

Табела 7.6. Статистичка анализа ефективне дебљине у гасном лежишту A1

Табела 7.7. Вредности перцентиала ефективне дебљине у гасном лежишту A1

Табела 7.8. Статистичка анализа засићења водом у гасном лежишту A1

Табела 7.9. Вредности перцентиала засићења водом у гасном лежишту A1

Табела 7.10. Статистичка анализа порозности у гасном лежишту A2

Табела 7.11. Вредности перцентиала порозности у гасном лежишту A2

Табела 7.12. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта A2

Табела 7.13. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта A2

Табела 7.14. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта A2

Табела 7.15. Вредности перцентиала ефективне дебљине гасног лежишта A2

Табела 7.16. Статистичка анализа засићења водом у гасном лежишту A2

Табела 7.17. Вредности перцентиала засићења водом у гасном лежишту A2

Табела 7.18. Средње пондерисане вредности петрофизичких параметара лежишта A3

Табела 7.19. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта A3

Табела 7.20. Вредности перцентиала порозности гасног лежишта A3

Табела 7.21. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта A3

Табела 7.22. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта A3

Табела 7.23. Статистичка анализа података ефективне дебљине лежишта A3

Табела 7.24. Вредности перцентиала ефективне дебљине лежишта A3

Табела 7.25. Статистичка анализа података засићења водом гасног лежишта A3

Табела 7.26. Вредности перцентиала засићења водом гасног лежишта A3

Табела 7.27. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта A4

Табела 7.28. Вредности перцентиала порозности гасног лежишта A4

Табела 7.29. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта A4

Табела 7.30. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта A4

Табела 7.31. Статистичка анализа ефективне дебљине лежишта A4

Табела 7.32. Вредности перцентиала ефективне дебљине лежишта A4

Табела 7.33. Статистичка анализа вредности засићења водом у гасном лежишту A4

Табела 7.34. Вредности перцентиала засићења водом у гасном лежишту A4

Табела 7.35. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта A5

Табела 7.36. Вредности перцентиала порозности гасног лежишта A5

Табела 7.37. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта A5

Табела 7.38. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А5
Табела 7.39. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А5
Табела 7.40. Вредности перцентила ефективне дебљине гасног лежишта А5
Табела 7.41. Статистичка анализа вредности засићења водом гасног лежишта А5
Табела 7.42. Вредности перцентила засићења водом гасног лежишта А5
Табела 7.43. Вредности петрофизичких параметара гасног лежишта А6
Табела 7.44. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта А6
Табела 7.45. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А6
Табела 7.46. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А6
Табела 7.47. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А6
Табела 7.48. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А6
Табела 7.49. Вредности перцентила ефективне дебљине гасног лежишта А6
Табела 7.50. Статистичка анализа засићења водом гасног лежишта А6
Табела 7.51. Вредности перцентила засићења водом гасног лежишта А6
Табела 7.52. Вредности петрофизичких параметара гасног лежишта А7
Табела 7.53. Статистичка анализа порозности гасног лежишта А7
Табела 7.54. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А7
Табела 7.55. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А7
Табела 7.56. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А7
Табела 7.57. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А7
Табела 7.58. Вредности перцентила ефективне дебљине гасног лежишта А7
Табела 7.59. Статистичка анализа засићења водом гасног лежишта А7
Табела 7.60. Вредности перцентила засићења водом гасног лежишта А7
Табела 7.61. Нормализована матрица одлучивања
Табела 7.62. Тежински нормализована матрица одлучивања
Табела 7.63. Fuzzy позитивно ($\tilde{A}^+$) и негативно ($\tilde{A}^-$) идеално решење
Табела 7.64. Релативне блискости алтернатива
Табела 7.65. Учесталост и вероватноћа појаве одређеног типа стене
Табела 7.66. Денормализоване вредности релативних пропусности за бушотину X-4
Табела 7.67. Компонентални састав гаса
Табела 7.68. Годишња и укупна производња гаса и воде
Табела 7.69. Историјат лежишног притиска (bar)
Табела 7.70. Преглед дефинисаних симулационих сценарија
Табела 7.71. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 1)
Табела 7.72. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 2)
Табела 7.73. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 3)
Табела 7.74. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 4)
Табела 7.75. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 5)
Табела 7.76. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 6)
Табела 7.77. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 7)
Табела 7.78. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 8)
Табела 7.79. Приказ процентуалног учешћа механизма акумулирања и кумулативно утиснутих количина CO₂ за све дефинисане сценарије
Табела 7.80. Схематски приказ почетне матрице одлучивања
Табела 7.81. Почетна матрица одлучивања
Табела 7.82. Нормализована матрица
Табела 7.83. Тежински нормализована матрица одлучивања
Табела 7.84. Fuzzy позитивно ($\tilde{A}^+$) и негативно ($\tilde{A}^-$) идеално решење

Табела 7.85. Релативне блискости алтернатива

1. УВОД

Климатске промене представљају значајан глобални проблем који последњих година привлачи пажњу стручњака и међународне јавности. У циљу решавања наведеног проблема, донет је низ закона и директива чији је приоритет смањење утицаја антропогених емисија гасова са ефектом стаклене баште. У складу са тим, у оквиру Оквирне конвенције Уједињених нација о промени климе – United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 1992), усвојен је Париски споразум 2015. године (UNFCCC, 2015) са циљем да свака држава имплементира одговарајуће мере и активности које доприносе глобалном испуњењу дугорочног циља, тј. ублажавању климатских промена. У оквиру национално утврђених доприноса (Nationally Determined Contributions – NDC) (Влада Републике Србије, 2022), Република Србија као држава потписница Париског споразума, усвојила је циљ смањења емисија поменутих гасова за 33,3% у односу на 1990. годину, односно 13,2% у односу на 2010. годину.

С обзиром на то да је Република Србија у статусу кандидата за чланство у Европској унији, у обавези је да усклади законску регулативу са правним тековинама ЕУ. Једно од кључних питања је хармонизација са законодавним и регулаторним оквиром ЕУ о климатских променама. Предвиђени план ЕУ за 2030. годину – The 2030 climate target plan (European Commission, 2020) обухвата смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште најмање 55% у односу на ниво из 1990. године, учешће обновљивих извора у укупној производњи електричне енергије најмање 32%, као и побољшање енергетске ефикасности за 32,5%.

За постизање климатских и еколошких циљева у складу са претходно наведеним, у Србији су усвојени закони, регулативе и стратегије који дефинишу правце развоја у областима енергетске ефикасности и обновљивих извора енергије, ради смањења емисија гасова са ефектом стаклене баште.

Према последњим доступним подацима, укупне емисије угљен диоксида у Републици Србији у 2024. години износиле су 42,02 Mt (Ritchie et al., 2023). Највећи удео у емисијама угљен диоксида, који износи око 60%, има енергетски сектор (производња електричне и топлотне енергије). Емисије угљен диоксида у Србији нису занемарљиве и неопходно је предузети одговарајуће активности и мере како би се оне смањиле и свеле на минимум.

Технологија геолошког складиштења угљен диоксида представља једно од најзначајнијих перспективних решења смањења емисије антропогеног угљен диоксида на путу остварења циља нулте емисије до 2050. године.

Геолошко складиштење је комплексан процес који обухвата примену различитих технологија хватања угљен диоксида из индустријског и енергетског сектора, компримовање угљен диоксида и транспорт најчешће цевоводима, и на крају његово утискивање у циљу подземног складиштења у одговарајуће геолошке формације. Геолошке формације које се сматрају адекватним за дугорочно складиштење угљен диоксида превасходно су: исцрпљена нафтна и гасна лежишта, аквифери и слојеви угља. Одређена количина угљен диоксида може се складиштити током примене терцијарних метода повећања искоришћења нафтних и гасних лежишта утискивањем угљен диоксида (enhanced oil/gas recovery by CO₂ injection method – „EOR/EGR–CO₂”). Такође, каверне у соним наслагама, базалти и шејлови разматрају се као потенцијална подземна складишта угљен диоксида и за сада се могућности њихове примене у те сврхе налазе у фази испитивања.

Посматрано са аспекта сигурности и постизања дугорочног задржавања угљен диоксида у складиштем простору, најадекватније је вршити складиштење CO₂ у исцрпљеним лежиштима угљеводоника у односу на друге типове геолошких формација. Ова тврдња произилази из чињенице да лежишта угљеводоника карактерише висок степен истражености, као и дуг период експлоатације током којег је сакупљен велики број података о лежишту и флуиду. Такође, складиштење угљен диоксида у исцрпљена лежишта угљеводоника има

предност у односу на остале опције складиштења због знатно нижих капиталних и оперативних трошкова с обзиром на постојећи ниво истражености и присуство инфраструктуре.

При поређењу могућности складиштења у нафтна или гасна лежишта чија је производња завршена, сматра се да су гасна лежишта, и то са експанзионим режимом, повољнија за складиштење угљен диоксида у односу на исцрпљена нафтна лежишта, јер се код гасних лежишта може постићи већи капацитет складиштења. Код нафтних лежишта, присутно је одређено засићење резидуалном нафтом, па ће капацитет потенцијалног складишта бити мањи. Гасна лежишта са експанзионим режимом карактерише висок степен искоришћења. Гас има знатно већи компресибилитет у односу на нафту, из чега произилази могућност складиштења већих количина угљен диоксида у односу на нафтна лежишта.

1.1. Преглед литературе

Геолошко складиштење угљен диоксида последњих деценија представља једну од кључних технологија за ублажавање климатских промена, тј. смањење антропогених емисија угљен диоксида у атмосферу. Развој ове технологије пратио је постепен прелазак са концептуалних истраживања ка индустријској примени, при чему су бројни аутори анализирали потенцијал геолошких формација за складиштење угљен диоксида, критеријуме који су кључни за ефикасно и безбедно складиштење, као и механизме акумулирања CO₂ у различитим у геолошким формацијама. Паралелно су развијане аналитичке методе за процену капацитета складиштења CO₂ у различите геолошке формације, рађене нумеричке симулације процеса утискивања и складиштења угљен диоксида, као и процена ризика. Последњих година посебна пажња усмерена је ка интеграцији метода вишекритеријумског одлучивања у процес геолошког складиштења.

Истраживања могућности геолошког складиштења антропогеног угљен диоксида као мере за регулацију климатских промена започета су још седамдесетих година прошлог века. Један од првих радова у којем је предложена могућност подземног складиштења CO₂ објавио је Marchetti, 1977, док су током осамдесетих и почетком деведесетих година објављена бројна истраживања која су анализирали могућност утискивања угљен диоксида у дубоке слане аквифере, исцрпљена нафтна и гасна лежишта и друге геолошке формације (Baes et al., 1980; Kaarstad, 1992; Koide et al., 1992; van der Meer, 1992; Gunter et al., 1993; Holloway & Savage, 1993; Bachu et al., 1994; Korbøl & Kaddour, 1995). Ова истраживања поставила су научне основе за каснији развој технологије геолошког складиштења CO₂.

Значајна прекретница у развоју технологије геолошког складиштења угљен диоксида догодила се 1996. године, када је почео пројекат Sleipner, у оквиру ког се CO₂ утискује у формацију Utsira, један од највећих аквифера Северног мора. Овај пројекат представља прву индустријску примену геолошког складиштења угљен диоксида великих размера и имао је пресудан утицај на даљи развој ове технологије. Велик број каснијих истраживања развијен је управо на основу ових искуствених података.

Развој технологије хватања и складиштења угљен диоксида (Carbon Capture and Storage – CCS) током наредних година резултирао је потребом за дефинисањем јасних критеријума за избор потенцијалних геолошких складишта. Bachu, 2000. први је представио систематску методологију за избор потенцијалних складишта која је заснована на евалуацији геолошких, хидродинамичких, геотермалних, техничких, економских и друштвено-политичких критеријума. Његов рад представља основу за каснији развој критеријума за избор геолошких складишта.

Bachu, 2002. наставља претходна истраживања и даље развија методологију за избор потенцијалних геолошких складишта угљен диоксида. У односу на претходни рад предлаже систематски поступак селекције потенцијалне локације за складиштење угљен диоксида који

се заснива на анализи геолошких, хидродинамичких, геотермалних, техничких, економских и друштвено-политичких критеријума. Поред тога, процес евалуације потенцијалних лежишта обухвата анализу капацитета складиштења, идентификацију главних извора емисија угљен диоксида, процену трошкова хватања CO_2 , његовог транспорта и утискивања у одговарајућу геолошку формацију, као и анализу потенцијалних путева миграције и цурења угљен диоксида. Посебан значај рада је анализа просторне дистрибуције температуре и притиска у седиментним басенима којом је омогућена идентификација геолошких формација погодних за складиштење угљен диоксида у суперкритичном стању.

Wachu, 2003. даље унапређује методологију избора потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида развијајући модел за прелиминарну селекцију и рангирање седиментних басена. У његовом истраживању дефинисано је 15 критеријума на основу којих се врши процена подобности седиментних басена за геолошко складиштење CO_2 . Применом поступка параметарске нормализације и тежинских коефицијената, који представљају релативни значај појединих критеријума, израчунава се јединствени индекс погодности, на основу кога се врши рангирање потенцијалних геолошких формација. Предложена методологија је веома флексибилна, јер омогућава промену тежинских коефицијената и критеријума у зависности од специфичних геолошких услова и циљева анализе. Поменути рад представља један од првих покушаја систематског квантитативног рангирања потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида применом већег броја критеријума, што је поставило основу за каснији развој вишекритеријумских метода одлучивања у области геолошког складиштења CO_2 .

Почетак интензивнијег развоја технологије геолошког складиштења угљен диоксида везује се и за објављивање Специјалног извештаја IPCC о хватању и складиштењу угљен диоксида – IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (IPCC, 2005), где је први пут описана свеобухватна анализа технологије хватања угљен диоксида, транспорта и геолошког складиштења CO_2 (CCS – Carbon Capture and Storage). Поред тога, анализирани су различити типови геолошких формација погодних за складиштење угљен диоксида, механизми акумулирања, критеријуми за процену карактеристика геолошке формације за складиштење CO_2 , економски аспекти примене, ризици, регулаторни оквир и мониторинг. Овај извештај представља прву свеобухватну синтезу дотадашњих научних сазнања из области геолошког складиштења угљен диоксида и постао је полазна тачка за даљи развој истраживања у тој области.

Након објављивања IPCC извештаја, пажња истраживача била је усмерена ка развоју методологија за процену капацитета геолошког складиштења угљен диоксида. Велике разлике у процењеним капацитетима, настале услед примене различитих претпоставки, критеријума и метода, указале су на потребу за развојем стандардизованог приступа за процену капацитета геолошког складиштења угљен диоксида. Из тог разлога је у оквиру Форума за вођење секвестрације угљеника – Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF, 2007) формирана међународна радна група чији је задатак био развој методологије за процену капацитета геолошког складиштења CO_2 (Bradshaw et al., 2007; Wachu et al., 2007). Резултат ових активности представља развој прве међународно прихваћене методологије за процену капацитета складиштења угљен диоксида у нафтним и гасним лежиштима, аквиферима и слојевима угља.

Поред геолошке карактеризације потенцијалних складишта угљен диоксида, значајан део истраживања усмерен је и на примену нумеричке симулације у циљу анализе понашања угљен диоксида током утискивања и након престанка утискивања. Нумеричка симулација представља један од најзначајнијих алата за анализу просторне и временске дистрибуције CO_2 у лежишту, промене лежишног притиска, процену капацитета складиштења, идентификацију потенцијалних путева миграције и процену дугорочне безбедности складиштења. Математички модели и нумеричка симулација омогућавају моделовање вишефазног струјања,

фазних промена, процеса растварања CO_2 у лежишној води, промене температуре и других физичко-хемијских процеса који се јављају током геолошког складиштења угљен диоксида.

Развој нумеричких симулационих модела у области геолошког складиштења угљен диоксида започео је почетком деведесетих година прошлог века, паралелно са развојем првих пројеката геолошког складиштења. Први симулациони модели развијени су за складиштење CO_2 у аквифере и приказани су у радовима (van der Meer, 1992; Korbøl & Kaddour, 1995; Weir et al., 1995; Law & Bachu, 1996). Ови модели су били прилично поједностављени, али представљали су полазну основу за даљи развој сложенијих композитних симулационих модела.

Значајан напредак у развоју нумеричке симулације у области геолошког складиштења угљен диоксида дали су Pruess & García, 2002, који су користили нумерички симулатор TOUGH2 за моделовање вишефазног струјања у аквиферима. Резултати истраживања показали су да хетерогеност лежишта и просторна дискретизација модела имају значајан утицај на миграцију CO_2 и расподелу притиска, због чега је за поуздану процену дугорочне сигурности складиштења неопходна пажљива валидација симулационих модела.

Развој нумеричких симулатора огледа се и у све већем броју истраживања усмерених на моделовање реалних пројеката геолошког складиштења угљен диоксида. Композитна нумеричка симулација примењена је за анализу утискивања CO_2 у аквифер Johansen (Eigestad et al., 2009), пилот пројекат складиштења CO_2 у слани аквифер Frio (Ghomian et al., 2008), као и у Utsira формацију (Nilsen et al., 2015).

Паралелно са истраживањима у сланим аквиферима, све већа пажња посвећена је и исцрпљеним нафтним и гасним лежиштима, која се сматрају најперспективнијим геолошким формацијама за дугорочно складиштење CO_2 .

Један од првих радова где се нумеричком симулацијом анализирају физички процеси током утискивања и складиштења угљен диоксида у гасна лежишта објавили су Oldenburg et al., 2001. Они су у свом раду показали да утискивање CO_2 може поред складиштења омогућити и додатну производњу гаса (EGR – Enhanced Gas Recovery).

Al-Hashami et al., 2005. користили су композитну нумеричку симулацију за анализу утискивања CO_2 у гасна лежишта. У раду је анализирано како мешање CO_2 са природним гасом, дифузија CO_2 и растворљивост CO_2 у води утичу на повећање производње гаса и складиштење CO_2 .

Polak & Grimstad, 2009. анализирали су потенцијал гасног лежишта Atzbach–Schwanenstadt у Аустрији за складиштење угљен диоксида и могућност повећања производње природног гаса применом CO_2 -EGR процеса. Резултати рада показали су да је лежиште погодно за дугорочно складиштење CO_2 , али у посматраном случају није потврђен позитиван ефекат CO_2 -EGR услед брзог продора CO_2 до производних бушотина.

Развојем технологије геолошког складиштења угљен диоксида развијен је и велики број специјализованих нумеричких симулатора за моделовање процеса утискивања и дугорочног понашања CO_2 у геолошким формацијама. Jiang, 2011. је у свом раду анализирао могућности и ограничења најчешће коришћених симулатора за геолошко складиштење CO_2 и истакао да резултати нумеричких симулација значајно зависе од физичких модела који се примењују, нумеричких метода решавања, начина просторне дискретизације и термодинамичког описа понашања флуида. Из тог разлога Jiang истиче да је избор симулатора кључан корак у изради квалитетне симулационе студије.

Arts et al., 2012. били су међу првим ауторима који су применили композитну нумеричку симулацију искључиво за анализу геолошког складиштења CO_2 у исцрпљеном гасном лежишту у Холандији, без разматрања повећања производње природног гаса (CO_2 -EGR). Анализиране су промене лежишног притиска и температуре током процеса утискивања CO_2 , као и могућност постепеног повећања лежишног притиска до вредности почетног лежишног

притиска. Аутори су истакли да су детаљна геолошка карактеризација лежишта и континуирани мониторинг кључни предуслови за безбедно дугорочно складиштење CO₂.

Khan et al., 2013. применили су нумеричку симулацију за анализу утискивања CO₂ у гасно лежиште са циљем истовременог повећања производње гаса (CO₂-EGR) и геолошког складиштења CO₂. У раду су анализирани различити сценарији утискивања у зависности од времена почетка утискивања и режима утискивања CO₂. Резултати су показали да су ови параметри кључни за процену продора CO₂ у производне бушотине, количину додатно произведеног гаса, као и количину CO₂ коју је могуће складиштити. Аутори су закључили да правилним избором стратегије утискивања CO₂ може истовремено да се повећа искоришћење природног гаса и обезбеди значајан капацитет складиштења угљен диоксида.

Raza A. et al., 2018b применили су композитну нумеричку симулацију за процену погодности различитих типова гасних лежишта (сува, влажна и гаснокондензатна) за геолошко складиштење CO₂. У раду су анализирани утицај типа лежишног флуида, брзине утискивања и варијације пропусности на капацитет складиштења и дугорочно понашање CO₂. Резултати су показали да гаснокондензатна лежишта представљају најповољнију опцију за геолошко складиштење CO₂. Такође, утврђено је да избор оптималне стратегије утискивања омогућава постизање већег капацитета складиштења, као и да смањење пропусности лежишта повећава количину резидуално акумулираног CO₂ и CO₂ раствореног у води, чиме се повећава укупна сигурност дугорочног складиштења.

Raza A. et al., 2018a анализирали су утицај резидуалног засићења гасом на ефикасност геолошког складиштења CO₂. Испитиван је утицај количине преосталог гаса у лежишту на капацитет складиштења, инјективност, пораст лежишног притиска, као и на механизме акумулирања CO₂. Резултати су показали да при малом резидуалном засићењу гасом доминира структурно акумулирање угљен диоксида, док при већем резидуалном засићењу (око 30%) доминантан механизам постаје резидуално акумулирање.

Приказана истраживања показују да је нумеричка симулација постала основни алат за анализу процеса геолошког складиштења CO₂. Ипак, резултати симулација у већини досадашњих истраживања користе се искључиво за процену понашања CO₂ у појединачним сценаријима, док је њихова интеграција са методама вишекритеријумског одлучивања и даље ограничена. Повећањем броја потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида, као и велики број геолошких, техничких, економских и еколошких критеријума који утичу на избор адекватне опције за складиштење, условили су све већу примену метода вишекритеријумског одлучивања у области геолошког складиштења CO₂.

Један од првих радова у којем је примењено вишекритеријумско одлучивање за избор геолошког складиштења CO₂ објавили су Hsu et al., 2012. Аутори су користили методу аналитичког мрежног процеса (Analytic Network Process – ANP) за избор потенцијалне геолошке формације на Тајвану.

Llamas & Cienfuegos, 2012. предложили су примену Analytical Hierarchy Process (AHP) методе за избор геолошке формације погодне за складиштење CO₂, при чему су критеријуме груписали у две категорије – техничке и друштвено-економске. У наставку својих истраживања, Llamas et al., 2014b показали су да се вишекритеријумске методе одлучивања могу успешно применити и за избор технологија мониторинга током процеса геолошког складиштења, чиме је њихова примена проширена и на касније фазе CCS пројеката.

Choptiany & Pelot, 2014. развили су интегрисани оквир за подршку одлучивању у CCS пројектима који комбинује методе вишекритеријумског одлучивања, анализу ризика, Монте Карло симулацију и анализу осетљивости. Модел је намењен процени CCS пројеката и омогућава истовремено вредновање еколошких, економских, друштвених и инжењерских критеријума. Ова методологија је приказана на примеру поређења два CCS сценарија и њена

предност огледа се у томе што је флексибилна и може се применити на различите CCS пројекте.

Deveci et al., 2015. у свом раду упоредили су примену три fuzzy вишекритеријумске методе одлучивања (fuzzy TOPSIS, fuzzy ELECTRE I и fuzzy VIKOR) за избор најповољније геолошке формације за складиштење угљен диоксида у Турској. Резултати су показали да све три методе обезбеђују стабилно рангирање алтернатива, док fuzzy приступ омогућава боље моделирање неизвесности геолошких података у односу на класичне методе.

Firtina Ertiř, 2018. применила је класичну TOPSIS вишекритеријумску методу за избор оптималне локације за складиштење угљен диоксида. У раду су анализиране четири потенцијалне локације за геолошко складиштење CO₂ у исцрпљеним нафтним и гасним лежиштима узимајући у обзир осам критеријума.

Pakchotanon et al., 2025. развили су систематичан оквир за избор аквифера погодних за геолошко складиштење угљен диоксида. Предложена методологија обухвата три фазе: почетни „скрининг” потенцијалних локација, вредновање и рангирање на основу тежинских коефицијената критеријума и валидацију добијених резултата. За одређивање релативног значаја критеријума примењена је метода Analytic Hierarchy Process (AHP).

Анализа доступне литературе показује да су током последњих неколико деценија остварени значајни помаци у области геолошког складиштења угљен диоксида, како у погледу развоја критеријума за избор потенцијалних складишта тако и у области нумеричке симулације и примене метода вишекритеријумског одлучивања. Ипак, већина постојећих истраживања разматра наведене области одвојено. Истраживања која интегрисају методе вишекритеријумског одлучивања и композитну нумеричку симулацију у јединствен модел за избор и оптимизацију геолошког складиштења CO₂ веома су ограничена. Управо овај недостатак представља научну основу и полазиште за развој методологије предложене у оквиру ове докторске дисертације.

1.2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања у докторској дисертацији је развој интегралног модела којим се врше избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизација процеса утискивања CO₂ у одабрано лежиште. За селекцију лежишта примењује се модел мултидимензионалног одлучивања, а на основу резултата развијеног модела врши се избор оптималне опције утискивања и складиштења упоредном применом нумеричке симулације и вишекритеријумског одлучивања.

Први корак у процени могућности и избору гасног лежишта као подземног складишта угљен диоксида је прикупљање података и анализа бројних критеријума од којих зависи успешност реализације процеса складиштења, пре свега са техничког и сигурносног аспекта. Најадекватнији типови басена за складиштење су седиментни, где су и највише заступљене геолошке формације за потенцијално складиштење, а којима припадају лежишта која ће се анализирати. Након извршене анализе, елиминишу се лежишта која не задовољавају разматране критеријуме складиштења, а преостала лежишта се користе за даљу анализу.

Други корак обухвата анализу критеријума који су од кључног значаја за избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида. Параметри од којих зависи избор потенцијалне геолошке формације за складиштење угљен диоксида обухватају: тип лежишта, порозност, пропусност, дубину, ефективну дебљину колектор стена, однос укупне и ефективне дебљине лежишта и запремину лежишта, тј. капацитет складиштења. За вишекритеријумску анализу користи се fuzzy TOPSIS (Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) метода. Резултат овог дела је евалуација (рангирање) алтернатива, тј. лежишта.

Трећа фаза обухвата симулациони модел најбоље рангиране алтернативе. Нумеричка симулација представља савремено средство које омогућава анализу различитих сценарија, за разлику од класичног приступа који користи само један. У овој фази се дефинише неколико сценарија. За сваки сценарио дефинисане су количине утискивања угљен диоксида, као и максимални дозвољени притисак који је једнак почетном лежишном притиску. Разматра се више сценарија утискивања са аспекта различитих количина утиснутог угљен диоксида, различитих инјекционих бушотина, као и њиховог распореда и локације у лежишту. За утискивање угљен диоксида примењује се тип композитног симулационог лежишног модела. Добијени резултати симулационог модела су кумулативне количине утиснутог угљен диоксида до вредности максимално дозвољеног притиска, дистрибуција угљен диоксида у лежишту, као и доминантни механизми акумулирања угљен диоксида, односно понашање угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након престанка.

У четвртој фази поново се приступа вишекритеријумској анализи. Излазни параметри симулационог модела користе се као улазни параметри за вишедимензионални модел. До сада се под оптимизацијом утискивања подразумевао сценарио у којем би се могла утиснути највећа количина угљен диоксида. Међутим, под оптимизацијом је битно укључити и динамичке параметре у различитим временским периодима и они су пресудни када је реч о количинама утискивања и складиштења угљен диоксида.

Коначан резултат је избор оптималне стратегије утискивања угљен диоксида. Оптимална стратегија утискивања базира се на анализи кумулативне количине утиснутог угљен диоксида, као и на доминантним механизмима акумулирања који су од кључног значаја за безбедно задржавање угљен диоксида у геолошким формацијама.

Циљ дисертације је креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела где се применом различитих критеријумских параметара врши вредновање исцрпљених гасних лежишта у циљу избора најповољнијег лежишта за утискивање и складиштење угљен диоксида, као и оптимизације процеса утискивања. Креирани мултидимензионално-симулациони модел представља систематску интеграцију fuzzy логике, вишекритеријумских метода и метода нумеричке симулације у области вештачке интелигенције. Циљ докторске дисертације је да се нафтним и гасним инжењерима пружи примењив модел на основу кога је могуће извршити избор адекватног гасног лежишта за складиштење угљен диоксида, као и оптимизација процеса утискивања. Развијени модел за избор геолошког складиштења представља подршку у стратешком одлучивању и решавању проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума. Модел карактерише флексибилност и адаптабилност што се огледа у једноставности промене улазних параметара, при чему га је могуће применити за анализу на било којем лежишту.

1.3. Полазне хипотезе

Креирање мултидимензионално-симулационог модела којим се врше избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење и оптимизација процеса утискивања угљен диоксида у одабрано лежиште представља основни циљ који је дефинисан у докторској дисертацији. На основу тога, полазне научне хипотезе докторске дисертације су:

- утискивање угљен диоксида у геолошке формације представља оптимално решење смањења емисија штетних гасова у атмосферу;
- посматрано са аспекта сигурности и постизања веће ефикасности складиштења, најповољније је утискивати угљен диоксид у исцрпљена гасна лежишта са експанзионим режимом;
- досадашњи избор лежишта за утискивање угљен диоксида заснивао се углавном на примени конвенционалне вишекритеријумске анализе што представља непотпун приступ за избор оптималног подземног складишта;

- геолошке параметре на основу којих се доноси одлука о складиштењу угљен диоксида карактерише неодређеност и често недовољна расположивост података за карактеризацију лежишта на одговарајући начин. Из тог разлога, примена fuzzy вишекритеријумских модела представља веома ефикасан приступ за минимизирање или елиминисање поменутог проблема;
- вишекритеријумски модели базирани на fuzzy логици елиминишу субјективност и повећавају ефикасност и прецизност приликом решавања комплексних проблема;
- досадашњи избор оптималне стратегије утискивања и складиштења угљен диоксида базирао се на максималним количинама утиснутог угљен диоксида, што представља непотпун и нерелевантан приступ за дефинисање оптималне стратегије;
- израда композитног симулационог модела омогућава праћење динамике понашања угљен диоксида у лежишту за време и након престанка његовог утискивања.

1.4. Постигнути научни доприноси

Научни допринос представља креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела, где се применом различитих критеријумских параметара врши вредновање исцрпљених гасних лежишта у циљу избора најповољнијег лежишта за утискивање угљен диоксида, као и оптимизације процеса утискивања.

Научни допринос представља напредак у односу на досадашња научна достигнућа у области геолошког складиштења угљен диоксида, а огледа се у елиминисању субјективности и повећавању ефикасности и прецизности приликом избора најповољнијег лежишта и оптимизације процеса утискивања. Докторска дисертација пружа нове увиде у могућности примене вишекритеријумских метода базираних на fuzzy логици у области геолошког складиштења угљен диоксида. Креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела представља систематску интеграцију fuzzy логики, вишекритеријумских метода и метода нумеричке симулације у области вештачке интелигенције. На такав начин представља значајан научни допринос постојећим приступима у овој области. Новина ове дисертације је што се разматрају исцрпљена гасна лежишта у Србији за подземно складиштење угљен диоксида. У нашој литератури и пракси први пут се представља овакав модел за избор складишта угљен диоксида и оптимизацију процеса његовог утискивања.

Поред тога, додатни научни допринос развијеног модела за складиштење угљен диоксида јесте то што представља подршку у стратешком одлучивању и решавању комплексних проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума. Креирани модел карактеришу флексибилност и адаптивност што се огледа у једноставности промене улазних параметара, при чему га је могуће применити на било којем лежишту.

Нови развијени мултидимензионално-симулациони модел има бројне предности у односу на постојеће моделе. Пре свега, избор најповољнијег лежишта за складиштење детаљном анализом параметара обезбеђује дугорочно и сигурно складиштење, без потенцијалних путева миграције/цурења угљен диоксида. Такође, досадашњи избор оптималне стратегије утискивања и складиштења угљен диоксида базирао се на максималним количинама утиснутог угљен диоксида, што представља непотпун и нерелевантан приступ за дефинисање оптималне стратегије. У докторској дисертацији оптимизација се врши на основу динамике понашања угљен диоксида за време и након престанка утискивања што значајно утиче на количине утискивања, као и на обезбеђивање сигурног складиштења, и то представља додатни научни допринос.

1.5. Структура дисертације

Структура дисертације обухвата приказ девет тематских поглавља, кроз која се тематски и методолошки разрађује проблематика геолошког складиштења угљен диоксида у исцрпљена гасна лежишта.

Докторска дисертација састоји се од следећих структурних целина:

1. Увод
2. Антропогене емисије угљен диоксида и водећа решења за ублажавање климатских промена
3. Геолошко складиштење угљен диоксида
4. Методе вишекритеријумског одлучивања
5. Нумеричка симулација
6. Хибридни мултидимензионално-симулациони модел избора гасног лежишта за складиштење угљен диоксида
7. Резултати хибридног мултидимензионално-симулационог модела
8. Дискусија и интерпретација резултата
9. Закључак

У оквиру првог поглавља дати су опис и значај проблематике која је предмет истраживања, основне полазне хипотезе, циљ истраживања и научни допринос докторске дисертације, као и преглед и систематизација релевантне литературе.

У другом поглављу представљен је преглед антропогених емисија угљен диоксида на глобалном нивоу, у Европској унији, као и детаљан приказ емисија CO₂ у Србији.

У трећем поглављу детаљно је приказано складиштење угљен диоксида у геолошке формације. Ово поглавље обухвата преглед критеријума и вредности лежишних параметара и особина лежишног флуида који представљају основу за процену погодности и избор потенцијалне геолошке формације за складиштење угљен диоксида.

У четвртом поглављу приказане су методе вишекритеријумског и fuzzy вишекритеријумског одлучивања, са посебним акцентом на fuzzy TOPSIS методу која је примењена у оквиру развијеног модела.

У петом поглављу дате су теоријске основе нумеричке симулације које се односе на типове лежишних модела, основни концепт математичког моделовања лежишта угљоводоника, као и карактеризацију лежишта, статичко и динамичко моделовање.

У шестом поглављу дати су алгоритам и опис развијеног интегралног мултидимензионално-симулационог модела за избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизацију стратегије утискивања CO₂ у одабрано лежиште.

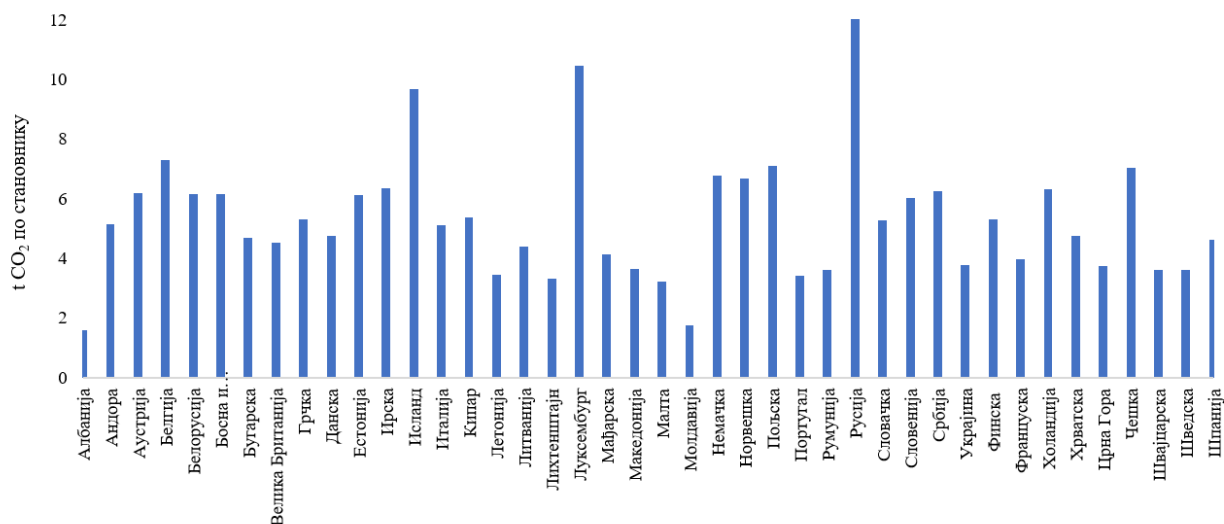
У седмом поглављу приказани су резултати примене развијеног модела који је подељен у четири фазе. Прва фаза обухвата прикупљање података и статистичку анализу петрофизичких параметара лежишта. Друга фаза се односи на примену fuzzy TOPSIS вишекритеријумске методе за избор оптималног гасног лежишта за складиштење CO₂. Трећа фаза обухвата нумеричку симулацију процеса утискивања и складиштења CO₂ у прворангирано лежиште из претходног корака и четврта фаза подразумева оптимизацију стратегије утискивања и складиштења применом fuzzy TOPSIS вишекритеријумске методе, при чему се као критеријуми користе динамички параметри добијени у лежишној симулацији.

У осмом поглављу дата је дискусија и интерпретација добијених резултата.

У деветом поглављу представљени су закључци истраживања, научни допринос дисертације, предности и ограничења развијеног модела, као и правци будућих истраживања и могућности даљег развоја модела.

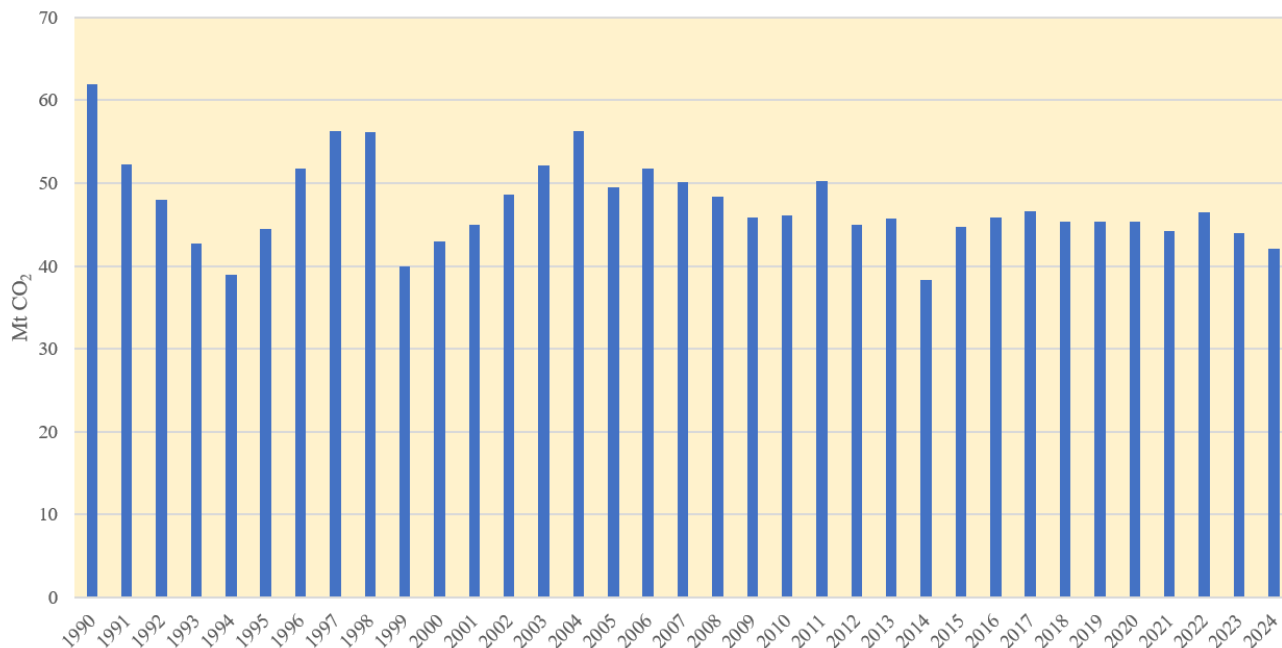
2. АНТРОПОГЕНЕ ЕМИСИЈЕ УГЉЕН ДИОКСИДА И ВОДЕЋА РЕШЕЊА ЗА УБЛАЖАВАЊЕ КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА

Укупне емисије угљен диоксида на глобалном нивоу у 2024. години износиле су око 38,6 Gt, односно 4,73 t CO₂ по становнику (Ritchie & Roser, CO₂ emissions, 2020). У Европској унији емисија CO₂ исте године достигла је вредност од 2,43 Gt, то јест 5,39 t CO₂ по становнику што је за 14% више од светског просека (Ritchie & Roser, CO₂ emissions, 2020). На слици 2.1. дате су емисије угљен диоксида по становнику у европским земљама у 2024. години.



Слика 2.1. Емисије угљен диоксида по становнику у европским земљама
*напомена: нема расположивих података за Монако и Сан Марино

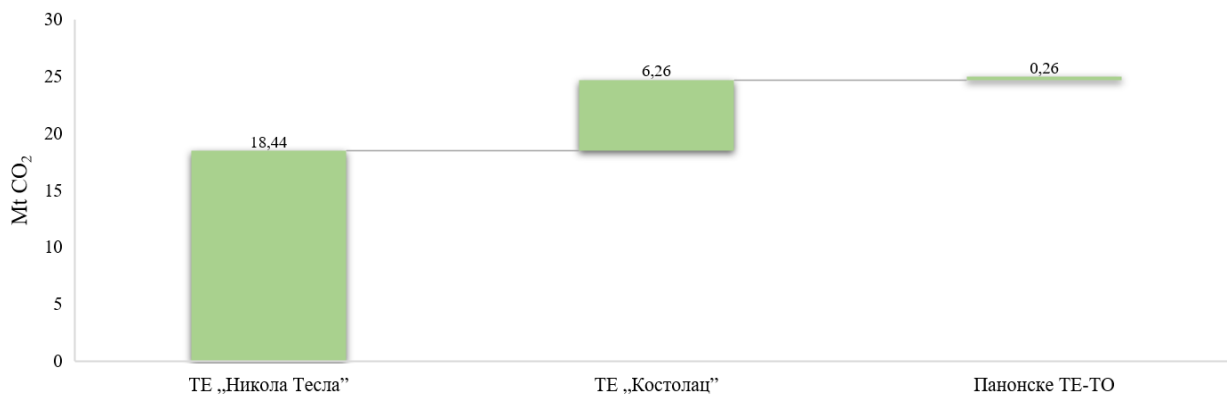
Према последњим доступним подацима Међународне агенције за енергетику – International Energy Agency (IEA, 2025), укупне емисије угљен диоксида у Србији у 2023. години износиле су 44 Mt (6,63 t per capita – по становнику), што је за 30% мање у односу на емисију у 1990. години. У 2024. години укупне емисије угљен диоксида у Србији износиле су 42,02 Mt, односно 6,24 t CO₂ по становнику (Ritchie & Roser, CO₂ emissions, 2020). На слици 2.2. приказан је тренд емисија CO₂ у Србији у периоду од 1990. до 2024. године.



Слика 2.2. Укупне емисије CO₂ у Србији за период од 1990. до 2024. године

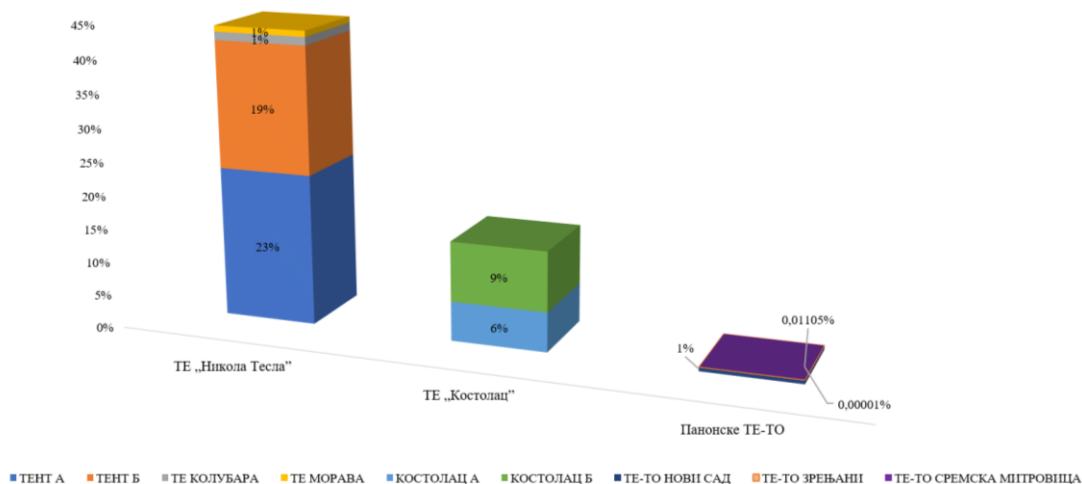
У поређењу са европским земљама, Србија се налази на једанаестом месту по емисијама CO₂ по становнику. Емисије угљен диоксида у Србији нису занемарљиве и неопходно је предузети одговарајуће активности и мере како би се смањиле и свеле на минимум.

Највеће учешће у укупним емисијама CO₂ у Србији, које износи око 60%, има енергетски сектор (производња електричне и топлотне енергије). Највећи емитери су термоелектране (ТЕ) и топлане (ТО) које користе фосилна горива за производњу електричне енергије. На слици 2.3. дате су укупне емисије CO₂ у Србији из термоелектрана и топлана у 2024. години (ЕПС, 2025).



Слика 2.3. Укупне емисије угљен диоксида у Србији из термоелектрана и топлана у 2024. години

Процентуално учешће емисија CO₂ у појединачним термоелектранама и ТЕ-ТО у односу на укупне количине емитованог угљен диоксида у Србији приказано је на слици 2.4. Може се видети да ТЕ „Никола Тесла“ емитује највеће количине CO₂ у атмосферу, јер је то највеће енергетско постројење у Србији које на годишњем нивоу користи 25 140 060 t угља, 75 345 t мазута и 2 828 t нафте, док Панонске ТЕ-ТО за производњу електричне енергије користе природни гас и биомасу (ЕПС, 2025).



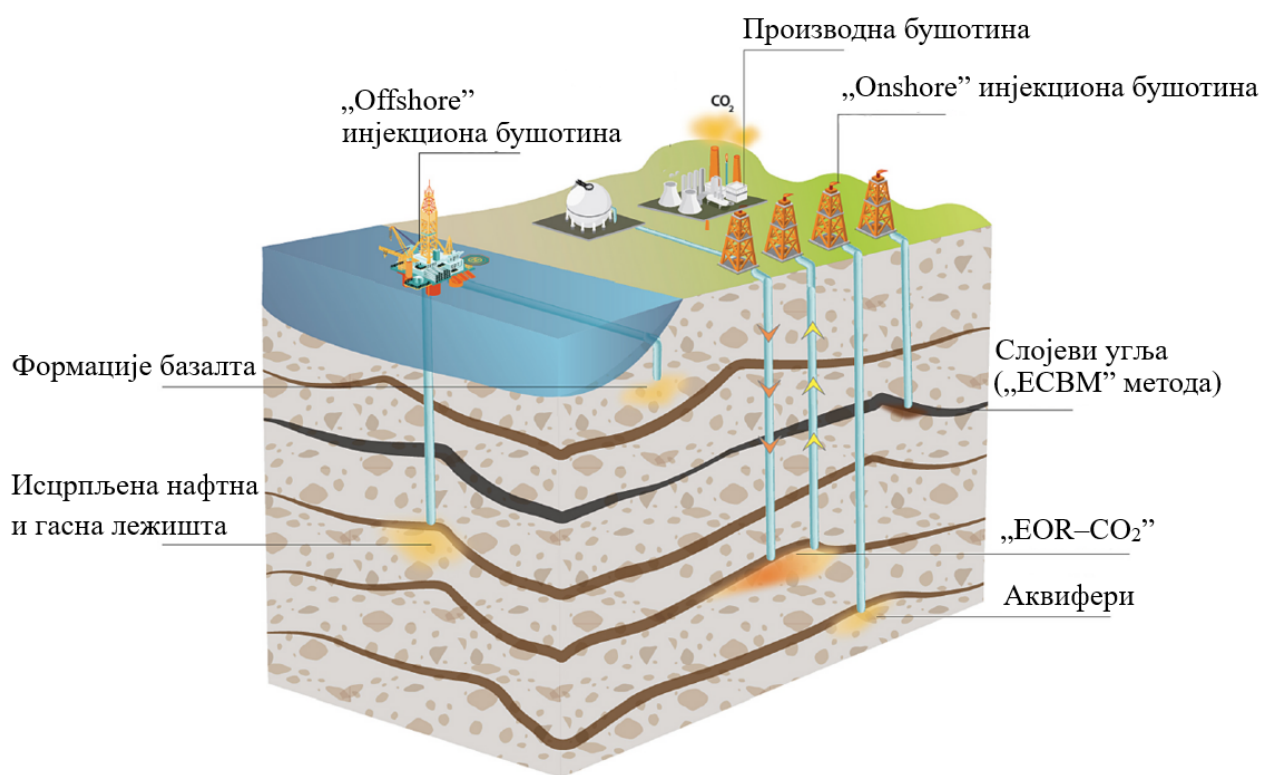
Слика 2.4. Процентуално учешће емисија CO₂ по појединачним термоелектранама и ТЕ-ТО у односу на укупне количине емитованог угљен диоксида у Србији у 2024. години

Коришћење обновљивих извора енергије, нуклеарне енергије, повећање енергетске ефикасности и коришћење природног гаса уместо угља представљају мере које доприносе смањењу емисија антропогеног угљен диоксида (Tomić et al., 2018). Водећа технологија смањења емисија CO₂ је складиштење у геолошке формације. Она представља ефикасну методу која обезбеђује сигурно складиштење знатних количина угљен диоксида (Tomić et al., 2018; Ali et al., 2022).

3. ГЕОЛОШКО СКЛАДИШТЕЊЕ УГЉЕН ДИОКСИДА

Технологија геолошког складиштења угљен диоксида представља једно од најзначајнијих перспективних решења смањења емисије антропогеног CO₂ на путу остварења циља нулте емисије до 2050. године.

Геолошко складиштење је комплексан процес који обухвата примену технологије хватања CO₂ из индустријског и енергетског сектора, компримовање CO₂ и транспорт најчешће цевоводима, и на крају утискивање у циљу складиштења у одговарајуће геолошке формације (Tomić et al., 2018). Геолошке формације које се сматрају адекватним за дугорочно складиштење CO₂ су превасходно: исцрпљена нафтна и гасна лежишта, аквифери и слојеви угља. Одређена количина CO₂ може се складиштити током примене терцијарних метода повећања искоришћења нафтних и гасних лежишта утискивањем CO₂ („EOR–CO₂”). Такође, каверне у соним наслагама, базалти и шејлови разматрају се као потенцијална складишта CO₂ и за сада се могућности њихове примене у те сврхе налазе у фази испитивања (IPCC, 2005; Raza A. et al., 2020). На слици 3.1. приказани су типови геолошког складиштења угљен диоксида.



Слика 3.1. Типови геолошког складиштења угљен диоксида (адаптирано из извора: Bashir et al., 2024)

- **Исцрпљена нафтна и гасна лежишта**

На основу бројних истраживања спроведених у области геолошког складиштења CO₂ сматра се да су исцрпљена лежишта угљоводоника најпогоднија за складиштење угљен диоксида посматрано са аспекта најмањег ризика од миграције/цурења CO₂ из складишта (Lai et al., 2015; Aminu et al., 2017; Tomić et al., 2019; Cao et al., 2020; Tomić et al., 2021). Ово произилази из чињенице да лежишта угљоводоника карактерише висок степен истражености, као и дуг период експлоатације током којег је сакупљен велики број података о лежишту и флуиду. Поред тога, дуготрајна акумулација угљоводоника у геолошким структурама потврђује интегритет заштитних стена (Busch et al., 2010; Mat Razali et al., 2022). Расположивост великог броја података омогућава израду прецизног лежишног симулационог модела, као и адекватну процену капацитета складиштења угљен диоксида (Ајаји et al., 2019). Складиштење CO₂ у изексплоатисана лежишта угљоводоника има предност у односу на остале опције

складиштења и са аспекта капиталних и оперативних трошкова који су знатно нижи с обзиром на висок степен истражености и присуство постојеће инфраструктуре (IPCC, 2005; Rasool et al., 2023).

Утискивање угљен диоксида у исцрпљена лежишта угљоводоника доприноси порасту лежишног притиска. С обзиром на то да током производње нафте и гаса долази до пада лежишног притиска, сматра се да је безбедно вршити утискивање CO_2 до вредности почетног лежишног притиска (Bradshaw et al., 2007). Могуће је утискивати CO_2 и изнад почетног лежишног притиска, што ће омогућити складиштење већих количина, али то захтева детаљну анализу како би се избегли потенцијални ризици. Утврђено је да је безбедно складиштење могуће све док је вредност притиска мања од притиска фрактурирања заштитне стене (Busch et al., 2010; Aminu et al., 2017; Ajayi et al., 2019; Cao et al., 2020). У појединим лежиштима, угљоводоници не заузимају запремину до преливне тачке замке („spill point”), па је за складиштење CO_2 расположива већа порна запремина. У том случају притисак инјектирања треба да буде виши од почетног лежишног притиска (CSLF, 2007).

Исцрпљена гасна лежишта са експанзионим режимом повољнија су за складиштење CO_2 у односу на исцрпљена нафтна лежишта, јер се код гасних лежишта може постићи већи капацитет складиштења. Код нафтних лежишта присутно је одређено засићење резидуалном нафтом, па ће капацитет потенцијалног складишта бити мањи. Гасна лежишта карактерише висок степен искоришћења. Гас има знатно већи компресибилитет у односу на нафту из чега произилази могућност складиштења већих количина CO_2 у односу на нафтна лежишта.

Потенцијални проблем при утискивању угљен диоксида у циљу складиштења у исцрпљена лежишта угљоводоника јесте присуство конзервираних бушотина, које могу представљати евентуалне путеве миграције CO_2 на површину.

- *Складиштење CO_2 при процесу повећања искоришћења нафтних лежишта – „EOR- CO_2 ” методе*

Утискивање угљен диоксида у делимично исцрпљена нафтна лежишта или лежишта на крају експлоатационог периода за повећање степена искоришћења примењује се у нафтној индустрији деценијама (Tomić et al., 2018). Данас ова метода представља највише примењену терцијарну методу искоришћења лежишта. Утискивањем CO_2 након примене примарних и секундарних метода искоришћења може се повећати постигнуто искоришћење од 20 до 50% за 15–25% (Karović Maričić et al., 2014).

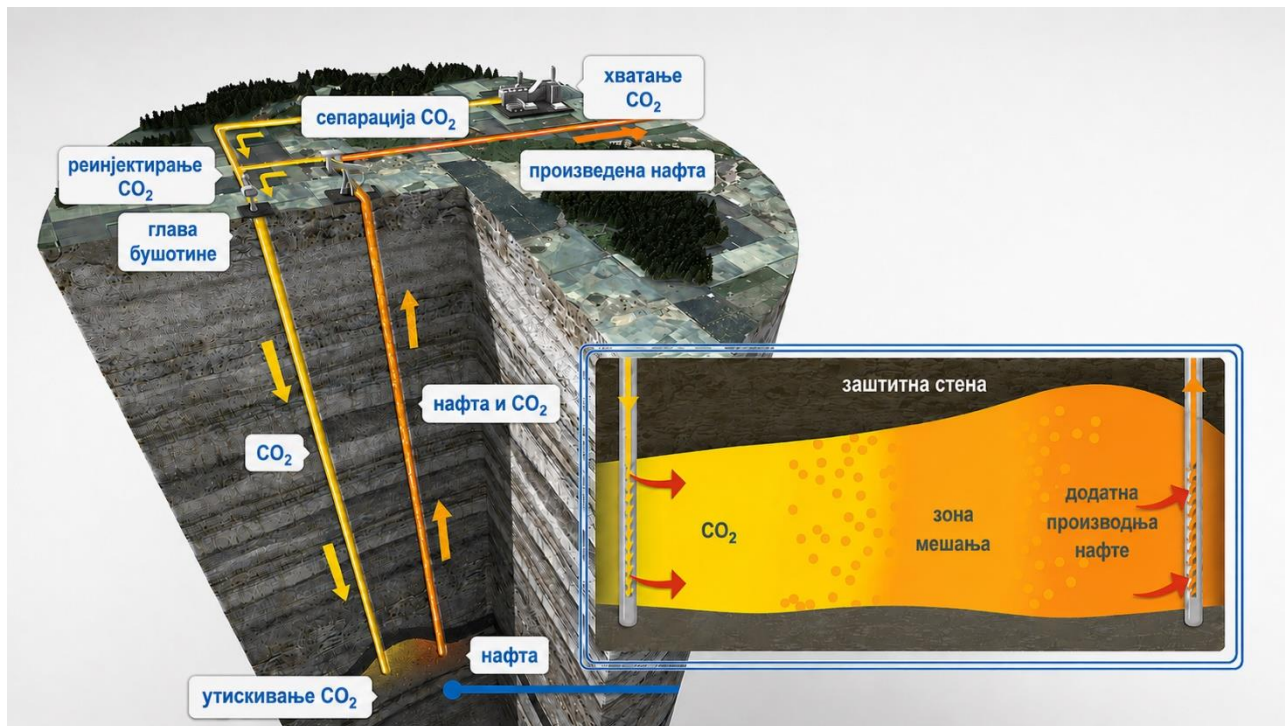
Утискивањем CO_2 повећава се искоришћење нафте у вредности која зависи од тога да ли се процес одвија у условима немешања или мешања са нафтом. У условима немешања смањује се вискозност нафте и повећава запремина нафте бубрењем, а на одређеним условима лежишног притиска, температуре и компоненталног састава нафте долази до мешања са нафтом – формирања једнофазног флуида, настанка додатних производних механизма и самим тим постизања већег искоришћења (Solomon, 2006; Karović Maričić et al., 2015).

У почетку примене „EOR- CO_2 ” методе, угљен диоксид се добијао из природних лежишта овог гаса. Данашњи тренд примене базира се све више на коришћењу антропогеног CO_2 добијеног из индустријског и енергетског сектора тако да се специфичност ове методе огледа у њеном еколошком бенефиту.

Предност утискивања и складиштења угљен диоксида при процесу повећања искоришћења иста је као и код исцрпљених лежишта угљоводоника, тј. познате су лежишне карактеристике будућег складишта, што је предуслов безбедности складиштења, и расположива је инфраструктура, што утиче на смањење трошкова. Капацитети складиштења делимично исцрпљених нафтних лежишта у односу на изексплоатисана лежишта знатно су мањи, јер се око 37–50% утиснутог CO_2 задржава у порном простору растварањем у нафти и лежишној води, док се остатак производи заједно са нафтом, одваја од ње на површини у сепараторима и

поново утискује за повећање искоришћења нафтног лежишта (Solomon, 2006). Укупна количина CO_2 која се може складиштити током процеса повећања искоришћења нафте мања је у односу на остале опције геолошког складиштења, међутим двоструки ефекат ових процеса који обухвата економску добит и утицај на смањење емисија CO_2 чини их веома значајним (IEA, 2015; Farajzadeh et al., 2020).

Приказ процеса утискивања CO_2 у делимично исцрпљена нафтна лежишта дат је на слици 3.2.



Слика 3.2. Утискивање CO_2 у делимично исцрпљена нафтна лежишта – „EOR- CO_2 ” процес (адаптирано из извора: Denduluri & Thakur, 2022)

- Аквифери

Аквифери представљају пропусне стене са порним простором испуњеним минерализованом водом високог салинитета (Smit et al., 2014). Предност у односу на остале формације геолошког складиштења јесте да поседују највећи складиштени простор и већу распрострањеност што их чини доступнијим са аспекта транспорта (Maroto-Valer, 2010; Tomić et al., 2018; Ajayi et al., 2019). Главни недостатак складиштења у аквифере је њихова недовољна истраженост и одсуство потребне инфраструктуре што заједно захтева велика капитална улагања.

- Слојеви угља

Складиштење у неексплоатисане слојеве угља функционише на принципу адсорпције угљен диоксида на површини угља и у пукотинском простору формације, при чему се истискује метан адсорбован у порном простору угља због веће адсорпционе моћи CO_2 (Maroto-Valer, 2010; Smit et al., 2014; Ajayi et al., 2019). Значајно је да, поред складиштења угљен диоксида, ова метода истовремено представља и методу повећања производње метана из слојева угља (enhanced coalbed methane recovery – „ECBM”) (Bachu, 2000; Llamas et al., 2016).

Главни недостатак овог вида складиштења јесте врло ниска пропусност угља и бубрење изазвано адсорпцијом CO_2 на површини угља, што додатно смањује пропусност (Mazumder & Wolf, 2008; Perera & Ranjith, 2012). Ове карактеристике угља знатно утичу на повећање трошкова утискивања.

- Каверне соли, базалти, нафтни и гасни шејлови

Каверне соли, базалти, нафтни и гасни шејлови такође се проучавају као потенцијална складишта, али за сада нису довољно истражени са тог аспекта (IPCC, 2005; Bennaceur, 2014; Tomić et al., 2018).

3.1. Критеријуми геолошког складиштења угљен диоксида

Први корак у процени могућности и избору потенцијалног геолошког складиштења угљен диоксида је прикупљање података и анализа бројних критеријума од којих зависи успешност реализације процеса складиштења са техничког, сигурносног, економског и друштвеног аспекта (Bachu, 2000; Tomić et al., 2018).

Критеријуми за геолошко складиштење CO₂ могу се поделити у три групе (Bachu, 2000; Llamas et al., 2014a; Cai et al., 2017; Tomić et al., 2018):

1. Геолошки;
2. Термодинамички и хидродинамички;
3. Техно-економски, друштвени и политички критеријуми.

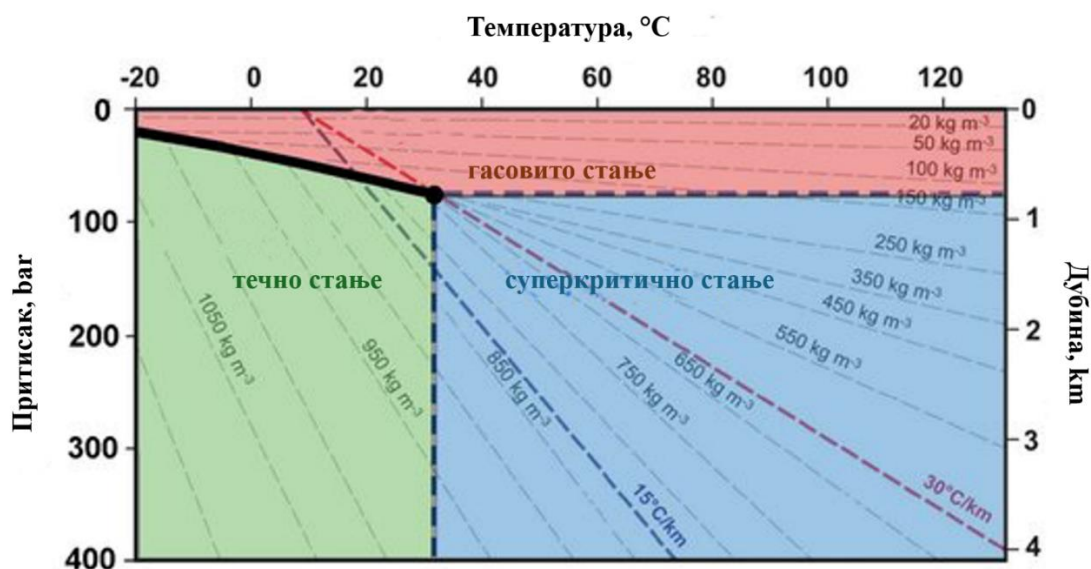
3.1.1. Геолошки критеријуми

Геолошки критеријуми обухватају особине резервоара, тј. лежишта и заштитне стене. Прелиминарна анализа геолошких параметара од којих зависи избор потенцијалне геолошке формације за складиштење угљен диоксида обухвата: тип лежишта, запремину лежишта, порозност и пропусност, дубину и дебљину колектор стена, пропусност и дебљину заштитних стена, сеизмогени потенцијал раседа и напонска стања стене (Bachu, 2000; Llamas et al., 2014a; Tomić et al., 2018; Aminu et al., 2017; Ajayi et al., 2019). Најодговарајући типови басена за складиштење су седиментни, где су и највише заступљене геолошке формације за потенцијално складиштење (Kali et al., 2022). Посматрано са аспекта обезбеђивања сигурног задржавања CO₂, складиштење није пожељно вршити у басенима са присутним раседима, у близини вулкана и у сеизмички активним областима.

3.1.2. Термодинамички и хидродинамички критеријуми

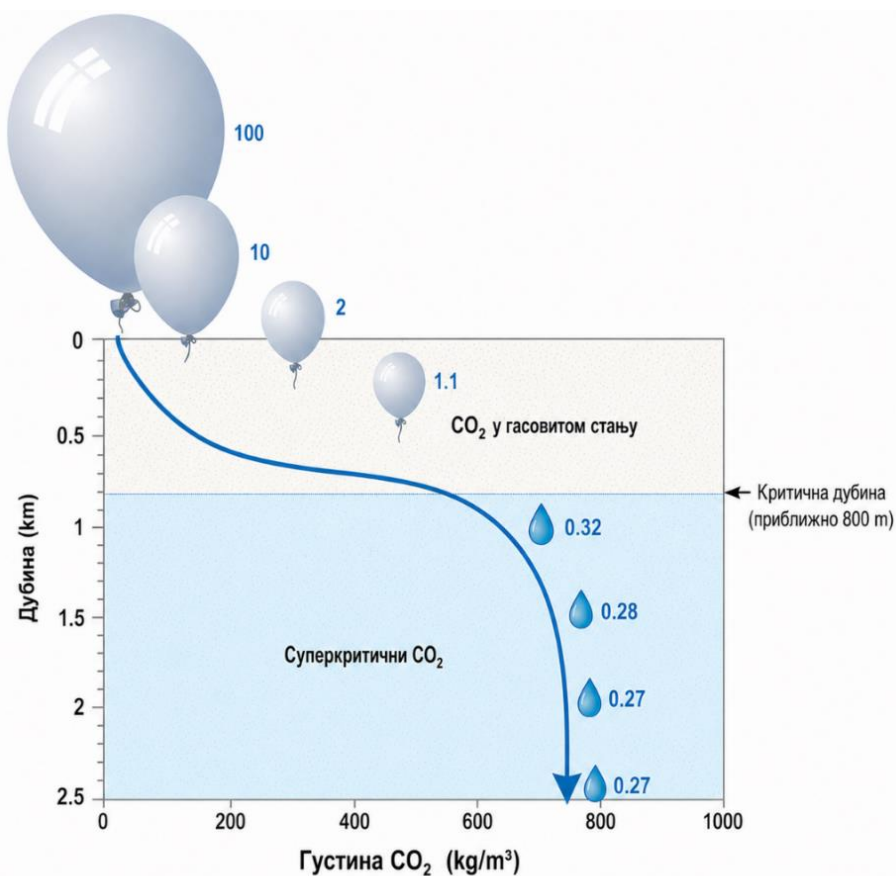
Термодинамички критеријуми односе се на вредности лежишног геотермалног градијента и градијента притиска које су од утицаја на могућност складиштења одређених количина CO₂, односно на ефикасност складиштења. Ефикасност складиштења угљен диоксида у геолошку формацију представља количину утиснутог CO₂ у јединици порне запремине и расте са повећањем густине CO₂ (Brennan & Burruss, 2006).

Оптимални термобарски услови складиштења представљају утискивање CO₂ у суперкритичном стању. Критичне вредности притиска и температуре угљен диоксида су 7,38 МПа (73 atm) и 31,1°C и на тим условима CO₂ поседује особине гаса и течности, тј. има густину течности и вискозност гаса (Bachu, 2000; Solomon, 2006; Llamas et al., 2014a; Aminu et al., 2017; Kali et al., 2022). На слици 3.3. дат је дијаграм промене фазног стања угљен диоксида у функцији дубине, притиска и температуре.



Слика 3.3. Фазни дијаграм угљен диоксида (адаптирано из извора: Smit et al., 2014)

Повољнији услови складиштења су на мањим дубинама залегања колектор стене (800–1000 m) у условима нижег температурног градијента, јер се густина CO₂ повећава. За услове повећања притиска са дубином формације, узимајући вредност градијента хидростатичког притиска од 0,1 bar/m и геотермалног градијента Земље који износи 25–30 °C/km, минимална апроксимативна дубина за утискивање CO₂ у суперкритичном стању је 800 m (Smit et al., 2014). Са повећањем дубине смањује се запремина утиснутог угљен диоксида (слика 3.4.), што омогућава утискивање већих количина и самим тим ефективније складиштење.



Слика 3.4. Промена запремине угљен диоксида на површини и лежишним условима (адаптирано из извора: Smit et al., 2014)

Хидродинамички критеријуми обухватају утицај слојне воде на стратегију утискивања и складиштења CO_2 у геолошке формације (Setijadji, 2009; Aminu et al., 2017; Tomić et al., 2018). Познато је да је слојна вода често присутна у порном простору исцрпљених и делимично исцрпљених лежишта угљоводоника. Брзина кретања, салинитет и притисак слојне воде параметри су који утичу на задржавање угљен диоксида у порном простору, или у супротном, на могућност стварања услова за миграцију CO_2 (Aminu et al., 2017). Брзина кретања слојне воде зависи од структуре формације, а за постизање сигурног складиштења, угљен диоксид се утискује у лежиште чији је притисак нижи од хидростатичког (Setijadji, 2009; Aminu et al., 2017).

Дакле, избором одговарајуће стратегије геолошког складиштења, која је у складу са хидродинамичким режимом у лежишту, може се елиминисати ризик од миграција и пропуштања CO_2 на површини (Tomić et al., 2018).

3.1.3. Техно-економски, друштвени и политички критеријуми

Техно-економски критеријуми обухватају трошкове пре самог процеса складиштења CO_2 , трошкове у вези са избором локације складишта, као и трошкове мониторинга (Tomić et al., 2018). Трошкови пре процеса складиштења подразумевају трошкове који се односе на хватање, компримовање и транспорт CO_2 до геолошке формације, као и спровођење студија претходне оправданости за карактеризацију и одабир адекватне локације за складиштење угљен диоксида (Tomić et al., 2018; Kali et al., 2022). Трошкови складиштења угљен диоксида могу се поделити на капиталне и оперативне. Капитални трошкови складиштења обухватају израду инјекционих бушотина и изградњу површинске инфраструктуре (Kali et al., 2022; Nermoen et al., 2022). Оптимални број и распоред инјекционих бушотина одређује изабрана стратегија утискивања и може да варира у времену у зависности од количине угљен диоксида коју треба утиснути. Трошкови складиштења се смањују с обзиром на коришћење постојеће инфраструктуре, односно конверзије напуштених производних бушотина у инјекционе бушотине. Оперативни трошкови складиштења обухватају трошкове одржавања, компримовања и административне трошкове. Трошкови мониторинга, који обухватају надзор и контролу, зависе од трајања процеса складиштења, као и од законских регулативних аката и нису урачунати у процену трошкова складиштења.

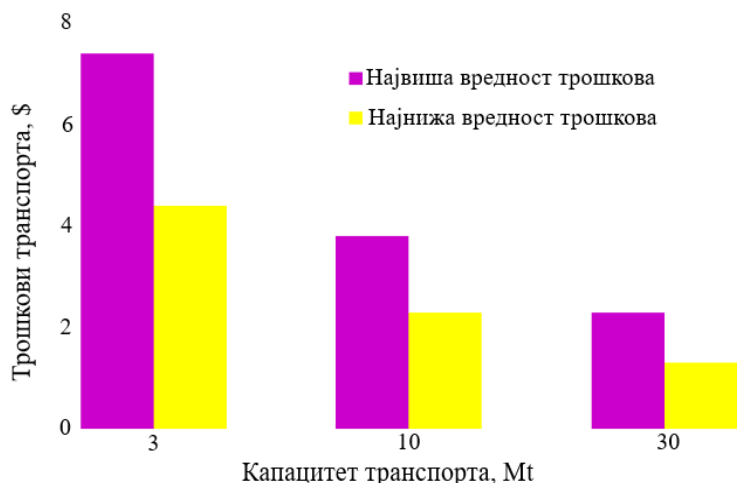
У зависности од начина хватања, транспорта и складиштења CO_2 , распон трошкова веома је варијабилан.

Цена хватања угљен диоксида варира у зависности од извора и концентрације CO_2 , који директно утичу на избор одговарајуће технологије хватања (Sievert et al., 2023). Према Међународној агенцији за енергетику (IEA, 2021), трошкови хватања висококонцентрованог угљен диоксида из индустријских процеса, као што је пречишћавање природног гаса, износе 15–25 \$/t CO_2 , док се трошкови хватања нискоконцентрованог CO_2 из постројења за производњу електричне енергије (термоелектране), цемента и железара, крећу од 40 до 120 \$ по тони CO_2 . За сада је директно хватање угљен диоксида из ваздуха најмање исплатив приступ са ценом која иде чак до 340 \$ по тони CO_2 . Трошкови хватања угљен диоксида у термоелектранама зависе од врсте енергента који се користи за производњу електричне енергије. Rubin et al., 2015. у свом раду наводе да је просечна цена хватања CO_2 у термоелектранама које користе угаљ 47 \$, док је у термоелектранама које користе природни гас 76 \$.

У зависности од вида транспорта, односно да ли се користе цевоводи, цистерне или бродови, трошкови транспорта угљен диоксида варирају. Најзаступљеније средство за транспорт CO_2 су цевоводи, и битна карактеристика која утиче на цену јесте да ли су цевоводи на копну („onshore”) или на мору („offshore”). Изградња цевовода на мору знатно је комплекснија, што утиче на веће трошкове изградње потребне инфраструктуре. Такође, фактори који утичу на цену транспорта јесу трошкови изградње цевовода, удаљеност, капацитет угљен диоксида који

се транспортује, као и трошкови везани за законодавни оквир који обухватају разне еколошке дозволе и административне таксе (Ulvestad & Overland, 2012; Smith et al., 2021). Трошкови изградње цевовода, који зависе од капацитета и услова транспорта угљен диоксида, обухватају материјал од којег је изграђен цевовод, дебљину цеви и пречник (Smith et al., 2021).

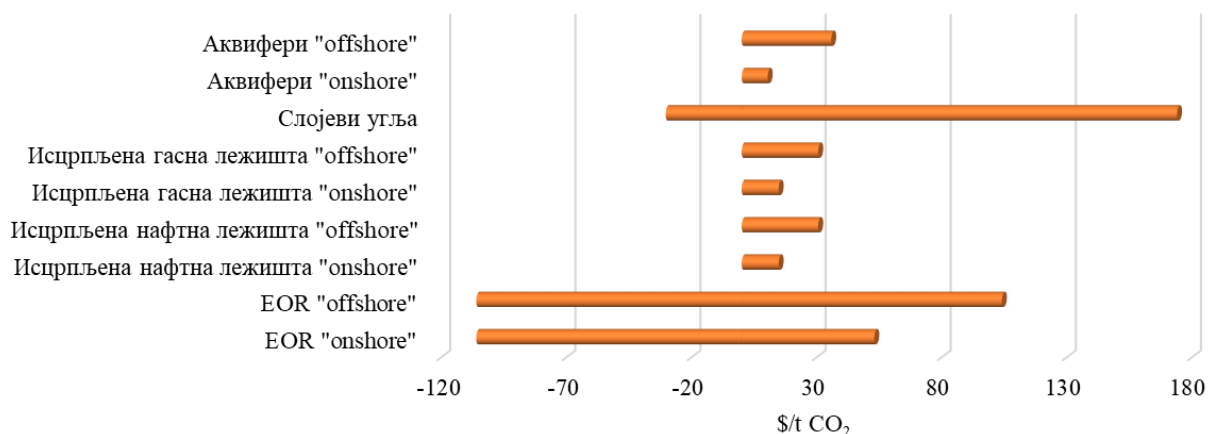
На слици 3.5. дат је пример минималних и максималних трошкова транспорта угљен диоксида цевоводима дужине 250 km у Сједињеним Америчким Државама, за различите капацитете транспорта (Schmelz et al., 2020). За транспорт 3 Mt CO₂ распон трошкова иде од 4,4 \$ до 7,4 \$ по тони CO₂. Са слике се може уочити да се повећањем капацитета транспорта CO₂, за исту удаљеност, трошкови смањују. Минимални и максимални трошкови транспорта 30 Mt CO₂ цевоводима су 1,3 \$ и 2,3 \$ по тони CO₂.



Слика 3.5. Трошкови транспорта по тони CO₂

Платформа нултих емисија (Zero emissions platform – ZEP) представља платформу за иновације и технологију, чија улога је да саветује Европску унију о значају и имплементацији складиштења угљен диоксида. На основу досадашњих пројеката складиштења CO₂ у Европи, Платформа нултих емисија је у свом документу „Трошкови транспорта CO₂: пост демонстрациони пројекти хватања и складиштења угљен диоксида у ЕУ” (The Costs of CO₂ Transport: Post-demonstration CCS in the EU) дала преглед кретања цена транспорта угљен диоксида (ZEP, 2011). Трошкови транспорта копненим цевоводима дужине 180 km и капацитета 2,5 Mt, процењени су на 5,4 € по тони CO₂, док су за транспорт на истој удаљености са капацитетом од 20 Mt трошкови чак 70% нижи и износе 1,5 € по тони.

Цене процеса складиштења CO₂ варирају у зависности од типа складиштења. Преглед минималних и максималних трошкова складиштења у различите геолошке формације дат је на слици 3.6. Може се уочити да највећи опсег трошкова има складиштење у слојеве угља и креће се од -30,3 до 174 \$ по тони угљен диоксида. Негативна вредност трошкова при процесу повећања искоришћења нафтних лежишта („EOR–CO₂”) и код складиштења CO₂ у слојеве угља представља економску добит остварену производњом нафте и метана, што утиче на смањење трошкова складиштења (Koelbl et al., 2014).

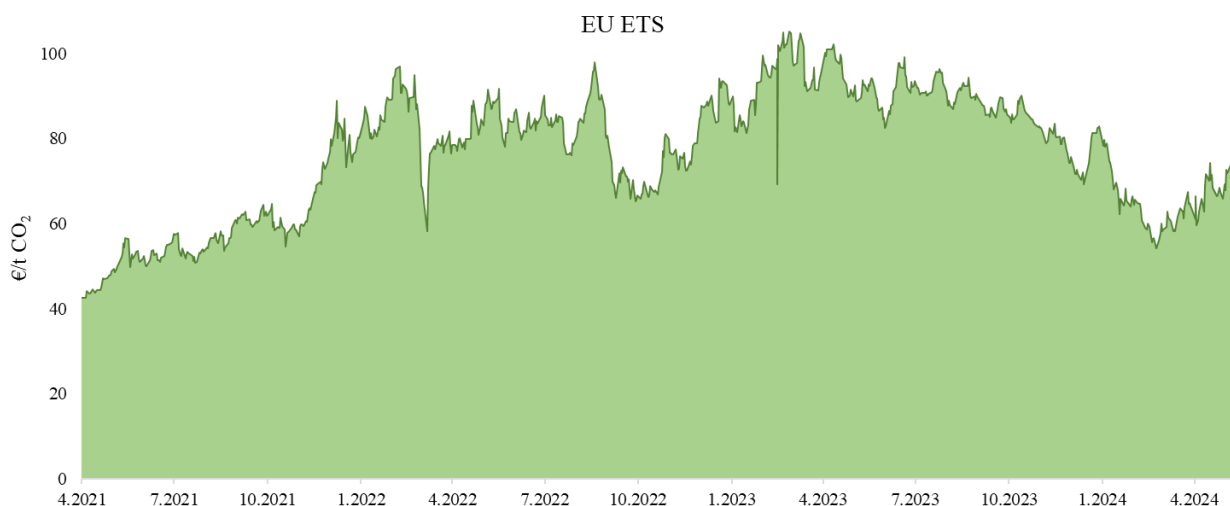


Слика 3.6. Трошкови складиштења угљен диоксида у зависности од типа геолошког складиштења

Такође, једна од мера за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште, пре свега из енергетског и индустријског сектора, јесте Систем трговине емисионим јединицама Европске уније (EU Emissions Trading System – EU ETS) који је установљен 2005. године Директивом 2003/87/EZ (European Commission, 2025; European Union, 2003). Овим системом формирано је тржиште емисијама гасова из наведених сектора израженим у тонама CO₂ еквивалента, где се максималне количине емисија и њихова цена одређују на годишњем нивоу. Механизам EU ETS функционише на принципу ограничења и трговине дозвољених емисија (Cap and Trade System), које је Европска унија дефинисала у складу са циљевима плана климатске политике до 2030. године. Такав тржишни механизам функционише тако што емисиони привредни и други субјекти купују или добијају бесплатном алокацијом емисионе јединице чија количина треба да покрије њихове укупне годишње емисије. У супротном, емисиони субјекти плаћају новчану накнаду за сваку прекомерну испуштену тону CO₂ за коју немају дозволу. Од 2005. године, извршено је неколико ревизија Система трговине емисионим јединицама Европске уније у складу са текућим законима ЕУ о климатским променама. Од 2021. године систем је у четвртој фази примене (2021–2030), која је првобитно имала за циљ смањење емисија за 43% до 2030. године у односу на ниво из 2005. године (European Union, 2018). Након усвајања пакета „Fit for 55”, четврта фаза система је ревидирана ради усклађивања са новим циљем Европске уније да до 2030. године смањи нето емисије гасова са ефектом стаклене баште за најмање 55% у односу на ниво из 1990. године (European Union, 2023).

Како би се обезбедила економска исплативост утискивања CO₂ у подземне формације, трошкови хватања, транспорта и складиштења угљен диоксида требало би да буду нижи од пореза на емитовање CO₂ у атмосферу (Kali et al., 2022). Значајни износи опорезивања прекомерне емисије свакако утичу на њено смањење, а приходована буџетска средства омогућују већа улагања у развој активности у области енергетске ефикасности, обновљивих извора енергије, нискоугљеничних и зелених технологија.

На слици 3.7. дат је приказ кретања цена емисионих дозвола од априла 2021. до маја 2024. године и може се уочити да је у фебруару 2023. године цена емисионе јединице достигла највећу вредност која је износила 105,14 € по тони емисије CO₂ (Trading Economics, n.d.).



Слика 3.7. Тренд кретања цена емисионих дозвола (€/t CO₂) у ЕУ за период од априла 2021. до маја 2024. године

Друштвени критеријуми односе се на интензивирање информисања јавности о значају утицаја процеса геолошког складиштења на смањење емисија угљен диоксида (Тomić et al., 2018). То подразумева промовисање геолошког складиштења као еколошке активности, која представља једно од кључних глобалних решења заштите животне средине. Међутим, може се рећи да за сада земљама у развоју није приоритет смањење емисија и загађења животне средине, тако да је подизање свести друштва о митигацији CO₂ применом складиштења присутно и усмерено на развијене државе.

Проблематика законске регулативе представља такође друштвено-политички критеријум, који се односи на доношење и имплементацију потребних регулатива, прописа и планова, као правног оквира геолошког складиштења CO₂ и утицаја политичког фактора на испуњавање обавеза на основу усвојених међународних обавеза у вези с овим питањем (Тomić et al., 2018). Европски парламент и Европски савет 2009. године усвојили су Директиву о геолошком складиштењу угљен диоксида (European Union, 2009) која садржи правне одредбе о процесу складиштења CO₂ почевши од избора локације, па све до мониторинга процеса утискивања. Највећи део земаља ЕУ транспоновало је Директиву у своја законодавства, а у Србији су главни принципи садржани у Директиви делимично пренети кроз Закон о рударству и геолошким истраживањима (Република Србија, 2015). Такође, Директива је усвојена као део ЕУ пакета климатских и енергетских мера усмерених на смањење емисија гасова стаклене баште који доприносе климатским променама. Европска комисија је 2019. године у оквиру Европског закона о клими (European Union, 2021) усвојила Европски зелени договор (European Green Deal) који представља стратегију одрживог развоја ЕУ. Европски зелени договор водећа је стратегија Европске уније за борбу против климатских промена која има за циљ постизање неутралности до 2050. године (European Commission, 2019).

3.2. Вредности лежишних параметара и особина лежишног флуида као критеријума складиштења CO₂

У табелама овог потпоглавља дате су пожељне и оптималне вредности лежишних параметара и особина флуида (сирове нафте) на основу којих се врши прелиминарна селекција геолошке формације за складиштење CO₂.

У табели 3.1. дате су вредности општих, тзв. елиминационих критеријума који се могу применити на све типове геолошких формација. Они су веома значајни због обезбеђивања сигурног дугорочног складиштења CO₂ и представљају неопходан предуслов који треба испунити при избору потенцијалне локације складишта.

Табела 3.1. Вредности општих критеријума за прелиминарну селекцију геолошке формације за складиштење угљен диоксида (Maroto-Valer, 2010)

Критеријум	Пожељно	Непожељно
Дубина, m	> 800	< 800
Лежишни притисак	Мањи или једнак хидростатичком притиску	Већи од хидростатичког
Сеизмичка активност	Тектонски стабилна подручја	Присуство раседа, близина вулкана и земљотреси

У табели 3.2. приказане су вредности притиска и температуре и њихових градијената потребних за складиштење CO₂ у суперкритичном стању.

Табела 3.2. Оптималне вредности притиска и температуре за складиштење угљен диоксида у суперкритичном стању (Maroto-Valer, 2010)

Критеријум	Пожељно	Непожељно
Температурни градијент, °C/km	< 35	> 35
Температура, °C	≥ 35	< 35
Градијент притиска, kPa/m	< 12	> 14
Притисак, МПа	≥ 7,5	< 7,5

Оптималне дубине за складиштење угљен диоксида у исцрпљена лежишта угљоводоника су од 800 до 1000 m. Пожељно је да су лежишта хомогена, са добром пропусношћу и без воденог утока (Solomon, 2006). Такође, значајни критеријуми су моћност лежишта и тип заштитне стене (шејлови, глине, евапорити), растојање између емитера CO₂ и потенцијалног складишта, као и да укупни капацитет складиштења буде већи од количине CO₂ коју производи одређени емитер (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009a; Wang et al., 2022). Оптимални параметри за складиштење угљен диоксида у исцрпљена нафта и гасна лежишта дати су у табели 3.3.

Табела 3.3. Оптимални параметри за складиштење CO₂ у исцрпљена нафта и гасна лежишта (Raza A. et al., 2016b; Raza A. et al., 2017b)

Особине лежишта и флуида	Вредност
Дубина, m	> 800
Порозност, %	> 20
Пропусност, 10 ⁻¹⁵ m ²	> 100
Ефективна моћност, m	> 20
Резидуално засићење флуидом	мало

У табели 3.4. дат је опсег вредности критеријума за случај складиштења током „EOR–CO₂” процеса у условима мешања. У зависности да ли се утискивање CO₂ врши у условима мешања или немешања са нафтом, разликују се пожељне вредности дубине, а самим тим и температуре. За остваривање услова мешања потребна је већа вредност притиска од минималног притиска мешања (minimum miscibility pressure – MMP), па је самим тим потребна и већа дубина лежишта (Томић et al., 2018). Минимални притисак мешања је притисак изнад којег долази до мешања утиснутог гаса и лежишне нафте и на његову вредност утичу температура у лежишту и компонентални састав нафте (Gozalpour et al., 2005). Вредности MMP одређују се у лабораторији (експерименталне методе), или емпиријским корелацијама које су развили бројни аутори (Song et al., 2024).

Табела 3.4. Оптималне вредности лежишних параметара и особина флуида током „EOR-CO₂” процеса (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009a; Maroto-Valer, 2010)

Особине лежишта и флуида	Вредност
Густина, kg/m ³	800–890
Вискозност нафте, mPa·s	≤ 6
Преостало засићење нафтом, %	> 30
Тип формације	Пешчари
Дебљина, m	5–7,5
Пропусност, 10 ⁻¹⁵ m ²	≥ 5
Порозност, %	≥ 3
Дубина, m	> 600
Температура, °C	28–121
Притисак	> ММР и < P _{frakturiranja}

Оптималне особине аквифера и воде у аквиферу за складиштење CO₂ у тај тип геолошке формације приказане су у табели 3.5. Заштитне стене аквифера треба да обезбеде „херметичност складишта” што подразумева да их карактерише латерални континуитет, моћност већа од 100 m и да притисак фрактурирања заштитне стене буде већи од максимално предвиђеног повећања притиска услед утискивања (Chadwick et al., 2008; IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009a).

Табела 3.5. Оптимални параметри аквифера и воде (Chadwick et al., 2008; IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009a; Tomić et al., 2018)

Особине аквифера и воде	Оптималне вредности
Дубина, m	1000–2500
Моћност, m	> 50
Порозност, %	> 20
Пропусност, 10 ⁻¹⁵ m ²	> 300
Салинитет, mg/l	> 100000

Према IPCC, 2005. за складиштење CO₂ у слојеве угља пожељно је да је лежиште хомогено, адекватне пропусности, да се састоји из мањег броја латерално континуираних дебљих слојева, да нема раседа, да је дубина до 1500 m, да је присутно високо засићење метаном и да постоји могућност одводњавања слојне воде. Вредности оптималних параметара дати су у табели 3.6.

Табела 3.6. Оптимални параметри лежишта угља (CGS Europe, 2013; Pratama et al., 2017; Tomić et al., 2018)

Критеријум	Вредности
Дубина, m	500–1500
Температура, °C	< 100
Пропусност фрактура, 10 ⁻¹⁵ m ²	> 2
Порозност матрикса, %	> 0,5
Геолошке резерве метана, Mm ³ /km ²	> 250

Сви наведени критеријуми за избор адекватне локације за складиштење угљен диоксида своде се на три основна параметра, односно услова:

1. Капацитет складиштења

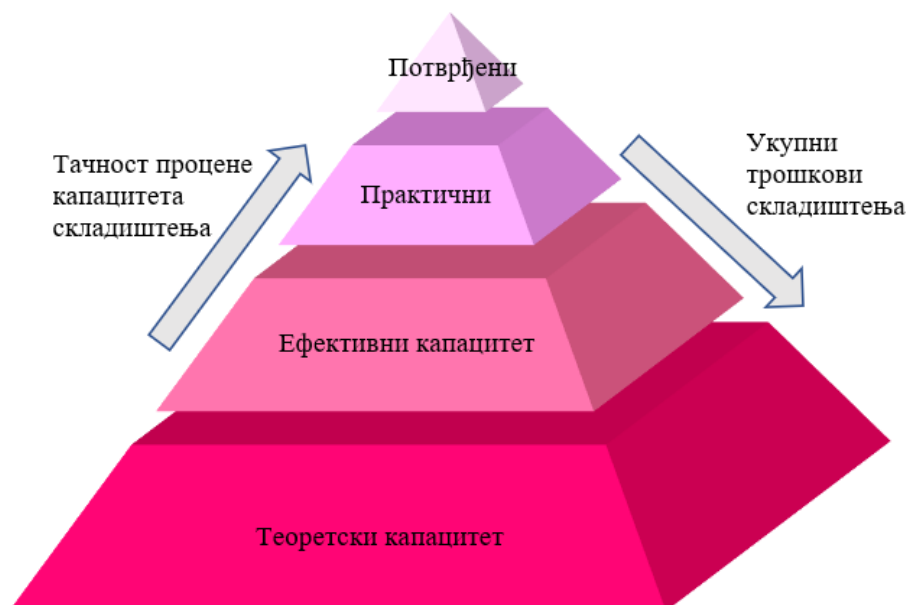
Капацитет складиштења је комплексан параметар и за његову процену, поред геолошких параметара, неопходно је узети у обзир и низ техничких и економских фактора (Tomić et al., 2018). За дефинисање и класификацију капацитета складиштења угљен диоксида, развијене су

две свеобухватне и веома сличне методологије. Прву методологију за процену капацитета складиштења угљен диоксида, 2005. године развила је Радна група Форума за вођење секвестрације угљеника – Carbon Sequestration Leadership Forum Task Force (CSLF, 2007). CSLF представља међународну иницијативу о климатским променама, основану 2003. године, која је усмерена на развој економичних технологија за хватање, транспорт и складиштење угљен диоксида (CSLF, 2003). Двадесет пет држава и Европска унија чланови су Форума за вођење секвестрације угљеника и њихово учешће у укупним антропогеним емисијама CO₂ у свету је око 80%.

Другу методологију стандардизације капацитета складиштења угљен диоксида, независно од прве, развило је Министарство енергетике Сједињених Америчких Држава (United States Department of Energy – U.S.DOE) и она се односи на капацитете складиштења CO₂ у САД и Канади, који су дати у Атласу складиштења угљен диоксида (Goodman et al., 2011; U.S. Department of Energy, 2015). U.S.DOE методологија за процену капацитета општег је карактера и може се применити на складишта широм света.

Такође, постоје још многе методологије за процену капацитета складиштења развијене од разних организација и аутора. Међу најпознатијим су метода коју је развила Међународна агенција за енергетику – Програм истраживања и развој технологија за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009b), као и метода коју су развили аутори Zhao & Liao, 2012.

Класификација капацитета складиштења угљен диоксида представљена је техно-економском пирамидом процене капацитета, коју је дефинисао Форум за вођење секвестрације угљеника (CSLF, 2007). Заснива се на принципу класификације ресурса и резерви минералних сировина (чврсте, течне и гасовите). У оквиру техно-економске пирамиде издваја се неколико типова капацитета (слика 3.8.): теоретски, ефективни, практични и потврђени капацитет. Крећући се од дна до врха техно-економске пирамиде, односно од теоретског до провереног капацитета, потенцијални капацитет складиштења се смањује услед све већег броја фактора од утицаја и ограничења. Услед ефекта одређених фактора и ограничења, процена капацитета постаје све прецизнија.



Слика 3.8. Техно-економска пирамида процене капацитета складиштења (адаптирано из извора: CSLF, 2007)

Теоретски капацитет представља максималну, често нереалну процену капацитета складиштења. Претпоставља се да је целокупна запремина порног простора доступна за утискивање CO₂. Процена теоретског капацитета представља иницијалну анализу капацитета

потенцијалног кандидата за складиштење, када је на располагању ограничен број доступних података. Теоретски капацитет представљен на слици 3.8. обухвата целу пирамиду, што је „груба” процена, јер ће у пракси увек постојати физичка, техничка и економска ограничења која ће онемогућити потпуно искоришћење складиштеног простора (CSLF, 2007; Clarke et al., 2017).

Ефективни капацитет представља подскуп теоретског капацитета и реалнији приступ за процену капацитета, јер се односи на порни простор који може бити обухваћен утиснутим CO₂. Ефективни капацитет узима у обзир низ фактора који утичу на ефикасност складиштења, као што су мобилитет, сила потиска, хетерогеност лежишта, засићење водом и водени уток уколико постоји аквифер (Bachu, 2006; CSLF, 2007; Bachu et al., 2007).

Практични капацитет представља део ефективног капацитета узимањем у обзир техничких, законских, инфраструктурних и економских фактора који утичу на складиштење CO₂ у потенцијалну геолошку формацију (CSLF, 2007). Ова вредност капацитета је у нафтној терминологији једнака геолошким резервама угљоводоника.

Потврђени (усаглашени) капацитет је подскуп практичног капацитета и његова тачност процене капацитета је највећа, јер се добија на основу највећег броја података применом комплексних студија које обухватају прелиминарну мултикритеријумску анализу, лабораторијске анализе, интегрисано лежишно моделирање, као и пилот тест утискивања CO₂ (CSLF, 2007). Вредност провереног капацитета обухвата усаглашавање стационарног извора угљен диоксида са потенцијалном геолошком формацијом која је погодна за складиштење CO₂. Налази се на врху пирамиде и одговара вредности економски придобивих доказаних резерви угљоводоника.

2. Инјективност

Инјективност (I) је способност кретања утиснутог флуида кроз геолошку формацију и дефинише се као однос количине утиснутог флуида (q_{inj}) и разлике притиска на дну бушотине (p_{bh}) и лежишног притиска (p_l), једначина 3.1 (Raza A. et al., 2015; Raza A. et al., 2016b).

$$I = \frac{q_{inj}}{p_{bh} - p_l} \quad (3.1)$$

Инјективност се односи на количину угљен диоксида коју је могуће утиснути кроз инјекциону бушотину, а да не дође до фрактурирања формације. Особине колектора које одређују карактеристике инјективности CO₂ су пропусност и дебљина. Код ниско пропусних лежишта присутна су ограничења кретања CO₂ кроз формацију, што може узроковати значајан пораст притиска и последично нарушавање интегритета заштитних стена (Vishal & Singh, 2016). Задовољавајућа пропусност лежишта подразумева и адекватну инјективност CO₂, а значајна је и са аспекта трошкова, јер је потребан мањи број инјекционих бушотина за постизање жељеног капацитета складиштења (Raza A. et al., 2016b).

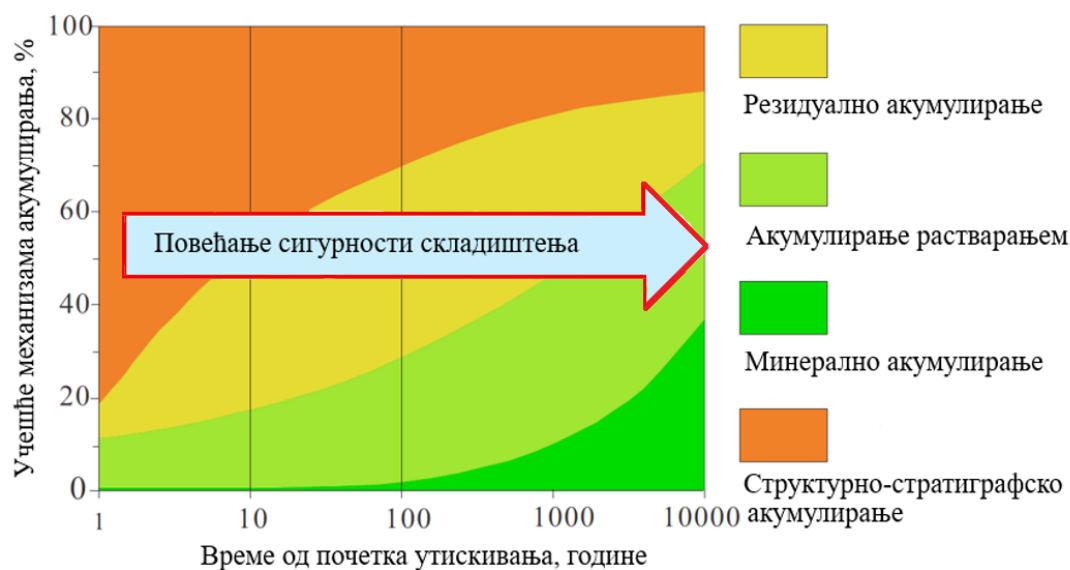
3. Безбедно и дугорочно задржавање угљен диоксида у геолошкој формацији

За успешност реализације процеса складиштења угљен диоксида у геолошке формације неопходно је обезбедити сигурно и дугорочно задржавање утиснутог CO₂. Детаљна прелиминарна анализа геолошких параметара, тј. познавање особина лежишта и флуида неопходно је како би се лежиште окарактерисало на адекватан начин. Такође, није пожељно утискивати CO₂ у басенима са присутним раседима, у близини вулкана, и у сеизмички активним областима. У циљу обезбеђивања сигурности складиштења, максимални притисак утискивања не сме да буде већи од притиска фрактурирања (Kaldi et al., 2013).

У различитим временским периодима, током и након утискивања CO₂ у одабрану геолошку формацију, настаје више механизма акумулирања CO₂ који обезбеђују и повећавају сигурност складиштења услед различитих физичких и хемијских процеса (Ringrose, 2020). Механизми

акумулирања CO_2 обухватају: структурно-стратиграфско акумулирање, резидуално (капиларно) акумулирање, растварање и минерализацију (слика 3.9.). Однос времена настајања и деловања наведених механизма може се представити као (Zhang & Song, 2014):

$$t_{\text{структурно-стратиграфско}} < t_{\text{резидуално}} < t_{\text{растварање}} < t_{\text{минерализација}}$$



Слика 3.9. Механизми акумулирања CO_2 у функцији времена (адаптирано из извора: Wei et al., 2023)

- Структурно-стратиграфско акумулирање

У фази утискивања CO_2 , структурно-стратиграфско акумулирање или хидродинамичко задржавање, представља доминантан механизам складиштења (Ајауи et al., 2019). У случају утискивања суперкритичног CO_2 у гасно лежиште, прво долази до мешања са преосталим гасом у лежишту (Raza A. et al., 2018b). Затим се, услед разлике у густини између слободног CO_2 и лежишне воде (гравитациона сегрегација), CO_2 креће навише кроз порозну и пропусну средину све док не наиђе на непропусну заштитну стену. На овај начин долази до акумулације угљен диоксида унутар лежишта, које је ограничено замком структурног и/или стратиграфског типа (слика 3.10.). Овај механизам акумулирања у исцрпљена лежишта угљоводоника, чија ефикасност зависи од структуре замке, обезбеђује сигурност складиштења са ниским ризицима од миграције CO_2 на површину. Међутим, веома је битно пре почетка утискивања извршити детаљну карактеризацију лежишта, да не би дошло до пробоја кроз заштитне стене или бушотине, као и спровођење мониторинга током и након процеса утискивања због потенцијалне миграције. У акиферима је такође присутан овај тип акумулирања угљен диоксида, при чему се CO_2 креће ка врху структуре веома споро.



Слика 3.10. Структурно-стратиграфски механизам акумулирања угљен диоксида (адаптирано из извора: CO_2 Capture Project, n.d.)

- Резидуално (капиларно) акумулирање

По завршетку утискивања CO_2 , под утицајем капиларних сила почиње његово резидуално, односно капиларно акумулирање, које се карактерише резидуалним засићењем гаса, $S_{gr\text{CO}_2}$ (Lu et al., 2013). Услед капиларног ефекта и дејства међуфазног напона између CO_2 и лежишне воде, нема даљег кретања CO_2 ка врху структуре, с обзиром на то да се угљен диоксид задржава у порама малих димензија (слика 3.11.). Капиларно акумулирање CO_2 , као доминантни механизам након утискивања, одређује даљу миграцију и дистрибуцију CO_2 у лежишту (Zhang & Song, 2014). У поређењу са структурно-стратиграфском акумулацијом, ризик од миграције CO_2 кроз пукотине у заштитним стенама није присутан. Такође, овај механизам утиче на ефикасност других механизма акумулације, односно на повећање растварања CO_2 у води и каснију минералну акумулацију, што је значајно са аспекта дугорочног и безбедног складиштења (Raza A. et al., 2016a).

Ефикасност капиларног акумулирања зависи од дејства капиларног притиска, који је дат једначином 3.2 (Raza A. et al., 2017a; Ringrose, 2020):

$$p_c = \frac{2\sigma_{w,\text{CO}_2} \cdot \cos\theta}{r_{\text{pore}}} [\text{Pa}] \quad (3.2)$$

где су:

r_{pore} – радијус пора $[\text{m}]$;

σ_{w,CO_2} – међуфазни напон између воде и CO_2 $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$;

θ – угао квашења $[\text{°}]$.

Уколико су познате вредности радијуса пора заштитне стене и колектор стене ($r_{\text{cap}}, r_{\text{res}}$), међуфазног напона, угла квашења, као и густине флуида ($\rho_w, \rho_{\text{CO}_2}$), могуће је одредити капиларно подизање CO_2 , односно висину стуба CO_2 у лежишту, h_{CO_2} , помоћу следеће једначине 3.3 (Ringrose, 2020):

$$h_{\text{CO}_2} = \frac{2\sigma_{w,\text{CO}_2} \cos\theta}{g(\rho_w - \rho_{\text{CO}_2})} \left(\frac{1}{r_{\text{cap}}} - \frac{1}{r_{\text{res}}} \right) \quad (3.3)$$



Слика 3.11. Резидуално акумулирање угљен диоксида (адаптирано из извора: *CO₂ Capture Project, n.d.*)

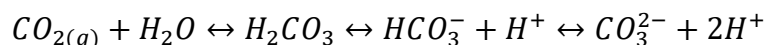
- Акумулирање растварањем CO_2 у лежишној води

Након престанка утискивања угљен диоксида, присутан је механизам акумулирања услед растварања одређене количине CO_2 у слојној води која се налази у порном простору лежишта (слика 3.12.) (*CO₂ Capture Project, n.d.*; IPCC, 2005; Zhang & Song, 2014). При контакту CO_2 и слојне воде, долази до њиховог мешања, тј. растварања CO_2 процесом дифузије и дисперзије.

То је веома спор механизам за који је процењено да може трајати више стотина година, а ефикасност растварања зависи од количине CO₂ и контактне површине између CO₂ и лежишне воде (Bachu et al., 2007).

Основна карактеристика акумулирања растварањем јесте да CO₂ не постоји више као самостална фаза и самим тим је онемогућено његово кретање, што је од значаја за сигурност задржавања CO₂ у подземном складишту (IPCC, 2005; Lu et al., 2013; Ajaoui et al., 2019).

Растварање CO₂ у слојној води представља се хемијском реакцијом:



Слика 3.12. Механизам акумулирања услед растварања угљен диоксида у лежишној води (адаптирано из извора: CO₂ Capture Project, n.d.)

- Минерално акумулирање у замкама

Минерално акумулирање угљен диоксида веома је спор процес и време трајања овог типа акумулације изражава се у геолошким периодима (слика 3.13.). Процес се одвија тако што се CO₂ раствара у лежишној води и на тај начин формира угљену киселину (H₂CO₃). Угљена киселина реагује са минералима стене и/или слојном водом, што проузрокује таложење нових минералних фаза, односно карбонатних минерала (калцита CaCO₃, магнезита MgCO₃, доломита CaMg(CO₃)₂, сидерита FeCO₃...) (Al Mansoori, 2009; Qi R., 2009; Lu et al., 2013; Zhang & Song, 2014; Vishal & Singh, 2016). Минерално акумулирање зависи од типа колектор стене, односно од минералног састава стене и присутних лежишних флуида (Vishal & Singh, 2016). Овај механизам се, у поређењу са осталима, сматра мање значајним с обзиром на дуготрајно формирање чврсте минералне фазе током хемијске реакције CO₂ и минералних фракција.



Слика 3.13. Минерално акумулирање угљен диоксида (адаптирано из извора: CO₂ Capture Project, n.d.)

3.3. Аналитичке методе за одређивање капацитета складиштења угљен диоксида

Расположивост релевантним геолошким подацима и историјатом производње омогућава креирање лежишних (складишних) модела, а самим тим и процену капацитета складиштења угљен диоксида. У случају складиштења CO_2 у исцрпљена лежишта угљоводоника, или при процесу повећања искоришћења нафтних лежишта, потребно је познавање следећих параметара: почетних геолошких резерви, придобивих резерви угљоводоника, термобарских услова, запремине лежишта, порозности, почетног засићења водом, воденог утока, фазног понашања CO_2 , растворљивости CO_2 у води, као и запремине до преливне тачке замке.

Због недовољне истражености аквифера, процена порног простора врши се на основу малог броја доступних података. Поред карактеристика аквифера, као што су површина, укупна моћност и порозност, значајни параметри су салинитет воде и растворљивост CO_2 у води.

За слојеве угља најзначајнији параметри за процену складиштења CO_2 су моћност, пропусност и адсорпциона способност угља, а за процену капацитета у кавернама у соним домама праг фрактурирања, напонска стања стене и величина каверне (Bachu, 2002; Bachu et al., 2007; Hsu et al., 2012; Tomić et al., 2018).

За процену капацитета складиштења примењују се статички и динамички приступ. Статички приступ базира се на примени запреминске методе која обухвата параметре лежишта и флуида који се не мењају с временом, а динамички приступ обухвата примену једначине материјалног баланса, кривих пада производње и нумеричке симулације. Методе динамичког приступа базирају се на историјату производње у функцији притиска и времена и њиховом применом врши се реалнија процена капацитета (Aminu et al., 2017). CSLF и US–DOE методологије користе запремински приступ за израчунавање теоретског капацитета складиштења CO_2 у исцрпљена гасна лежишта. Ефективни капацитет складиштења одређује се на основу вредности теоретског капацитета. Ефективна вредност капацитета узима у обзир коефицијенте који квантификују утицај геолошких и инжењерских података који утичу на ефикасност складиштења. Вредности ових података одређују се емпиријски, или нумеричком симулацијом. Практични и проверени капацитет складиштења узимају у обзир низ фактора који утичу на ефикасност складиштења и могу се одредити нумеричком симулацијом.

3.3.1. Метода процене капацитета складиштења CO_2 према US–DOE

US–DOE методологија примењује запреминску методу за израчунавање капацитета складиштења CO_2 у нафтна и гасна лежишта, аквифере и слојеве угља. Расположиви порни простор за складиштење рачуна се на основу параметара као што су: површина, дебљина формације, порозност и засићење флуидима, фактор волумена формације, густина CO_2 на стандардним условима и коефицијент ефикасности складиштења (Goodman et al., 2011; U.S. Department of Energy, 2015; Vishal & Singh, 2016; Aminu et al., 2017).

- *Нафтна и гасна лежишта*

Основна претпоставка за процену капацитета складиштења CO_2 у нафтна и гасна лежишта запреминском методом јесте да је укупни порни простор који је био испуњен угљоводоничним флуидима доступан за складиштење. Међутим, у пракси није чест случај да је однос запремина порног простора и произведеног флуида једнак. Из тог разлога узима се у обзир коефицијент ефикасности складиштења, односно рачуна се ефективни капацитет, који је мањи од теоретског капацитета.

Капацитет складиштења CO_2 углавном се одређује за услове почетног лежишног притиска, односно максималну вредност притиска при којем неће доћи до пробоја CO_2 (Goodman et al., 2011; U.S. Department of Energy, 2015; Aminu et al., 2017).

Ефективни капацитет складиштења (једначина 3.4) једнак је:

$$M_{CO_2,e} = \rho_{CO_2,s} \cdot A \cdot h_e \cdot \phi_e \cdot B_{gi} \cdot (1 - S_{wi}) \cdot E_{gas/nafta} \quad (3.4)$$

где су:

$M_{CO_2,e}$ – ефективни капацитет складиштења CO_2 [kg];

$\rho_{CO_2,s}$ – густина CO_2 на стандардним условима $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

A – површина лежишта доступна за складиштење CO_2 [m^2];

h_e – ефективна дебљина лежишта [m];

ϕ_e – просечна вредност ефективне порозности [д. ј.];

B_{gi} – почетни фактор волумена формације за гас $\left[\frac{m^3}{m^3}\right]$;

S_{wi} – почетно засићење лежишта водом [д. ј.];

$E_{gas/nafta}$ – коефицијент ефикасности складиштења.

Производ $A \cdot h_e \cdot \phi_e \cdot (1 - S_{wi})$ представља почетне геолошке резерве нафте/гаса на лежишним условима. Густина CO_2 на стандардним условима користи се за конверзију запремине CO_2 у масу која се складишти $\left(\rho = \frac{m}{V}\right)$. Коефицијент ефикасности складиштења, $E_{gas/nafta}$, представља однос запремине угљен диоксида на стандардним условима и почетних геолошких резерви нафте/гаса и израчунава се емпиријским формулама или применом нумеричке симулације (Vishal & Singh, 2016).

- Аквифери:

Ефективни капацитет складиштења аквифера израчунава се помоћу следеће једначине 3.5:

$$M_{CO_2,e} = A \cdot h_{uk} \cdot \phi_{uk} \cdot \rho_{CO_2,le\dot{z}} \cdot E_{akvifer} \quad (3.5)$$

где су:

h_{uk} – укупна дебљина формације [m];

ϕ_{uk} – укупна порозност [д. ј.];

$\rho_{CO_2,le\dot{z}}$ – густина CO_2 на лежишним условима $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$E_{akvifer}$ – коефицијент ефикасности складиштења аквифера.

У једначини 3.5 за одређивање капацитета складиштења аквифера користе се вредности укупне површине, дебљине и порозности. Међутим, за израчунавање ефикасности складиштења морају се узети у обзир фактори који ограничавају расположивост укупне порне запремине за складиштење угљен диоксида. Из тог разлога, узимају се у обзир ефективне вредности површине, дебљине и порозности, тј. ефективне запремине коју је могуће испунити угљен диоксидом. Коефицијент ефикасности складиштења аквифера одређује се помоћу следећег израза (U.S. Department of Energy, 2015; Vishal & Singh, 2016):

$$E_{akvifer} = \left[E_{\left(\frac{A_n}{A_t}\right)} \cdot E_{\left(\frac{h_n}{h_t}\right)} \cdot E_{\left(\frac{\phi_e}{\phi_t}\right)} \right] \cdot E_A \cdot E_V \cdot E_G \cdot E_D \quad (3.6)$$

где су:

$E_{\left(\frac{A_n}{A_t}\right)}$ – однос ефективне и укупне површине аквифера;

$E_{\left(\frac{h_n}{h_t}\right)}$ – однос ефективне и укупне дебљине;

$E_{\left(\frac{\phi_e}{\phi_t}\right)}$ – однос ефективне и укупне порозности;

E_A – коефицијент површинског обухвата аквифера утиснутим угљен диоксидом;

E_V – коефицијент вертикалног обухвата аквифера утиснутим угљен диоксидом;

E_G – утицај разлике у густини и вискозности између CO_2 и лежишне воде;

E_D – коефицијент микроскопског истискивања, тј. део запремине пора претходно засићене водом коју је истиснуо угљен диоксид.

Goodman et al., 2011. у свом раду су дали преглед вредности коефицијента ефикасности складиштења у аквифере, изражене у перцентилима, за три различите литолошке формације, и то за кластичне резервоар стене, доломите и карбонате. Вредности се крећу од 0,4% десетог перцентиала, и то за случај карбоната, до 5,5% деведесетог перцентиала, за случај доломита. Средње вредности ефикасности складиштења (педесети перцентил) су 2% за складиштење угљен диоксида у кластичне стене, 2,2% за доломите и 1,5% за карбонатне стене.

- Слојеви угља

Ефективни капацитет складиштења у слојеве угља израчунава се помоћу једначине 3.7 :

$$M_{\text{CO}_2,e} = A \cdot h_{uk} \cdot c_{s,max} \cdot \rho_{\text{CO}_2,s} \cdot E_{ugalj} \quad (3.7)$$

где су:

$c_{s,max}$ – максимална количина CO_2 која може бити апсорбована по јединици запремине угља на стандардним условима $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}\right]$;

E_{ugalj} – коефицијент ефикасности складиштења угља.

Вредности ефикасности складиштења у слојеве угља према Goodman et al., 2011. утврђене су на основу компјутерског моделовања и производње метана из слојева угља. Вредности изражене у перцентилима (десети, педесети и деведесети перцентил) износе 21%, 37% и 48%.

3.3.2. Приступи процене капацитета складиштења CO_2 у исцрпљена лежишта према CSFL методи

CSFL метода за процену капацитета складиштења угљен диоксида у исцрпљена нафтна и гасна лежишта користи податке историјата производње. Ова метода заснива се на томе да је запремина произведених флуида једнака запремини угљен диоксида која може да се складишти. Ова претпоставка је релевантна у случају када лежиште није у контакту са аквифером, или није вршено утискивање воде као секундарне методе повећања искоришћења. Према CSFL методи, развијена су два приступа за прорачун капацитета складиштења (Bachu et al., 2007; CSLF, 2007; Aminu et al., 2017; Ajayi et al., 2019). Први приступ односи се на одређивање теоретског масеног капацитета складиштења CO_2 на лежишним условима, и одређује се помоћу једначина 3.8 и 3.9:

- гасна лежишта:

$$M_{\text{CO}_2,t} = \rho_{\text{CO}_2,le\check{z}} \cdot I \cdot (1 - F_{ig}) \cdot G \cdot \left(\frac{p_s \cdot z_{le\check{z}} \cdot T_{le\check{z}}}{p_{le\check{z}} \cdot z_s \cdot T_s} \right) \quad (3.8)$$

- нафтна лежишта:

$$M_{\text{CO}_2,t} = \rho_{\text{CO}_2,le\check{z}} \left[\frac{I \cdot N}{B_o} - V_{iw} + V_{pw} \right] \quad (3.9)$$

где су:

$M_{\text{CO}_2,t}$ – теоретски капацитет складиштења CO_2 у лежишним условима $[kg]$;

I – степен искоришћења лежишта;

G – почетне геолошке резерве гаса [m^3];

F_{ig} – запремина инјектираног гаса [m^3] ($F_{ig} = 0$ уколико се не инјектира гас);

$p_s, p_{le\dot{z}}$ – стандардни и лежишни притисак, ($p_s = 1,013 \text{ bar}$);

$T_s, T_{le\dot{z}}$ – стандардна и лежишна температура, ($T_s = 15,5^\circ\text{C} = 288,15 \text{ K}$);

$z_s, z_{le\dot{z}}$ – стандардни и лежишни фактор компресибилитета, ($z_s = 1$);

N – почетне геолошке резерве нафте [m^3];

B_0 – фактор волумена формације за нафту [$\frac{m^3}{m^3}$];

V_{iw} – укупна запремина утиснуте воде у случају утискивања воде [m^3];

V_{pw} – укупна запремина произведене воде (у случају производње воде, тј. присуства аквифера) [m^3].

Други приступ базира се на прорачуну капацитета складиштења у геолошку формацију у зависности од геометрије, односно запремине лежишта (Aminu et al., 2017), једначина 3.10.

$$M_{CO_2,t} = \rho_{CO_2,le\dot{z}} \cdot [A \cdot h_n \cdot \phi_e \cdot I \cdot (1 - S_{wi}) - V_{iw} + V_{pw}] \quad (3.10)$$

Када је лежиште у контакту са аквифером, током производње, услед пада притиска долази до воденог утока, вода заузима део порног простора што утиче на смањење расположивог порног простора за складиштење CO_2 . На ефикасност складиштења, односно на смањење капацитета поред воденог утока, утичу и мобилитет CO_2 , разлика у густини CO_2 и флуида у лежишту, као и хетерогеност лежишта (IPCC, 2005; Bachu et al., 2007; Aminu et al., 2017).

Узимајући у обзир наведене факторе, ефективни капацитет складиштења израчунава се као производ теоретског капацитета и коефицијента капацитета складиштења помоћу следеће једначине (Bachu, 2006; CSLF, 2007):

$$M_{CO_2,e} = E_{gas/nafta} \cdot M_{CO_2,t} \quad (3.11)$$

где је:

$E_{gas/nafta}$ – коефицијент капацитета складиштења, који представља укупни утицај мобилитета (E_m), силе потиска (E_b), хетерогености лежишта (E_h), ефекта засићења водом (E_w) и дејства аквифера (E_a) и приказан је једначином 3.12.

$$E_{gas/nafta} = E_m \cdot E_b \cdot E_h \cdot E_w \cdot E_a \quad (3.12)$$

- Аквифери

Одређивање капацитета складиштења CO_2 у аквиферима коришћењем CSFL методологије обухвата његову процену за различите типове механизма акумулирања.

За одређивање теоретског капацитета складиштења у аквифере са структурно/стратиграфским механизмом користи се једначина запреминске методе као код исцрпљених лежишта угљоводоника, с том разликом да је лежишни флуид вода (Vishal & Singh, 2016; Aminu et al., 2017) (једначина 3.13):

$$M_{CO_2,t} = A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{CO_2} (1 - S_{wr}) \quad (3.13)$$

где је:

$A \cdot h = V_{akvifer}$ – запремина аквифера [m^3];

ϕ – порозност [д. ј.];

S_{wr} – резидуално засићење водом [д. ј.].

За одређивање ефективног капацитета (једначина 3.14), претходна једначина се множи са ефективним коефицијентом капацитета који зависи од хетерогенитета, ефикасности обухвата CO_2 и силе потиска CO_2 :

$$M_{\text{CO}_2,e} = M_{\text{CO}_2,t} \cdot C_c \quad (3.14)$$

где C_c представља коефицијент капацитета.

Коефицијент ефикасности складиштења E , једнак је изразу $(1 - S_{wr}) \cdot C_c$ и његова вредност је у функцији литолошког састава колектор стене. Вредности ефикасности складиштења за десети, педесети и деведесети перцентил за кластичне резервоар стене су 1,86%, 2,7%, 6%, за доломите 2,58%, 3,26%, 5,54% и за карбонате 1,41%, 2,04%, 3,271% (Vishal & Singh, 2016; Aminu et al., 2017).

За одређивање ефективног капацитета складиштења у аквифере са механизмом растварања CO_2 у води потребно је одредити растворљивост CO_2 у води, што се врши нумеричким моделовањем. Развијена је и корелација која омогућава прорачун теоретског капацитета на регионалном нивоу и нивоу басена (једначина 3.15). Одређивање капацитета складиштења на регионалном нивоу обухвата процену на већем подручју, што знатно утиче на прецизност процене капацитета складиштења, јер се користе средње вредности геолошких и петрофизичких параметара. Одређивање капацитета складиштења на нивоу басена представља детаљан ниво процене одређене геолошке формације у циљу квантификовања потенцијала складиштења и захтева детаљно познавање геолошких и петрофизичких параметара.

$$M_{\text{CO}_2,e} = A \cdot h \cdot \phi \cdot (\rho_{ws} X_s^{\text{CO}_2} - \rho_{w0} X_0^{\text{CO}_2}) \cdot C \quad (3.15)$$

Параметар C у једначини 3.15 представља утицај притиска, температуре и салинитета воде на растворљивост и дистрибуцију угљен диоксида у аквиферу. Параметри ρ_{w0} , ρ_{ws} представљају густину лежишне воде на почетном, односно максималном засићењу угљен диоксидом. Параметри $X_0^{\text{CO}_2}$, $X_s^{\text{CO}_2}$ су масена учешћа угљен диоксида у води на почетном и максималном засићењу угљен диоксидом (CSLF, 2007; Vishal & Singh, 2016).

За одређивање теоретског капацитета складиштења у аквифере са механизмом капиларног акумулирања, где резидуално засићење угљен диоксидом $S_{\text{CO}_2,r}$ представља акумулацију CO_2 у порном простору по завршетку утискивања, примењује се једначина 3.16 (Bachu et al., 2007; Vishal & Singh, 2016; Aminu et al., 2017):

$$M_{\text{CO}_2,t} = V_{\text{CO}_2,r} \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot \phi \cdot S_{\text{CO}_2,r} \quad (3.16)$$

где је:

$V_{\text{CO}_2,r}$ – запремина порног простора са резидуалним засићењем угљен диоксидом ($S_{\text{CO}_2,r}$).

- Слојеве угља

Прорачун капацитета складиштења CO_2 у слојеве угља зависи од почетних геолошких резерви и продуктивности лежишта метана. Теоретски капацитет складиштења одређује се применом једначине 3.17 (CSLF, 2007; Aminu et al., 2017; Bachu et al., 2007; Vishal & Singh, 2016):

$$M_{\text{CO}_2,t} = \rho_{\text{CO}_2,s} \cdot A \cdot h \cdot \tilde{n} \cdot G_c \cdot (1 - f_a - f_m) \quad (3.17)$$

где су:

$\tilde{n}$ – густина угља ($\sim 1,4 \text{ t/m}^3$);

f_a, f_m – масени удео пепела и влаге у угљу;

G_c – садржај гаса у угљу, уз претпоставку да је угаљ 100 % засићен угљен диоксидом.

Садржај гаса у угљу, G_c (једначина 3.18), одређује се помоћу Лангмуирове адсорпционе изотерме у зависности од притиска:

$$G_c = V_L \frac{P}{P + P_L} \quad (3.18)$$

где су V_L и P_L Лангмуирова запремина и притисак.

Лангмуирова запремина представља максимални капацитет адсорпције гаса на одређеној температури (Bachu et al., 2007). Основна карактеристика Лангмуирове изотерме је адсорпција максималне количине гаса у једном слоју на површини угља. На капацитет адсорпције утичу параметри као што су: температура, притисак, компонентални састав угља, садржај пепела и влаге у угљу.

3.3.3. Метода процене капацитета складиштења CO₂ у исцрпљена гасна лежишта према IEA–GHG

Ова метода за израчунавање капацитета складиштења развијена је за гасна лежишта и базира се на производним подацима, односно користе се подаци кумулативне производње гаса и преосталих количина гаса у лежишту (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009b; Vishal & Singh, 2016; Aminu et al., 2017). Претпоставља се да се CO₂ може инјектирати до вредности почетног притиска. Теоретски капацитет складиштења рачуна се помоћу једначине 3.19:

$$M_{co_2,t} = G_{puk} \cdot \rho_{co_2,le\dot{z}} \cdot B_g \quad (3.19)$$

где је:

G_{puk} – кумулативна производња гаса на стандардним условима, [m^3].

Множењем претходног израза са коефицијентом ефикасности складиштења гаса може се израчунати ефективни капацитет:

$$M_{co_2,e} = G_{puk} \cdot \rho_{co_2,l} \cdot B_g \cdot E_{gas} \quad (3.20)$$

где је:

E_{gas} – коефицијент ефикасности складиштења у исцрпљена гасна лежишта и претпоставља се да има вредност 75% (IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009b).

4. МЕТОДЕ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ОДЛУЧИВАЊА

Вишекритеријумско одлучивање представља процес доношења одлуке када је присутан велики број алтернатива и више међусобно супротних критеријума (Opricovic & Tzeng, 2004; Zhu et al., 2021; Azhar et al., 2021). Избор критеријума је од кључног значаја за решавање одређеног проблема и представља веома битан корак од којег зависи вредновање алтернатива. Напредак компјутерске технологије довео је до снажног развоја метода вишекритеријумског одлучивања, које су се последњих деценија показале као веома значајан и поуздан алат за решавање реалних сложених проблема (Kacprzak, 2018; Tomić et al., 2021). Методе вишекритеријумског одлучивања применом комплексних математичких операција, побољшавају квалитет и ефикасност доношења одлуке (Mardani et al., 2015; Azhar et al., 2021). Главни задатак метода вишекритеријумског одлучивања је проналажење оптималног (компромисног) решења које најбоље задовољава скуп критеријума чији интереси су често супростављени. Развијено је више метода које се могу поделити у 3 категорије: методе за поређење по паровима (АНР), методе рангирања/методе преференци (PROMETHEE, ELECTRE) и компромисне методе (TOPSIS, VIKOR) (Opricovic & Tzeng, 2004; Wu & Abdul-Nour, 2020; Azhar et al., 2021).

Решавање вишекритеријумских проблема у основи обухвата следеће кораке (слика 4.1.):

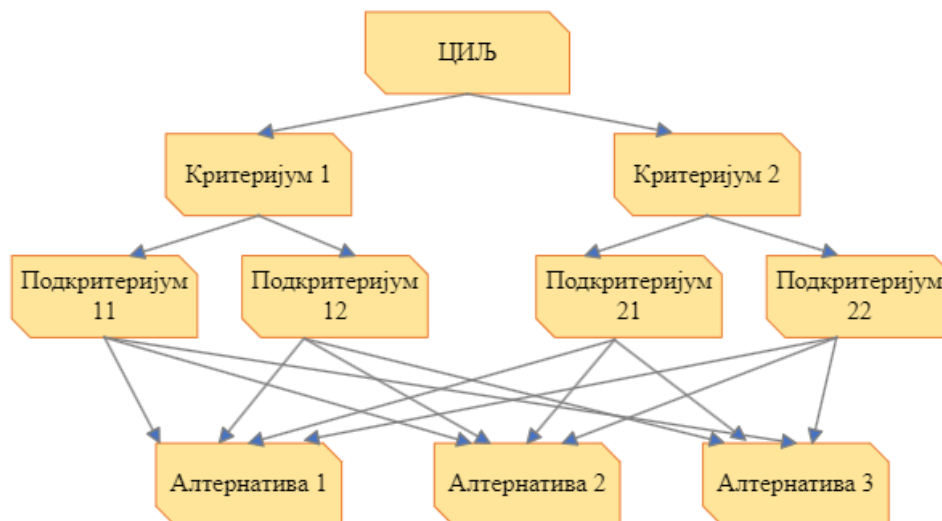
- дефинисање проблема који захтева вишекритеријумску анализу;
- одређивање скупа алтернатива и критеријума;
- формирање почетне матрице одлучивања која се састоји од вредности критеријума за сваку дефинисану алтернативу;
- одређивање тежинских коефицијената критеријума (субјективне/објективне методе) како би се одредио утицај сваког критеријума на коначну одлуку;
- примена одговарајуће вишекритеријумске методе;
- вредновање алтернатива.



Слика 4.1. Схематски приказ поступка решавања вишекритеријумског проблема

4.1. АНР метода

Најпознатија метода за поређење по паровима је АНР (Analytical Hierarchy Process), коју је развио Saaty, 1980. Први корак при решавању сложених виšekритеријумских проблема користећи АНР методу је разлагање комплексних проблема креирањем његове хијерархијске структуре. На врху хијерархије налази се циљ, критеријуми и подкритеријуми су у средини и алтернативе на дну структуре (Görener, 2012; Velmurugan et al., 2011; Aziz et al., 2016; Siekelova et al., 2021) (слика 4.2.). Следећи корак је компаративна анализа елемената на истим нивоима хијерархијске структуре. Доносилац одлуке одређује значај једног елемента (критеријума) у односу на други, тј. у паровима се пореде елементи на свим нивоима хијерархијске структуре. Тежина преференце одређује се коришћењем Сатијеве скале релативне важности која садржи вредности од 1 до 9 (табела 4.1.).



Слика 4.2. Хијерархијска структура проблема

Табела 4.1. Сатијева скала релативних важности (Saaty & Vargas, 2012; Siekelova et al., 2021)

Значај	Дефиниција	Објашњење
1	Идентичан значај	Два елемента су једнако важна у односу на циљ
3	Слаба доминантност	Незнатно фаворизовање једног елемента у односу на други
5	Јака доминантност	Значајно фаворизовање једног елемента у односу на други
7	Демонстративна доминација	У пракси је потврђена доминантност једног елемента
9	Апсолутна доминација	Елемент има доминантност највишег степена у односу на други
2,4,6,8	Међувредности	Потребан је компромис

Резултат поређења елемената даје се у позитивно реципрочној квадратној матрици 4.1 која је дефинисана као:

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

где је:

n – број поређења.

Елемент матрице a_{ij} представља релативну важност поређења i -тог елемента у односу на j -ти елемент. Како би се одржала конзистенција расуђивања вредност елемента $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$. Вредности елемената матрице које се налазе на дијагонали су једнаке 1, јер се пореде исти елементи ($a_{ij} = 1, i = j$) (Aziz et al., 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018).

За услове потпуне конзистентности, матрица A једнака је матрици W (4.2). Релативни тежински коефицијент елемента i дат је као $w(a_{ij}) = \frac{w_i}{w_j}$.

$$W = [w_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Следећи корак је одређивање вектора тежинских коефицијената на свим хијерархијским нивоима. Развијено је више метода како би се из матрице $A = (a_{ij})$ добили вектори $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ (Aziz et al., 2016). Saaty, 1977. је развио методу сопствених вектора и она има најширу примену у пракси. На основу матрице поређења $A = (a_{ij})$ решавањем система линеарних једначина (4.3), одређује се вектор тежина (Bernasconi et al., 2010; Görener, 2012):

$$A \cdot w = n \cdot w \quad (4.3)$$

односно:

$$\begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Да би се обезбедили конзистентност матрице поређења и адекватно поређење, вредност елемента n у једначини 4.3 једнака је максималној сопственој вредности матрице, λ_{max} .

Вектор тежинских коефицијената може се одредити и сумирањем редова матрице поређења и нормализацијом добијених сума (једначина 4.5). Такође, један од начина који се ретко примењује у пракси јесте и нормализација геометријске средине елемената по редовима матрице поређења (Papathanasiou & Ploskas, 2018) (једначина 4.6).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (4.5)$$

$$w_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\prod_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad (4.6)$$

На основу вредности релативних важности одређују се вектори тежинских коефицијената критеријума, који се на крају синтезирају у укупне приоритете алтернатива (Aziz et al., 2016; Allah Bukhsh et al., 2017). Вредности вектора множе се са тежинским коефицијентом који се налази на вишем нивоу хијерархије. Ова процедура се врши све до најнижег хијерархијског нивоа где су алтернативе. На крају се добијају укупни приоритети алтернатива, односно значај сваке алтернативе у односу на задати циљ (Velmurugan et al., 2011).

Последњи корак је провера доследности постављеног модела рачунањем степена конзистентности (CR), чиме се субјективност у процесу доношења одлуке своди на минимум (Azhar et al., 2021). Овај степен представља однос индекса конзистентности и случајног индекса и мора да буде мањи од 10%. Уколико степен конзистентности не задовољава услов $CR < 10\%$ потребно је извршити одговарајуће корекције у поређењима елемената.

Графички приказ АНР методе по корацима дат је на слици 4.3.



Слика 4.3. Схематски приказ алгоритма АНР методе

4.2. PROMETHEE метода

PROMETHEE вишекритеријумска метода одлучивања спада у групу метода преференци. PROMETHEE представља методу организованог рангирања преференци за унапређење евалуације (The Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations) (Papathanasiou & Ploskas, 2018). Развијено је неколико различитих варијанти ове методе у зависности од начина вредновања алтернатива. PROMETHEE I и II користе се за парцијално и потпуно вредновање алтернатива. PROMETHEE III врши рангирање алтернатива на основу интервала, PROMETHEE IV се користи за парцијално и потпуно вредновање алтернатива када постоји непрекидан низ решења, док се PROMETHEE V метода користи за решавање вишекритеријумских проблема када постоје граничне вредности алтернатива (Taherdoost & Madanchian, 2023b).

У тези је приказана PROMETHEE II метода.

Основни принцип рада PROMETHEE II методе јесте међусобно поређење алтернатива у паровима по сваком дефинисаном критеријуму (Brans & De Smet, 2016; Tomić et al., 2019). Како би се извршило вредновање алтернатива, PROMETHEE II метода уводи функције преференце $P(a, b)$ за алтернативе a и b , где сваки критеријум има дефинисану критеријумску функцију (f). Алтернатива a је боља од алтернативе b ако задовољава услов $f(a) > f(b)$ (Оприцовић, 1988). Функција преференце дефинисана је као:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } f(a) \leq f(b) \\ P(f(a) - f(b)), & \text{ако је } f(a) > f(b) \end{cases}$$

Ради поједностављења може се увести замена параметара:

$$d(a, b) = f(a) - f(b)$$

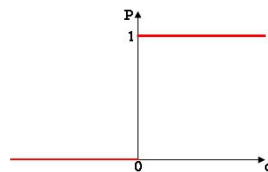
Вредности функције преференце крећу се у опсегу од 0 до 1, $0 \leq P(a, b) \leq 1$. Уколико је вредност функције преференце $P(a, b)$ једнака или приближна нули, то значи да се не преферира алтернатива a у односу на алтернативу b , тј. постоји слаба преференца алтернативе a . Кретањем вредности функције преференце од 0 до 1, расте и значај једне алтернативе у односу на другу. Уколико је $P(a, b) = 1$, алтернатива a у потпуности доминира у односу на алтернативу b (Brans et al., 1986; Brans & De Smet, 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Taherdoost & Madanchian, 2023b).

Постоји неограничен број функција које испуњавају горенаведене услове. За сваки критеријум дефинишу се такозвани генерализовани критеријуми, на основу којих се одређује функција преференце $P(a, b)$ (Brans et al., 1986). Шест најчешће примењиваних типова генерализованих критеријума, који се сматрају сасвим довољним за решавање практичних проблема су

(Оприцовић, 1988; Brans & Mareschal, PROMETHEE Methods, 2005; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Tomić et al., 2019):

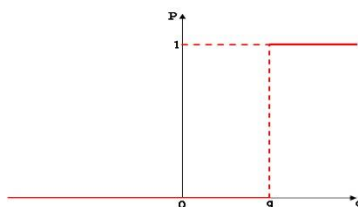
1) Обичан критеријум:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq 0 \\ 1, & \text{ако је } d > 0 \end{cases}$$



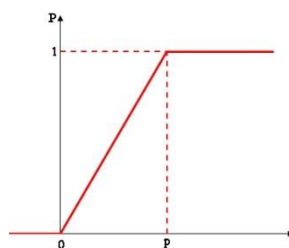
2) Квази критеријум:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq q \\ 1, & \text{ако је } d > q \end{cases}$$



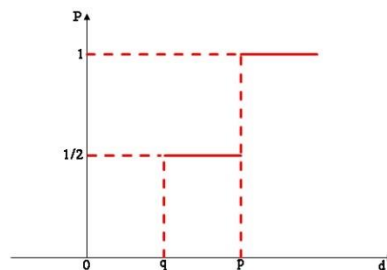
3) Критеријум са линеарном преферентношћу:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & \text{ако је } 0 < d \leq p \\ 1, & \text{ако је } d > p \end{cases}$$



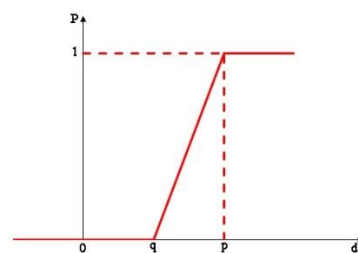
4) Степенасти критеријум:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq q \\ \frac{1}{2}, & \text{ако је } q < d \leq p \\ 1, & \text{ако је } d > p \end{cases}$$



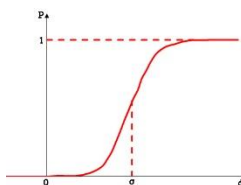
5) Критеријум са линеарном преферентношћу са подручјима индиференције:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & \text{ако је } q < d \leq p \\ 1, & \text{ако је } d > p \end{cases}$$



6) Гаусов критеријум:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, & \text{ако је } d > 0 \end{cases}$$



где је:

q – граница индиферентности;
 p – граница строге преферентности;
 σ – стандардна девијација.

За сваки пар алтернатива одређује се мултикритеријумски индекс преференце (једначине 4.7 и 4.8):

$$\Pi(a, b) = \sum_{i=1}^n P_i(a, b) \cdot w_i \quad (4.7)$$

$$\Pi(b, a) = \sum_{i=1}^n P_i(b, a) \cdot w_i \quad (4.8)$$

где је:

$\Pi(a, b)$ – преференца алтернативе a у односу на алтернативу b ;

$\Pi(b, a)$ – преференца алтернативе b над алтернативом a ;

w_i – тежина i -тог критеријума.

За решавање вишекритеријумских проблема, PROMETHEE II метода уводи токове преференције (Pavan & Todeschini, 2009).

Позитиван (ϕ_j^+) и негативан (ϕ_j^-) ток алтернатива одређује се помоћу једначина 4.9 и 4.10 (Brans & De Smet, 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Taherdoost & Madanchian, 2023b):

$$\phi_j^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x) \quad (4.9)$$

$$\phi_j^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a) \quad (4.10)$$

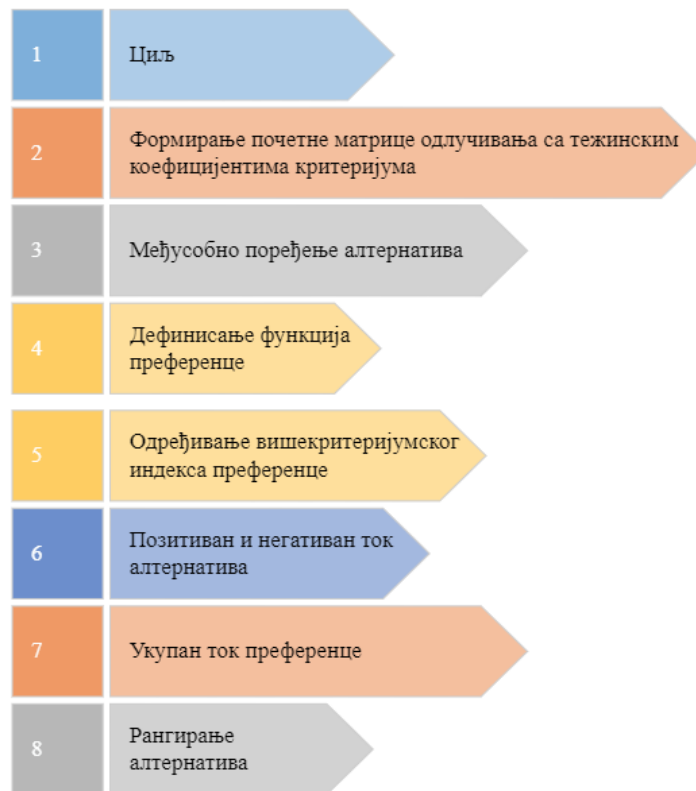
где је A скуп алтернатива, $A = \{1, 2, \dots, m\}$.

Позитиван ток алтернативе представља доминацију алтернативе a над осталим алтернативама. Негативан ток приказује доминацију осталих алтернатива у односу на алтернативу a .

На основу вредности позитивног и негативног тока, одређује се укупан ток преференце (једначина 4.11), на основу којег се врши поредак алтернатива. Што је већи укупан ток алтернативе, то је она боље рангирана.

$$\phi_j(a) = \phi_j^+(a) - \phi_j^-(a) \quad (4.11)$$

Графички приказ PROMETHEE II методе по корацима дат је на слици 4.4.



Слика 4.4. Схематски приказ алгоритма PROMETHEE II методе

4.3. ELECTRE метода

Скуп метода елиминације и изборног приказивања реалности (ELECTRE, акроним на француском: ELimination Et Choix Tradusant la REalite) базира се на решавању вишекритеријумских проблема поређењем алтернатива у паровима за сваки дефинисани критеријум (Alper & Başdar, 2017; Nawir et al., 2017; Taherdoost & Madanchian, 2023a).

Алгоритам решавања вишекритеријумских проблема применом методе ELECTRE обухвата следеће кораке (Supraja & Kousalya, 2016; Alper & Başdar, 2017; Nawir et al., 2017; Taherdoost & Madanchian, 2023a):

1) Дефинисање почетне матрице одлучивања

Први корак је постављање проблема дефинисањем почетне матрице одлучивања. Ова матрица састоји се од m алтернатива, A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) и n критеријума, X_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Матрица има облик $m \times n$, где су x_{ij} елементи матрице, односно вредности j -тог критеријума за i -ту алтернативу (Taherdoost & Madanchian, 2023a).

2) Нормализација почетне матрице одлучивања

- За случај критеријума корисности (једначина 4.12):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (4.12)$$

- За случај критеријума трошкова (једначина 4.13):

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{x_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{x_{ij}}\right)^2}} \quad (4.13)$$

- 3) Рачунање тежински нормализоване матрице одлучивања, v_{ij} (једначина 4.14)

$$v_{ij} = w_{ij} \cdot r_{ij} \quad (4.14)$$

где је w_{ij} – тежински коефицијент j -тог критеријума.

- 4) Одређивање скупова слагања и неслагања

За свако поређење алтернатива p, q ($p, q = 1, 2, \dots, m; p \neq q$) из скупа алтернатива, критеријуми ($j = 1, 2, \dots, n$) су подељени у два скупа. Скуп слагања C_{pq} , представља доминантност алтернативе p у односу на алтернативу q (једначина 4.15). За случај скупа неслагања D_{pq} , не преферира се алтернатива p у односу на алтернативу q (p је инфериорно у односу на q (једначина 4.16) (Supraja & Kousalya, 2016; Nawir et al., 2017; Alper & Başdar, 2017; Fei et al., 2019; Taherdoost & Madanchian, 2023a).

$$C_{pq} = \{j, v_{pj} \geq v_{qj}\} \quad (4.15)$$

$$D_{pq} = \{j, v_{pj} < v_{qj}\} = 1 - C_{pq} \quad (4.16)$$

- 5) Матрице слагања и неслагања

За формирање матрице слагања непходно је дефинисати елементе матрице, тј. индекс слагања (једначина 4.17). Индекс слагања, c_{pq} представља значај једне алтернативе у односу на другу, односно колико је алтернатива p супериорна у односу на алтернативу q . Вредности се крећу у опсегу од 0 до 1 ($c_{pq} \in [0, 1]$) и што је већи индекс слагања то је алтернатива p значајнија од алтернативе q (Fei et al., 2019).

$$c_{pq} = \sum_{j \in C_{pq}} w_j \quad (4.17)$$

Индекс неслагања одређује се помоћу једначине 4.18 и показује инфериорност једне алтернативе у односу на другу. Што су веће вредности индекса неслагања то је алтернатива p инфериорнија у односу на алтернативу q .

$$d_{pq} = \frac{\max_{j \in D_{pq}} |v_{pj} - v_{qj}|}{\max_{j \in J} |v_{pj} - v_{qj}|} \quad (4.18)$$

- 6) Одређивање матрице доминације слагања (F) и неслагања (G)

Елементи матрице доминације слагања f_{pq} , могу имати вредности 0 или 1 (потпуна доминација).

$$f_{pq} = \begin{cases} 1, \text{ ако је } c_{pq} \geq \bar{c} \\ 0, \text{ у супротном} \end{cases}$$

Где је $\bar{c}$ праг слагања и дефинисан је изразом 4.19:

$$\bar{c} = \sum_{p=1}^m \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^m \frac{c_{pq}}{m(m-1)} \quad (4.19)$$

Слично претходном кораку одређују се елементи матрице доминације неслагања, g_{pq} .

$$g_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{ако је } d_{pq} \geq \bar{d} \\ 0, & \text{у супротном} \end{cases}$$

Где је $\bar{d}$ праг неслагања (једначина 4.20);

$$\bar{d} = \sum_{p=1}^m \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^m \frac{d_{pq}}{m(m-1)} \quad (4.20)$$

- 7) На основу матрица доминације слагања (F) и неслагања (G), креира се агрегатна матрица доминације (E), чији се елементи, e_{pq} , одређују користећи израз 4.21:

$$e_{pq} = f_{pq} \cdot g_{pq} \quad (4.21)$$

- 8) Агрегатна матрица доминације даје парцијални поредак алтернатива. Уколико је $e_{pq} = 1$ (за критеријуме слагања и неслагања), тада се алтернатива p преферира у односу на алтернативу q . Међутим, овај услов није довољан и постоји могућност да је друге алтернативе надвладају. Уколико постоји неки од следећих услова, алтернатива p неће бити доминантна (Taherdoost & Madanchian, 2023a):

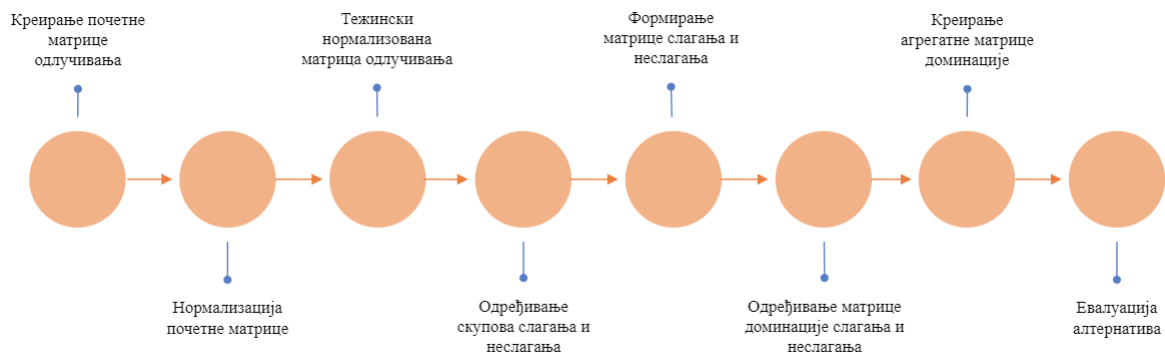
$$\text{алтернатива } p \text{ није доминантна ако: } \begin{cases} e_{pq} = 1, & \text{за бар једно } q \\ e_{pq} = 0, & \text{за свако } i \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$s = 1, 2, \dots, m$$

$$p \neq q, i \neq p, i \neq q$$

На слици 4.5. дат је графички приказ ELECTRE методе по корацима.



Слика 4.5. Схематски приказ алгоритма методе ELECTRE

4.4. VIKOR метода

ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКО КОМПРОМИСНО РАНГИРАЊЕ – VIKOR метода спада у групу компромисних вишекритеријумских метода. Ова метода коју је развио Оприцовић, 1988. примењује се за вишекритеријумску оптимизацију комплексних система.

Компромисно рангирање алтернатива базира се на елементима из компромисног рангирања (Opricovic & Tzeng, 2007; Azhar et al., 2021). Вредновање алтернатива проистиче из L_p – метрике (једначина 4.22), која представља функцију агрегације у компромисном рангирању (Opricovic & Tzeng, 2004; Sayadi et al., 2009). L_p – метрика представља меру удаљености алтернативе од идеалне тачке (Tomić et al., 2021).

$$L_{p,j} = \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{f_j^* - f_j^-} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} ; 1 \leq p \leq \infty, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.22)$$

Где су:

w_j – тежина j -тог критеријума;

f_j^* – најбоља вредност за сваку критеријумску функцију;

f_j^- – најлошија вредност за сваку критеријумску функцију;

f_{ij} – вредност алтернативе за дати критеријум.

Како би се извршило рангирање алтернатива, VIKOR метода полази од граничних вредности. $L_{1,j}$ карактерише песимистичко решење (S_j), док $L_{\infty,j}$ представља очекивано решење (R_j) (Opricovic & Tzeng, 2004; Sayadi et al., 2009; Tomić et al., 2021). Оприцовић, 1988. наводи да параметар p представља баланс између укупне корисности и максималног индивидуалног одступања. Мале вредности балансирајућег параметра, p , стављају акценат на групну корисност, док се повећавањем вредности p даје предност индивидуалним одступањима.

Алгоритам решавања вишекритеријумских комплексних проблема помоћу VIKOR методе обухвата следеће кораке (Оприцовић, 1988; Opricovic & Tzeng, 2004; Opricovic & Tzeng, 2007; Sayadi et al., 2009; Tomić et al., 2019; Tomić et al., 2021):

- 1) Одређивање најбоље f_j^* и најлошије вредности f_j^- за све критеријумске функције, $j = 1, 2, \dots, n$.

Уколико j -та функција представља критеријуме корисности, онда важе следеће релације (једначине 4.23 и 4.24):

$$f_j^* = \max_j f_{ij} \quad (4.23)$$

$$f_j^- = \min_j f_{ij} \quad (4.24)$$

Најбоље и најлошије вредности за случај критеријума трошкова дају се једначинама 4.25 и 4.26:

$$f_j^* = \min_j f_{ij} \quad (4.25)$$

$$f_j^- = \max_j f_{ij} \quad (4.26)$$

- 2) Рачунање песимистичког решења S_j , (једначина 4.27) и очекиваног решења R_j , (једначина 4.28):

$$S_j = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (4.27)$$

$$R_j = \max_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (4.28)$$

3) Израчунавање вредности компромисног решења, Q_j применом једначине 4.29:

$$Q_j = v \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1 - v) \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-} \quad (4.29)$$

где су:

$$S^- = \min_j S_j; S^* = \max_j S_j$$

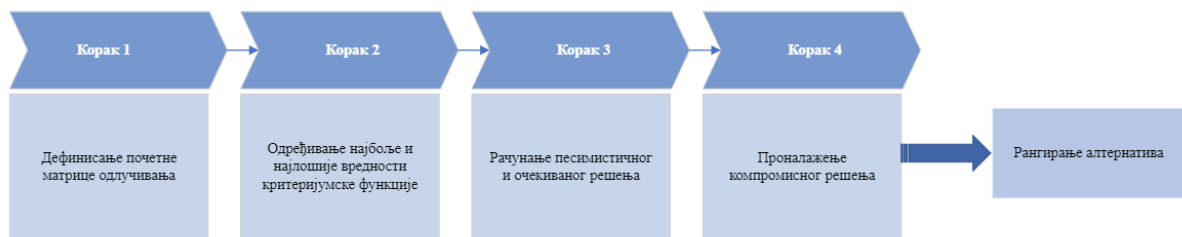
$$R^- = \min_j R_j; R^* = \max_j R_j$$

Параметар v у једначини 4.29 представља тежину стратегије задовољења већине критеријума и може се одредити коришћењем израза 4.30.

$$v = \frac{n + 1}{2n} \quad (4.30)$$

4) Рангирање алтернатива врши се на основу вредности компромисног решења, Q_j . Најбоља алтернатива је она која има најмању вредност Q_j . Алтернатива a_j боља је од алтернативе a_k ако испуњава услов да је $Q_j < Q_k$.

Графички приказ VIKOR методе по корацима дат је на слици 4.6.



Слика 4.6. Схематски приказ алгоритма VIKOR методе

4.5. TOPSIS метода

TOPSIS (Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution) представља једну од метода вишекритеријумског одлучивања коју су развили Hwang and Yoon, 1981. Ова метода омогућава решавање комплексних, вишекритеријумских проблема и за циљ има проналажење најбољег (компромисног) решења (Tzeng & Huang, 2011; Kore et al., 2017; Azhar et al., 2021). Основни принцип примене ове методе, као што и сам њен назив каже „Техника за редослед приоритета према сличности са идеалним решењем”, заснива се на проналажењу најбоље алтернативе из скупа алтернатива на основу геометријске дистанце од позитивно идеалног (A^+) и негативно идеалног решења (A^-). Најбоља алтернатива је она која је у исто време најближа позитивном и најудаљенија од негативно идеалног решења (Krohling & Pacheco, 2015; Dammak et al., 2016; Lakshmi et al., 2016; Kore et al., 2017).

Постоје две основне категорије критеријума и то су критеријуми корисности и трошкова (benefit и cost) (Dammak et al., 2016; Tomić et al., 2021). Позитивно идеално решење максимизује критеријуме корисности, а минимизује критеријуме трошкова, док је код негативно идеалног решења обрнуто (Krohling & Pacheco, 2015; Tomić et al., 2021).

Први корак у решавању проблема је формирање почетне матрице одлучивања (матрица 4.31) $X = (x_{ij})_{m \times n}$, коју чине критеријуми ($C_1, C_2, \dots, C_n$) и алтернативе ($A_1, A_2, \dots, A_m$):

$$X = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

где је x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) нумеричка вредност елемената матрице, односно алтернативе (A_i) у односу на критеријум (C_j).

Алгоритам решавања вишекритеријумских проблема применом TOPSIS методе састоји се од следећих корака (Krohling & Pacheco, 2015; Zhang Y., 2015; Tzeng & Huang, 2011; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Azhar et al., 2021; Tomić et al., 2021):

1) Нормализација почетне матрице одлучивања

Почетна матрица одлучивања састоји се од вредности критеријума, x_{ij} , који углавном имају широк распон вредности и различите мерне јединице. Из тог разлога, како би се омогућило поређење критеријума, неопходно је извршити нормализацију почетне матрице одлучивања, према једначини 4.32, где се вредности критеријума крећу у опсегу 0–1 (Dammak et al., 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Tomić et al., 2021):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4.32)$$

где је r_{ij} нормализована вредност критеријума.

Нормализована матрица састоји се од бездимензионалних вредности критеријума и може се приказати у облику $R = (r_{ij})_{m \times n}$ (матрица 4.33).

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

2) Нормализована тежинска матрица одлучивања

Множењем нормализованих вредности критеријума (r_{ij}) са одговарајућим тежинским коефицијентом (w_j) одређују се тежински нормализоване вредности критеријума (v_{ij}), (једначина 4.34) (Tzeng & Huang, 2011; Dammak et al., 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018). Нормализована тежинска матрица има облик $V = (v_{ij})_{m \times n}$.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (4.34)$$

3) Одређивање позитивно идеалног (A^+) и негативно идеалног решења (A^-)

Позитивно идеално решење (једначина 4.35) обухвата најбољу перформансу алтернативе за сваки дефинисани критеријум, односно максималне вредности у случају критеријума корисности и минималне вредности критеријума трошкова. Негативно идеално решење представља најнеповољније вредности за сваки појединачни критеријум, односно то су минималне вредности критеријума добити и максималне вредности критеријума трошкова (Tzeng & Huang, 2011; Krohling & Pacheco, 2015; Tomić et al., 2021) (једначина 4.36):

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (4.35)$$

где је:

$$v_j^+ = \{(\max_i v_{ij} | j \in K'), (\min_i v_{ij} | j \in K'')\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (4.36)$$

где је:

$$v_j^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in K'), (\max_i v_{ij} | j \in K'')\}$$

где су:

K' – критеријуми добити;

K'' – критеријуми трошкова;

v^+ – удаљеност j -тог критеријума од критеријума корисности;

v^- – удаљеност j -тог критеријума од критеријума трошкова.

4) Удаљености алтернатива од позитивно идеалног и негативно идеалног решења

За сваку алтернативу из скупа алтернатива одређује се удаљеност од позитивно идеалног решења, S_i^+ (једначина 4.37), као и од негативно идеалног решења, S_i^- (Tzeng & Huang, 2011) (једначина 4.38).

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v^+)^2} \quad (4.37)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v^-)^2} \quad (4.38)$$

5) Релативна блискост алтернатива позитивно идеалном решењу

$$c_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (4.39)$$

6) Рангирање алтернатива

Алтернативе се рангирају на основу релативне блискости позитивно идеалном решењу. Најбоље рангирана алтернатива има највећу релативну блискост позитивно идеалном решењу, тј. уколико је $c_j > c_k$, алтернатива a_j боље је рангирана у односу на алтернативу a_k .

Приказ алгоритма решавања вишекритеријумских проблема применом TOPSIS методе по корацима дат је на слици 4.7.



Слика 4.7. Графички приказ TOPSIS методе

4.6. Fuzzy вишекритеријумско одлучивање

Вишекритеријумске методе описане у претходном тексту у дисертацији базирају се на теорији класичних скупова. Припадност скупу реалних бројева $A(x)$ може износити 1 ($x \in A$, припада скупу), односно 0 ($x \notin A$, не припада скупу), $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$ (Hanss, 2005; Gerami Seresht & Robinson Fayek, 2019; Chakraverty et al., 2019).

Fuzzy скуп представља генерализацију класичног скупа. Теорију fuzzy скупа први пут представио је Zadeh, 1965. у свом раду „Fuzzy sets”. Основна идеја теорије fuzzy скупова је да не постоји потреба за прецизношћу, при чему је омогућено моделовање реалних ситуација у којима владају неизвесност, непрецизност и неодређеност.

Приликом решавања вишекритеријумских проблема, у стварном окружењу некада је веома тешко дефинисати вредност критеријума као једнозначан број који треба да опише одговарајући проблем (Gligoric & Gligoric, 2015). У таквим ситуацијама, када је присутна расплнутост улазних података, примењују се fuzzy бројеви, који омогућавају детаљан опис проблема, као и његово успешно решавање (Chen C.-T., 2000; Nădăban et al., 2016; Kasprzak, 2018). Дакле, fuzzy бројеви се користе када неодређеност, непрецизност, расплнутост, недостатак и субјективност података треба уврстити у процес одлучивања (Gerami Seresht & Robinson Fayek, 2019).

Fuzzy број обухвата скуп могућих вредности, односно проширење реалног (једнозначног) броја, где свака могућа вредност скупа има одговарајућу тежину (Anand & Bharatraj, 2017). Ова тежина представља функцију припадности ($\mu_{\tilde{A}}$), и њене вредности се крећу у опсегу између 0 и 1. Уколико fuzzy број представимо као $\tilde{A}$, функција припадности за свако $x \in X$, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ може се представити изразом (Zimmermann, 2001; Chakraverty et al., 2019):

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X, \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]\} \quad (4.40)$$

X – универзални скуп.

За случај дискретног (коначног) скупа, који је дат у облику $\tilde{A} = \{(x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), (x_2, \mu_{\tilde{A}}(x_2)), \dots (x_n, \mu_{\tilde{A}}(x_n))\}$, fuzzy скуп се може представити на следећи начин (Chakraverty et al., 2019):

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_n)}{x_n} \right\} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{x_i} \quad (4.41)$$

Континуални fuzzy скупови могу се приказати као (Chakraverty et al., 2019):

$$\tilde{A} = \int \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} dx \quad (4.42)$$

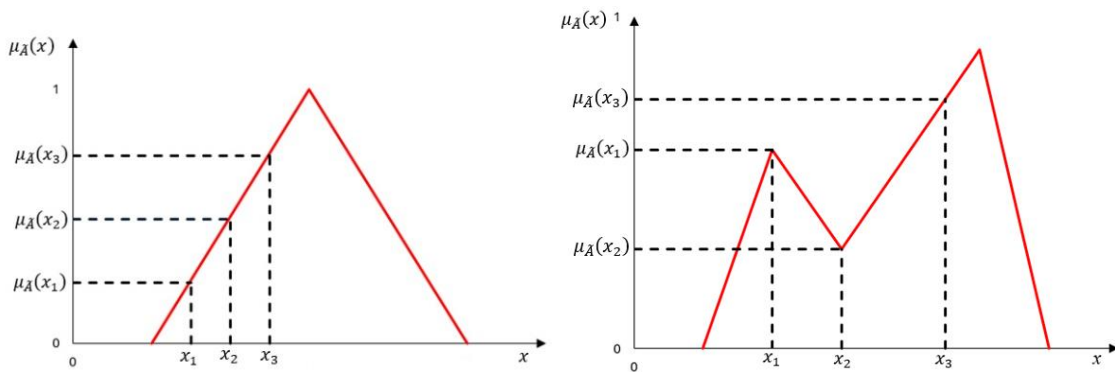
Fuzzy број $\tilde{A}$ је fuzzy скуп који је дефинисан скупом природних бројева $\mathfrak{N}$ и мора да задовољи следеће услове (Lee, 2005; Pavlačka & Talasová, 2007; Pathinathan et al., 2015; Kasprzak, 2018; Chakraverty et al., 2019):

1) Конвексност

Да би fuzzy скуп био конвексан, потребно је да задовољи услов:

$$\mu_{\tilde{A}}(x_2) \geq \min(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_3)); \forall x_1 \leq x_2 \leq x_3 \quad (4.43)$$

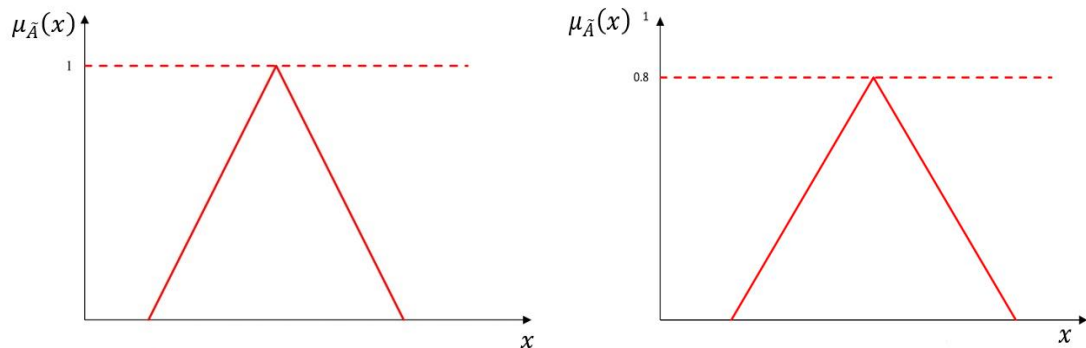
На слици 4.8. дат је приказ конвексног и неконвексног fuzzy скупа.



Слика 4.8. Конвексан (лево) и неконвексан (десно) fuzzy скуп

2) Нормализованост

Fuzzy скуп је нормализован ако испуњава услов да бар једно x има вредност функције припадности 1, $\exists x \in X, \mu_{\tilde{A}}(x) = 1$. У супротном је субнормализован. Приказ нормализованог и субнормализованог fuzzy скупа дат је на слици 4.9.



Слика 4.9. Лево нормализован, десно субнормализован fuzzy скуп

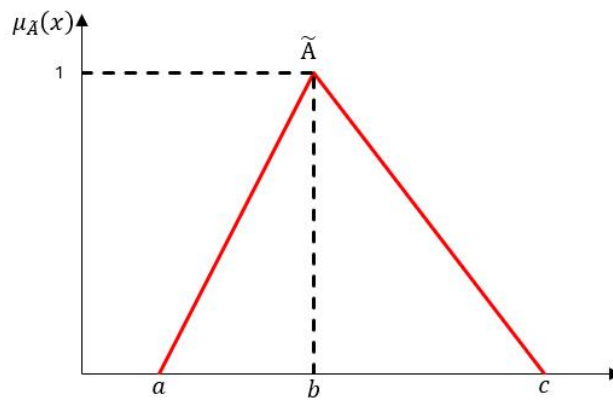
3) Функција припадности континуирана по деловима

Fuzzy скуп који задовољава горе наведене услове конвексности и нормализованости, испуњава и услов да је функција припадности по деловима континуирана.

Постоје различити fuzzy бројеви који зависе од функција припадности. Најчешће примењивани fuzzy бројеви су троугласти и трапезоидни (Buckley & Eslami, 2002; Pathinathan et al., 2015; Lavanya, 2017). Постоји и низ других fuzzy бројева као што су пентагонални, хексагонални, Гаусов fuzzy број итд. (Chakraverty et al., 2019). Chen C.-T., 2000. је први проширио TOPSIS са једнозначним (реалним) бројевима на расплинуте податке. Он је у свом раду користио троугласте fuzzy бројеве.

Троугласти fuzzy број, $\tilde{A}$ (слика 4.10.), дефинише се као $\tilde{A}(a, b, c)$ и његова функција припадности се изражава на следећи начин (Lee, 2005; Akyar et al., 2012; Nagoor Gani & Mohamed Assarudeen, 2012; Ali et al., 2016; Anand & Bharatraj, 2017; Kore et al., 2017; Zhao & Liu, 2018):

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (4.44)$$



Слика 4.10. Троугласти fuzzy број $\tilde{A}(a, b, c)$

где је:

a – најмања могућа (гранична) вредност fuzzy скупа;

b – средња вредност, односно вредност која највише обећава;

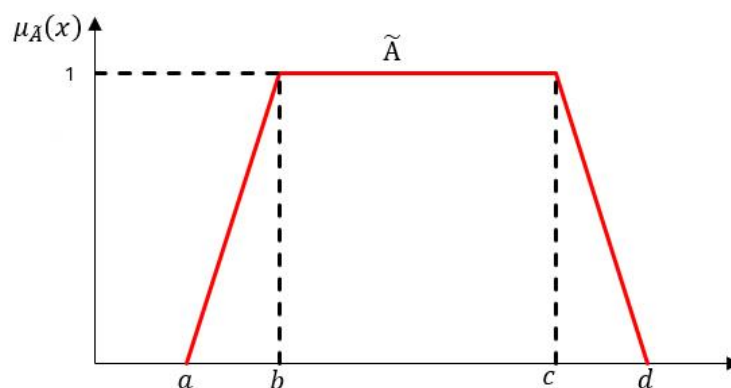
c – највећа могућа (гранична) вредност fuzzy скупа.

Троугласти fuzzy број задовољава следеће услове:

- $a \leq b \leq c$;
- функција припадности у интервалу $[a, b]$ има тренд раста;
- функција припадности у интервалу $[b, c]$ има тренд пада.

Трапезоидни fuzzy број $\tilde{A}$ (слика 4.11.), дефинише се као $\tilde{A}(a, b, c, d)$ и његова функција припадности изражава се на следећи начин (Pathinathan et al., 2015):

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (4.45)$$



Слика 4.11. Трапезоидни fuzzy број $\tilde{A}(a, b, c, d)$

- Основне рачунске операције над троугластим fuzzy бројевима

За два троугласта fuzzy броја, $\tilde{M}(a_1, b_1, c_1)$ и $\tilde{N}(a_2, b_2, c_2)$, основне аритметичке операције изражавају се на следећи начин (Giachetti & Young, 1997; Cheng C.-B., 2004; Lee, 2005; Gao et al., 2009; Kumar & Kaur, 2010; Nagoor Gani & Mohamed Assarudeen, 2012; Zhang et al., 2014; Kavitha & Frank gladson, 2018; Sudha & Jayalalitha, 2020):

- сабирање:

$$\tilde{M} + \tilde{N} = (a_1, b_1, c_1) + (a_2, b_2, c_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2)$$

- одузимање:

$$\tilde{M} - \tilde{N} = (a_1, b_1, c_1) - (a_2, b_2, c_2) = (a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2)$$

- множење:

$$\tilde{M} \cdot \tilde{N} = [\min(a_1 \cdot a_2, a_1 \cdot c_2, c_1 \cdot a_2, c_1 \cdot c_2), b_1 \cdot b_2, \max(a_1 \cdot a_2, a_1 \cdot c_2, c_1 \cdot a_2, c_1 \cdot c_2)] \\ = (a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2)$$

- дељење:

$$\frac{\tilde{M}}{\tilde{N}} = \left[\min\left(\frac{a_1}{a_2}, \frac{a_1}{c_2}, \frac{c_1}{a_2}, \frac{c_1}{c_2}\right), \frac{b_1}{b_2}, \max\left(\frac{a_1}{a_2}, \frac{a_1}{c_2}, \frac{c_1}{a_2}, \frac{c_1}{c_2}\right) \right] = \left(\frac{a_1}{c_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{c_1}{a_2}\right)$$

- инверзија:

$$\frac{1}{\tilde{M}} = \frac{1}{(a_1, b_1, c_1)} = \left(\frac{1}{c_1}, \frac{1}{b_1}, \frac{1}{a_1}\right)$$

- минимум:

$$\min(\tilde{M}, \tilde{N}) = (\min(a_1, a_2), \min(b_1, b_2), \min(c_1, c_2))$$

- максимум:

$$\max(\tilde{M}, \tilde{N}) = (\max(a_1, a_2), \max(b_1, b_2), \max(c_1, c_2))$$

- множење троугластог fuzzy броја скаларом, k:

$$k \cdot \tilde{M} = (k \cdot a_1, k \cdot b_1, k \cdot c_1), k \geq 0$$

$$k \cdot \tilde{M} = (k \cdot c_1, k \cdot b_1, k \cdot a_1), k < 0$$

- растојање (Euclidean Distance):

$$d(\tilde{M}, \tilde{N}) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]}$$

- дефазификација троугластог fuzzy броја, $\tilde{M}(a_1, b_1, c_1)$:

$$M = \frac{1}{3} \cdot (a_1 + b_1 + c_1)$$

- функција рангирања:

$$\Re(\tilde{M}) = \Re(a_1, b_1, c_1) = \frac{1}{4} \cdot (a_1 + 2b_1 + c_1)$$

4.6.1. Fuzzy TOPSIS

Имплементацијом fuzzy логики у вишекритеријумске методе одлучивања, TOPSIS метода је проширена на расплинато окружење – fuzzy TOPSIS. На овај начин елиминише се субјективност и повећавају ефикасност и прецизност приликом решавања комплексних проблема. У наставку дисертације дат је алгоритам решавања вишекритеријумских проблема применом fuzzy TOPSIS-а, где су вредности критеријума и тежинских коефицијената приказани у форми троугластих fuzzy бројева (Şevkli et al., 2010; Kore et al., 2017; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Ansari et al., 2020).

1) Конструисање fuzzy почетне и нормализоване матрице одлучивања

Fuzzy почетну матрицу одлучивања $\tilde{X} = (\tilde{x}_{ij})_{m \times n}$ (матрица 4.46), чине критеријуми $(C_1, C_2, \dots, C_n)$ и алтернативе $(A_1, A_2, \dots, A_m)$ (Tzeng & Huang, 2011; Krohling & Pacheco, 2015; Gligoric & Gligoric, 2015; Zhang Y., 2015; Dammak et al., 2016; Lakshmi et al., 2016):

$$\tilde{X}|\tilde{x}_{ij}| = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

где $\tilde{x}_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ представља вредност алтернативе (A_i) у односу на критеријум (C_j) и приказана је као троугласти fuzzy број $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$.

Како би се омогућило адекватно поређење критеријума, врши се нормализација почетне fuzzy матрице одлучивања, према једначини 4.47 (Hosseinzadeh Lotfi & Fallahnejad, 2010; Dammak et al., 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018):

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\max\{\sum_{i=1}^m a_{ij}, \sum_{i=1}^m b_{ij}, \sum_{i=1}^m c_{ij}\}} = \frac{(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})}{\sum_{i=1}^m c_{ij}} = (d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}) \quad (4.47)$$

где је $\tilde{r}_{ij}$ нормализована fuzzy вредност критеријума.

Нормализована fuzzy матрица састоји се од бездимензионалних вредности критеријума и може се приказати у облику $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{m \times n}$ (матрица 4.48):

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1m} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \dots & \tilde{r}_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

2) Израчунавање тежинских коефицијената критеријума

Тежински коефицијенти, $\tilde{w}_j$ представљају значај сваког критеријума и имају веома битну улогу у процесу доношења одлуке, тј. на коначан резултат који се односи на рангирање алтернатива (Li et al., 2011; Zavadskas & Podvezko, 2016; Tomić et al., 2021). Тежинске коефицијенте је могуће одредити субјективно и објективно. Код субјективних метода, доносилац одлуке даје тежину сваком критеријуму на основу свог знања и искуства, док се објективне методе заснивају на математичким методама (Tomić et al., 2021). Како би се избегла субјективност у процесу доношења одлуке, у дисертацији ће се користити Шенонова ентропија за одређивање тежинских коефицијената. У теорији информација, ентропија представља меру неуређености, односно неизвесности улазних података (Zavadskas & Podvezko, 2016). Вредност ентропије расте са повећањем неуређености система, док уређени, хомогени системи немају значајан утицај на процес доношења одлуке, јер су вредности ентропије приближни нули (Zavadskas & Podvezko, 2016).

Користећи нормализоване вредности добијене у претходном кораку, може се израчунати степен ентропије, $\tilde{E}_j$ (Hosseinzadeh Lotfi & Fallahnejad, 2010; Zhang Y., 2015), применом једначине 4.49:

$$\tilde{E}_j = -k \cdot \sum_{i=1}^m \tilde{r}_{ij} \cdot \ln \tilde{r}_{ij} \quad (4.49)$$

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (4.50)$$

где су:

k – коефицијент који обезбеђује услов $0 \leq \tilde{E}_j \leq 1$;

m – број алтернатива.

С обзиром на то да применом функције $\tilde{r}_{ij} \cdot \ln \tilde{r}_{ij}$ може доћи до промене редоследа граничних вредности троугластог fuzzy броја, доња и горња гранична вредност fuzzy ентропије одређују се једначинама 4.51 и 4.52, док се средња вредност добија помоћу једначине 4.49 на основу средње вредности fuzzy броја (Hosseinzadeh Lotfi & Fallahnejad, 2010).

$$\tilde{E}_{jL} = -k \cdot \sum_{i=1}^m \min(d_{ij} \cdot \ln d_{ij}; e_{ij} \cdot \ln e_{ij}; f_{ij} \cdot \ln f_{ij}) \quad (4.51)$$

$$\tilde{E}_{jU} = -k \cdot \sum_{i=1}^m \max(d_{ij} \cdot \ln d_{ij}; e_{ij} \cdot \ln e_{ij}; f_{ij} \cdot \ln f_{ij}) \quad (4.52)$$

Степен варијације, $\tilde{d}_j$, за сваки критеријум одређује се као:

$$\tilde{d}_j = 1 - \tilde{E}_j \quad (4.53)$$

Крајњи израз за одређивање тежине критеријума дат је једначином 4.54:

$$\tilde{w}_j = \frac{\tilde{d}_j}{\sum_{j=1}^n \tilde{d}_j} = [w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}] \quad (4.54)$$

3) Нормализована тежинска матрица одлучивања

Нормализована тежинска матрица има облик $\tilde{V} = (\tilde{v}_{ij})_{m \times n}$ (матрица 4.56) и одређује се множењем нормализованих вредности критеријума ($\tilde{r}_{ij}$) добијених једначином 4.47 са одговарајућим тежинским коефицијентом ($\tilde{w}_j$) израчунатих једначином 4.54 (Fu, 2008; Tzeng & Huang, 2011; Dammak et al., 2016; Papathanasiou & Ploskas, 2018; Zulqarnain et al., 2020; Arora & Naithani, 2023).

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{w}_j \tilde{r}_{ij} = (w_{j1} \tilde{r}_{1j}, w_{j2} \tilde{r}_{2j}, w_{j3} \tilde{r}_{3j}) \quad (4.55)$$

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \cdot \tilde{r}_{11} & \tilde{w}_2 \cdot \tilde{r}_{12} & \cdots & \tilde{w}_n \cdot \tilde{r}_{1m} \\ \tilde{w}_1 \cdot \tilde{r}_{21} & \tilde{w}_2 \cdot \tilde{r}_{22} & \cdots & \tilde{w}_n \cdot \tilde{r}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{w}_1 \cdot \tilde{r}_{n1} & \tilde{w}_2 \cdot \tilde{r}_{n2} & \cdots & \tilde{w}_n \cdot \tilde{r}_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

4) Одређивање fuzzy позитивно идеалног ($\tilde{A}^+$) и fuzzy негативно идеалног решења ($\tilde{A}^-$)

Најбоља перформанса алтернативе за сваки дефинисани критеријум представља fuzzy позитивно идеално решење, $\tilde{A}^+$ (једначина 4.57). Најнеповољније вредности за сваки појединачни критеријум израчунавају се применом једначине 4.58 и то је fuzzy негативно идеално решење, $\tilde{A}^-$ (Tzeng & Huang, 2011; Krohling & Pacheco, 2015; Papathanasiou & Ploskas, 2018).

$$\tilde{A}^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+\} \quad (4.57)$$

где је:

$$\tilde{v}_j^+ = \{(\max_i \tilde{v}_{ij} | j \in K'), (\min_i \tilde{v}_{ij} | j \in K'')\}$$

$$\tilde{A}^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} \quad (4.58)$$

где је:

$$\tilde{v}_j^- = \{(\min_i \tilde{v}_{ij} | j \in K'), (\max_i \tilde{v}_{ij} | j \in K'')\}$$

5) Удаљености алтернатива од fuzzy позитивно идеалног и fuzzy негативно идеалног решења

За сваку алтернативу из скупа алтернатива одређује се дистанца, односно удаљеност од fuzzy позитивно идеалног решења, $\tilde{S}_i^+$ (једначина 4.59), као и од fuzzy негативно идеалног решења, $\tilde{S}_i^-$ (Tzeng & Huang, 2011; Huang, 2011) (једначина 4.60).

$$\tilde{S}_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\tilde{v}_{ij} - \tilde{v}^+)^2} \quad (4.59)$$

$$\tilde{S}_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\tilde{v}_{ij} - \tilde{v}^-)^2} \quad (4.60)$$

6) Релативна блискост алтернатива fuzzy позитивно идеалном решењу

На основу вредности удаљености алтернатива од fuzzy позитивно идеалног и fuzzy негативно идеалног решења добијених у претходном кораку, може се одредити релативна блискост fuzzy позитивном идеалном решењу користећи једначину 4.61.

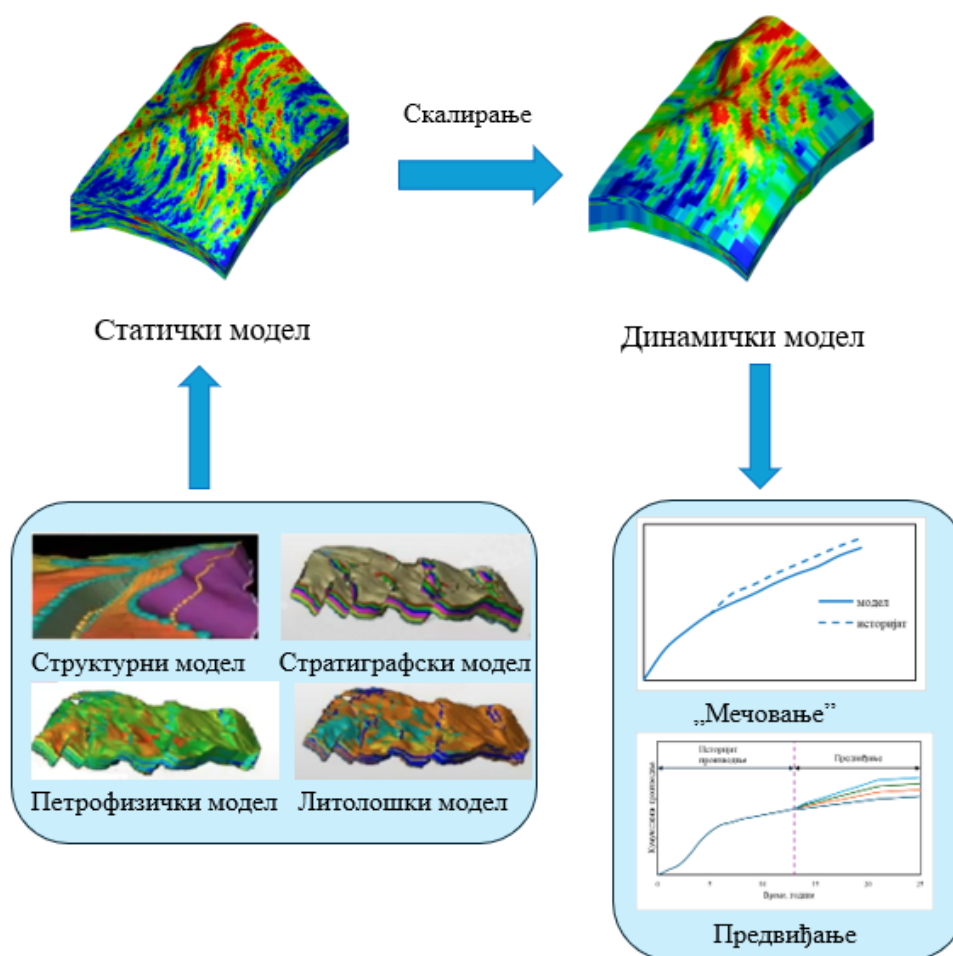
$$\tilde{c}_i = \frac{\tilde{S}_i^-}{\tilde{S}_i^- + \tilde{S}_i^+} \quad (4.61)$$

7) Рангирање алтернатива

Вредновање алтернатива врши се на основу релативне блискости fuzzy позитивно идеалном решењу добијених у претходном кораку. Најбоље рангирана алтернатива је најближа fuzzy позитивно идеалном решењу, тј. има највећу релативну блискост fuzzy позитивно идеалном решењу. Уколико је $\tilde{c}_j > \tilde{c}_k$, алтернатива a_j је боље рангирана у односу на алтернативу a_k (Chen C.-T., 2000; Papathanasiou & Ploskas, 2018).

5. НУМЕРИЧКА СИМУЛАЦИЈА

Нумеричка симулација представља најсофистициранији алат за анализу и предвиђање понашања флуида у лежишту током времена (Fanchi, 2018; Khalili & Ahmadi, 2023). Базира се на примени закона физике, математике и програмирања у области разрадног инжењерства (Islam et al., 2016). Основни концепт рада лежишне симулације је креирање модела чије ће понашање одговарати реалном понашању лежишта. Нумеричка лежишна симулација има кључну улогу у области разрадног инжењерства с обзиром на то да резултати њене примене одређују избор оптималне стратегије производње, као и развој плана управљања лежиштем (Islam et al., 2016; Khalili & Ahmadi, 2023). Избор одговарајуће стратегије разраде и експлоатације минимизира пратеће ризике и знатно утиче на смањење капиталних трошкова (Chen Z., 2007). У суштини, симулација представља интеракцију између података и доношења одлука у циљу оптимизације процеса током експлоатационог века лежишта (Fanchi, 2018). Лежишни симулациони модел формира се интегрисањем геолошког статичког модела и динамичког разрадно-производног модела. На слици 5.1. дат је приказ интегрисаног лежишног симулационог модела.



Слика 5.1. Интегрисани лежишни симулациони модел

Процес симулације састоји се од карактеризације лежишта, адаптације („мечовања“) историјата добијеног у моделу са реалним производним подацима и предвиђања будућег понашања лежишта на различитим условима (Islam et al., 2016).

5.1. Типови лежишних модела

Лежишни модели класификују се у зависности од броја мобилних фаза, геометрије протока флуида, начина одређивања фазног притиска и засићења, као и типа процеса који се одвија у лежишту.

Према геометрији протока, лежишни симулатори деле се на једнодимензионалне (1D), дводимензионалне (2D), тродимензионалне (3D) и радијалне моделе. Код једнодимензионалног (хоризонтаног) модела проток се одвија у једном смеру и не узима у обзир утицај гравитационих сила (Fanchi, 2018). Дводимензионални модел користи се за симулацију протока у x - y правцу („површински модел”) и у x - z правцу („модел попречног пресека”) (Satter & Iqbal, 2016). Тродимензионални модел дефинише проток у сва три правца (x - y - z) и има најчешћу примену у лежишној симулацији, јер је на тај начин омогућено прецизно дефинисање протока флуида (Satter & Iqbal, 2016). Радијални модел може бити дводимензионални и тродимензионални и користи се када постоје брзе промене притисака и засићења у близини бушотине (Fanchi, 2018).

Лежишни симулациони модел може се груписати на основу броја мобилних фаза (нафта, гас и вода) које су заступљене у моделу (Satter & Iqbal, 2016). Једнофазни симулациони модел карактерише присуство једне фазе и то нафте (изнад притиска засићења у присуству везане воде) или гаса (изнад тачке кондензације у присуству везане воде). Двофазни модел описује присуство две фазе у еквилибријуму и то нафте и воде, гаса и воде, или нафте и гаса. Присуство нафте, гаса и воде карактерише трофазни симулациони модел.

У зависности од приступа решавања парцијалних диференцијалних једначина, односно одређивања фазног притиска и засићења, лежишни симулатори могу се поделити на симулаторе који користе методу имплицитног притиска и експлицитног засићења (Implicit pressure explicit saturation – IMPES), потпуно имплицитну методу (Fully Implicit – FI) и адаптивно имплицитну методу (Adaptive Implicit Method – AIM) (Marcondes et al., 2009). У лежишној симулацији најчешће се примењује IMPES метода и, као што њен сам назив каже, притисак се одређује имплицитно, а засићења експлицитно. Решавањем система линеарних једначина, IMPES метода прво одређује вредност притиска у датом временском кораку (t_n) узимајући у обзир засићење у претходном временском кораку (t_{n-1}) и на основу израчунате вредности притиска израчунава се засићење у датом кораку (t_n). Ова метода даје прилично поуздане резултате када не долази до знатних промена засићења у кратким временским интервалима (Satter & Iqbal, 2016). Потпуно имплицитна метода (FI) истовремено одређује вредности фазног притиска и засићења у свакој тачки, што је комплексније и захтева више времена, али се на тај начин добијају адекватнија решења (Satter & Iqbal, 2016). Адаптивно имплицитна метода (AIM) представља комбинацију претходне две методе (Marcondes et al., 2009).

Према врсти процеса који се одвија у лежишту, симулациони модели могу се сврстати у: „black oil”, композитне, термичке, хемијске и моделе двојне порозности. Код „black oil” симулатора, нафта, гас и вода посматрају се као засебне компоненте и њихов састав се не мења, тј. нема интеракције између флуида (Klins, 1977; Islam et al., 2016). Овај тип модела има широку примену у нафтној и гасној индустрији као што су симулација примарних и секундарних метода искоришћења лежишта и код процеса утискивања гасова у случају немешања (Satter & Iqbal, 2016; Druetta et al., 2016). Уколико се компонентни састав мења током времена, композитни симулатор користи се за анализу протока флуида кроз порозну средину, где се свака промена притиска, температуре и компонентног састава одређује коришћењем одговарајућих једначина стања. Примена овог типа модела користи се за симулацију понашања лако испарљивих нафти и гасокондензатних лежишта, јер састав нафтне и гасне зоне услед пада лежишног притиска испод притиска засићења и притиска росе значајно варира (Coats K., 1982; Satter & Iqbal, 2016). Такође, композитни симулациони модел примењује се приликом утискивања гаса у лежиште у циљу вапоризације лакших нафтних фракција или остваривања услова мешања за мобилизацију нафте, као и утискивања CO_2 у лежиште у циљу остваривања услова мешања (Coats K., 1982). Термички модели узимају у обзир утицај температуре на понашање флуида и динамику протока. Основни задатак овог модела је анализа утицаја топлоте на вискозност нафте, лежишни притисак и на повећање степена искоришћења лежишта (Satter & Iqbal, 2016). Термички модел користи се за симулацију два процеса

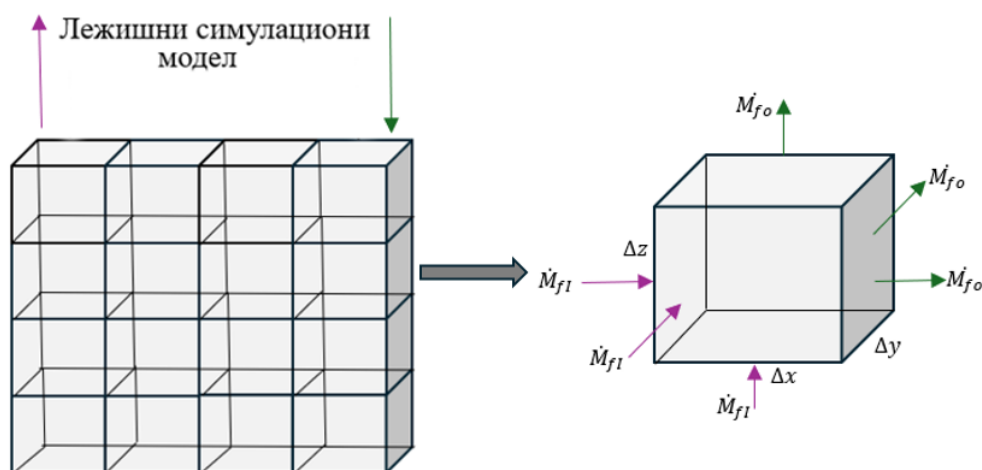
повећања искоришћења и то: утискивање водене паре и унутарслојно сагоревање (Coats K., 1982). Хемијски симулациони модели рачунају проток флуида и транспорт масе услед дисперзије, адсорпције и фазног понашања. Овај тип модела користи се код хемијских метода повећања искоришћења нафтних лежишта и симулира утискивање хемијских агенаса као што су полимери, сурфактанти и алкални раствори (Coats K., 1982; Satter & Iqbal, 2016). Код природно фрактурираних лежишта, за симулацију понашања лежишта користи се модел двојне порозности.

5.2. Основни концепт математичког моделирања лежишта нафте и гаса

Динамика протока флуида кроз порну средину математички се описује у складу са физичким законима: законом о одржању масе (једначина континуитета), законом о протоку флуида (Дарсијев закон) и једначинама стања (PVT односи флуида) (Satter & Iqbal, 2016). У суштини, симулациони модел представљен је сетом парцијалних диференцијалних једначина које захтевају нумеричко решавање, а обухватају једначине материјалног баланса које карактеришу сваку фазу, као и једначине протока флуида дефинисане Дарсијевим законом.

5.2.1. Закон о одржању масе

Према принципу материјалног баланса тј. закона о одржању масе флуида, маса флуида која се акумулира у елементу запремине лежишта једнака је маси флуида која улази у елемент минус маса флуида која излази из елемента, слика 5.2. (Satter & Iqbal, 2016; Abou-Kassem et al., 2020).



Слика 5.2. Закон о одржању масе у лежишном систему

Закон о одржању масе математички се може изразити једначином 5.1:

$$\frac{\partial M_f}{\partial t} = \dot{M}_{fi} - \dot{M}_{fo} \quad (5.1)$$

где су:

M_f – акумулирана маса флуида, [kg];

$\dot{M}_{fi}$ – маса флуида која улази у елемент, [kg];

$\dot{M}_{fo}$ – маса флуида која излази из елемента, [kg].

Маса флуида, у овом случају нафте, може се изразити у функцији густине, засићења, фактора волумена формације, као и протока флуида (једначине 5.2 – 5.4). За остале флуиде могу се извести једначине на сличан начин (Satter & Iqbal, 2016):

$$M_o = \frac{\rho_{os} \cdot A \cdot \Delta x \cdot \phi \cdot S_o}{B_o} \quad (5.2)$$

$$\dot{M}_{oI} = \rho_{os} \cdot \left(\frac{q_o}{B_o} \right)_x \quad (5.3)$$

$$\dot{M}_{oo} = \rho_{os} \cdot \left(\frac{q_o}{B_o} \right)_{x+\Delta x} \quad (5.4)$$

где су:

ρ_{os} – густина нафте на стандардним условима, $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;

A – површина попречног пресека елемента, $[m^2]$;

Δx – дужина елемента, $[m]$;

ϕ – порозност, $[d.j.]$;

S_o – засићење нафтом, $[d.j.]$;

B_o – фактор волумена формације за нафту, $\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$;

q_o – количина протока нафте, $\left[\frac{m^3}{s} \right]$.

5.2.2. Дарсијев закон

Према Дарсијевом закону, количина флуида q која протиче кроз порозну средину, површине попречног пресека A , зависи од пропусности k , вискозности флуида μ , градијента притиска $\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ и нагиба/ гравитационе силе (Peaceman, 1977; Coats K., 1980; Chen Z., 2007; Satter & Iqbal, 2016).

За једнофазни проток флуида, количина протока (q) изражава се једначином 5.5 (Coats K., 1980; Ewing, 1983; Chen Z., 2007; Satter & Iqbal, 2016):

$$q = - \frac{k \cdot A}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (5.5)$$

где су:

k – апсолутна пропусност, $[m^2]$;

μ – вискозност флуида, $[Pas]$;

p – притисак, $[Pa]$;

g – гравитационо убрзање, $\left[9,81 \frac{m}{s} \right]$;

z – дубина, $[m]$.

У случају вишефазног протока флуида (нафта – једначина 5.6, гас – једначина 5.7), Дарсијева једначина има облик:

$$q_o = - \frac{A \cdot k \cdot k_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (5.6)$$

$$q_g = - \frac{A \cdot k \cdot k_{rg}}{\mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_g \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (5.7)$$

где су:

k_{ro}, k_{rg} – релативне пропусности за нафту и гас.

На основу горенаведених израза (једначине 5.2 – 5.7), изводе се диференцијалне једначине протока (Mattax & Dalton, 1990; Satter et al., 2008; Satter & Iqbal, 2016):

- нафта:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{A \cdot k \cdot k_{ro}}{\mu_o \cdot B_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] = A \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi \cdot S_o}{B_o} \right) \quad (5.8)$$

- вода:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{A \cdot k \cdot k_{rw}}{\mu_w \cdot B_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_w \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] = A \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi \cdot S_w}{B_w} \right) \quad (5.9)$$

- гас:

У случају протока гаса узима се у обзир слободан гас и гас растворен у нафти:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{A \cdot k \cdot k_{rg}}{\mu_g \cdot B_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_g \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{A \cdot R_s \cdot k \cdot k_{ro}}{\mu_o \cdot B_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} - \rho_o \cdot g \frac{\partial z}{\partial x} \right) \\ = A \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \cdot \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_s \cdot S_o}{B_o} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.10)$$

где су:

k_{ro}, k_{rg}, k_{rw} – релативне пропусности за нафту, гас и воду;

μ_o, μ_g, μ_w – вискозност нафте, гаса и воде, [Pa·s];

B_o, B_g, B_w – фактор волумена формације за нафту, гас и воду, $\left[\frac{m^3}{m^3} \right]$;

$\frac{\partial p_o}{\partial x}, \frac{\partial p_g}{\partial x}, \frac{\partial p_w}{\partial x}$ – градијент притиска у нафтој, гасној и воденој зони, $\left[\frac{Pa}{m} \right]$;

p_o, p_g, p_w – притисци нафтне, гасне и водене зоне, [Pa];

S_o, S_g, S_w – засићење нафтом, гасом и водом, [д. ј.];

R_s – количина раствореног гаса, $\left[\frac{sm^3}{m^3} \right]$.

За решавање наведених парцијалних диференцијалних једначина (5.8 – 5.10) морају бити задовољени додатни услови (Archer & Wall, 1986; Fanchi, 2000):

- сума засићења нафте, гаса и воде једнака је порној запремини у свакој тачки система (Peaceman, 1977; Mattax & Dalton, 1990; Satter & Iqbal, 2016) (једначина 5.11):

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (5.11)$$

- разлика фазних притисака једнака је капиларном притиску на њиховом контакту и у функцији је фазних засићења (једначине 5.12 и 5.13) :

$$p_{cow} = p_o - p_w = p_{cow}(S_o, S_w) \quad (5.12)$$

$$p_{cgo} = p_g - p_o = p_{cgo}(S_o, S_g) \quad (5.13)$$

где су:

p_{cow} – капиларни притисак на контакту нафте и воде;

p_{cgo} – капиларни притисак на контакту нафте и гаса.

Наведени систем од шест једначина (5.8–5.13) решава се применом одговарајућих граничних и почетних услова. Крајњи резултат је дистрибуција притиска и засићења у лежишту.

5.2.3. Једначине стања

Једначине стања представљају релацију између густине, притиска и температуре у одређеној тачки неког система (Abou-Kassem et al., 2020). Коришћењем једначина стања математички се моделују PVT карактеристике којима се описује запреминско и фазно понашање флуида (Satter & Iqbal, 2016). За решавање једначине стања у већини случајева потребне су критичне вредности притиска и температуре и ацентрични фактор компоненти (одступање молекула од сферичног облика) (Ahmed, 2016). Будући да је развијено више једначина стања, моделовање понашања свих фаза врши се применом једне једначине.

Једначине стања које се најчешће користе су:

- RK: Redlich-Knowng

Redlich и Kwong једначина стања дата је следећим изразом (Ahmed, 2016) (једначина 5.14):

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V(V + b)\sqrt{T}} \quad (5.14)$$

где су:

P – притисак, $[Pa]$

R – универзална гасна константа, $8,31 \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$

T – температура, $[K]$

V – моларна запремина, $\left[\frac{m^3}{mol} \right]$

a и b – параметри једначине стања и одређују се помоћу израза 5.15 и 5.16:

$$a = 0,42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (5.15)$$

$$b = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c} \quad (5.16)$$

где су T_c и P_c критичне вредности температуре и притиска.

- SRK: Soave- Redlich-Knowng

Модификовану Redlich-Knowng једначину стања представио је Soave (једначина 5.17). SRK једначина стања користи температурно зависни коефицијент $[a\alpha(T)]$ који представља замену за члан $\left[\frac{a}{\sqrt{T}} \right]$ у једначини 5.14 (Ahmed, 2016).

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha(T)}{V(V + b)} \quad (5.17)$$

Бездимензионални параметар α одређује се коришћењем једначине 5.18 и узима у обзир коефицијент корелације (m) и редуковану температуру (T_r).

$$\alpha(T) = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (5.18)$$

Коефицијент корелације (m) рачуна се помоћу једначине 5.19 и зависи од фактора ацентричности (ω):

$$m = 0,480 + 1,574\omega - 0,176\omega^2 \quad (5.19)$$

- PR: Peng-Robinson

Peng-Robinson-ова једначина представља модификацију SRK једначине стања. Peng и Robinson су сматрали да треба прецизније одредити густину течности, нарочито у близини критичне тачке (Ahmed, 2016). PR једначина стања представљена је следећим изразом:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V(V + b) + b(V - b)} \quad (5.20)$$

Параметри a и b израчунавају се једначинама 5.21 и 5.22:

$$a = 0,45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (5.21)$$

$$b = 0,07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (5.22)$$

Бездимензионални параметар α одређује се на исти начин као код SRK једначине стања (једначина 5.18), међутим Peng и Robinson за израчунавање вредности m користе следећи израз:

$$m = 0,3796 + 1,5422\omega - 0,2699\omega^2 \quad (5.23)$$

За теже компоненте, тј. када је фактор ацентричности $\omega > 0,49$, Peng и Robinson предложили су модификацију једначине 5.23 следећим изразом:

$$m = 0,379642 + 1,48503\omega - 0,1644\omega^2 + 0,016667\omega^3 \quad (5.24)$$

5.2.4. Нумеричке методе решавања парцијалних диференцијалних једначина

Први корак у лежишној симулацији је дискретизација лежишта, односно подела лежишта на N блокове (ћелија) (Abou-Kassem et al., 2020). Свака ћелија има дефинисану димензију, границе и локацију, као и униформне вредности порозности, пропусности, притиска, температуре и састава флуида, при чему те вредности могу варирати од ћелије до ћелије (Islam et al., 2016).

Претходно дефинисане диференцијалне једначине протока флуида (5.8–5.10) дају континуирана решења за притисак и засићење у простору и времену, међутим нумеричким решавањем добијају се апроксимативна континуална решења за дискретан сет ћелија или тачака у дискретним временским интервалима (Mattax & Dalton, 1990; Khalili & Ahmadi, 2023). Најчешће примењивана нумеричка метода која се користи у лежишној симулацији за решавање парцијалних диференцијалних једначина је метода коначних разлика (Cosham, 2016).

Нумеричко решавање парцијалних диференцијалних једначина методом коначних разлика односи се на замену парцијалних извода коначним прираштајима, а затим и замену извода посматране функције њиховим приближним вредностима (Peaceman, 1977; Coats K., 1980; Mattax & Dalton, 1990; Satter & Iqbal, 2016; Islam et al., 2016). Овај начин решавања парцијалних диференцијалних једначина захтева просторну и временску дискретизацију.

Најчешће коришћене методе за решавање парцијалних диференцијалних извода методом коначних разлика су имлицитна (разлика уназад) и експлицитна (разлика унапред) метода (Appau et al., 2019).

Апроксимативна решења функција у дефинисаним тачкама $x_0 + \Delta x$ и $x_0 - \Delta x$ (једначине 5.25 и 5.26) применом Taylor-овог реда су (Coats K., 1980; Cheng Y., 2009; Cosham, 2016):

За $x_0 + \Delta x$:

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \Delta x \cdot f'(x_0) + \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x_0) + \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x_0) + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} f^n(x_0) \quad (5.25)$$

$x_0 - \Delta x$:

$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \Delta x \cdot f'(x_0) + \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x_0) - \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x_0) + \frac{\Delta x^4}{4!} f''''(x_0) - \dots + (-1)^n \frac{\Delta x^n}{n!} f^n(x_0) \quad (5.26)$$

Уколико је вредност Δx мала, за дефинисање првог и другог извода елиминише се све од трећег члана у једначини Тајлор-овог реда (5.25 и 5.26) и изводе се једначине у следећем облику:

- експлицитан (разлика унапред):

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (5.27)$$

- имплицитан (разлика уназад):

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \quad (5.28)$$

- на средини интервала:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (5.29)$$

Други извод:

$$f'' = \frac{f(x_0 - \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 + \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (5.30)$$

Горња једначина другог извода може се дати у облику:

$$f'' = \frac{f_{i-1} - 2f_i + f_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (5.31)$$

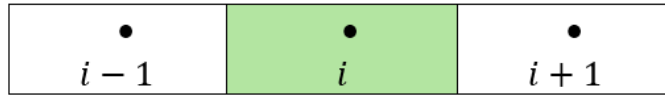
Уколико је дата функција $f = f(x, t)$, где је x растојање, а t време, први и други извод за неко време n може се дати следећим једначинама:

$$f'^n = \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2\Delta x} \quad (5.32)$$

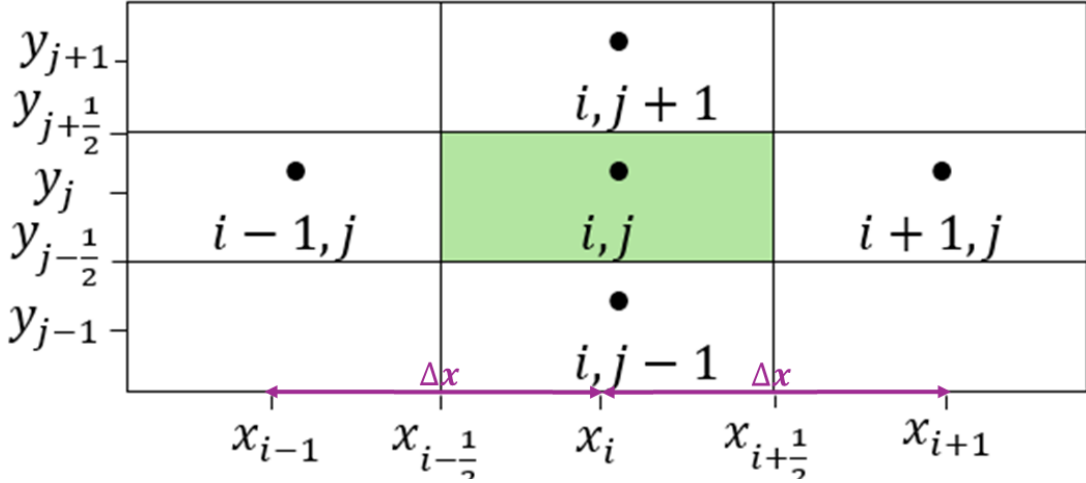
$$f_i''^n = \frac{f_{i-1}^n - 2f_i^n + f_{i+1}^n}{\Delta x^2} \quad (5.33)$$

5.2.4.1. Просторна дискретизација

Једнодимензионални и дводимензионални приказ дискретне мреже ћелија дат је на сликама 5.3. и 5.4. Код дводимензионалне шеме I дефинише ћелију у смеру x , док J дефинише ћелију у смеру y , тј. индекси i, j представљају колоне и редове мреже ћелија (Mattax & Dalton, 1990; Islam et al., 2016).



Слика 5.3. Подела лежишта на блокове – 1D приказ (адаптирано из извора: *Islam et al., 2016*)



Слика 5.4. Подела лежишта на блокове – 2D приказ (адаптирано из извора: *Mattax & Dalton, 1990*)

Позиција ћелије дефинисана је њеним границама: $x_{1/2}, x_{3/2} \dots x_{i+1/2}$; $y_{1/2}, y_{3/2} \dots y_{j+1/2}$, а центар ћелије представља аритметичку средину граница ћелије (Mattax & Dalton, 1990) (једначина 5.34 и 5.35):

$$x_i = \frac{x_{i-1/2} + x_{i+1/2}}{2} \quad (5.34)$$

$$y_i = \frac{y_{j-1/2} + y_{j+1/2}}{2} \quad (5.35)$$

На основу једначина Taylor-овог реда (једначине 5.25 и 5.26) апроксимативна вредност притиска у функцији растојања дефинише се следећим изразима (Klins, 1977):

- апроксимација првог извода у тачки $i + \frac{1}{2}, j$ израчунава се једначином 5.36:

$$\left(\frac{\partial p_o}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \sim \frac{(p_o)_{i+1,j} - (p_o)_{i,j}}{x_{i+1} - x_i} = \frac{(p_o)_{i+1,j} - (p_o)_{i,j}}{\Delta x} \quad (5.36)$$

- апроксимација првог извода у тачки $i - \frac{1}{2}, j$ израчунава се једначином 5.37:

$$\left(\frac{\partial p_o}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j} \sim \frac{(p_o)_{i,j} - (p_o)_{i-1,j}}{x_i - x_{i-1}} = \frac{(p_o)_{i,j} - (p_o)_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (5.37)$$

- на средини интервала, у тачки i, j апроксимативно решење одређује се као средња вредност апроксимације првог извода у тачки $i + \frac{1}{2}, j$ и тачки $i - \frac{1}{2}, j$ (једначина 5.38):

$$\left(\frac{\partial p_o}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{(p_o)_{i+1,j} - (p_o)_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (5.38)$$

- аппроксимација другог извода притиска у односу на растојање једнака је:

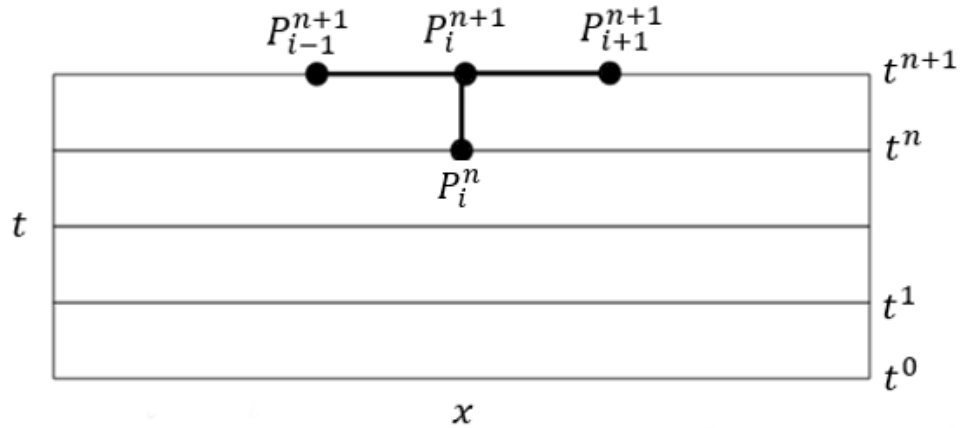
$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 p_o}{\partial^2 x} \right)_{i,j} &= \frac{\left(\frac{\partial p_o}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} - \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x} \\ &= \frac{\frac{(p_o)_{i+1,j} - (p_o)_{i,j}}{\Delta x} - \frac{(p_o)_{i,j} - (p_o)_{i-1,j}}{\Delta x}}{\Delta x} \end{aligned} \quad (5.39)$$

Коначни облик једначине дат је следећим изразом:

$$\left(\frac{\partial^2 p_o}{\partial^2 x} \right)_{i,j} = \frac{(p_o)_{i+1,j} - 2(p_o)_{i,j} + (p_o)_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (5.40)$$

5.2.4.2. Временска дискретизација

Дискретни временски интервали подељени су на $t, t_0, t_1, t_2 \dots t_n, t_{n+1}$. Уколико је позната вредност притиска p_i у времену t_n може се одредити апроксимативна вредност притиска p_i у временском кораку t_{n+1} . На слици 5.5. дат је приказ временске дискретизације. Уколико се крене од почетног услова $t = 0$, нумеричким решавањем одређује се решење у свакој дискретној тачки у простору и времену (Peaceman, 1977; Coats K., 1980; Mattax & Dalton, 1990; Cheng Y., 2009; Satter & Iqbal, 2016; Cosham, 2016; Appau et al., 2019).



Слика 5.5. Приказ временске дискретизације (адаптирано из извора: Cheng, 2009)

Поступак експлицитног и имплицитног одређивања притиска p_i у временском кораку t_{n+1} дат је следећим једначинама (Peaceman, 1977; Coats K., 1980; Cheng Y., 2009; Khormali et al., 2014; Cosham, 2016; Selase et al., 2018):

- 1) Експлицитно одређивање притиска:

- временски извод:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (5.41)$$

- просторни извод:

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} = \frac{p_{i-1}^n - 2p_i^n + p_{i+1}^n}{\Delta x^2} \quad (5.42)$$

- аппроксимацијом једначине дифузитета (једначина 5.43):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.43)$$

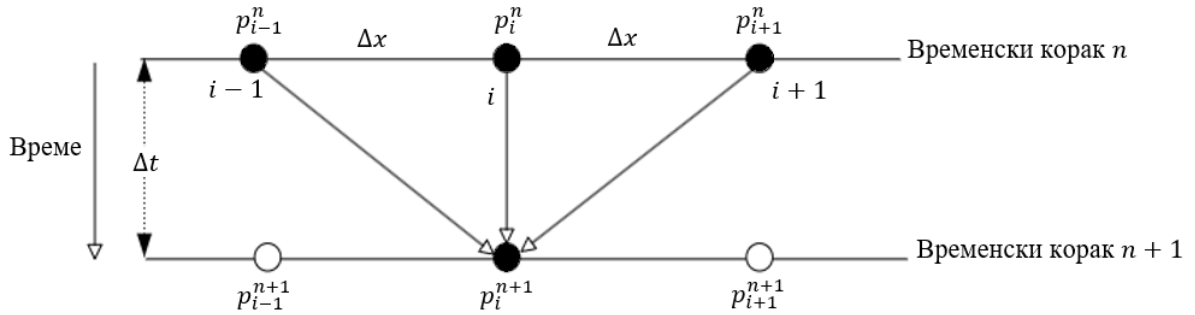
добија се следећи израз:

$$\frac{p_{i-1}^n - 2p_i^n + p_{i+1}^n}{\Delta x^2} = \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (5.44)$$

У сваком временском кораку постоји само једна непозната (p_i^{n+1}) и за експлицитно одређивање вредности притиска p_i у временском кораку t_{n+1} , за познате вредности притисака p_i, p_{i-1}, p_{i+1} и дефинисаним Δx и временским кораком Δt , користи се једначина 5.45:

$$p_i^{n+1} = (p_{i-1}^n - 2p_i^n + p_{i+1}^n) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + p_i^n \quad (5.45)$$

На слици 5.6. дат је алгоритам експлицитног одређивања притиска методом коначних разлика.



Слика 5.6. Алгоритам експлицитног одређивања притиска (адаптирано из извора: Heriot-Watt University, n.d.)

2) Имплицитно одређивање притиска:

- временски извод:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (5.46)$$

- просторни извод:

$$\frac{\partial p^2}{\partial x^2} = \frac{p_{i-1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (5.47)$$

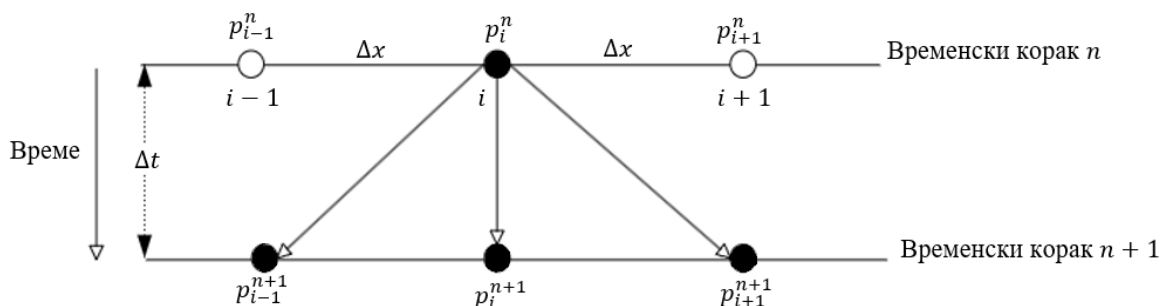
- апроксимацијом једначине дифузитета добија се следећа једначина:

$$\frac{p_{i+1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (5.48)$$

Једина непозната у претходној једначини је притисак p_i у временском кораку t_{n+1} и имплицитно се одређује једначином 5.49:

$$p_i^{n+1} = (p_{i-1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + p_i^n \quad (5.49)$$

На слици 5.7. представљен је алгоритам имплицитног одређивања притиска методом коначних разлика.



Слика 5.7. Алгоритам имплицитног одређивања притиска (адаптирано из извора: Heriot-Watt University, n.d.)

Код вишефазног протока флуида кроз порозну средину врши се дискретизација временски зависних диференцијалних једначина за сваку ћелију. На тај начин добија се сет међузависних једначина које се могу представити матрицом и омогућити симултано одређивање притиска и zasiћења (Satter & Iqbal, 2016).

5.3. Карактеризација лежишта, статички и динамички модел

Детаљна карактеризација лежишта веома је битна како би се креирао веродостојан лежишни модел који захтева мултидисциплинарни приступ (Satter et al., 2008). Интегрисани тимски рад омогућава ефикасно прикупљање потребних података и на тај начин обезбеђује се квалитетна израда симулационе студије, пре свега усаглашавања историјата добијеног у моделу са реалним подацима, што је од изузетног значаја за избор одговарајуће стратегије разраде и експлоатације (Satter et al., 2008). Неопходни подаци за развој интегрисаног лежишног модела обухватају геолошке, геофизичке, сеизмичке, петрофизичке податке, податке добијене бушотинским испитивањима и производне податке (Satter & Iqbal, 2016).

Нумерички лежишни модел састоји се од креирања статичког модела, адаптације мреже ћелија статичког модела и динамичког симулационог модела (Zou, 2013).

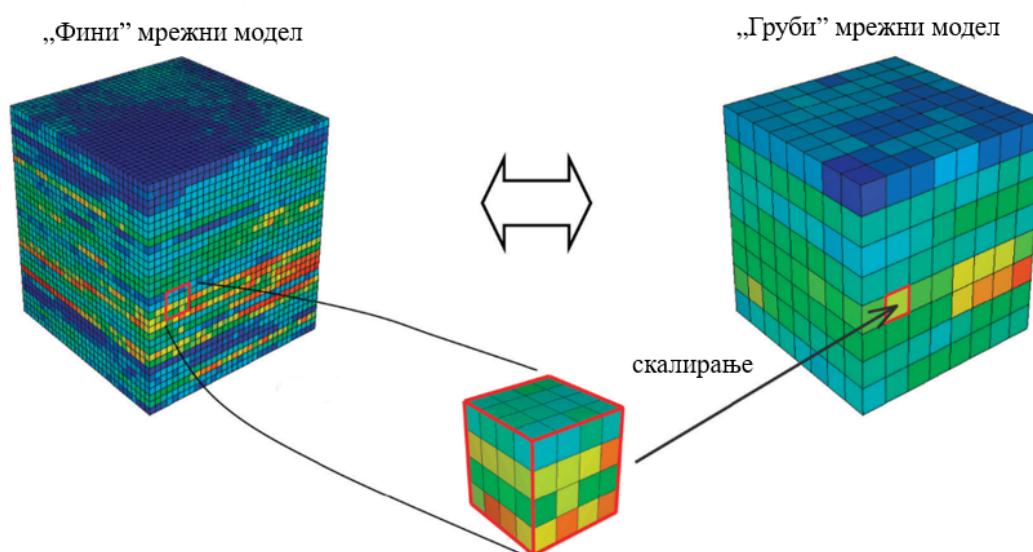
5.3.1. Статички модел

Статички модел назива се још и геолошки, или геомодел, и описује почетне услове у лежишту (Hosseini et al., 2013; Bjørlykke, 2015). Користи се за дефинисање петрофизичких особина флуида у оквиру претходно формираних структурних модела који се састоје од оптимално димензионисаних мрежа ћелија у циљу одређивања геолошких резерви флуида у лежишту (Oloo & Xie, 2018; Amanipoor, 2019). У суштини, геолошки модел представља први корак у креирању лежишног модела и дефинише се реализацијом геолошких и геофизичких студија које обухватају (Satter & Iqbal, 2016; Papiernik & Michna, 2019):

- 1) Структурно моделовање – интерпретацијом података добијених геофизичким истраживањима конструише се структурна карта по повлати лежишта приказана тродимензионалном мрежом (структурни модел) (Serintel, n.d.; Ezekwe, 2011; Bjørlykke, 2015);
- 2) Стратиграфско моделовање – на основу корелације података добијених бушотинским каротажом и анализама језгара дефинишу се стратиграфски слојеви и геолошка старост стена (стратиграфски модел) (Serintel, n.d.; Ezekwe, 2011);
- 3) Литолошко моделовање – приказ литолошких типова стена на основу литологије, седиментологије и петрофизике (литолошки модел) (Serintel, n.d.);
- 4) Петрофизичко моделовање – дефинисање основних петрофизичких особина (порозност, пропусност, zasiћење водом, однос ефективне и укупне моћности) на основу интерпретације геофизичког каротажа који се калибришу са подацима добијеним у лабораторији испитивањем језгара (петрофизички модел) (Serintel, n.d.;

Amanipoor, 2019). Петрофизичко моделовање представља веома битан корак у изради статичког модела, јер се на основу дистрибуције петрофизичких параметара могу препознати делови лежишта који су најпогоднији за будућу производњу.

Геолошки модел детаљно описује лежиште и састоји се од великог броја активних ћелија (10^7 – 10^8) (Durlowsky, 2005; Islam et al., 2016). Једноставан дводимензионални динамички модел састоји се од око 100 ћелија, док код сложених тродимензионалних модела број ћелија мреже може бити отприлике од 100 000 до 1 000 000 (Mattax & Dalton, 1990; Christie, 1996; Qi & Hesketh, 2005;). Из тог разлога неопходна је адаптација статичког модела („upscaling”) са великим бројем ћелија на мрежни модел са мањим бројем ћелија, (слика 5.8.), при чему је битно задржати што тачнији опис лежишних параметара. Скалирање модела („upscaling”) представља процес осредњавања, где се петрофизички параметри модела са великим бројем ћелија „финих” димензија апроксимирају параметрима модела са мањим бројем ћелија тзв. „грубих” димензија (Serintel, n.d.). Основна сврха скалирања је смањење броја ћелија мрежног модела како би се задовољиле потребе симулације протока која би била изведена у разумном временском кораку (Qi & Hesketh, 2005; Preux et al., 2016). Главни изазов „upscaling”-а је губитак информација, јер хомогени модели „грубих” димензија не могу у потпуности да интерпретирају динамичко понашање хетерогених „финих” модела (Preux et al., 2016). Кључна ствар код скалирања модела је наћи компромис између прецизности и ефикасности. Из тог разлога битно је одабрати адекватну методу скалирања која би минимизирала губитке у информацијама и задржала одговарајућу тачност карактеризације лежишта за потребе симулације (Qi & Hesketh, 2005). Методе које се користе за скалирање модела су методе осредњавања (аритметичка, хармонијска и геометријска средина), ренормализација, метода одређивања параметара у функцији притиска, тензорска метода и техника псеудо функција (Qi & Hesketh, 2005; Islam et al., 2016).



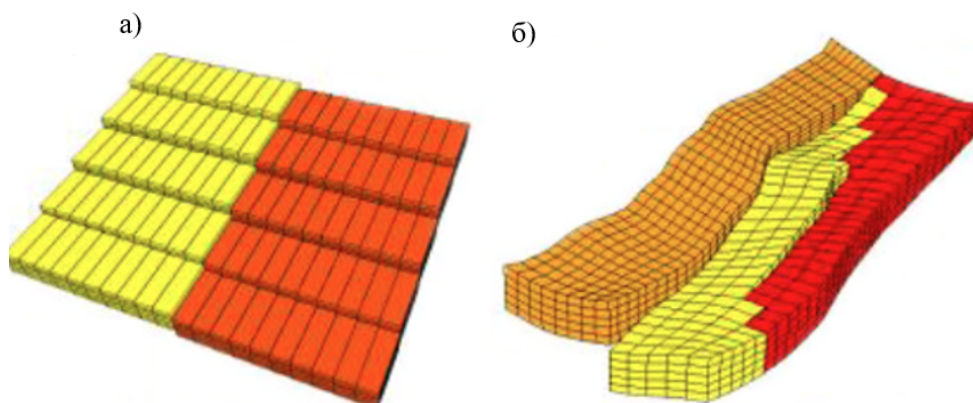
Слика 5.8. Приказ скалирања модела – „upscaling” процеса (адаптирано из извора: Serintel, n.d.)

Најзаступљенији тип мреже ћелија за опис лежишта у нумеричкој симулацији заснива се на Декартовом правоугаоном координатном систему и то су блок центрична („block centered grid”) и угао-центрична мрежа („corner centered grid”) (Abou-Kassem & Osman, 2008).

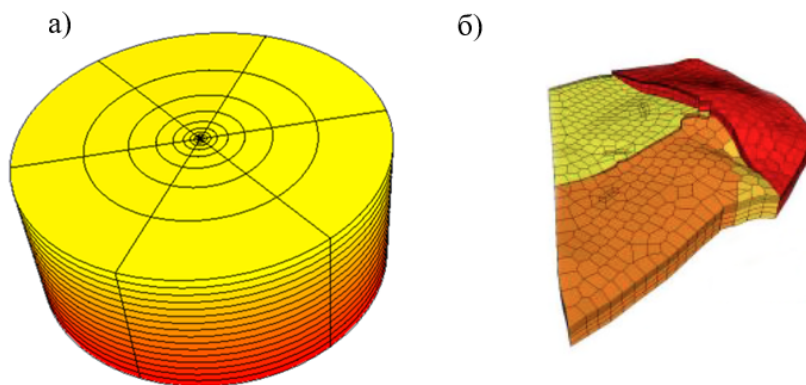
Код блок центричне геометрије мреже блокови су хоризонтални и сви углови су под 90° (слика 5.9. а)) (Schlumberger, 2014a). Код овог типа геометрије, мрежне тачке у којима се врши прорачун налазе се у центру сваке ћелије (Abou-Kassem et al., 2006). Сваки блок има прецизно дефинисане димензије (D_x, D_y, D_z), дубину горње површине, као и вредности порозности и пропусности. Блок-центрична мрежа представља најједноставнији приказ геометрије лежишта

(Fanchi, 2018). Са друге стране, код угао-центричне геометрије мреже, мрежне тачке налазе се у ћошковима ћелија и самим тим су подаци обимнији. Овај тип геометрије мреже заснива се на одређивању положаја свих осам углова за сваки блок мреже, при чему углови не морају бити под правим углом (слика 5.9. б)) (Schlumberger, 2014a). Ћелије угао-центричне геометрије омогућавају већу флексибилност, тј. имају већи избор облика, што је посебно корисно за моделовање комплексних геолошких структура и самим тим пружају реалнији приказ лежишта (Schlumberger, 2007; Fanchi, 2018).

Такође, постоје радијална и неструктурна геометрија мреже, али њихова примена није честа (слика 5.10.) (Schlumberger, 2007). Радијални тип геометрије мреже користи се углавном за анализу прибушотинске зоне, односно када се јављају брзе промене у засићењу флуида у близини бушотине.



Слика 5.9. Блок-центрична и угао-центрична геометрија мреже (адаптирано из извора: Schlumberger, 2014a)



Слика 5.10. а) радијални и б) неструктурни тип геометрије мреже (адаптирано из извора: Schlumberger, 2007)

5.3.2. Динамички модел

Динамички модел представља комбинацију статичког модела заједно са разрадним и производним подацима као што су историјат производње и притиска, подаци о бушотинама и PVT особине флуида (Habib et al., 2017). Динамичким моделом одређују се промене у засићењу флуида, промене састава и притиска и на тај начин омогућава процена динамичког понашања у лежишту. Основна разлика између ова два типа модела јесте чињеница да се статички модел базира на подацима који су константни током времена, док се код динамичког моделовања користећи методе нумеричке математике симулира проток флуида током времена (Cannon, 2018; Fanchi, 2018).

Динамички модел може се поделити у три фазе: унос података за симулациони модел, усаглашавање историјата производње и притиска и предвиђање будућег понашања за различите оперативне услове.

5.3.2.1. Унос података за израду динамичког лежишног модела

Унос података у динамички лежишни симулатор може се поделити на следеће кораке:

1) Дефинисање особина флуида и стене у функцији притиска и засићења

Улазни подаци у динамичком моделу су PVT особине флуида у функцији притиска (фактор волумена формације, вискозност и количина раствореног гаса), релативне пропусности и капиларни притисак у функцији засићења и компресибилитет стене у функцији притиска. Лежишни симулатор врши прорачун материјалног баланса за сваку ћелију у сваком временском кораку и из тог разлога неопходно је израчунати густину сваке фазе на лежишним условима у функцији притиска (Schlumberger, 2007; Schlumberger, 2014a) (једначине 5.50–5.52):

$$\rho_{o,le\dot{z}} = \frac{\rho_{os} + R_s \cdot \rho_{gs}}{B_o} \quad (5.50)$$

$$\rho_{g,le\dot{z}} = \frac{\rho_{gs}}{B_g} \quad (5.51)$$

$$\rho_{w,le\dot{z}} = \frac{\rho_{ws}}{B_w} \quad (5.52)$$

где су:

$\rho_{o,le\dot{z}}$ – густина нафте на лежишним условима, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$\rho_{g,le\dot{z}}$ – густина гаса на лежишним условима, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$\rho_{w,le\dot{z}}$ – густина воде на лежишним условима, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$\rho_{os}, \rho_{gs}, \rho_{ws}$ – густина нафте, гаса и воде на стандардним условима.

Код „black oil” лежишног модела, PVT особине флуида дате су табеларно. За сваки временски корак из табеле читава се PVT податак за одговарајућу вредност притиска („lookup” метода).

Код композитног модела, прорачун PVT карактеристика доста је захтевнији, јер се за дефинисање фазног понашања флуида користи итеративно решавање једначине стања и фазних равнотежа у сваком временском кораку у свакој ћелији мреже.

Вредности капиларног притиска и релативних пропусности за сваку активну фазу уносе се табеларно у функцији засићења. Криве релативних пропусности користе се за израчунавање почетних фазних засићења у свакој ћелији мреже (слика 5.11.) (Schlumberger, 2007). Такође, вредности релативних пропусности користе се за рачунање протока флуида између ћелија, као и између ћелије и бушотине.

Вредности капиларних притисака служе да се одреде засићења сваке фазе у почетној прелазној зони (слика 5.12.).

Компресибилитет стене (c_f) дефинише промену порне запремине (∂V_p) услед промене притиска (∂p) (једначина 5.53), и представља параметар од значаја за инцијализацију лежишне симулације. Вредност компресибилитета одређује се на основу анализе језгара и испитивања механике стена.

$$c_f = \frac{\left(\frac{\partial V_p}{\partial p}\right)}{V_p} \quad (5.53)$$

2) Иницијализација модела

Основна улога иницијализације модела је дефинисање почетних услова притиска и засићења за сваку ћелију мреже лежишног модела (Schlumberger, 2014a). Вредност притиска на референтној дубини је позната и та вредност је константна за дефинисање дистрибуције почетних услова у лежишту.

За формулисање почетних услова у лежишном симулатору постоје три начина:

1. Почетне вредности притиска и засићења базирају се на функцијама засићења, контакту флуида, референтној дубини и притиску. У случају да постоји више зона, приступа се иницијализацији у свакој зони.

На слици 5.11. дат је приказ дистрибуције почетних услова притиска и засићења флуидима у лежишту. Почетне вредности притиска у свакој ћелији израчунавају се на основу градијента притиска (једначина 5.54) и вредности почетног притиска на референтној дубини.

$$p(h_2) = p(h_1) + \int_{h_1}^{h_2} \rho \cdot g \cdot dh \quad (5.54)$$

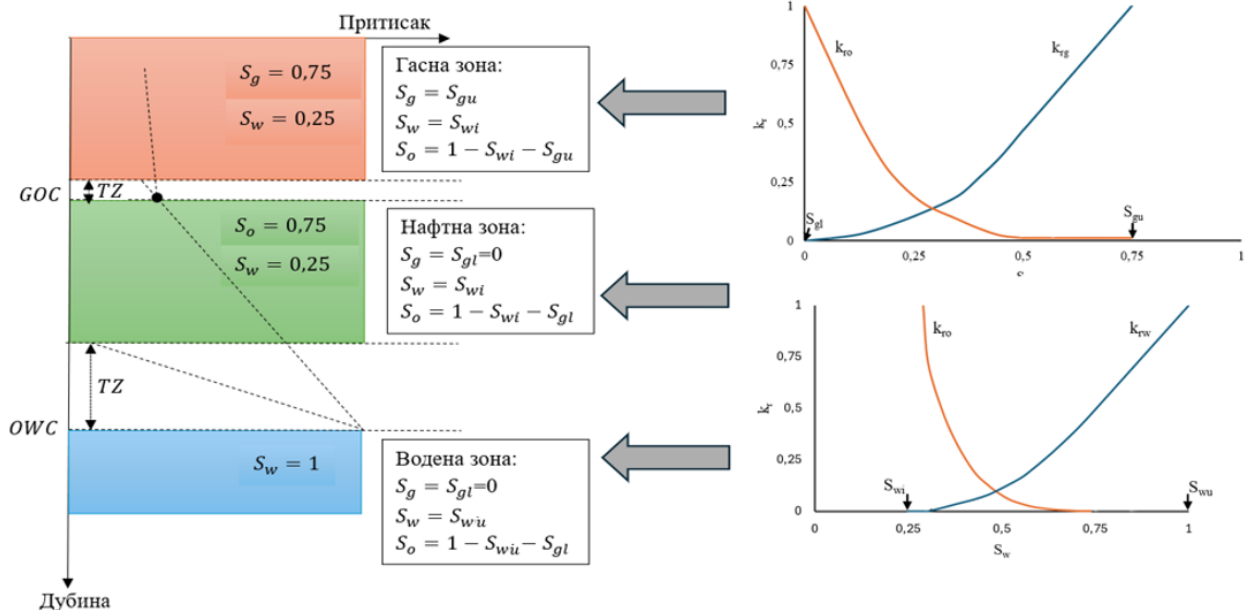
Где су:

$p(h_2)$ – притисак на дубини h_2 ;

$p(h_1)$ – притисак на дубини h_1 ;

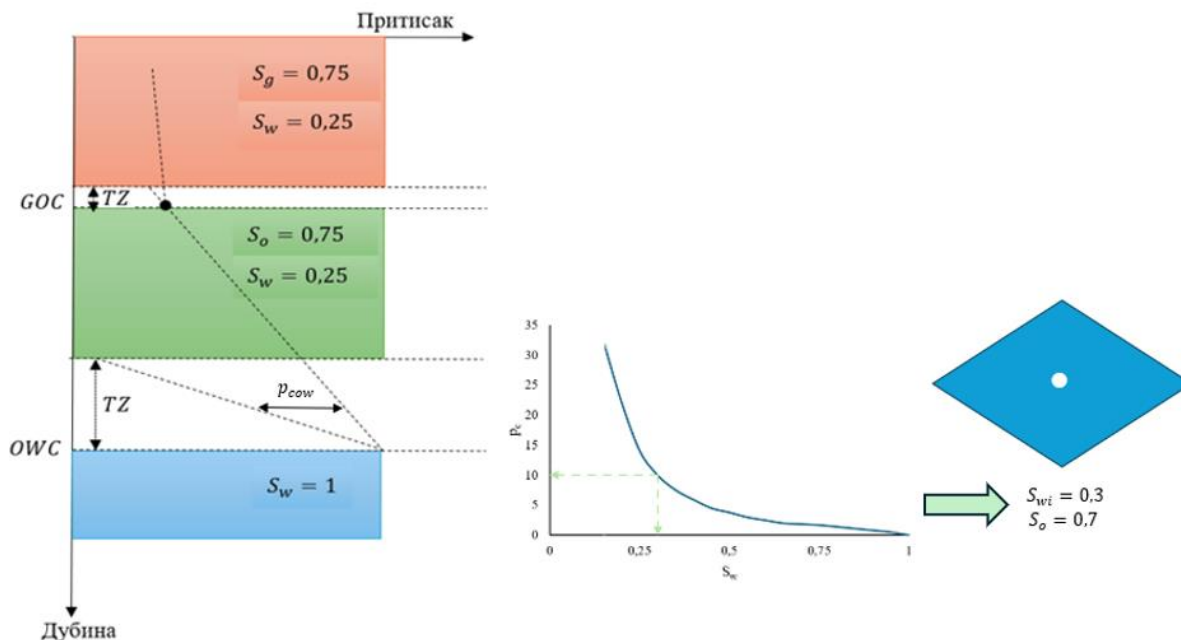
dh – представља разлику у дубинама ($h_2 - h_1$).

За дистрибуцију засићења користе се подаци релативних пропусности (Schlumberger, 2007). У гасној зони засићење гасом има максималну вредност (S_{gu}) и резидуално засићење водом (S_{wi}). У нафтној зони присутно је засићење резидуалном водом и засићење нафтом (S_o). У воденој зони је максимално засићење водом (S_{wu}).



Слика 5.11. Дистрибуција почетних услова притиска и засићења (адаптирано из извора: Schlumberger, 2007)

У прелазној зони, засићења флуидима одређују се на основу капиларних кривих које су претходно дефинисане (Schlumberger, 2007). Капиларни притисак представља разлику неквашеће и квашеће фазе (једначине 5.12 и 5.13). С обзиром на то да су познате вредности градијента притиска у нафтној и воденој зони на одређеној дубини, одређује се капиларни притисак на основу њихове разлике. За ту вредност капиларног притиска методом „lookup” читава се засићење водом и та вредност се задаје ћелији (слика 5.12.).



Слика 5.12. Дефинисање засићења у прелазној зони (адаптирано из извора: Schlumberger, 2007)

2. Почетне вредности притиска и засићења дефинишу се експлицитно за сваку ћелију у моделу. Ова метода иницијализације модела користи се када постоје доступни подаци о засићењу у геолошком моделу, међутим овакав начин није препоручљив, јер може доћи до значајних одступања (Schlumberger, 2007; Satter & Iqbal, 2016).

3. Трећи тип иницијализације односи се на то да су почетни услови у моделу излази претходно извршеног симулационог корака. Суштина овог типа иницијализације јесте да се започне симулација у било ком тренутку без понављања ранијих корака, што знатно смањује време и број потребних прорачуна (Schlumberger, 2007).

3) Дефинисање аквифера

Присуство аквифера и његова карактеризација веома су битни за процену будућег понашања лежишта. У нумеричкој симулацији постоје два начина моделовања аквифера: нумерички и аналитички (Fanchi, 2018; Brantson et al., 2020). Аналитички приступ користи математичке моделе за симулацију и предвиђање понашања аквифера као што су: Carter-Tracy-јев модел аквифера и Fetkovich-ев модел аквифера (Schlumberger, 2014b). Нумерички аквифер моделује се у ћелијама симулационе мреже које су повезане са одређеним бројем ћелија лежишта. С обзиром на то да су аквифери недовољно истражени и углавном се не располаже подацима о њима, усаглашавањем („мечовањем”) вредности притиска процењује се његова величина, порозност, пропусност и дистрибуција (Brantson et al., 2020).

4) Подаци о бушотинама

Обухватају:

- основне информације о бушотини – име бушотине, позиција ушћа бушотине у моделу, димензије, притисак на дну бушотине, дубина бушотине, назив групе којој бушотина

припада и дефинисање фаза (нафта, гас, вода). Свака ново избушена бушотина мора се описати на овај начин (Schlumberger, 2014a);

- перфорације – подаци о интервалима који омогућавају уток флуида из формације у бушотину. Бушотина углавном пролази кроз цео модел, међутим само перфорирани интервали су у комуникацији са лежиштем;
- историјат производње нафте, гаса и воде у функцији времена;
- податке о утискивању флуида.

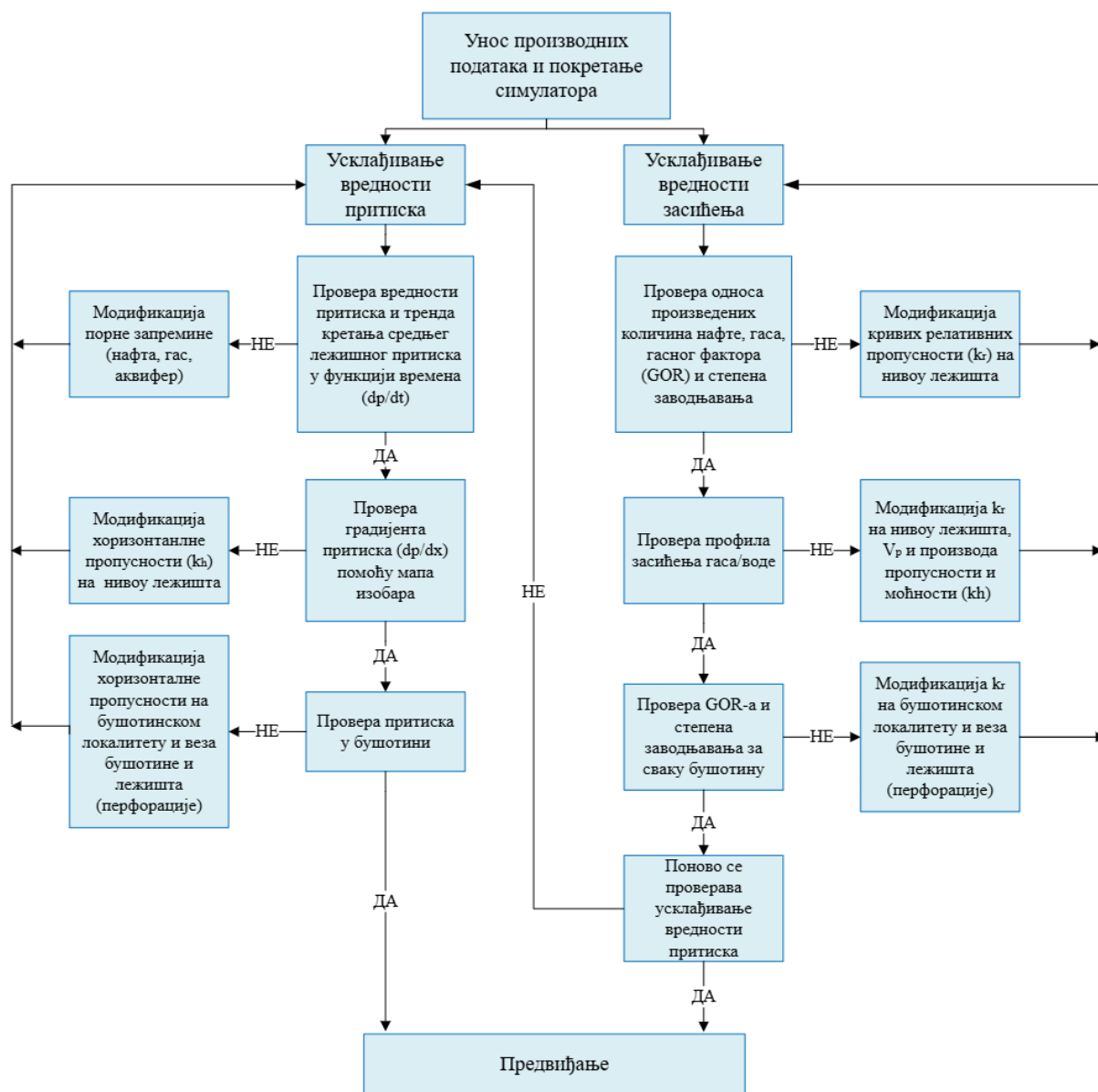
5.3.2.2. Усаглашавање („мечовање”) историјата производње и притиска

„Мечовање” историјата (history matching - НМ) представља поступак усаглашавања историјата добијеног у моделу са реалним историјатом притиска и производње (Wheaton, 2016; Fanchi, 2018). Доступни лежишни подаци за израду геолошког модела често су недовољни за опис целог лежишта и из тог разлога их карактерише одређени степен несигурности (Islam et al., 2016). Циљ „мечовања” је калибрација модела како би се креирао модел који се подудара са реалним условима који владају у лежишту и на тај начин обезбеђује се адекватно предвиђање будућег производног понашања, што представља предуслов развоја оптималног плана управљања лежиштем. „Мечовање” историјата у суштини представља тип инверзног проблема, јер је потребно дефинисати улазне податке који одговарају стварним лежишним историјским подацима (Wheaton, 2016; Okotie & Ikporo, 2016; Fanchi, 2018). На овај начин смањује се непрецизност улазних података и омогућава адекватнији опис лежишта.

Треба нагласити да се „мечовање” историјата ради у динамичком моделу на основу доступног историјата притиска и производње за одређени временски период. Уколико постоји дужи временски интервал током којег су доступни подаци, већа је вероватноћа да ће креирани модел бити веродостојан и прикладан за даљи рад.

Валидација лежишног модела одвија се у две фазе и то: усаглашавањем вредности притиска и усаглашавањем вредности засићења, односно произведених количина нафте, гаса и воде (Okotie & Ikporo, 2016; Al-Husseini & Hamad-Allah, 2023). Алгоритам „мечовања” притиска и засићења дат је на слици 5.13.

Лежишни параметри са највећим степеном неизвесности који утичу на процес „мечовања”, јесу дистрибуција пропусности и порозности (Maschio & Schiozer, 2003; Al-Husseini & Hamad-Allah, 2023). Њихове вредности се прве модификују. Такође, вредности лежишних података од којих зависи усаглашавање производних и података добијених у моделу су: особине флуида (компресибилитет, PVT подаци и вискозност), вредности релативних пропусности, подаци о бушотини (скин фактор и динамички притисак на дну бушотине) и величина аквифера (Okotie & Ikporo, 2016; Wheaton, 2016).



Слика 5.13. Поступак усаглашавања вредности притисака и zasiћења (адаптирано из извора: Al-Husseini & Hamad-Allah, 2023)

5.3.2.3. Предвиђање будућег производног понашања лежишта

Након успешног подударања историјских података и података добијених у моделу, приступа се процесу предвиђања, где се за различите оперативне услове процењује њихов утицај на будуће понашање лежишта (Mattax & Dalton, 1990; Fanchi, 2018). Коришћењем лежишних симулатора омогућена је детаљна процена динамике протока флуида унутар лежишта. Дефинисањем различитих сценарија у лежишној симулацији добија се низ могућих исхода који помажу у доношењу одлуке и омогућава се ефикасније управљање лежиштем тј. избор оптималне стратегије производње која уједно треба да буде и економски најисплативија (Cossé, 1993; Schlumberger, 2014b). Неки од сценарија укључују бушење нових бушотина, напуштање постојећих, примену неке од метода за повећање искоришћења – секундарних или „EOR” метода, као и стимулационих метода.

Исходи односно резултати лежишне симулације, приказују се графички у функцији времена и могу се односити на читаво лежиште, бушотину, групу бушотина, регион, итд. (Schlumberger, 2014b). Најчешће променљиве које представљају излазни резултат симулације су:

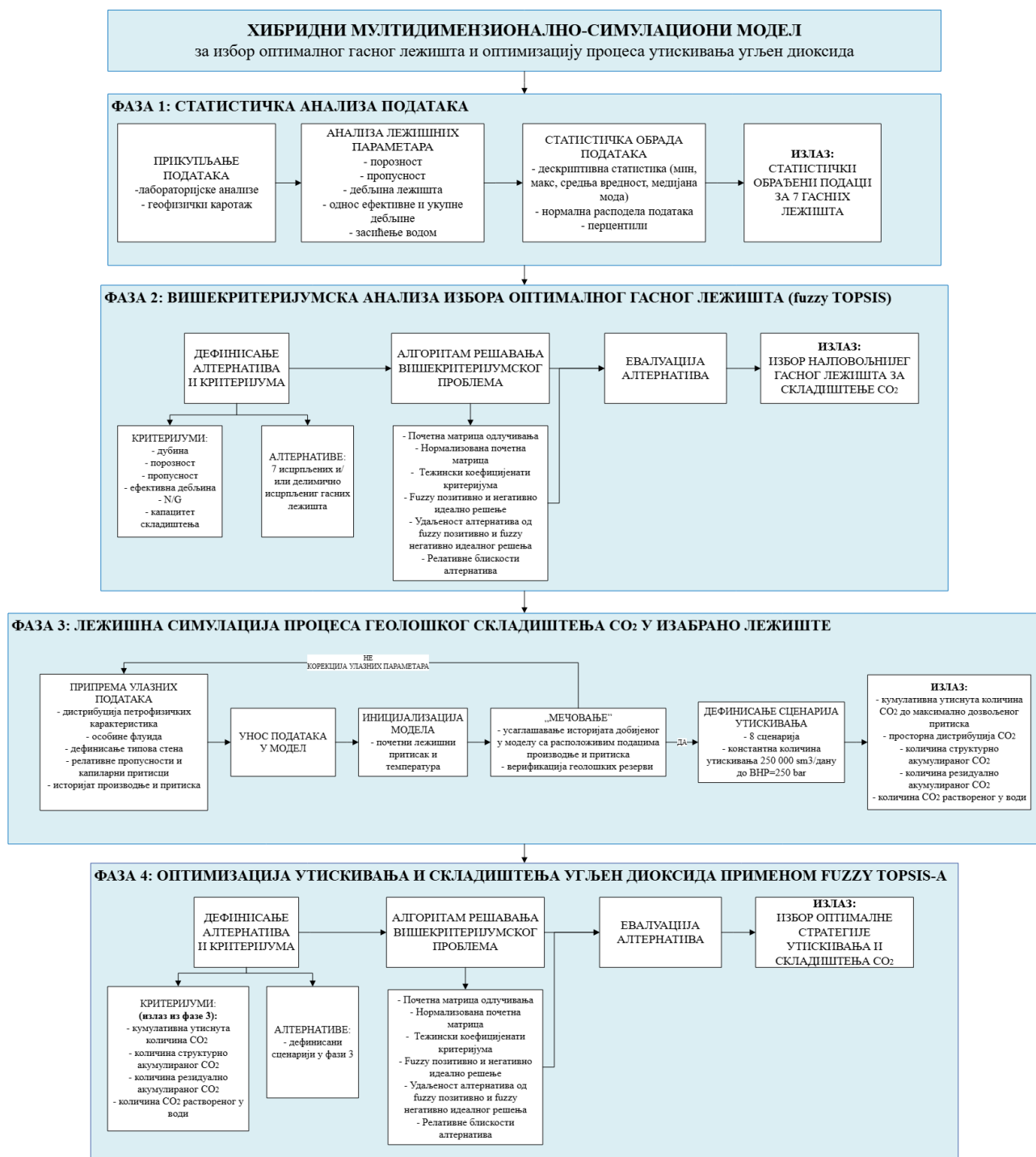
- просечни лежишни притисак у функцији времена;

- кумулативна производња флуида на дневном, недељном, месечном или годишњем нивоу;
- притисак на дну бушотине у функцији времена;
- однос произведених количина гаса и нафте (GOR) и нафте и воде (WOR);
- степен заводњавања, односно удео воде у производњи флуида;
- просторна дистрибуција засићења флуидима, $S_o(x, y, z, t)$, $S_g(x, y, z, t)$, $S_w(x, y, z, t)$.

6. ХИБРИДНИ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ИЗБОРА ГАСНОГ ЛЕЖИШТА ЗА СКЛАДИШТЕЊЕ УГЉЕН ДИОКСИДА

Предмет истраживања у докторској дисертацији је развој интегралног мултидимензионално-симулационог модела којим ће се извршити избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизација стратегије утискивања CO_2 у одабрано лежиште. Развијени модел представља систематску интеграцију fuzzy логике, вишекритеријумских метода и метода нумеричке симулације у области вештачке интелигенције чиме је омогућена свеобухватна анализа геолошког складиштења угљен диоксида. За селекцију лежишта примењен је модел мултидимензионалног одлучивања, а на основу резултата развијеног модела врши се избор оптималне опције утискивања и складиштења упоредном применом нумеричке симулације и fuzzy вишекритеријумског одлучивања. У оквиру докторске дисертације разматран је потенцијал складиштења угљен диоксида у седам исцрпљених и делимично исцрпљених гасних лежишта која се налазе у Србији.

На слици 6.1. дат је алгоритам развијеног мултидимензионално-симулационог модела.



Слика 6.1. Схематски приказ алгоритма мултидимензионално-симулационог модела

Прва фаза процене могућности и избора гасног лежишта као подземног складишта угљен диоксида подразумева прикупљање и детаљну анализу лежишних података од којих зависи успешност реализације процеса складиштења, пре свега са техничког и сигурносног аспекта. У овом кораку врши се статистичка анализа свих расположивих параметара кључних за карактеризацију потенцијалног лежишта за складиштење угљен диоксида који су прикупљени лабораторијским испитивањима језгрованог материјала и интерпретацијом резултата каротажних мерења изведеним на одређеном броју бушотина. Посебна пажња посвећена је параметрима који директно утичу на капацитет складиштења, инјективност и на крају најважније безбедност складиштења угљен диоксида и то су: порозност, пропусност, засићење лежишта водом, дебљина лежишта и односа ефективне и укупне дебљине лежишта. Сврха ове фазе је квантитативна и статистичка анализа лежишних параметара. Обухвата примену метода

дескриптивне статистике као што су аритметичка средина, медијана, мода, минималне и максималне вредности као и стандардна девијација. Такође, анализиране су нормалне расподеле параметара и перцентили. На основу резултата целокупно урађене статистичке анализе и дефинисаних опсега вредности у којима се крећу разматрани параметри, могуће је извршити поуздану процену тј. карактеризацију разматраних гасних лежишта за подземно складиштење CO₂.

Други корак, односно фаза, обухвата анализу критеријума који су од кључног значаја за избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида. У овој фази врши се вредновање анализираних гасних лежишта на основу скупа дефинисаних критеријума. Параметри (критеријуми) од којих зависи избор потенцијалне геолошке формације за складиштење угљен диоксида обухватају: тип лежишта (исцрпљено/делимично исцрпљено гасно лежиште), порозност, пропусност, дубину, ефективну дебљину колектор стена, однос укупне и ефективне дебљине лежишта и запремину лежишта, тј. капацитет складиштења. С обзиром на то да су разматрани критеријуми често међусобно конфликтни и да их прати одређен степен неизвесности и непрецизности, као и чињеница да сваки критеријум има одговарајућу тежину (значај) у процесу одлучивања, за њихову интеграцију и доношење адекватне одлуке примењује се fuzzy вишекритеријумска метода – fuzzy TOPSIS. Рангирање алтернатива врши се на основу вредности релативне блискости алтернатива fuzzy позитивно идеалном решењу, при чему су у процес одлучивања узети у обзир неодређеност, непрецизност, расплутост, недостатак и субјективност података применом fuzzy логики, тј. fuzzy бројева. Резултат ове фазе у креирању мултидимензионално-симулационог модела је евалуација и рангирање разматраних седам гасних лежишта, на основу чега је извршен избор оптималне геолошке формације за складиштење угљен диоксида. Изабрано лежиште користи се за даљу детаљну анализу у наредним фазама развоја модела.

Трећа фаза обухвата креирање симулационог модела најбоље рангиране алтернативе у циљу детаљне анализе процеса утискивања и дугорочног понашања угљен диоксида у лежишту. Ова фаза подразумева припрему улазних података, конструисање лежишног модела и дефинисање предиктивних сценарија утискивања. Улазни подаци лежишног модела обухватају петрофизичке карактеристике колектор стене, особине флуида, производни историјат, као и историјат промене притиска у лежишту. Петрофизичка анализа колектор стена, која је заснована на лабораторијским анализама и интерпретацији каротажних мерења, представља основу за дефинисање улазних параметара лежишног модела. Међутим, они су доступни само за одређени део лежишта (рађени на ограниченом броју бушотина) и с обзиром на хетерогеност лежишта и ограниченост улазних података, неопходно је извршити екстраполацију за цело лежиште. У циљу креирања симулационог модела који веродостојно описује лежиште, примењене су одговарајуће емпиријске зависности и корелације које омогућавају генерисање дистрибуције петрофизичких параметара на нивоу целог лежишта. На овај начин смањена је неизвесност улазних параметара и дефинисани су улазни подаци који реално описују понашање у лежишту. У циљу провере поузданости модела извршена је верификација усклађивањем расположивих историјских података са подацима добијеним у моделу чиме је потврђено да модел адекватно приказује реално понашање лежишта. Након верификације модела, приступа се предвиђању, односно дефинисању сценарија утискивања угљен диоксида у лежиште. За сваки сценарио дефинисана је константна дневна количина утискивања угљен диоксида од 250 000 sm³, уз ограничење да максимални притисак на дну бушотине не буде већи од 160 bar (почетни лежишни притисак је 158,16 bar) како би се сачувао интегритет лежишта и заштитних стена. Добијени резултати симулационог модела обухватају кумулативну количину утиснутог угљен диоксида, просторну и временску дистрибуцију угљен диоксида у лежишту, као и анализу доминантних механизма акумулирања угљен диоксида, односно понашање угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након престанка.

У четвртој, последњој фази, поново се приступа вишекритеријумској анализи применом fuzzy TOPSIS методе. Излазни параметри симулационог модела користе се као улазни параметри за мултидимензионални модел одлучивања. У овој фази врши се оптимизација стратегије утискивања угљен диоксида на основу резултата добијених у симулационом моделу. Досадашњи приступ оптимизације утискивања CO₂ углавном је подразумевао сценарио у којем би се могла утиснути максимална количина угљен диоксида. Међутим, овакав приступ је непотпун и нерелевантан, јер не укључује динамичке аспекте понашања угљен диоксида у лежишту, као ни механизме акумулирања који су пресудни за дугорочну стабилност и безбедност геолошког складиштења CO₂. На основу свега наведеног, у овој, последњој фази развоја мултидимензионално-симулационог модела примењен је проширени приступ који поред кумулативне количине утиснутог угљен диоксида укључује и различите механизме акумулирања који су дефинисани у склопу резултата симулационог модела. На тај начин је омогућено свеобухватно сагледавање процеса складиштења. Резултат ове фазе развоја модела је евалуација дефинисаних сценарија утискивања на основу чега се врши оптимизација процеса утискивања и складиштења угљен диоксида која представља компромисно решење између утиснуте количине и доминантних механизма акумулирања.

7. РЕЗУЛТАТИ ХИБРИДНОГ МУЛТИДИМЕНЗИОНАЛНО-СИМУЛАЦИОНОГ МОДЕЛА

У овом поглављу дати су резултати добијени применом развијеног интегралног мултидимензионално-симулационог модела за избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизацију процеса утискивања угљен диоксида у одабрано лежиште. Резултати су дати у потпоглављима и обухватају све фазе истраживања, почев од статистичке анализе петрофизичких параметара лежишта, избора оптималне геолошке формације за складиштење, симулационог лежишног модела изабране геолошке формације и на крају оптимизације процеса утискивања применом мултидимензионалног одлучивања.

7.1. Статистичка анализа петрофизичких параметара лежишта - потенцијалних складишта угљен диоксида

У овом потпоглављу дат је приказ основних карактеристика лежишта (НИС, 2022) означених као алтернативе A1, A2, A3, A4, A5, A6 и A7.

Гасна лежишта A1, A2, A3, A4 и A5 налазе се у средњем Банату у близини границе Србије и Румуније и припадају нафтно-гасном пољу „И”. У оквиру овог поља, на основу сеизмогеолошких интерпретација, потврђено је присуство пет гасних и једног нафтног лежишта. Лежишта су откривена унутар два генетски различита структурна облика. Интерпретацијом података добијених лабораторијским испитивањима и методама геофизичког каротажа одређене су дубине залегања, врсте колектор стена и петрофизичке карактеристике. На основу анализа језгара дефинисане су литостратиграфске особине колектора. Резервоар стене гасних лежишта стратиграфски припадају доњем понту, а литолошки састав представљен је ситнозрним карбонатним пешчарима са малим учешћем лапоровитих ламина и пескова.

Гасно лежиште A6 налази се у јужном Банату, удаљено је око 40 km североисточно од Београда и припада гасном пољу „Б”. Тестирањем и освајањем утврђено је да резервоар стене гасног лежишта стратиграфски припадају седиментима сармата, а према литолошком саставу су средњезрни пешчари.

Гасно лежиште A7 налази се на подручју јужне Бачке и припада нафтно-гасном пољу „С”. У оквиру овог поља, на основу сеизмогеолошких интерпретација, потврђено је присуство једног нафтног и два гасна лежишта. На основу анализе проба са сита, интерпретације и корелације података геофизичког каротажа одређене су литостратиграфске особине колектора. Резервоар стене представљене пешчарима доњег понта местимично су глиновито-лапоровите.

Гасна лежишта означена као алтернативе A6 и A7 карактерише недовољан број релевантних података, па је за дистрибуцију њихових петрофизичких параметара примењена Монте Карло симулација по аналогiji са лежиштима са сличним петрофизичким карактеристикама. Монте Карло метода у суштини представља математички модел где се изводе вишеструке поновљене симулације са различитим случајним улазним варијаблама које се генеришу према нормалној расподели вероватноће. Нумерички резултати Монте Карло симулације коришћени су за интерпретацију и статистичку анализу параметара гасних лежишта A6 и A7.

7.1.1. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта A1

Петрофизичка анализа колектор стена лежишта A1 извршена је на основу резултата лабораторијских испитивања узорака језгрованог материјала и интерпретације дијаграма каротажних мерења. Лабораторијским испитивањима процењене су вредности порозности (ϕ), засићења водом (S_w), хоризонталне (k_h) и вертикалне (k_v) апсолутне пропусности лежишта. Средње пондерисане вредности петрофизичких карактеристика колектор стене одређене лабораторијским испитивањима за гасно лежиште A1, дате су у табели 7.1.

Табела 7.1. Средње пондерисане вредности петрофизичких параметара лежишта А1

Петрофизички параметри	Укупан број података	Средња пондерисана вредност
Порозност, (ϕ), д.ј.	46 (4 бушотине)	0,284
Засићење водом, (S_w), д.ј.	29 (3 бушотине)	0,160
Хоризонтална пропусност, (k_h), 10^{-15} m^2	27 (3 бушотине)	230,6
Вертикална пропусност, (k_v), 10^{-15} m^2	7 (1 бушотина)	427

- Порозност:

Лабораторијски подаци порозности прикупљени су у четири бушотине (46 података), а на основу примене геофизичког каротажа (неутронски каротаж и каротаж густине), коришћени су резултати мерења порозности у укупно 19 бушотина. Разлика између добијених вредности порозности на основу геофизичког каротажа и лабораторијских мерења јесте што се каротажна мерења односе на ефективну порозност, а анализе језгара у лабораторији на укупну вредност порозности. За процену резерви користе се подаци добијени методама геофизичког каротажа, јер се мерења врше дуж целог канала бушотине на свим бушотинама овог лежишта.

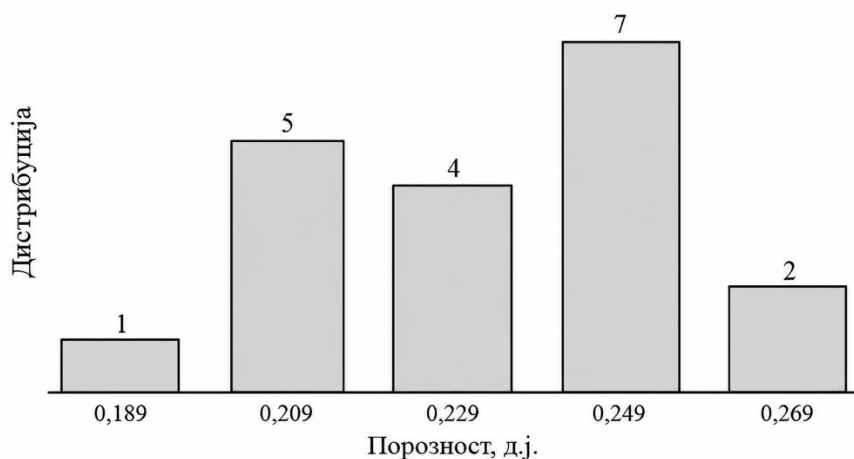
Статистичка анализа података добијених методама геофизичког каротажа дата је табеларно. На основу анализе података у табели 7.2. уочава се да је средња вредност ефективне порозности 22,5%, минимална 18,9% и максимална 25,2%. У табели 7.3. дати су перцентици: P10 износи 19,76 %, односно 10 % од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке 0,1976 д.ј., P50 износи 0,228 д.ј. и то представља медијану, 99% података има вредности мање или једнаке 25,182%. Слика 7.1. представља дистрибуцију доступних података, односно колико података има вредност у датом опсегу, док слика 7.2. приказује нормалну (Гаусову) расподелу, где μ представља аритметичку средину и σ стандардну девијацију.

Табела 7.2. Статистичка анализа порозности гасног лежишта А1

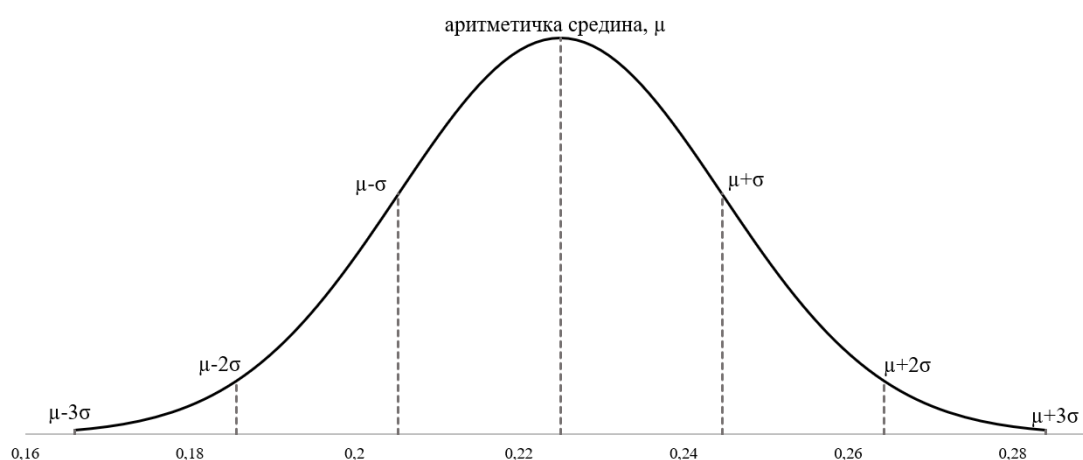
Укупан број података	19
Аритметичка средина, д.ј.	0,225
Медијана, д.ј.	0,228
Мода, д.ј.	0,228
Стандардна девијација	0,0197
Минимум, д.ј.	0,189
Максимум, д.ј.	0,252

Табела 7.3. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А1

P10, д.ј.	0,1976
P25, д.ј.	0,2075
P50, д.ј.	0,228
P75, д.ј.	0,240
P99, д.ј.	0,2518



Слика 7.1. Дистрибуција порозности гасног лежишта А1



Слика 7.2. Нормална расподела порозности гасног лежишта А1

- Пропусност:

Лабораторијски подаци о хоризонталној пропусности добијени су са три бушотине, укупно 27 језгара. С обзиром на то да ни једна метода геофизичког каротажа није примењена на овом лежишту за одређивање пропусности, на основу везе између порозности и пропусности мерених на узорцима језгрованог материјала, могуће је проценити пропусност дуж целог канала бушотине. На основу регресионе анализе и дефинисања зависности порозности и пропусности добијених лабораторијским испитивањима, екстраполацијом је процењена вредност пропусности у бушотинама у којима постоји континуална интерпретација порозности на основу геофизичког каротажа.

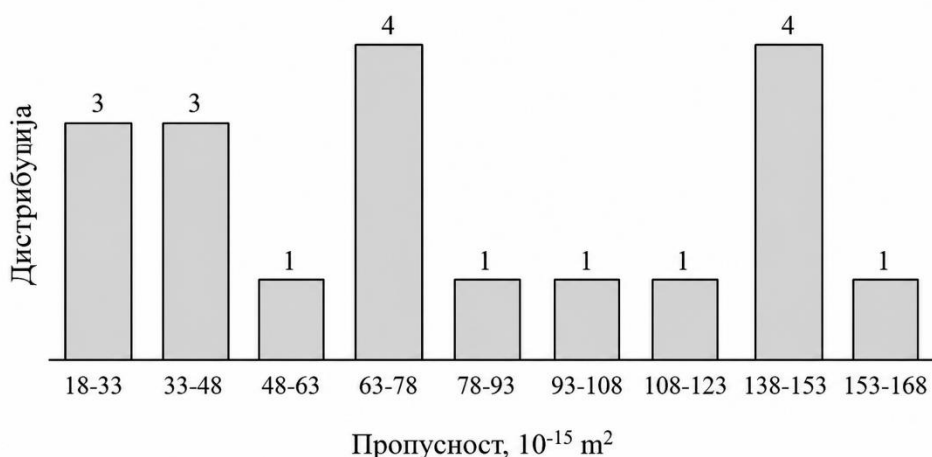
На основу анализе података, у табели 7.4. уочава се да средња вредност пропусности износи $83,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $19 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална пропусност износи $164,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. У табели 7.5. дати су перцентили: десети перцентил износи $24,76 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, односно 10% од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке тој вредности, P50 износи $69,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и то представља медијану, 99% података има вредности мање, или једнаке $162,186 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.3. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.4. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А1

Укупан број података	19
Аритметичка средина	$83,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Медијана	$69,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Мода	$145,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Стандардна девијација	48,9932
Минимум	$19,0 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Максимум	$164,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$

Табела 7.5. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А1

P10	$24,76 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$41,9 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$69,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$134 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$162,186 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.3. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А1

- Дебљина лежишта:

Интерпретацијом каротажних дијаграма, анализом јегрованог материјала, резултата испитивања и освајања бушотина, процењена је укупна дебљина колектор стене која се креће у распону од 2,4 до 19 m. Ефективна дебљина представља зону засићену гасом, тј. продуктивни интервал и одређује се тако што се од укупне дебљине формације одузме дебљина непродуктивне зоне. Вредности ефективне дебљине варирају од бушотине до бушотине и крећу се у опсегу 1,8–14,7 m. Статистичка анализа података ефективне дебљине прикупљених у 19 бушотина дата је у табели 7.6. У табели 7.7. дат је приказ перцентила где се уочава да је 50 % вредности ефективне дебљине мање од 9 m, 99% података има вредност једнаку или мању од 14,3 m, што значи да само 1% података има вредности које се крећу у распону од 14,3 до 14,7 m.

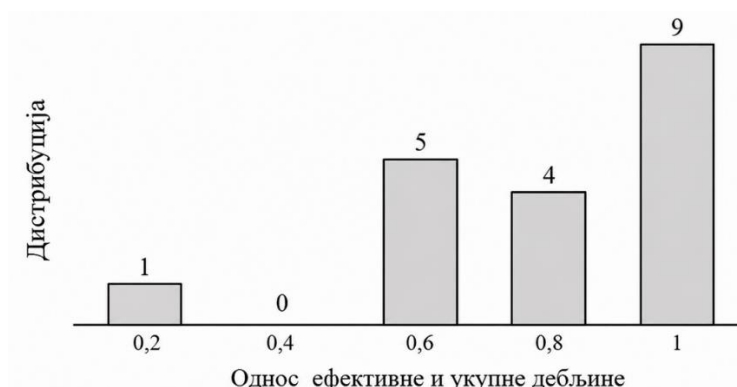
Табела 7.6. Статистичка анализа ефективне дебљине у гасном лежишту А1

Укупан број података	19
Аритметичка средина	8,682 m
Медијана	9 m
Стандардна девијација	3,1652
Минимум	1,8 m
Максимум	14,7 m

Табела 7.7. Вредности перцентила ефективне дебљине у гасном лежишту А1

P10	4,5 m
P25	7,2 m
P50	9,0 m
P75	10,6 m
P99	14,3 m

Однос ефективне и укупне дебљине („net to gros thickness” – N/G) лежишта варира у границама од 0,1017 до 1. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.4.



Слика 7.4. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А1

- Засићење водом:

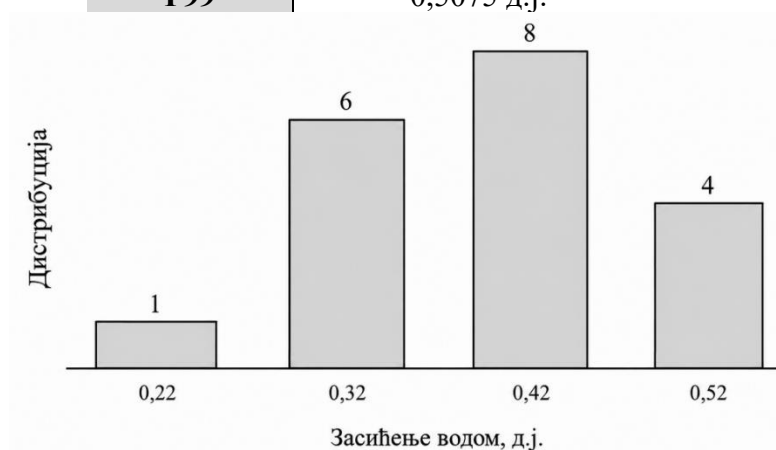
Засићење водом на основу геофизичког каротажа одређено је помоћу модела двојне воде. Статистичка анализа података добијених интерпретацијом каротажних мерења у 19 бушотина, дата је у табели 7.8. Аритметичка средина засићења водом у овом лежишту је 35,31 %, минимална вредност износи 21,2% док је максимална 51,7%. Табела 7.9. даје приказ вредности перцентила: десет процената података (P10) има вредности засићења водом које су једнаке или мање од 0,2694 д.ј., седамдесет пети перцентил износи 0,402 д.ј., док 99% података има вредности мање или једнаке 50,75%. На слици 7.5. дат је приказ дистрибуције засићења водом.

Табела 7.8. Статистичка анализа засићења водом у гасном лежишту А1

Укупан број података	19
Аритметичка средина	0,3531 д.ј.
Медијана	0,3520 д.ј.
Стандардна девијација	0,0761
Минимум	0,212 д.ј.
Максимум	0,517 д.ј.

Табела 7.9. Вредности перцентила засићења водом у гасном лежишту А1

P10	0,2694 д.ј.
P25	0,305 д.ј.
P50	0,352 д.ј.
P75	0,402 д.ј.
P99	0,5075 д.ј.



Слика 7.5. Дистрибуција засићења водом лежишта А1

7.1.2. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А2

Петрофизичка анализа колектор стена гасног лежишта А2 извршена је на основу интерпретације података добијених применом метода геофизичког каротажа у четири бушотине. Лабораторијска испитивања на узорцима језгара нису рађена за ово лежиште.

- Порозност:

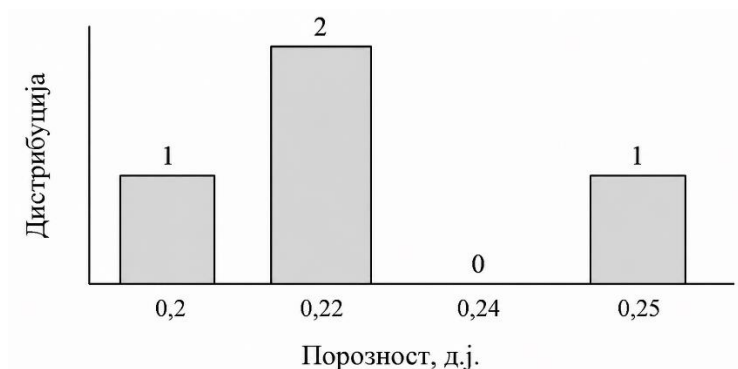
На основу доступних података добијених методама геофизичког каротажа урађена је статистичка анализа, чији су резултати дати у табели 7.10. Средња вредност ефективне порозности је 21,03%, минимална 19% и максимална 24,4%. Табела 7.11. даје приказ вредности перцентила. Десети перцентил (P10) износи 19,36%, односно 10% од укупног броја доступних података има вредности које су мање или једнаке 0,1936 д.ј., педесети перцентил (P50) износи 0,2035 д.ј. и то представља медијану, 99 % података има вредности мање или једнаке 24,28%. Слика 7.6. представља дистрибуцију доступних података, односно колико података има вредност у датом опсегу, док слика 7.7. приказује нормалну расподелу.

Табела 7.10. Статистичка анализа порозности у гасном лежишту А2

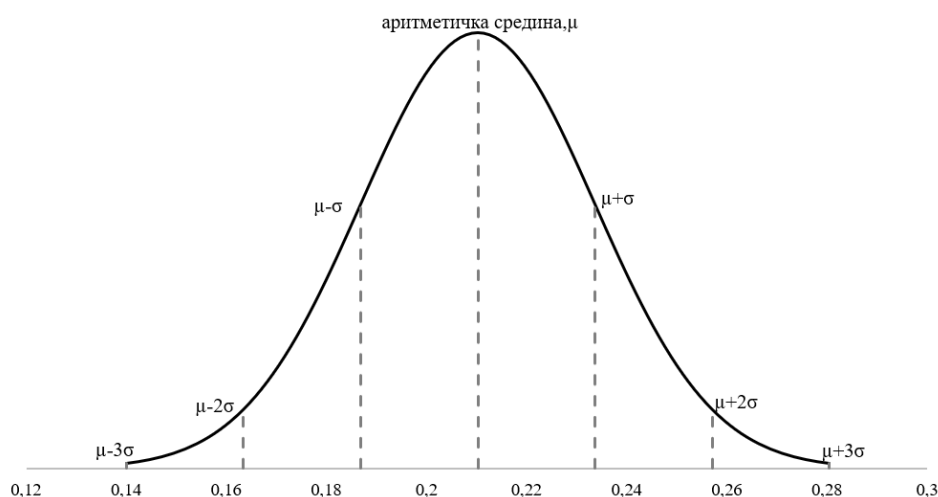
Укупан број података	4
Аритметичка средина, д.ј.	0,2103
Медијана, д.ј.	0,2035
Стандардна девијација	0,0234
Минимум, д.ј.	0,19
Максимум, д.ј.	0,244

Табела 7.11. Вредности перцентила порозности у гасном лежишту А2

P10, д.ј.	0,1936
P25, д.ј.	0,199
P50, д.ј.	0,2035
P75, д.ј.	0,2148
P99, д.ј.	0,2428



Слика 7.6. Дистрибуција података порозности гасног лежишта А2



Слика 7.7. Нормална расподела порозности гасног лежишта А2

- Пропусност:

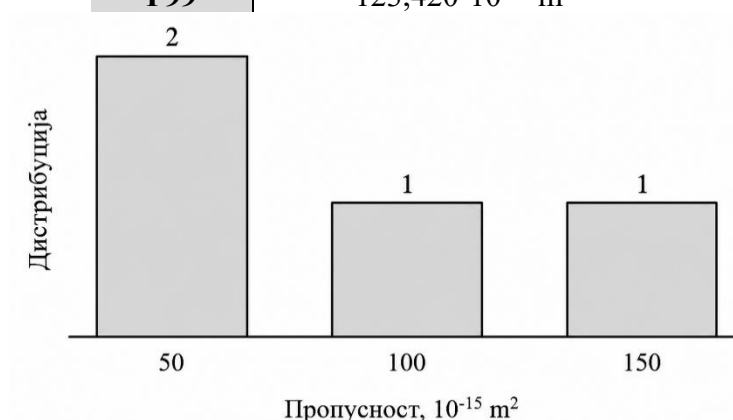
На основу доступних података мерења геофизичког каротажа која су рађена у четири бушотине, извршена је статистичка анализа приказана у табели 7.12. Средња вредност пропусности износи $73,928 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $30,81 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална пропусност износи $124,28 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. У табели 7.13. дати су перцентици: десети перцентил износи $35,067 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, односно 10% од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке тој вредности, P50 износи $70,31 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и то представља медијану, док 99% података има вредности мање или једнаке $123,420 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.8. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.12. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А2

Укупан број података	4
Аритметичка средина, 10^{-15} m^2	73,928
Медијана, 10^{-15} m^2	70,31
Стандардна девијација	43,596
Минимум, 10^{-15} m^2	30,81
Максимум, 10^{-15} m^2	124,28

Табела 7.13. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А2

P10	$35,067 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$41,4523 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$70,31 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$102,785 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$123,420 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.8. Дистрибуција вредности пропусности гасног лежишта А2

- Дебљина лежишта:

Интерпретацијом каротажних дијаграма процењена је укупна дебљина колектор стене која се креће у распону од 1 до 15,7 m у зависности од бушотине. Ефективна дебљина представља зону засићену гасом, тј. продуктивни интервал, и одређује се тако што се од укупне дебљине формације одузме дебљина непродуктивне зоне. Вредности ефективне дебљине крећу се у границама 3–11,2 m. Статистичка анализа података ефективне дебљине добијених мерењима у 4 бушотине дата је у табели 7.14. У табели 7.15. дат је приказ перцентила где се уочава да је 50% вредности ефективне дебљине мање од 5,838 m, 99% података има вредност једнаку или мању од 11,025 m.

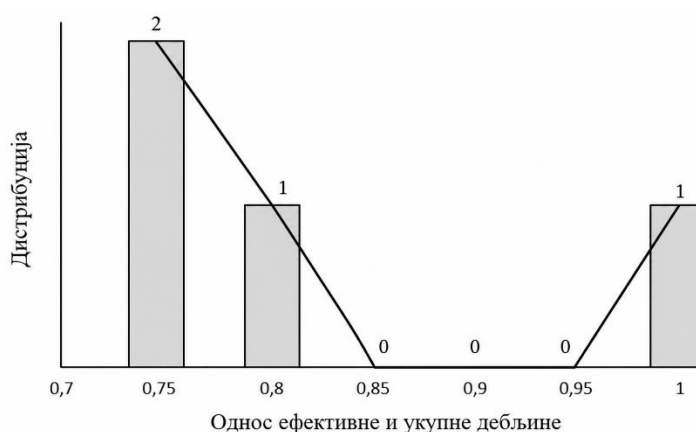
Табела 7.14. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А2

Укупан број података	4
Аритметичка средина, m	6,456
Медијана, m	5,838
Стандардна девијација	3,489
Минимум, m	3,0
Максимум, m	11,2

Табела 7.15. Вредности перценти́ла ефективне дебљине гасног лежишта А2

P10	3,572 m
P25	4,445 m
P50	5,838 m
P75	7,848 m
P99	11,025 m

Однос ефективне и укупне дебљине лежишта варира у границама од 0,711 до 0,964. Дистрибуција вредности дата је на слици 7.9.



Слика 7.9. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А2

- Засићење водом:

На основу интерпретације доступних података добијених методама геофизичког каротажа урађена је статистичка анализа. Средња вредност засићења водом у гасном лежишту А2 износи 48,2%, минимална 35,9% и максимална вредност је 59,9% (табела 7.16.).

Табела 7.16. Статистичка анализа засићења водом у гасном лежишту А2

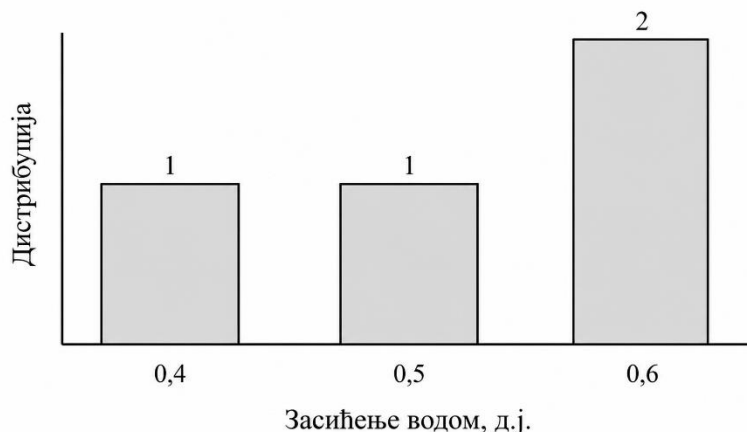
Укупан број података	4
Аритметичка средина, д.ј.	0,482
Медијана, д.ј.	0,485
Стандардна девијација	0,103
Минимум, д.ј.	0,359
Максимум, д.ј.	0,599

Табела 7.17. даје приказ вредности перценти́ла где се уочава да је вредност десетог перценти́ла (P10) 38,5%, седамдесет петог (P75) 54,1%, док је вредност деведесет деветог перценти́ла (P99) 59,7%.

Табела 7.17. Вредности перценти́ла засићења водом у гасном лежишту А2

P10	0,385 д.ј.
P25	0,425 д.ј.
P50	0,485 д.ј.
P75	0,541 д.ј.
P99	0,597 д.ј.

На слици 7.10. дат је приказ дистрибуције засићења водом.



Слика 7.10. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А2

7.1.3. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А3

Петрофизичка анализа колектор стена гасног лежишта А3 извршена је на основу резултата лабораторијских испитивања на узорцима језгрованог материјала и интерпретације дијаграма каротажних мерења. Лабораторијским испитивањима процењене су вредности порозности, засићења водом, хоризонталне и вертикалне апсолутне пропусности лежишта. Средње пондерисане вредности петрофизичких карактеристика колектор стене одређене лабораторијским методама за гасно лежиште А3, приказане су у табели 7.18.

Табела 7.18. Средње пондерисане вредности петрофизичких параметара лежишта А3

Петрофизички параметри	Укупан број података	Средња пондерисана вредност
Порозност, (ϕ), д.ј.	82 (4 бушотине)	0,241
Засићење водом, (S_w), д.ј.	36 (3 бушотине)	0,19
Хоризонтална пропусност, (k_h), 10^{-15} m^2	51 (4 бушотине)	71,6
Вертикална пропусност, (k_v), 10^{-15} m^2	31 (3 бушотине)	53,9

- Порозност:

Лабораторијски подаци о порозности прикупљени су у четири бушотине, укупно 82 податка, и средња пондерисана вредност укупне порозности износи 0,241 д.ј. Ефективна вредност порозности која се користи за прорачун резерви добијена је на основу резултата мерења методама геофизичког каротажа (каротаж густине и неутронски каротаж) у укупно девет бушотина.

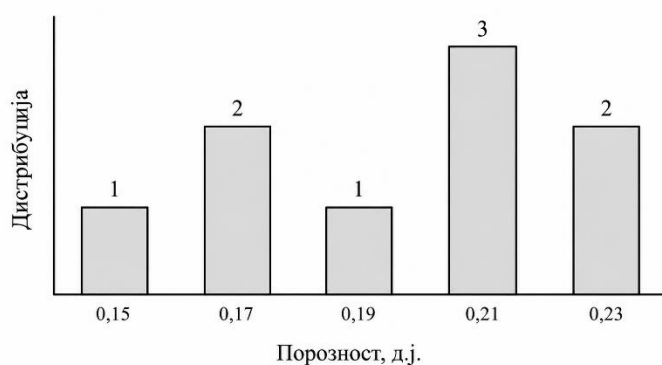
Статистичка анализа података добијених интерпретацијом геофизичког каротажног мерења дата је у табели 7.19. Средња вредност ефективне порозности износи 18,71%, док су минимална и максимална вредност 11,8% и 22,3%. Одступање доступних података од аритметичке средине (стандардна девијација) износи 0,033. Вредности перцентила дате су у табели 7.20. На слици 7.11. представљена је дистрибуција података, док слика 7.12. приказује нормалну расподелу порозности.

Табела 7.19. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта А3

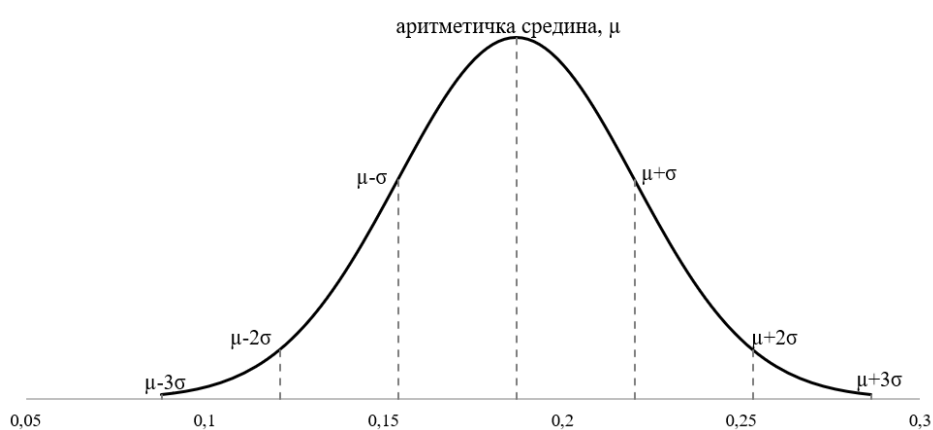
Укупан број података	9
Аритметичка средина, д.ј.	0,1871
Медијана, д.ј.	0,204
Мода, д.ј.	0,204
Стандардна девијација	0,033
Минимум, д.ј.	0,118
Максимум, д.ј.	0,223

Табела 7.20. Вредности перцентиља порозности гасног лежишта А3

P10	0,1524 д.ј.
P25	0,167 д.ј.
P50	0,204 д.ј.
P75	0,204 д.ј.
P99	0,2223 д.ј.



Слика 7.11. Дистрибуција порозности гасног лежишта А3



Слика 7.12. Нормална расподела порозности гасног лежишта А3

- Пропусност:

Лабораторијске вредности хоризонталне и вертикалне пропусности дате су у табели 7.18. На основу вредности порозности добијених интерпретацијом каротажних дијаграма, пропусност дуж целог канала бушотине одређује се екстраполацијом зависности порозности и пропусности мерених на узорцима језгрованог материјала.

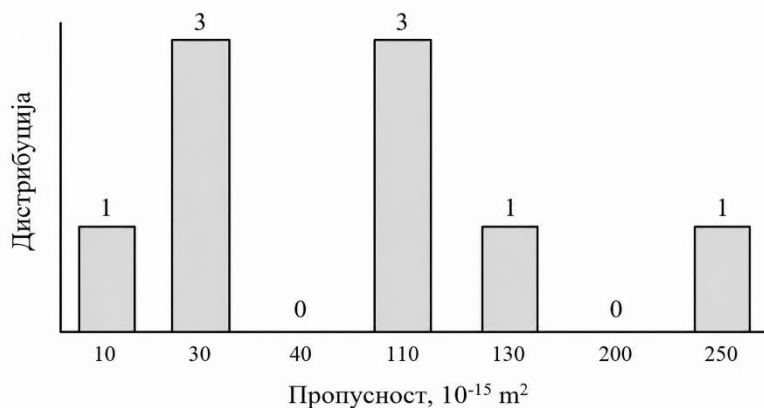
На основу анализе података у табели 7.21. примећује се да средња вредност пропусности износи $74,132 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $0,944 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална пропусност износи $245,95 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. У табели 7.22. дати су перцентили: десети перцентил износи $10,765 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, односно 10% од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке тој вредности, P50 износи $45,46 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и то представља медијану, 99% података има вредности мање или једнаке $235,604 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.13. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.21. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А3

Укупан број података	9
Аритметичка средина, 10^{-15} m^2	74,132
Медијана, 10^{-15} m^2	45,46
Стандардна девијација	77,483
Минимум, 10^{-15} m^2	0,944
Максимум, 10^{-15} m^2	245,95

Табела 7.22. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А3

P10	$10,765 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$21 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$45,46 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$109,19 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$235,604 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.13. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А3

- Дебљина лежишта:

Интерпретацијом каротажних дијаграма, анализом јегрованог материјала, резултата испитивања и освајања бушотина, процењена је укупна дебљина колектор стена која се креће у распону од 3,7 до 23,7 m. Зона засићена гасом, тј. ефективна дебљина варира од бушотине до бушотине и креће се у распону 4,7–13,5 m. Статистичка анализа података ефективне дебљине за 9 бушотина дата је у табели 7.23. У табели 7.24. дат је приказ перцентила где се уочава да је 50% вредности ефективне дебљине мање од 8,44 m, 99% узорака има вредност једнаку или мању од 13,334 m.

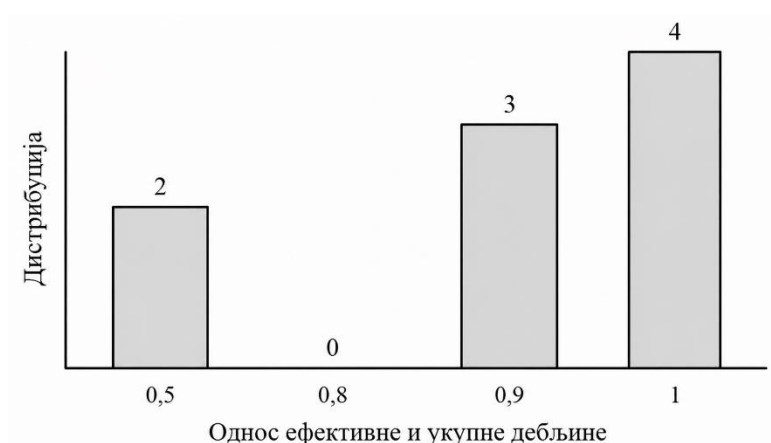
Табела 7.23. Статистичка анализа података ефективне дебљине лежишта А3

Укупан број података	9
Аритметичка средина	8,47 m
Медијана	8,440 m
Стандардна девијација	2,899
Минимум	4,7 m
Максимум	13,45 m

Табела 7.24. Вредности перцентила ефективне дебљине лежишта А3

P10	5,356 m
P25	6,33 m
P50	8,44 m
P75	9,5 m
P99	13,334 m

Однос ефективне и укупне дебљине лежишта варира у границама од 0,401 до 0,975. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.14.



Слика 7.14. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине лежишта А3

- Засићење водом:

Засићење водом у лежишту А3 одређено је у лабораторији (вредност је у табели 7.18.) и на основу мерења геофизичког каротажа. Статистичка анализа засићења водом на основу интерпретације података добијених моделом двојне воде за девет бушотина дата је у табели 7.25. Средња вредност је 49%, минимална 34,1%, док је максимална вредност засићења водом 58,1%.

Табела 7.25. Статистичка анализа података засићења водом гасног лежишта А3

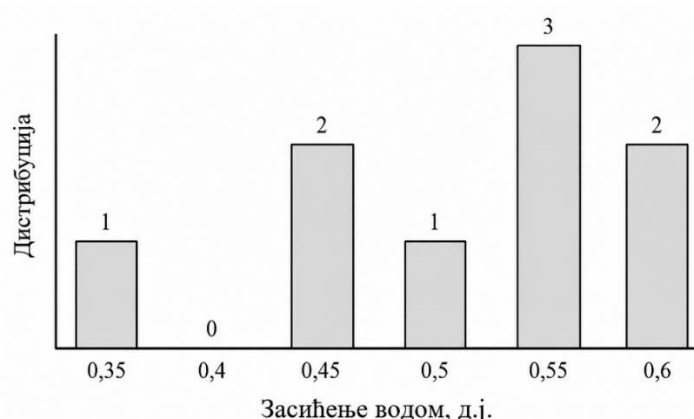
Укупан број података	9
Аритметичка средина	0,490 д.ј.
Медијана	0,527 д.ј.
Стандардна девијација	0,084
Минимум	0,341 д.ј.
Максимум	0,581 д.ј.

У табели 7.26. приказане су вредности перцентила. Уочава се да је 10% вредности засићења водом мање или једнако 0,399 д.ј., 50% вредности је мање или једнако 0,527 д.ј., док је 99% доступних података мање или једнако вредности од 0,581 д.ј.

Табела 7.26. Вредности перцентила засићења водом гасног лежишта А3

P10	0,399 д.ј.
P25	0,421 д.ј.
P50	0,527 д.ј.
P75	0,546 д.ј.
P99	0,581 д.ј.

На слици 7.15. дат је приказ дистрибуције засићења водом.



Слика 7.15. Дистрибуција засићења водом у лежишту А3

7.1.4. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А4

Петрофизичка анализа колектор стена гасног лежишта А4 извршена је на основу интерпретације података добијених применом метода геофизичког каротажа у седам бушотина. Лабораторијска испитивања на узорцима језгара нису рађена за ово лежиште.

- Порозност:

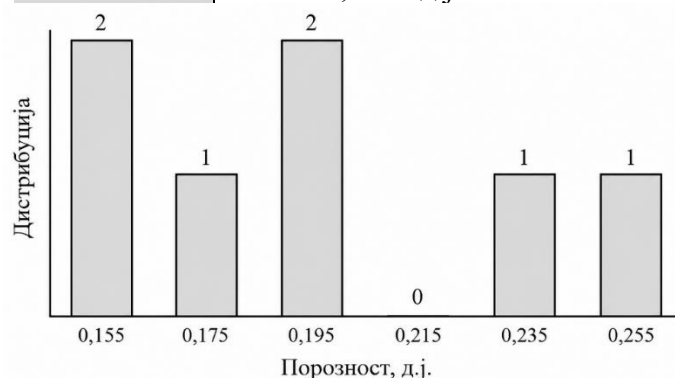
Одређивање порозности извршено је комбинацијом резултата каротажа густине и неутронског каротажа. На основу доступних података извршена је статистичка анализа, чији су резултати дати у табели 7.27. Средња вредност ефективне порозности је 18,6%, минимална 12,5% и максимална 24,3%. У табели 7.28. приказани су перцентици: P10 износи 14,12%, односно 10 % од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке 0,1412 д.ј., P50 износи 0,191 д.ј. и то представља медијану, 99% података има вредности мање или једнаке 24,24%. Слика 7.16. представља дистрибуцију доступних података, односно колико узорака има вредност у датом опсегу, док слика 7.17. приказује нормалну расподелу.

Табела 7.27. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта А4

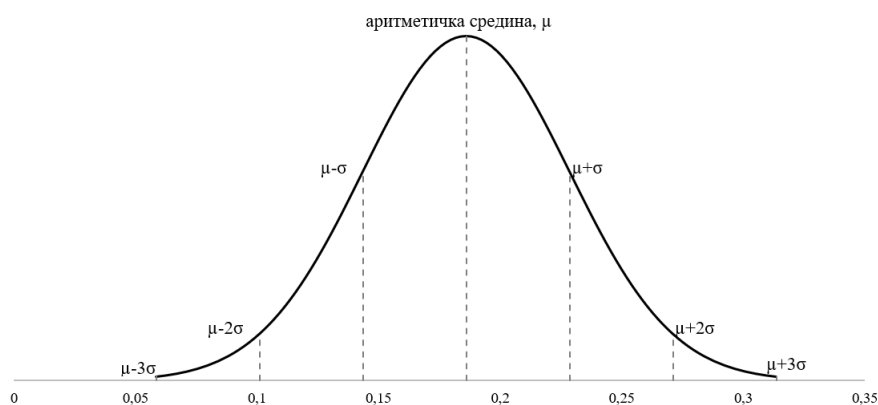
Укупан број узорака	7
Аритметичка средина, д.ј.	0,186
Медијана, д.ј.	0,191
Стандардна девијација	0,043
Минимум, д.ј.	0,125
Максимум, д.ј.	0,243

Табела 7.28. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А4

P10	0,1412 д.ј.
P25	0,1585 д.ј.
P50	0,191 д.ј.
P75	0,213 д.ј.
P99	0,2424 д.ј.



Слика 7.16. Дистрибуција вредности порозности гасног лежишта А4



Слика 7.17. Нормална расподела порозности гасног лежишта А4

- Пропусност:

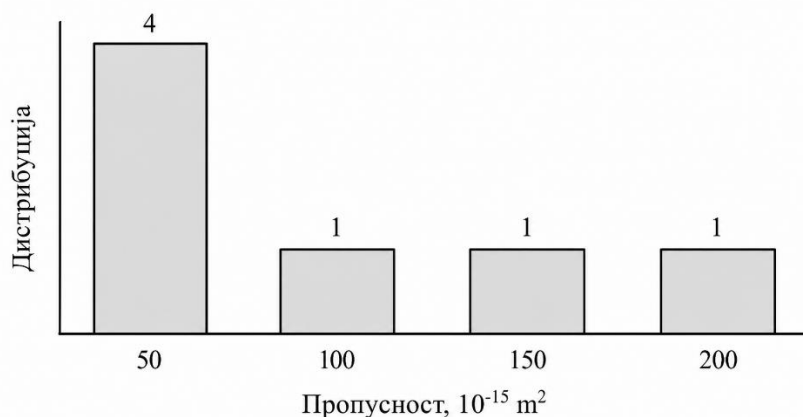
На основу доступних података мерења геофизичког каротажа која су вршена у седам бушотина, урађена је статистичка анализа која је приказана у табели 7.29. Средња вредност пропусности износи $62,829 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $0,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална пропусност износи $167,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. У табели 7.30. дати су перцентили: десети перцентил износи $8,06 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, односно 10% од укупног броја података има вредности које су мање или једнаке тој вредности, P50 износи $26,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и то представља медијану, док 99% података има вредности мање или једнаке $165,687 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.18. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.29. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А4

Укупан број узорака	7
Аритметичка средина, 10^{-15} m^2	62,829
Медијана, 10^{-15} m^2	26,1
Стандардна девијација	66,294
Минимум, 10^{-15} m^2	0,2
Максимум, 10^{-15} m^2	167,3

Табела 7.30. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А4

P10	$8,06 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$17,73 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$26,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$105,37 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$165,687 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.18. Дистрибуција вредности пропусности гасног лежишта А4

- Дебљина лежишта:

Укупна дебљина колектор стене процењена интерпретацијом каротажних дијаграма креће се у опсегу од 12,4 до 27 m. Дебљина продуктивне зоне је 0,9–6,24 m. Статистичка анализа података ефективне дебљине за седам бушотина дата је у табели 7.31. Табела 7.32. даје приказ перцентила где се уочава да је 50% вредности ефективне дебљине мање од 2,306 m, а 99% узорака има вредност једнаку или мању од 6,121 m.

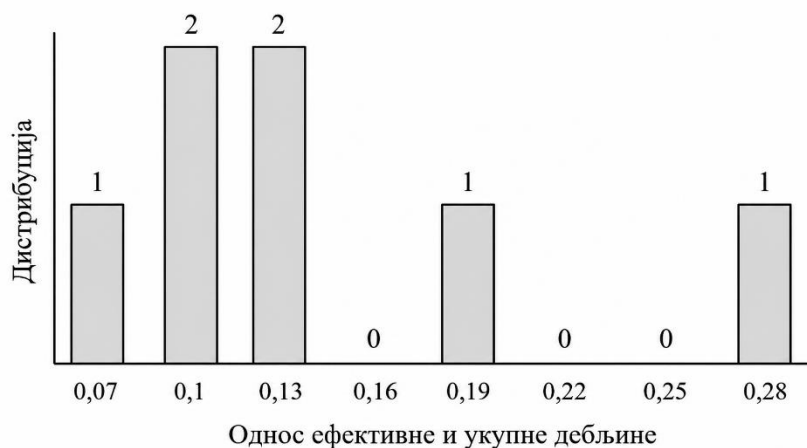
Табела 7.31. Статистичка анализа ефективне дебљине лежишта А4

Укупан број узорака	7
Аритметичка средина, m	2,772
Медијана, m	2,306
Стандардна девијација	1,856
Минимум, m	0,9
Максимум, m	6,24

Табела 7.32. Вредности перцентила ефективне дебљине лежишта А4

P10	1,248 m
P25	1,64 m
P50	2,306 m
P75	3,34 m
P99	6,121 m

Однос ефективне и укупне дебљине лежишта варира у границама од 0,065 до 0,255. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.19.



Слика 7.19. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине лежишта А4

- Засићење водом:

На основу интерпретације података добијених каротажним мерењима урађена је статистичка анализа (табела 7.33.). Средња вредност засићења водом у гасном лежишту А4 износи 55,2%, минимална 51,3% и максимална вредност је 59,3%.

Табела 7.33. Статистичка анализа вредности засићења водом у гасном лежишту А4

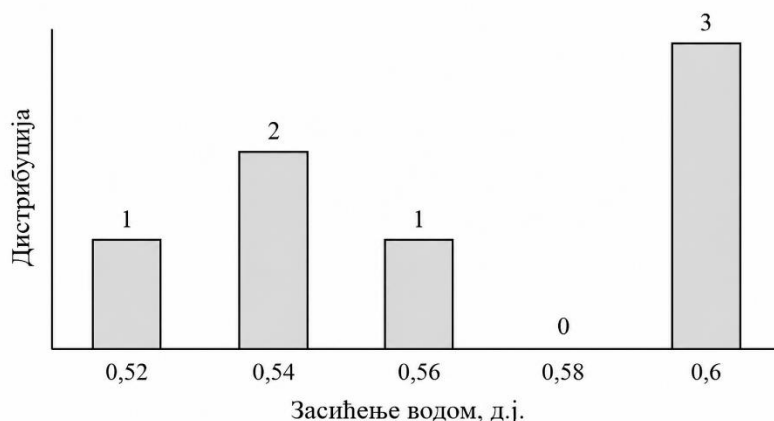
Укупан број података	7
Аритметичка средина, д.ј.	0,552
Медијана, д.ј.	0,543
Стандардна девијација	0,033
Минимум, д.ј.	0,513
Максимум, д.ј.	0,593

Табела 7.34. даје приказ вредности перцентила где се уочава да је вредност десетог перцентила (P10) 38,5%, седамдесет петог (P75) 54,1%, док је вредност деведесет деветог перцентила (P99) 59,7%.

Табела 7.34. Вредности перцентила засићења водом у гасном лежишту А4

P10	0,385 д.ј.
P25	0,425 д.ј.
P50	0,485 д.ј.
P75	0,541 д.ј.
P99	0,597 д.ј.

На слици 7.20. дат је приказ дистрибуције засићења водом.



Слика 7.20. Дистрибуција засићења водом у лежишту А4

7.1.5. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А5

За гасно лежиште А5 нису рађена лабораторијска испитивања на узорцима језгрованог материјала. За процену петрофизичких параметара коришћени су резултати интерпретације каротажних мерења која су рађена у 12 бушотина.

- Порозност:

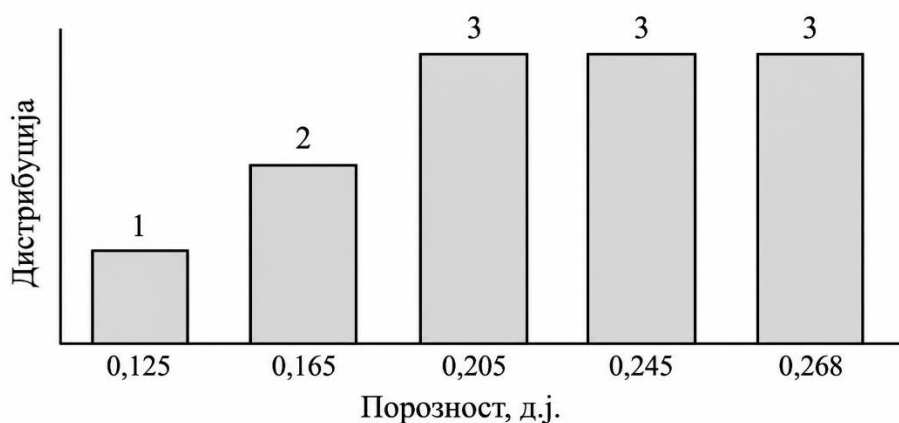
На основу доступних података добијених методама геофизичког каротажа урађена је статистичка анализа чији су резултати дати у табели 7.35. Средња вредност ефективне порозности је 20,46%, минимална 12,3% и максимална 27,2%. Табела 7.36. приказује вредности перцентила. Десети перцентил (P10) износи 12,97 %, односно 10 % укупног броја доступних података има вредности које су мање или једнаке 0,1297 д.ј., педесети перцентил (P50) износи 0,2045 д.ј. и то представља медијану, а 99% података има вредности мање или једнаке 27,15%. Слика 7.21. представља дистрибуцију доступних података, док слика 7.22. приказује нормалну расподелу.

Табела 7.35. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта А5

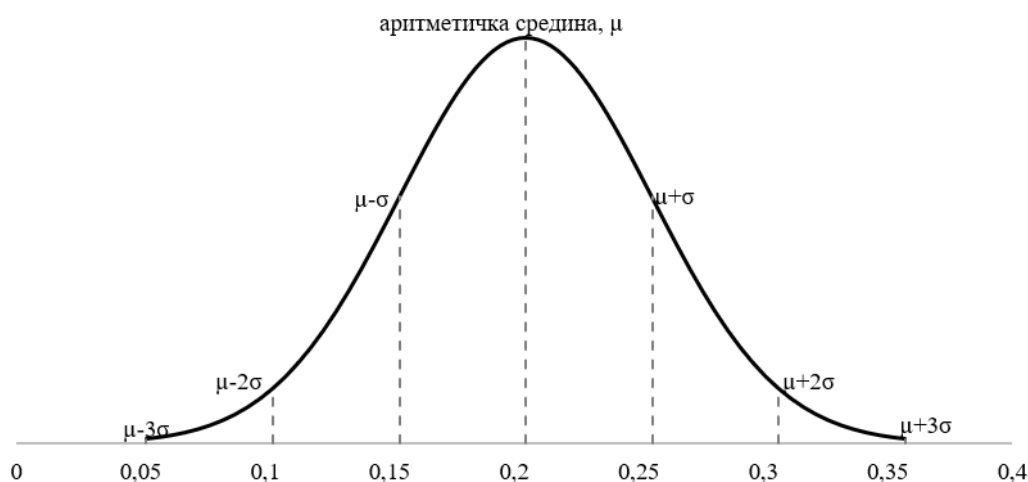
Укупан број података	12
Аритметичка средина, д.ј.	0,2046
Медијана, д.ј.	0,2045
Мода, д.ј.	0,199
Минимум, д.ј.	0,123
Максимум, д.ј.	0,272
Стандардна девијација	0,0508

Табела 7.36. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А5

P10	0,1297 д.ј.
P25	0,1818 д.ј.
P50	0,2045 д.ј.
P75	0,242 д.ј.
P99	0,2715 д.ј.



Слика 7.21. Дистрибуција вредности порозности гасног лежишта А5



Слика 7.22. Нормална расподела порозности гасног лежишта А5

- Пропусност:

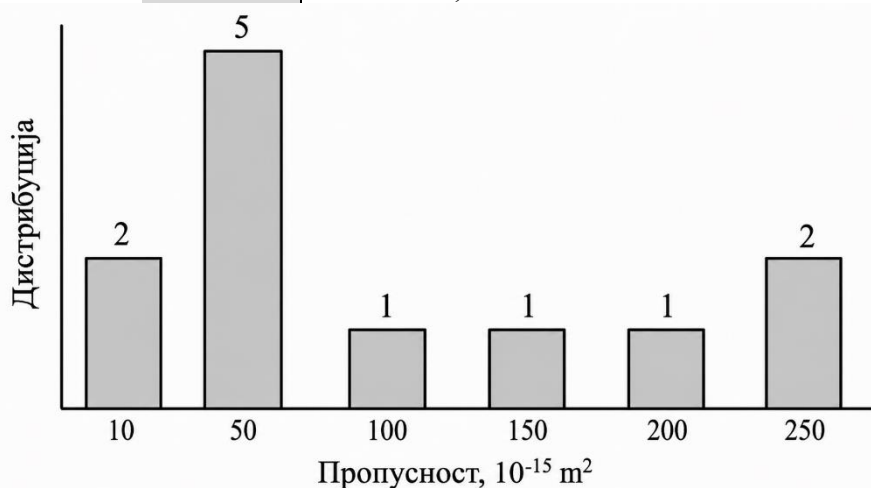
На основу доступних података геофизичког каротажа који је рађен у дванаест бушотина, извршена је статистичка анализа приказана у табели 7.37. Средња вредност пропусности је $83,011 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $0,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална пропусност износи $247,55 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. У табели 7.38. дати су перцентили: десети перцентил износи $9,68 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, P50 износи $48,255 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и 99% података има вредности мање или једнаке $242,8673 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.23. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.37. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А5

Укупан број података	12
Аритметичка средина, 10^{-15} m^2	83,011
Медијана, 10^{-15} m^2	48,255
Стандардна девијација	85,067
Минимум, 10^{-15} m^2	0,5
Максимум, 10^{-15} m^2	247,55

Табела 7.38. Вредности перцентила пропусности гасног лежишта А5

P10	$9,68 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$21,2825 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$48,255 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$124,0825 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$242,8673 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.23. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А5

- **Дебљина лежишта:**

Укупна дебљина колектор стене процењена интерпретацијом каротажних дијаграма креће се у опсегу од 2,8 до 13,2 m. Ефективна дебљина лежишта је у границама од 0,19 до 5,21 m. Статистичка анализа података ефективне дебљине за 12 бушотина дата је у табели 7.39. Табела 7.40. приказује перцентиле, где се уочава да је 50% вредности ефективне дебљине мање од 2,4747 m, а 99% узорака има вредност једнаку или мању од 5,1187 m.

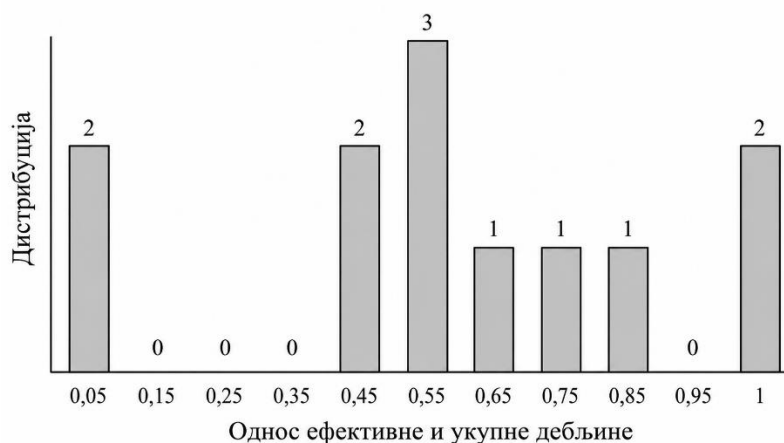
Табела 7.39. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А5

Укупан број података	12
Аритметичка средина, m	2,526
Медијана, m	2,475
Стандардна девијација	1,550
Минимум, m	0,19
Максимум, m	5,21

Табела 7.40. Вредности перцентила ефективне дебљине гасног лежишта А5

P10	0,3085 m
P25	1,7763 m
P50	2,4747 m
P75	3,2183 m
P99	5,1187 m

Однос ефективне и укупне дебљине лежишта варира у границама од 0,03 до 1. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.24.



Слика 7.24. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А5

- Засићење водом:

Статистичка анализа (табела 7.41.) урађена је на основу интерпретације података добијених каротажним мерењима. Средња вредност засићења водом у гасном лежишту А5 износи 49,1 %, минимална је 32% и максимална вредност је 59%.

Табела 7.41. Статистичка анализа вредности засићења водом гасног лежишта А5

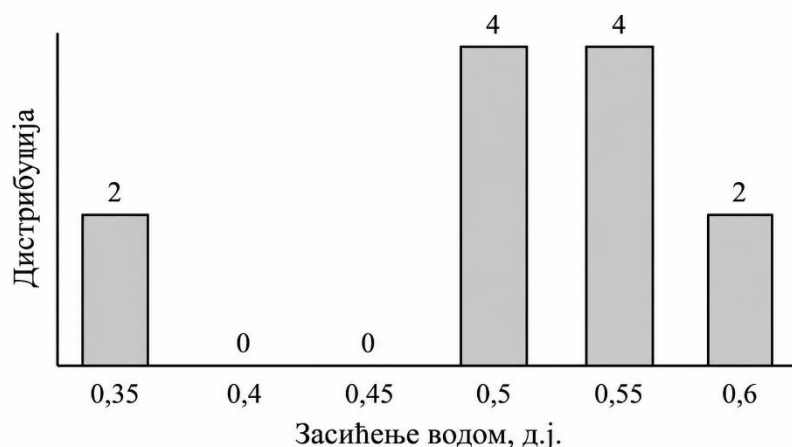
Укупан број података	12
Аритметичка средина, д.ј.	0,491
Медијана, д.ј.	0,514
Стандардна девијација	0,089
Минимум, д.ј.	0,32
Максимум, д.ј.	0,59

Табела 7.42. приказује вредности перцентиала где се уочава да је вредност десетог перцентиала (P10) 33,5%, седамдесет петог (P75) 54%, док је вредност деведесетог перцентиала (P99) 59%.

Табела 7.42. Вредности перцентиала засићења водом гасног лежишта А5

P10	0,335 д.ј.
P25	0,467 д.ј.
P50	0,514 д.ј.
P75	0,540 д.ј.
P99	0,590 д.ј.

На слици 7.25. дат је приказ дистрибуције засићења водом.



Слика 7.25. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А5

7.1.6. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А6

Петрофизички параметри колектор стена гасног лежишта А6 добијени су интерпретацијом геофизичких каротажних мерења у једној бушотини и дати су у табели 7.43. Пропусност је одређена на основу интерпретације резултата хидродинамичких мерења, односно методама пораста и пада притиска.

Табела 7.43. Вредности петрофизичких параметара гасног лежишта А6

Укупна дебљина, m	12,8
Ефективна дебљина, m	4,7
Порозност, д.ј.	0,291
Засићење водом, д.ј.	0,12
Пропусност, 10^{-15} m^2	340

С обзиром на недовољан број релевантних података, за дистрибуцију петрофизичких параметара као што су порозност, пропусност, дебљина лежишта и засићење водом, примењена је Монте Карло симулација по аналогији са лежиштима са сличним петрофизичким карактеристикама. На основу случајних улазних варијабли које су генерисане према нормалној расподели вероватноће, извршено је петсто поновљених Монте Карло симулација. Исходи симулације, тј. нумерички резултати коришћени су за интерпретацију и статистичку анализу параметара гасног лежишта А6.

- Порозност:

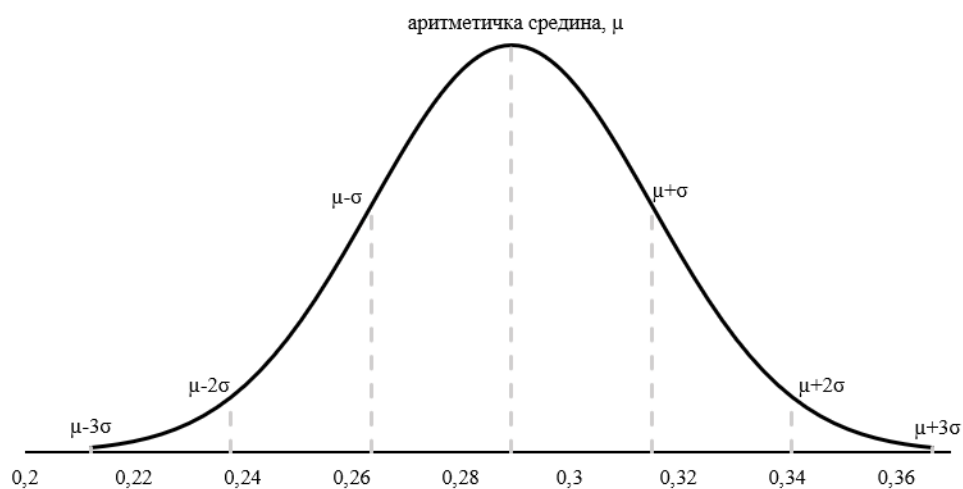
Дистрибуција порозности урађена је на основу аналогије са гасним лежиштем А1 чија средња вредност порозности износи 0,225 д.ј. Статистичка анализа података добијених применом Монте Карло симулације дата је у табели 7.44. Средња вредност ефективне порозности је 28,9%, минимална 16,5% и максимална 32%. Табела 7.45. приказује вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи 25,36%, односно 10% од укупног броја доступних података има вредности које су мање или једнаке 0,2536 д.ј., педесети перцентил (P50) износи 0,2932 д.ј. и то представља медијану, 99% података има вредности мање или једнаке 32%. Слика 7.26. приказује нормалну расподелу порозности, док слика 7.27. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.44. Статистичка анализа података порозности гасног лежишта А6

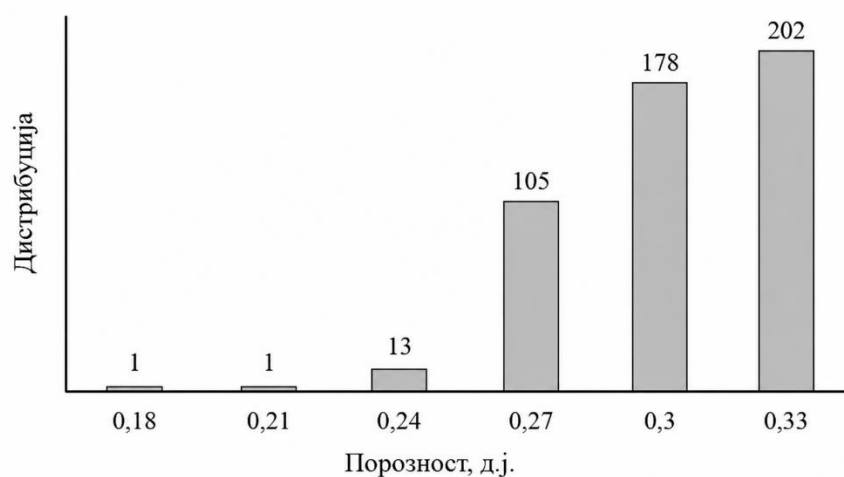
Укупан број података	500
Минимум, д.ј.	0,165
Медијана, д.ј.	0,293
Максимум, д.ј.	0,32
Аритметичка средина, д.ј.	0,289
Стандардна девијација	0,026

Табела 7.45. Вредности перцентила порозности гасног лежишта А6

P10	0,2536 д.ј.
P25	0,2713 д.ј.
P50	0,2932 д.ј.
P75	0,3121 д.ј.
P99	0,32 д.ј.



Слика 7.26. Нормална расподела порозности гасног лежишта А6



Слика 7.27. Дистрибуција порозности гасног лежишта А6

- Пропусност:

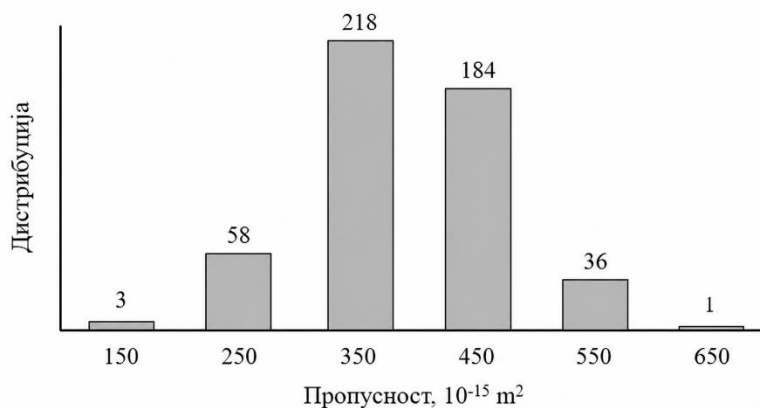
Дистрибуција пропусности урађена је на основу аналогije са гасним лежиштем А1 чија средња вредност пропусности износи $83,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Статистичка анализа добијених података дата је у табели 7.46. Средња вредност пропусности је $339,019 \cdot 10^{-15}$, минимална $120,286 \cdot 10^{-15}$ и максимална $594,976 \cdot 10^{-15}$. Табела 7.47. даје приказ вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи $242,817 \cdot 10^{-15}$, док 99 % података има вредности мање или једнаке $497,966 \cdot 10^{-15}$. Слика 7.28. представља дистрибуцију пропусности гасног лежишта А6 добијену Монте Карло симулацијом.

Табела 7.46. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А6

Укупан број података	500
Минимум	$120,286 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Медијана	$338,976 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Максимум	$594,519 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Стандардна девијација	76,530
Аритметичка средина	$339,019 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$

Табела 7.47. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта А6

P10	$242,817 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$288,312 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$338,976 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$393,167 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$497,966 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.28. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А6

- Ефективна дебљина лежишта:

Дистрибуција ефективне дебљине лежишта урађена је на основу аналогije са гасним лежиштем А2, чија средња вредност ефективне дебљине износи 6,456 m. Статистичка анализа добијених података дата је у табели 7.48. Средња вредност ефективне дебљине је 4,687 m, минимална 3,276 m и максимална 5,993 m. Табела 7.49. даје приказ вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи 4,069 m, седамдесет пет процената (P75) података има вредности које су мање или једнаке 5,012 m, док 99% података има вредности мање или једнаке 5,674 m.

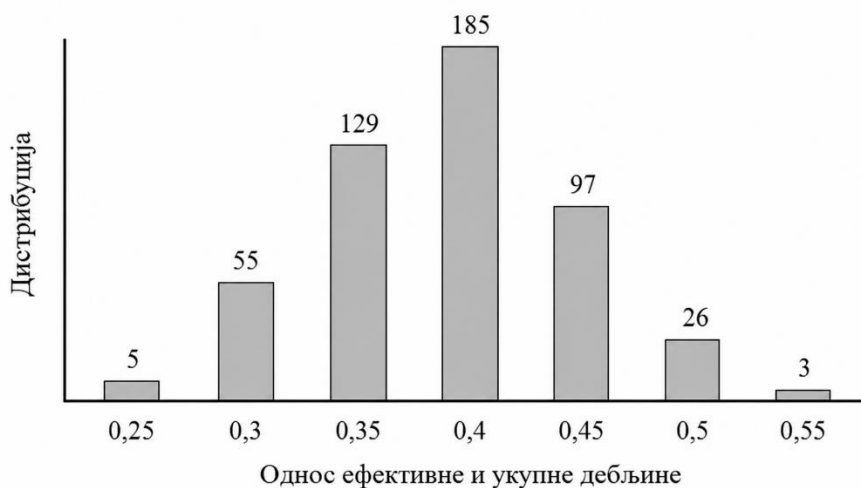
Табела 7.48. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А6

Укупан број података	500
Минимум, m	3,276
Медијана, m	4,713
Максимум, m	5,993
Аритметичка средина, m	4,687
Стандардна девијација	0,489

Табела 7.49. Вредности перцентиља ефективне дебљине гасног лежишта А6

P10	4,069 m
P25	4,366 m
P50	4,713 m
P75	5,012 m
P99	5,674 m

Средња вредност односа ефективне и укупне дебљине лежишта износи 0,365, односно варира у границама од 0,226 до 0,533. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.29.



Слика 7.29. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А6

- Засићење водом:

Дистрибуција засићења водом урађена је на основу аналогije са алтернативом А1, чија средња вредност засићења водом износи 0,3531 д.ј. Статистичка анализа података дата је у табели 7.50. Средња вредност засићења водом у гасном лежишту А6 износи 12,3%, минимална 1,7% и максимална вредност је 25%.

Табела 7.50. Статистичка анализа засићења водом гасног лежишта А6

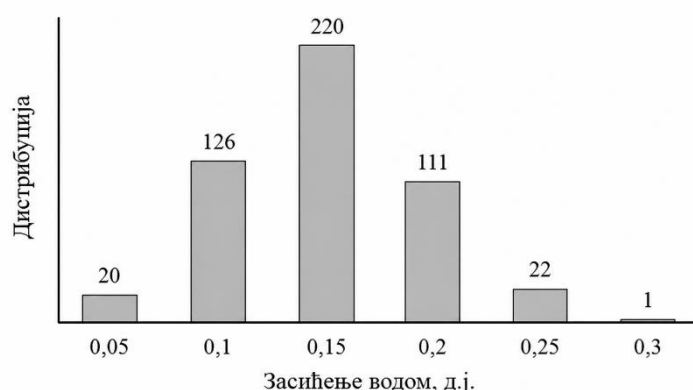
Укупан број података	500
Аритметичка средина, д.ј.	0,123
Стандардна девијација	0,042
Минимум, д.ј.	0,017
Максимум, д.ј.	0,250
Медијана, д.ј.	0,121

Табела 7.51. приказује вредности перцентила где се уочава да је вредност десетог перцентила (P10) 7,1%, седамдесет петог (P75) 15,1%, док је вредност деведесет деветог перцентила (P99) 22,3%.

Табела 7.51. Вредности перцентила засићења водом гасног лежишта А6

P10	0,071 д.ј.
P25	0,097 д.ј.
P50	0,121 д.ј.
P75	0,151 д.ј.
P90	0,179 д.ј.
P99	0,223 д.ј.

Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А6 дата је на слици 7.30.



Слика 7.30. Дистрибуција засићења водом у гасном лежишту А6

7.1.7. Статистичка анализа карактеристика гасног лежишта А7

Лабораторијска испитивања језгрованог материјала колектор стена гасног лежишта А7 нису рађена за ово лежиште. Петрофизичка анализа колектор стене извршена је на основу интерпретације података добијених методама геофизичког каротажа који је рађен у једној бушотини. Доступни петрофизички подаци добијени методама геофизичког каротажа приложени су у табели 7.52. Пропусност је одређена на основу резултата хидродинамичких мерења, односно интерпретацијом криве пораста притиска.

Табела 7.52. Вредности петрофизичких параметара гасног лежишта А7

Укупна дебљина, m	11
Ефективна дебљина, m	10,5
Порозност, д.ј.	0,245
Засићење водом, д.ј.	0,374
Пропусност, 10^{-15} m^2	45

С обзиром на недовољну доступност података, као што је то случај код гасног лежишта А6, за дистрибуцију петрофизичких параметара примењена је Монте Карло симулација по аналогији са лежиштима која имају сличне петрофизичке карактеристике. За интерпретацију података и статистичку анализу коришћени су нумерички резултати симулације која је поновљена 500 пута.

- Порозност:

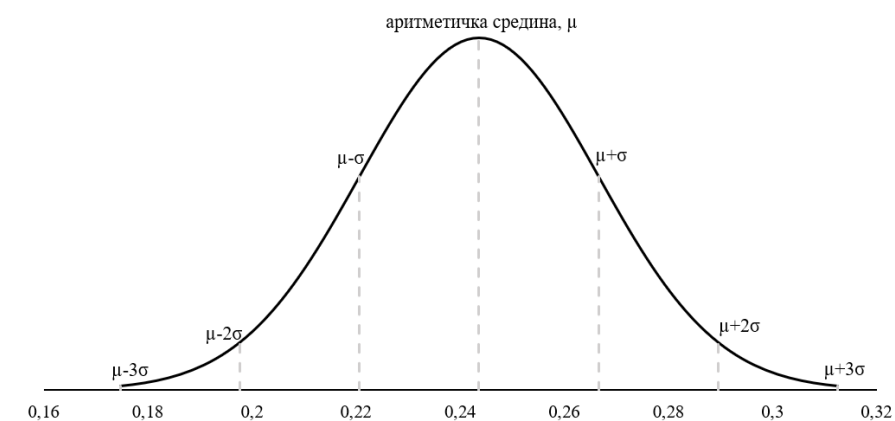
Дистрибуција порозности урађена је на основу анологије са гасним лежиштем А1, чија средња вредност порозности износи 0,225 д.ј. Статистичка анализа добијених података дата је у табели 7.53. Средња вредност ефективне порозности је 24,4%, минимална 18,3% и максимална 30,2%. Табела 7.54. даје приказ вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи 21,45%, односно 10% од укупног броја доступних података има вредности које су мање или једнаке 0,2145 д.ј., педесети перцентил (P50) износи 0,244 д.ј. и то представља медијану, 99 % података има вредности мање или једнаке 29,48%. Слика 7.31. приказује нормалну расподелу порозности, док слика 7.32. представља дистрибуцију доступних података.

Табела 7.53. Статистичка анализа порозности гасног лежишта А7

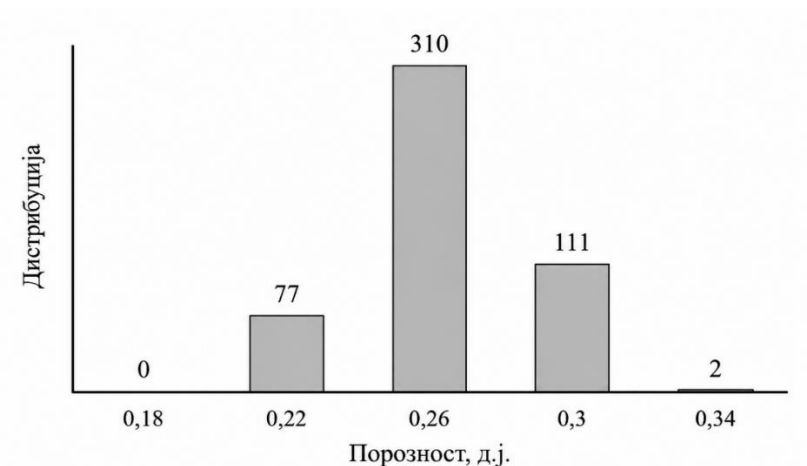
Укупан број података	500
Минимум, д.ј.	0,183
Медијана, д.ј.	0,244
Максимум, д.ј.	0,302
Стандардна девијација	0,023
Аритметичка средина, д.ј.	0,244

Табела 7.54. Вредности перцентиала порозности гасног лежишта А7

P10	0,2145 д.ј.
P25	0,2290 д.ј.
P50	0,244 д.ј.
P75	0,2586 д.ј.
P99	0,2948 д.ј.



Слика 7.31. Нормална расподела порозности гасног лежишта А7



Слика 7.32. Дистрибуција порозности гасног лежишта А7

- Пропусност:

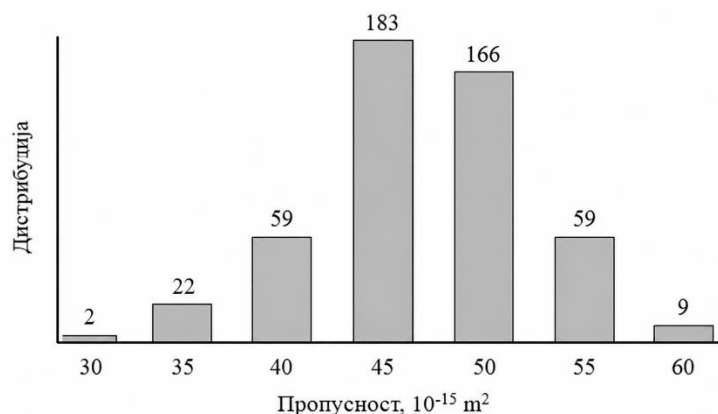
Дистрибуција пропусности урађена је на основу анологије са гасним лежиштем А4, чија средња вредност пропусности износи $62,82 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Статистичка анализа добијених података дата је у табели 7.55. Средња вредност пропусности је $44,521 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, минимална $27,799 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ и максимална $57,305 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Табела 7.56. даје приказ вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи $37,8990 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$, 99 % података има вредности мање или једнаке $55,4492 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$. Слика 7.33. приказује дистрибуцију пропусности у гасном лежишту А7.

Табела 7.55. Статистичка анализа пропусности гасног лежишта А7

Укупан број података	500
Минимум, m^2	$27,799 \cdot 10^{-15}$
Медијана, m^2	$44,606 \cdot 10^{-15}$
Максимум, m^2	$57,305 \cdot 10^{-15}$
Стандардна девијација	5,093
Аритметичка средина, m^2	$44,521 \cdot 10^{-15}$

Табела 7.56. Вредности перцентиала пропусности гасног лежишта А7

P10	$37,8990 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P25	$41,3549 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P50	$44,6059 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P75	$47,9947 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
P99	$55,4492 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$



Слика 7.33. Дистрибуција пропусности гасног лежишта А7

- Ефективна дебљина лежишта:

Дистрибуција ефективне дебљине лежишта урађена је на основу аналогије са гасним лежиштем А1, чија средња вредност ефективне дебљине износи 8,682 m. Статистичка анализа добијених података дата је у табели 7.57. Средња вредност ефективне дебљине је 10,538 m, минимална 9,194 m и максимална 12,266 m. Табела 7.58. даје приказ вредности перцентиала. Десети перцентил (P10) износи 9,878 m, 75% (P75) података има вредности које су мање или једнаке 10,879 m, док 99% података има вредности мање или једнаке 11,784 m.

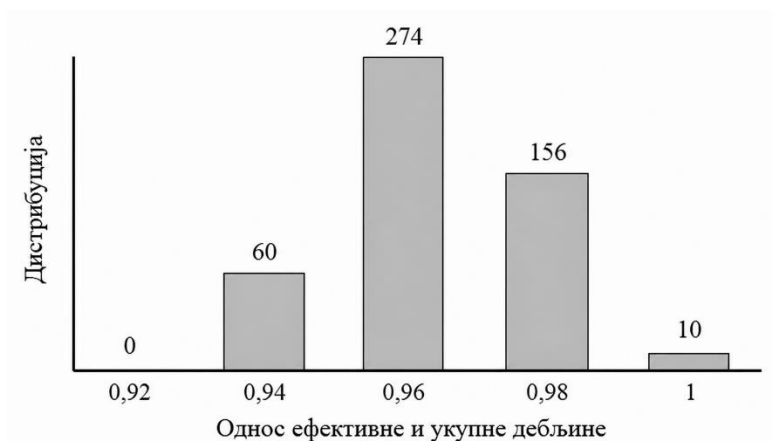
Табела 7.57. Статистичка анализа ефективне дебљине гасног лежишта А7

Укупан број података	500
Аритметичка средина, m	10,538
Медијана, m	10,542
Стандардна девијација	0,528
Минимум, m	9,194
Максимум, m	12,266

Табела 7.58. Вредности перцентиала ефективне дебљине гасног лежишта А7

P10	9,878 m
P25	10,162 m
P50	10,542 m
P75	10,879 m
P99	11,784 m

Средња вредност односа ефективне и укупне дебљине лежишта износи 0,955, односно варира у границама од 0,922 до 0,989. Дистрибуција те вредности дата је на слици 7.34.



Слика 7.34. Дистрибуција односа ефективне и укупне дебљине гасног лежишта А7

- Засићење водом:

Дистрибуција засићења водом урађена је на основу аналогije са алтернативом А1, чија средња вредност засићења водом износи 0,3531 д.ј. Статистичка анализа података приказана је у табели 7.59.

Табела 7.59. Статистичка анализа засићења водом гасног лежишта А7

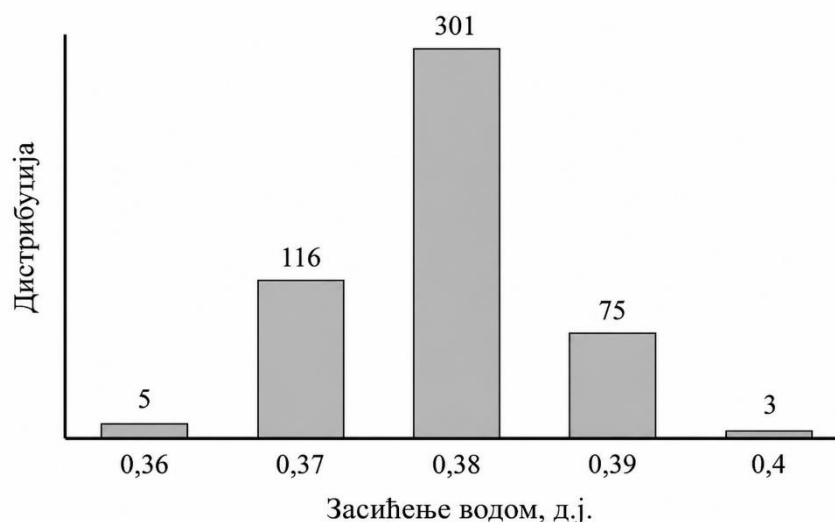
Укупан број података	500
Аритметичка средина, д.ј.	0,374
Стандардна девијација	0,006
Медијана, д.ј.	0,374
Минимум, д.ј.	0,355
Максимум, д.ј.	0,394

Табела 7.60. даје приказ вредности перцентиала где се уочава да је вредност десетог перцентиала (P10) 36,66%, седамдесет петог (P75) 37,8%, док је вредност деведесет деветог перцентиала (P99) 38,82%.

Табела 7.60. Вредности перцентиала засићења водом гасног лежишта А7

P10	0,3666 д.ј.
P25	0,3701 д.ј.
P50	0,3741 д.ј.
P75	0,378 д.ј.
P99	0,3882 д.ј.

Дистрибуција засићења водом гасног лежишта А7 дата је на слици 7.35.



Слика 7.35. Дистрибуција засићења водом гасног лежишта А7

7.2. Примена fuzzy TOPSIS вишекритеријумске анализе

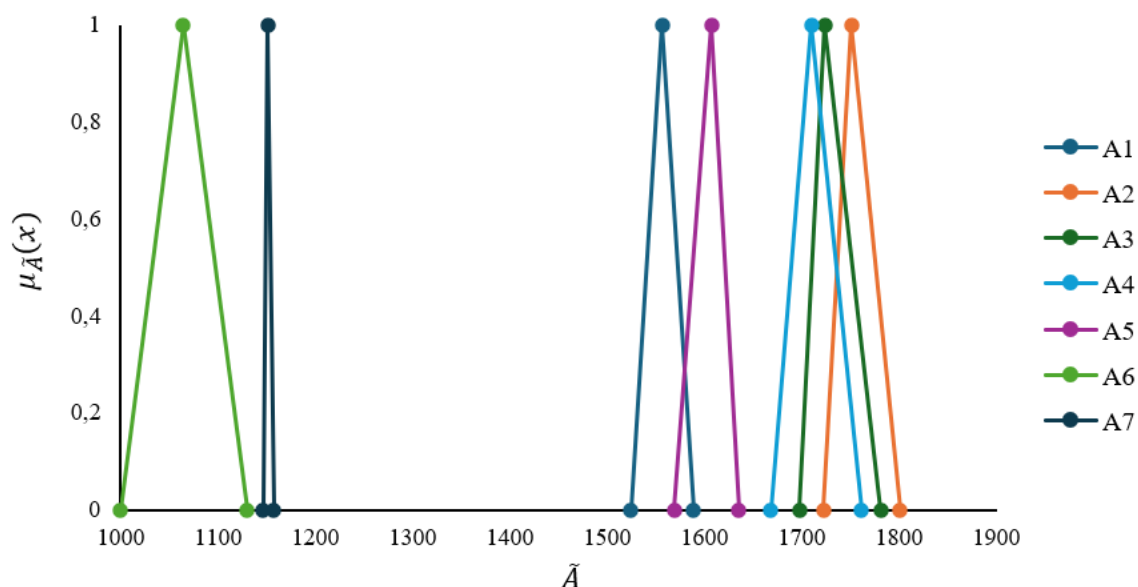
У овој фази примене хибридног мултидимензионално-симулационог модела анализирају се параметри седам разматраних гасних лежишта за прелиминарну вишекритеријумску оцену могућности геолошког складиштења CO_2 . Ти параметри тј. критеријуми обухватају: дубину на којој се налази геолошка формација, порозност, пропусност и ефективну моћност колектор стене, однос укупне и ефективне моћности геолошке формације, као и потенцијални теоретски капацитет складиштења угљен диоксида у геолошку формацију. За вишекритеријумску анализу, у циљу избора оптималног лежишта за складиштење, примењује се fuzzy TOPSIS (Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) методологија.

Алгоритам примене вишекритеријумске fuzzy TOPSIS методе састоји се од следећих корака:

1. Дефинисање почетне матрице одлучивања

На самом почетку кључно је дефинисање улазних параметара, тј. вредности критеријума за свако лежиште, односно алтернативу, који су представљени троугластим fuzzy бројевима, и формирање почетне матрице одлучивања:

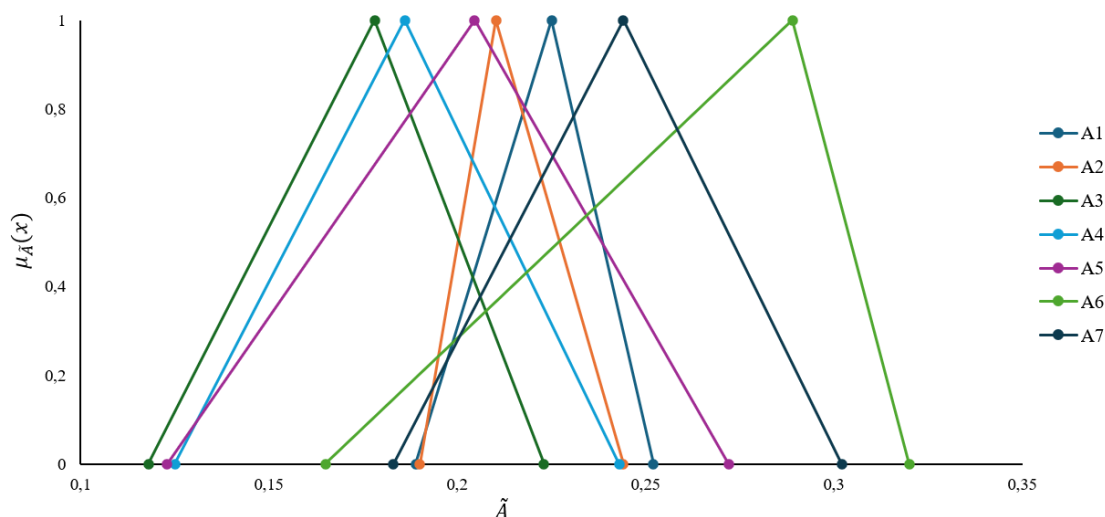
- 1) **K1** - Дубина потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.36. дате су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума дубине за седам лежишта.



Слика 7.36. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума дубине за седам лежишта, односно алтернатива

На слици 7.36. види се да се средње очекиване вредности fuzzy скупа крећу од 1064 m до 1751,2 m. Пожељно је да дубине потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида буду мање, уз неопходан услов складиштења CO_2 у суперкритичном стању које се остварује на дубинама ~800 m. Алтернатива A6 има најмању дубину залегања и представљена је троугластим fuzzy скупом (1000; 1064; 1130). Алтернатива A2 има највећу дубину залегања и њена расплнута троугласта вредност је (1722,2; 1751,2; 1801).

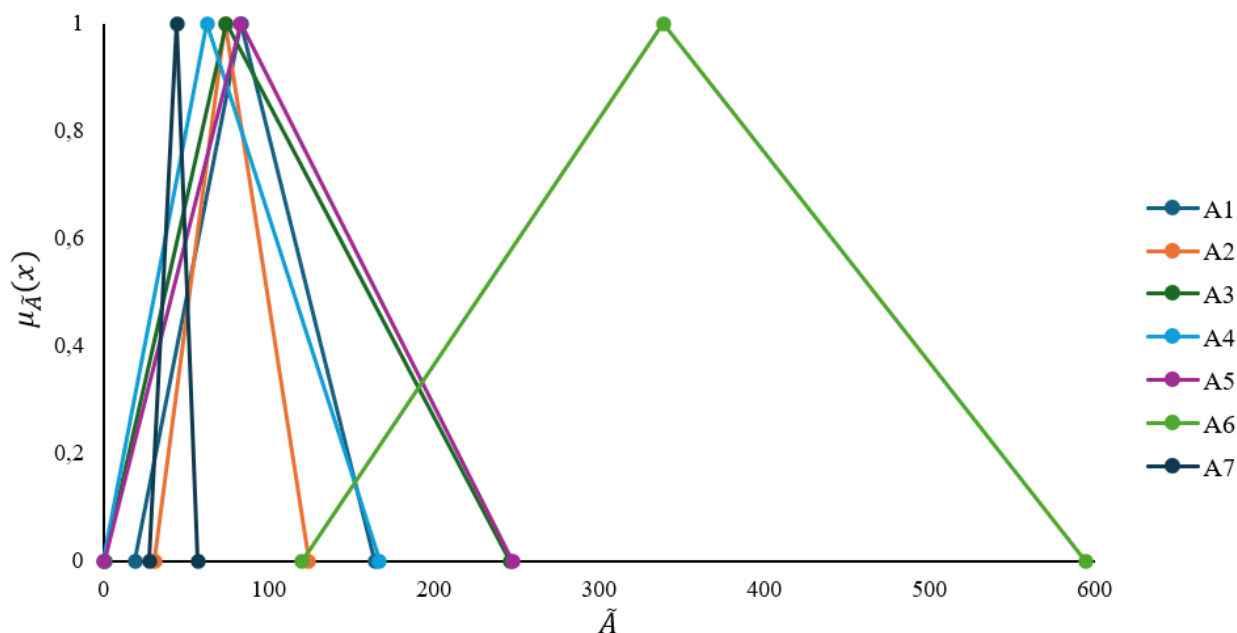
2) **K2** - Порозност потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.37. дате су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума порозности за седам лежишта.



Слика 7.37. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума порозности за седам лежишта

За складиштење угљен диоксида пожељна је већа порозност геолошке формације. Средње вредности fuzzy скупа порозности крећу се у опсегу од 0,1781 д.ј. до 0,289 д.ј. Алтернатива A3 приказана је троугластим fuzzy бројем (0,118; 0,1781; 0,223) и она има најмању пожељну средњу вредност fuzzy скупа. Алтернатива A6 има највећу вредност порозности и она износи 0,165; 0,289; 0,32.

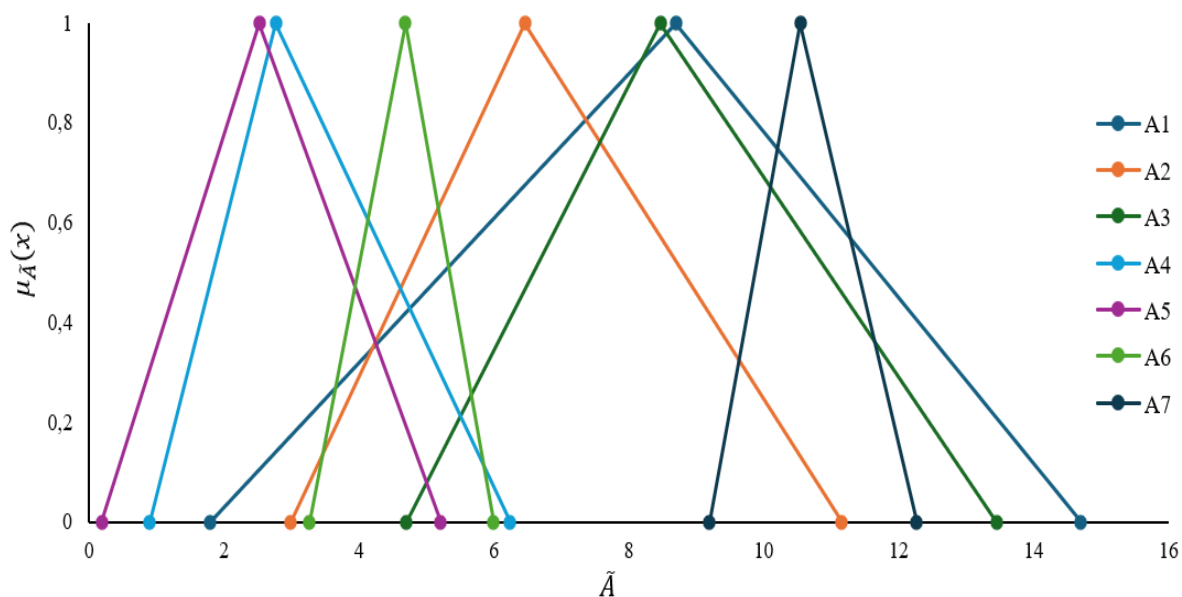
- 3) **К3** - Пропусност потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.38. дате су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума пропусности за седам лежишта.



Слика 7.38. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума пропусности за седам лежишта

Пропусност утиче на инјективност угљен диоксида и пожељно је да има што већу вредност. Разматрана гасна лежишта имају пропусност чије се средње вредности (вредности које највише обећавају) крећу у распону од 44,521 до 339,019 mD. Најпропусније лежиште је А6, чије су граничне вредности fuzzy скупа дате као (120,286; 339,019; 594,519).

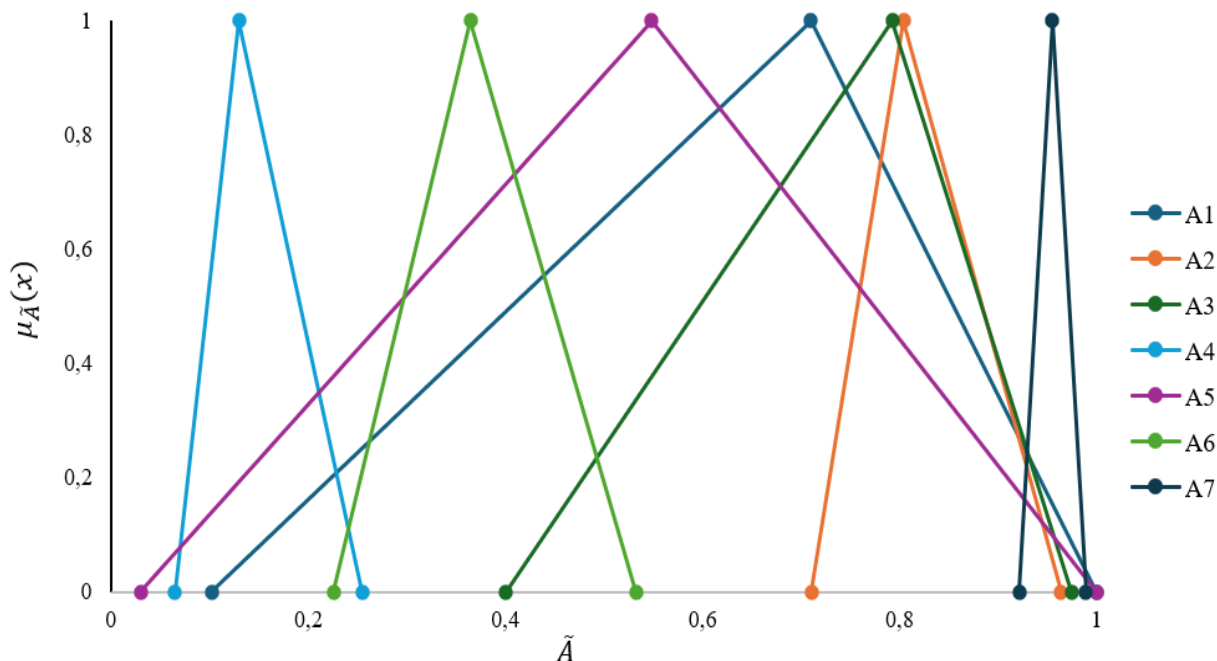
- 4) **К4** - Ефективна моћност потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.39. дате су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума ефективне моћности за седам лежишта.



Слика 7.39. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума ефективне моћности за седам лежишта

Ефективна моћност геолошке формације представља критеријум корисности, што значи да су пожељне веће вредности. Средње вредности троугластих fuzzy бројева крећу се у распону од 2,526 до 10,538 m. Лежиште са најадекватнијом ефективном дебелином је алтернатива А7, која је приказана као троугласти fuzzy број (9,194; 10,538; 12,266). Најмању вредност ефективне дебелине има алтернатива А5 и њена расплнута троугласта вредност износи (0,19; 2,526; 5,21).

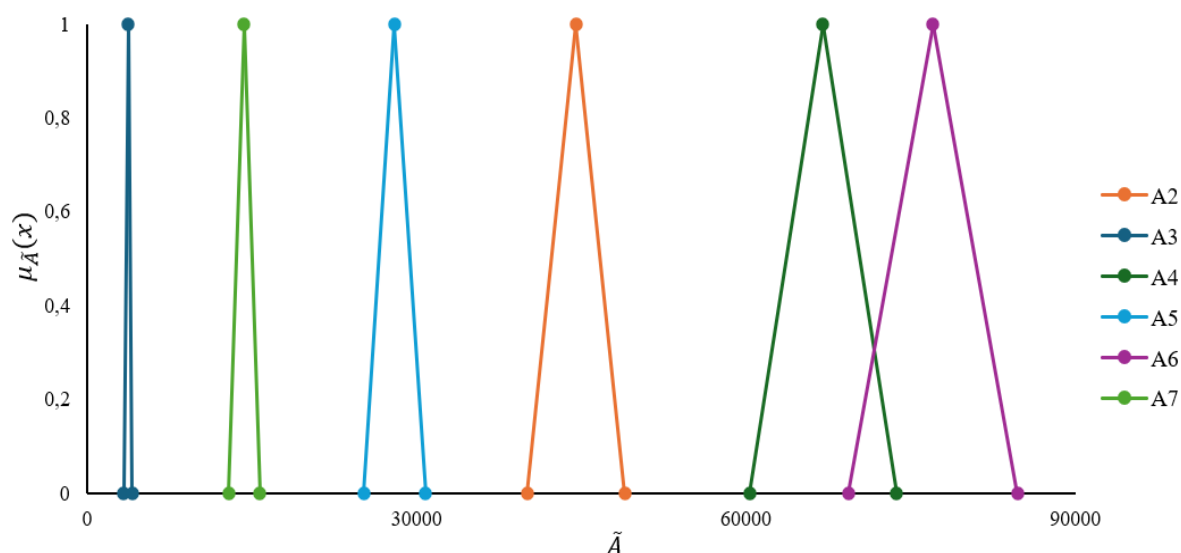
- 5) **К5** - Однос укупне и ефективне моћности потенцијалних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.40. дате су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума односа укупне и ефективне моћности за седам лежишта.



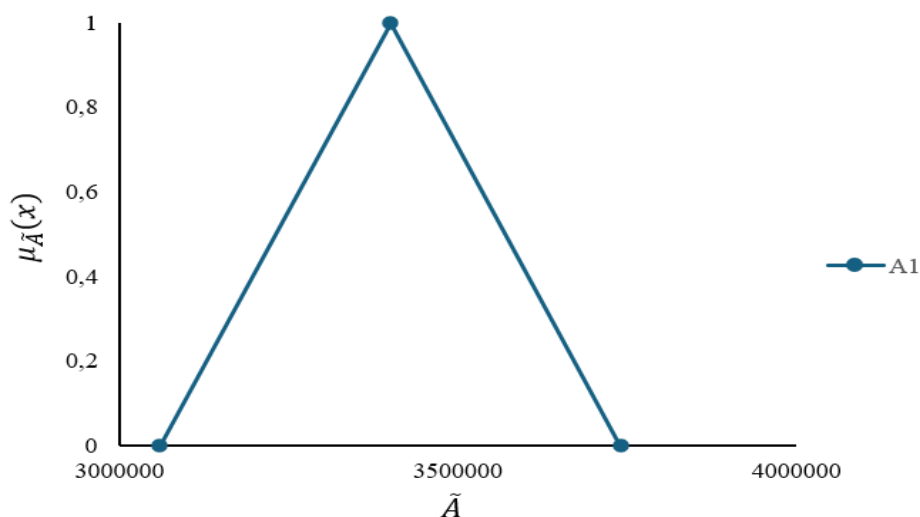
Слика 7.40. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума односа укупне и ефективне моћности за седам лежишта

Однос укупне и ефективне моћности представља део порног простора који је могуће испунити угљен диоксидом и овај критеријум се максимизује, односно представља критеријум корисности. Средње вредности расплнутих бројева крећу се од 0,13 (алтернатива А4), што указује на то да је 13 % укупне дебелине доступно за складиштење. Највећу средњу вредност има алтернатива А7 и она је приказана троугластим fuzzy бројем (0,922; 0,955; 0,989).

- 6) **К6** - Потенцијални теоретски капацитет складиштења одабраних геолошких формација за складиштење угљен диоксида. На слици 7.41. представљене су вредности троугластих fuzzy бројева критеријума потенцијалних капацитета складиштења за шест лежишта (А2-А7), а на слици 7.42. приказане су вредности троугластог fuzzy броја за алтернативу А1.



Слика 7.41. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума потенцијалних капацитета складиштења за све алтернативе осим алтернативе A1



Слика 7.42. Вредности троугластих fuzzy бројева критеријума потенцијалних капацитета складиштења за алтернативу A1

Капацитет складиштења представља један од најбитнијих критеријума при избору најповољније алтернативе за складиштење. На сликама 7.41. и 7.42. види се да алтернатива A1 доминира у односу на остале алтернативе и представљена је fuzzy бројем (3 060 000; 3 400 000; 3 740 000).

2. Нормализација почетне матрице одлучивања

На основу вредности анализираних улазних параметара (дубина формације, порозност, пропусност, ефективна моћност колектор стене, однос укупне и ефективне моћности, као и потенцијални теоретски капацитет складиштења угљен диоксида) који су дати на сликама (7.36.–7.42.), применом једначине 4.47 одређују се нормализоване вредности критеријума. Поређење критеријума врши се претварањем улазних вредности критеријума по алтернативама у бездимензионалне стандардне вредности у опсегу 0–1. У табели 7.61. дате су нормализоване вредности почетне матрице одлучивања.

Табела 7.61. Нормализована матрица одлучивања

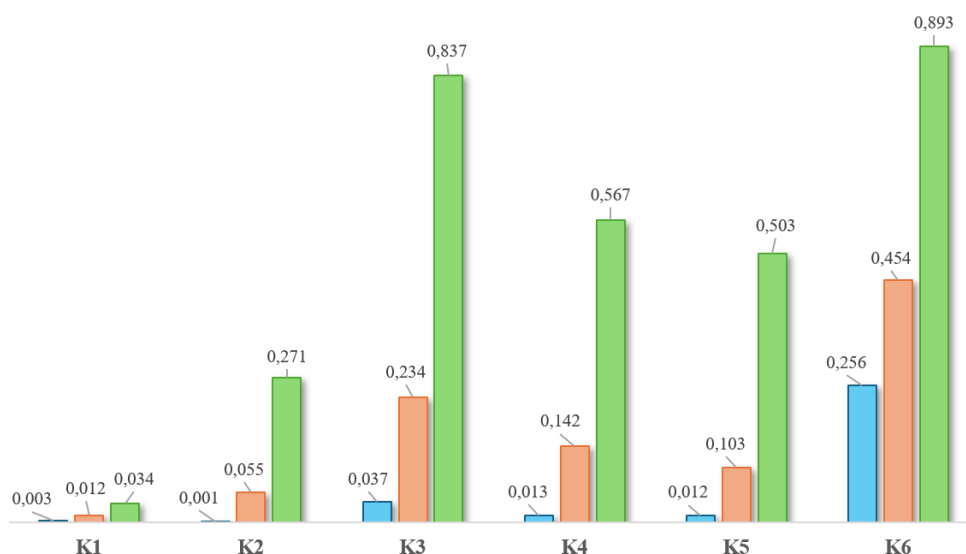
	K1	K2	K3
A1	0,1404 0,1434 0,1464	0,1018 0,1212 0,1358	0,0119 0,0520 0,1027
A2	0,1587 0,1613 0,1659	0,1024 0,1133 0,1315	0,0192 0,0462 0,0776
A3	0,1564 0,1588 0,1641	0,0636 0,0960 0,1202	0,0006 0,0463 0,1536
A4	0,1537 0,1575 0,1623	0,0673 0,1002 0,1309	0,0001 0,0392 0,1045
A5	0,1445 0,1481 0,1506	0,0663 0,1102 0,1466	0,0003 0,0518 0,1546
A6	0,0921 0,0980 0,1041	0,0889 0,1557 0,1724	0,0751 0,2117 0,3713
A7	0,1056 0,1060 0,1066	0,0986 0,1315 0,1627	0,0174 0,0278 0,0358

Табела 7.61. (наставак) - Нормализована матрица одлучивања

	K4	K5	K6
A1	0,0261 0,1261 0,2130	0,0178 0,1242 0,1749	0,7654 0,8504 0,9355
A2	0,0433 0,0935 0,1617	0,1244 0,1407 0,1686	0,0100 0,0111 0,0122
A3	0,0681 0,1227 0,1949	0,0702 0,1387 0,1706	0,0008 0,0009 0,0010
A4	0,0130 0,0402 0,0904	0,0114 0,0227 0,0446	0,0151 0,0168 0,0184
A5	0,0028 0,0366 0,0755	0,0052 0,0959 0,1749	0,0063 0,0070 0,0077
A6	0,0474 0,0679 0,0868	0,0395 0,0639 0,0932	0,0173 0,0193 0,0212
A7	0,1332 0,1527 0,1777	0,1613 0,1671 0,1730	0,0032 0,0036 0,0039

3. Тежински коефицијенти критеријума

Следећи корак је одређивање тежинских коефицијената критеријума применом Шенонове ентропије. На основу вредности нормализоване матрице одлучивања, применом једначина (4.49–4.54), значај сваког критеријума дат је на слици 7.43. На слици се уочава да критеријум капацитет складиштења – K6 има највећи утицај на коначно решење: $\tilde{w}_j(K6) = 0,256; 0,454; 0,893$.



Слика 7.43. Тежински коефицијенти критеријума

4. Нормализована тежинска матрица одлучивања

Тежински нормализоване вредности критеријума ($\tilde{v}_{ij}$) добијају се множењем нормализованих вредности критеријума ($\tilde{r}_{ij}$) (табела 7.61.) са одговарајућим тежинским коефицијентом ($\tilde{w}_j$) (слика 7.43.). Вредности тежински нормализованих критеријума ($\tilde{v}_{ij}$) приказане су у табели 7.62.

Табела 7.62. Тежински нормализована матрица одлучивања

	K1	K2	K3
A1	0,00038 0,00173 0,00504	0,00013 0,00668 0,03676	0,00044 0,01215 0,08592
A2	0,00043 0,00195 0,00571	0,00013 0,00625 0,03559	0,00072 0,01079 0,06495
A3	0,00043 0,00192 0,00565	0,00008 0,00529 0,03253	0,00002 0,01082 0,12854
A4	0,00042 0,00190 0,00559	0,00009 0,00553 0,03545	$4,7 \cdot 10^{-6}$ 0,00917 0,08744
A5	0,00039 0,00179 0,00519	0,00008 0,00608 0,03968	0,00001 0,01212 0,12938
A6	0,00025 0,00119 0,00359	0,00011 0,00859 0,04668	0,00281 0,04950 0,31072
A7	0,00029 0,00128 0,00367	0,00013 0,00725 0,04405	0,00065 0,00650 0,02995

Табела 7.62. (наставак) - Тежински нормализована матрица одлучивања

	K4	K5	K6
A1	0,00033 0,01792 0,12073	0,00022 0,01277 0,08797	0,19582 0,38612 0,83516
A2	0,00054 0,01330 0,09163	0,00153 0,01446 0,08480	0,00256 0,00505 0,01093
A3	0,00085 0,01745 0,11046	0,00086 0,01426 0,08577	0,00021 0,00042 0,00091
A4	0,00016 0,00571 0,05125	0,00014 0,00234 0,02243	0,00386 0,00761 0,01646
A5	0,00003 0,00520 0,04279	0,00006 0,00986 0,08797	0,00161 0,00318 0,00688
A6	0,00059 0,00965 0,04922	0,00049 0,00656 0,04689	0,00443 0,00874 0,01891
A7	0,00167 0,02171 0,10074	0,00199 0,01717 0,08700	0,00082 0,00162 0,00351

5. Одређивање fuzzy позитивно идеалног ($\tilde{A}^+$) и fuzzy негативно идеалног решења ($\tilde{A}^-$)

На основу тежински нормализованих вредности $\tilde{v}_{ij}$, датих у табели 7.62., применом једначина 4.57 и 4.58 одређују се fuzzy позитивно идеално ($\tilde{A}^+$) и fuzzy негативно идеално решење ($\tilde{A}^-$) (табела 7.63).

Табела 7.63. Fuzzy позитивно ($\tilde{A}^+$) и негативно ($\tilde{A}^-$) идеално решење

	K1	K2	K3
$\tilde{A}^+$	0,00025 0,00119 0,00359	0,00013 0,00859 0,04668	0,00281 0,04950 0,31072
$\tilde{A}^-$	0,00043 0,00195 0,00571	0,00008 0,00529 0,03253	$4,7 \cdot 10^{-6}$ 0,00650 0,02995

Табела 7.63. (наставак) - Fuzzy позитивно ($\tilde{A}^+$) и негативно ($\tilde{A}^-$) идеално решење

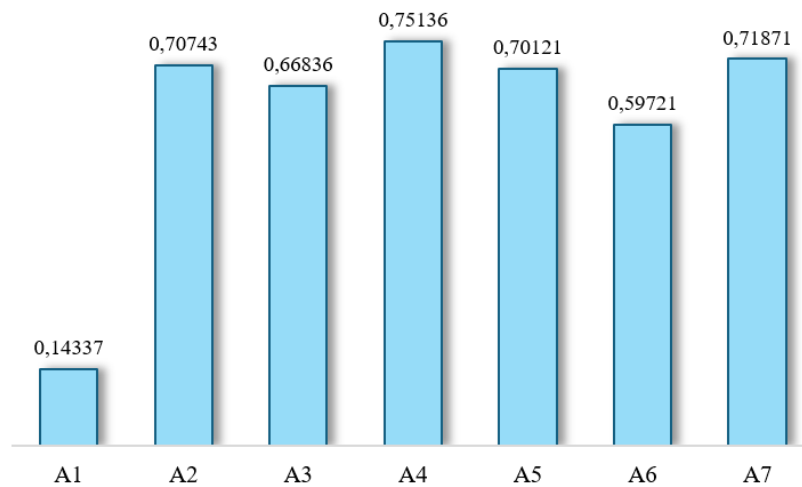
	K4	K5	K6
$\tilde{A}^+$	0,00167 0,02171 0,12073	0,00199 0,01717 0,08797	0,19582 0,38612 0,83516
$\tilde{A}^-$	0,00003 0,00520 0,04279	0,00006 0,00234 0,02243	0,00021 0,00042 0,00091

На пример, дубина (K1) представља критеријум трошкова, што значи да су пожељне што мање вредности овог критеријума. Позитивно идеално решење представља најбољу перформансу алтернативе, што би у случају овог критеријума била најмања вредност ($\tilde{A}^+(K1) = 0,00025; 0,00119; 0,00359$). Негативно идеално решење представља најнеповољнију вредност критеријума и у овом случају би било ($\tilde{A}^-(K1) = 0,00043; 0,00195; 0,00571$). Сви остали критеријуми представљају критеријуме корисности, што указује на то да су максималне вредности критеријума најповољније (позитивно идеално решење), а најмање вредности најнеповољније (негативно идеално решење).

6. Удаљености алтернатива од позитивно идеалног решења (S_i^+) и негативно идеалног решења (S_i^-)

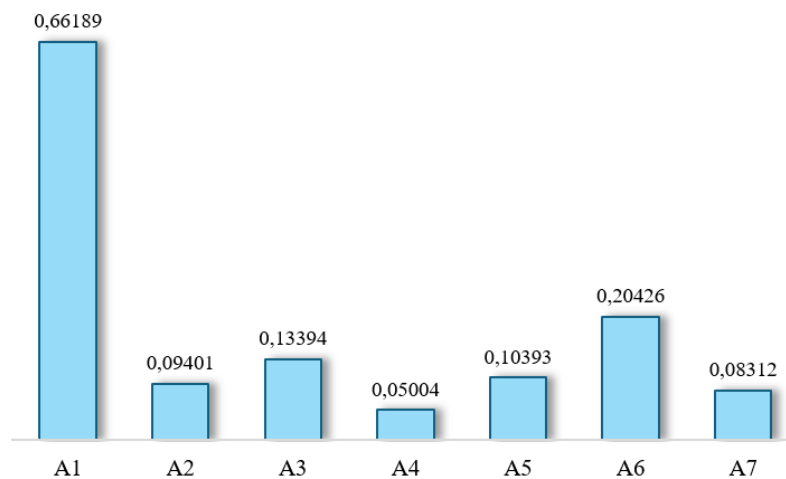
На основу тежински нормализованих вредности критеријума (табела 7.62.) и вредности позитивно и негативно идеалног решења (табела 7.63.), применом једначина 4.37 и 4.38, одређује се удаљеност алтернатива од позитивно и негативно идеалног решења приказаних као једнозначан број.

На слици 7.44. дат је приказ удаљености алтернатива од позитивно идеалног решења (S_i^+) и види се да алтернатива A1 има најмању удаљеност $S_i^+(A1) = 0,14337$.



Слика 7.44. Удаљеност алтернатива од позитивно идеалног решења

Слика 7.45. приказује удаљеност алтернатива од негативно идеалног решења (S_i^-) и јасно се уочава да алтернатива A1 има највећу удаљеност $S_i^-(A1) = 0,66189$.



Слика 7.45. Удаљеност алтернатива од негативно идеалног решења

7. Релативна блискост алтернатива позитивно идеалном решењу

Применом једначине 4.39 одређује се релативна блискост алтернатива позитивно идеалном решењу c_i чије вредности су дате у табели 7.64. На основу вредности у табели јасно је да алтернатива A1 има највећу блискост позитивно идеалном решењу: $c_i(A1) = 0,8220$.

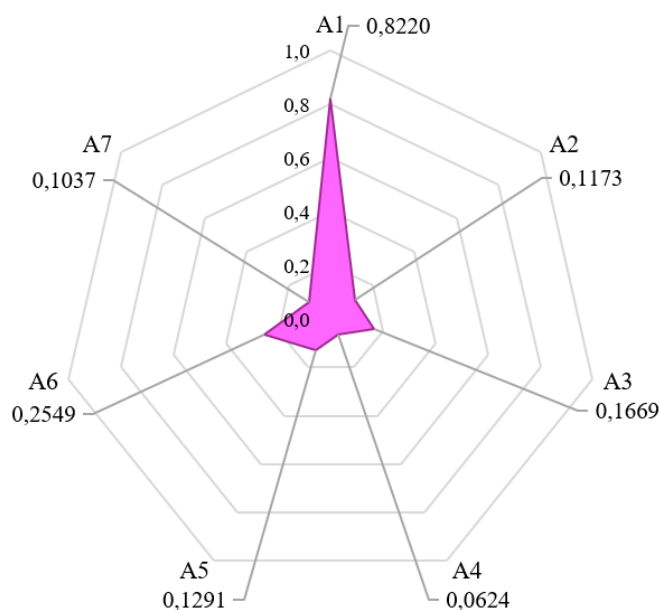
Табела 7.64. Релативне блискости алтернатива

A1	0,8220
A2	0,1173
A3	0,1669
A4	0,0624
A5	0,1291
A6	0,2549
A7	0,1037

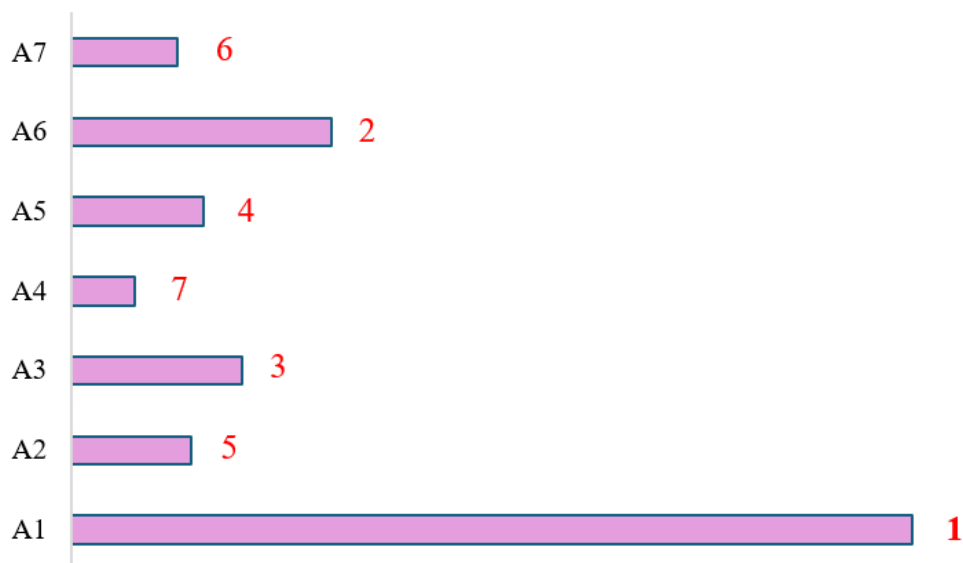
8. Рангирање алтернатива

На основу вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу одређених у претходном кораку (табела 7.64.) и слике 7.46, врши се евалуација алтернатива и вредновање алтернатива које је дато на слици 7.47. Алтернативе се рангирају опадајућим редоследом, односно најбоље рангирана алтернатива има највећу вредност релативне блискости позитивно идеалном решењу. Полазећи од добијених вредности релативне блискости, алтернативе се вреднују следећим редоследом: $A1 > A6 > A3 > A5 > A2 > A7 > A4$.

На основу вредности релативне блискости и рангирања алтернатива може се закључити да алтернатива, односно гасно лежиште A1 представља убедљиво најповољнију и најпоузданију геолошку формацију за складиштење, јер показује значајно већу вредност релативне блискости позитивно идеалном решењу у односу на остала разматрана лежишта.



Слика 7.46. Графички приказ вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу



Слика 7.47. Рангирање алтернатива

7.3. Резултати примене симулационог модела гасног лежишта „Л”

На основу статистичке и вишекритеријумске анализе извршена је евалуација гасних лежишта у циљу одређивања најпогодније опције за складиштење угљен диоксида. Гасно лежиште „Л” тј. алтернатива А1 прворангирана је опција, јер на основу анализираних критеријума представља најпогоднију варијанту безбедног и дугорочног складиштења CO_2 .

Након фаза примене статистичке анализе и вишекритеријумске методе избора, приступа се трећој фази примене развијеног модела (слика 6.1.), односно математичком моделовању утискивања CO_2 у прворангирано гасно лежиште „Л”. Математичко моделовање рађено је применом лиценцираног софтверског пакета Petrel 2021.6.0 са интегрисаним нумеричким симулатором ECLIPSE 300, компаније Schlumberger.

Моделовање утискивања угљен диоксида сложен је процес и лежишна симулација представља најрелевантнији приступ анализе процеса утискивања и праћења понашања CO_2 у лежишту током времена. У циљу адекватне анализе понашања угљен диоксида и лежишних флуида у лежишту, примењен је композитни симулациони лежишни модел који укључује ефекте фазних понашања и њихових карактеристика, односно омогућава моделовање интеракција између CO_2 и лежишних флуида (гаса и воде), као и анализу различитих механизма акумулирања који се јављају у лежишту.

У овом поглављу дат је детаљнији опис гасног лежишта „Л” (алтернатива А1), производних карактеристика лежишта, као и анализа улазних података који се користе за симулациони модел. Ова фаза подразумева припрему улазних података, конструисање лежишног модела и дефинисање предиктивних сценарија утискивања.

Улазни подаци лежишног модела обухватају петрофизичке карактеристике колектор стене, особине флуида, производни историјат, као и историјат промене притиска у лежишту. С обзиром на ограниченост улазних података (лабораторијске анализе језгрованог материјала и интерпретација резултата каротажних мерења доступне су за одређени број бушотина), примењене су одговарајуће емпиријске зависности и корелације које омогућавају генерисање дистрибуције петрофизичких параметара на нивоу целог лежишта као што су пропусност, резидуална засићења гасом и водом и релативне пропусности. Након детаљне анализе и карактеризације лежишта, смањена је неизвесност улазних параметара и дефинисани су улазни подаци који реално описују понашање у лежишту.

Провера поузданости модела врши се усклађивањем расположивих историјских података са подацима добијеним у моделу чиме је потврђено да модел адекватно приказује реално понашање лежишта.

Након верификације модела, дефинисани су сценарији утискивања угљен диоксида, при чему је свака постојећа производна бушотина примењена као инјекциона бушотина за утискивање CO_2 , а свака појединачна бушотина представља засебан сценарио (8 инјекционих бушотина=8 сценарија). Циљ оваквог приступа је да се уради анализа утицаја просторне локације бушотине у лежишту на ефикасност утискивања, као и на механизме заробљавања. За сваки сценарио задата је константна дневна количина утискивања угљен диоксида од $250\,000\text{ sm}^3$, уз ограничење да максимални притисак на дну бушотине не буде већи од 160 bar како би се сачувао интегритет лежишта и заштитних стена. Након достизања вредности граничног притиска на дну бушотине, престаје утискивање и још 500 година се врши праћење понашања CO_2 у лежишту. Резултати симулационог модела обухватају кумулативну количину утиснутог угљен диоксида, просторну и временску дистрибуцију угљен диоксида у лежишту, као и анализу доминантних механизма акумулирања угљен диоксида, односно понашање угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након престанка.

Ова анализа омогућава процену ефикасности складиштења, као и механизме акумулирања, нарочито када је реч о резидуално акумулираном CO_2 и CO_2 раствореном у води, који

доприносе дугорочном и безбедном задржавању у лежишту, и представља основу за оптимизацију стратегије утискивања и складиштења.

7.3.1. Улазни подаци за лежишну симулацију

За креирање симулационог модела неходно је дефинисати улазне параметре који описују особине колектор стене, особине лежишних флуида и историјат производње и притиска. Поузданост лежишног модела зависи од квалитета и репрезентативности улазних података.

У оквиру особина колектор стене одређују се дистрибуције пропусности и резидуалних засићења гасом и водом користећи одговарајуће емпиријске зависности и корелације, дефинишу се типови стена на основу Винландовог дијаграма и одређују капиларни притисци и релативне пропусности. Поред тога, анализиране су особине гаса гасног лежишта „Л”, као и историјат производње гаса и притиска, што је битно за верификацију симулационог модела.

Улазни подаци за лежишну симулацију обухватају групе података:

7.3.1.1. Особине колектор стене

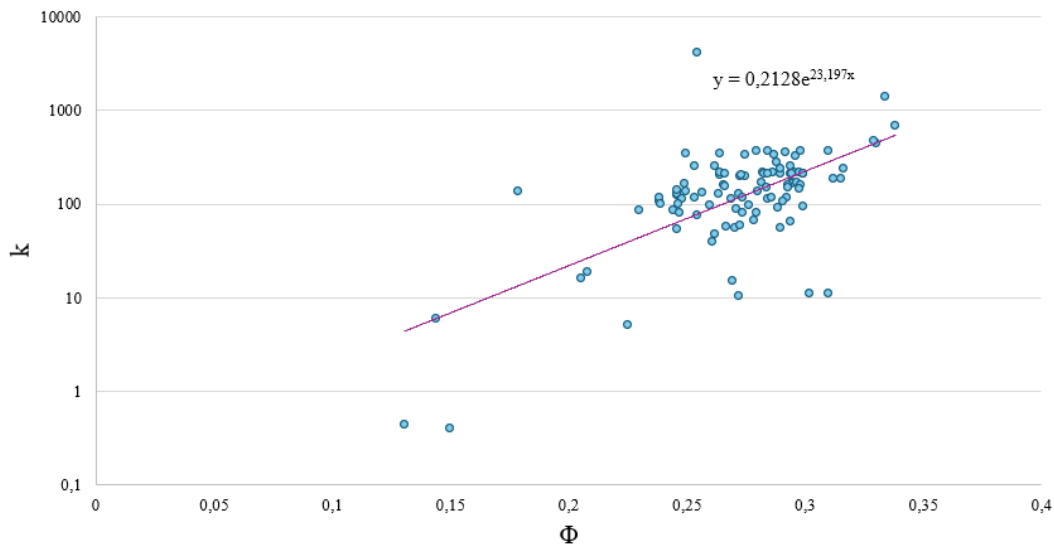
Петрофизичка анализа колектор стена дата у поглављу 7.1. извршена је на основу резултата лабораторијских испитивања узорака језгрованог материјала и интерпретације резултата каротажних мерења. Ови подаци представљају основу, међутим они су доступни само за одређени део лежишта. С обзиром на хетерогеност лежишта и ограниченост улазних података, у циљу креирања симулационог модела који веродостојно описује лежиште, битно је одредити дистрибуцију петрофизичких параметара применом одговарајућих емпиријских зависности и корелација. Комбинованом применом доступних лабораторијских података и података добијених интерпретацијом каротажних мерења и дефинисањем зависности, омогућено је одређивање петрофизичких параметара за сваку ћелију модела. На овај начин смањује се неизвесност улазних података и дефинишу реални параметри који описују стварно понашање у лежишту и то је кључно за веродостојни опис хетерогености лежишта.

На основу доступних лабораторијских података дефинисане су емпиријске зависности између порозности, пропусности и резидуалних засићења гасом и водом. Ове корелације користе се за генерисање просторне дистрибуције петрофизичких особина на нивоу целог лежишта у оквиру симулационог модела.

- Одређивање дистрибуције пропусности на основу емпиријских зависности података

За одређивање дистрибуције пропусности користи се емпиријска зависност података пропусности и порозности добијених у лабораторији анализом језгара (слика 7.48.). Подаци о порозности углавном су доступнији и из тог разлога се на основу везе између порозности и пропусности одређује дистрибуција пропусности у лежишту.

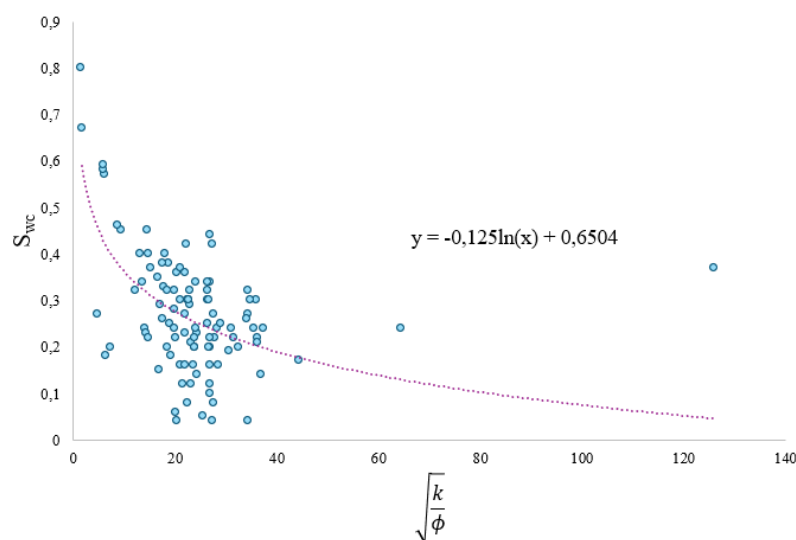
На слици 7.48. уочава се нелинеарна експоненцијална зависност између порозности и пропусности, тј. вредности пропусности расту експоненцијално са повећањем вредности порозности и она је апроксимирана следећом релацијом: $k = 0,2128 \cdot e^{23,197 \cdot \phi}$.



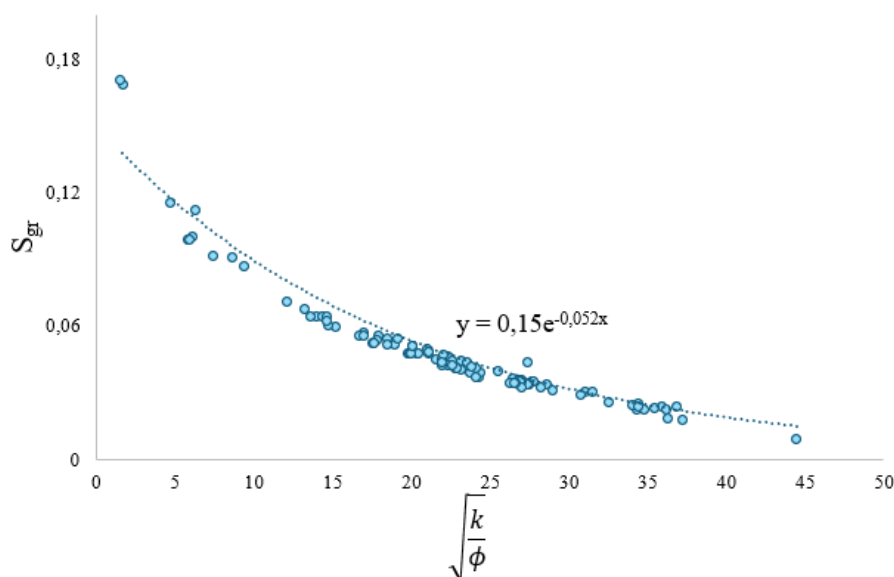
Слика 7.48. Веза између порозности и пропусности

- **Одређивање дистрибуције резидуалних засићења водом и гасом на основу емпиријских зависности података**

За одређивање дистрибуције резидуалног засићења водом и резидуалног засићења гасом у лежишту користе се емпиријске зависности које се дефинишу конструисањем два дијаграма (слика 7.49. и слика 7.50.) зависности резидуалног засићења водом и резидуалног засићења гасом у функцији параметра $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$ који представља индиректну величину порних грла. На слици 7.49. добијена је логаритамска зависност која је апроксимирана следећом релацијом $S_{wc} = -0,125 \ln\left(\sqrt{\frac{k}{\phi}}\right) + 0,6504$, односно добијени тренд указује на то да повећањем вредности $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$ долази до смањења резидуалног засићења водом. У случају резидуалног засићења гасом (слика 7.50.), експоненцијална зависност дата је једначином $S_{gr} = 0,15 \cdot e^{-0,052 \sqrt{\frac{k}{\phi}}}$ и јасно се види да повећањем $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$ долази до смањења количине резидуалног засићења гасом.



Слика 7.49. Веза између резидуалног засићења водом и $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$



Слика 7.50. Веза између резидуалног засићења гасом и $\sqrt{\frac{k}{\phi}}$

- Дефинисање типова стена на основу Винландовог дијаграма

У циљу карактеризације лежишта, применом Винландове R35 методе дефинишу се типови стена у лежишту, тј. ради се груписање стена на основу петрофизичких параметара (Krivoshchekov et al., 2023; На et al., 2023). Типови стена одређују се на основу зависности порозности, пропусности и порних грла које дефинишу специфичне порне геометрије. То је емпиријска метода која је представљена једначином 7.1:

$$\log(r_{35}) = 0,732 + 0,588 \cdot \log(k) - 0,864 \cdot \log(\phi) \quad (7.1)$$

где су:

r_{35} – радијус порног грла за одговарајућих 35 % засићења живом, μm ;

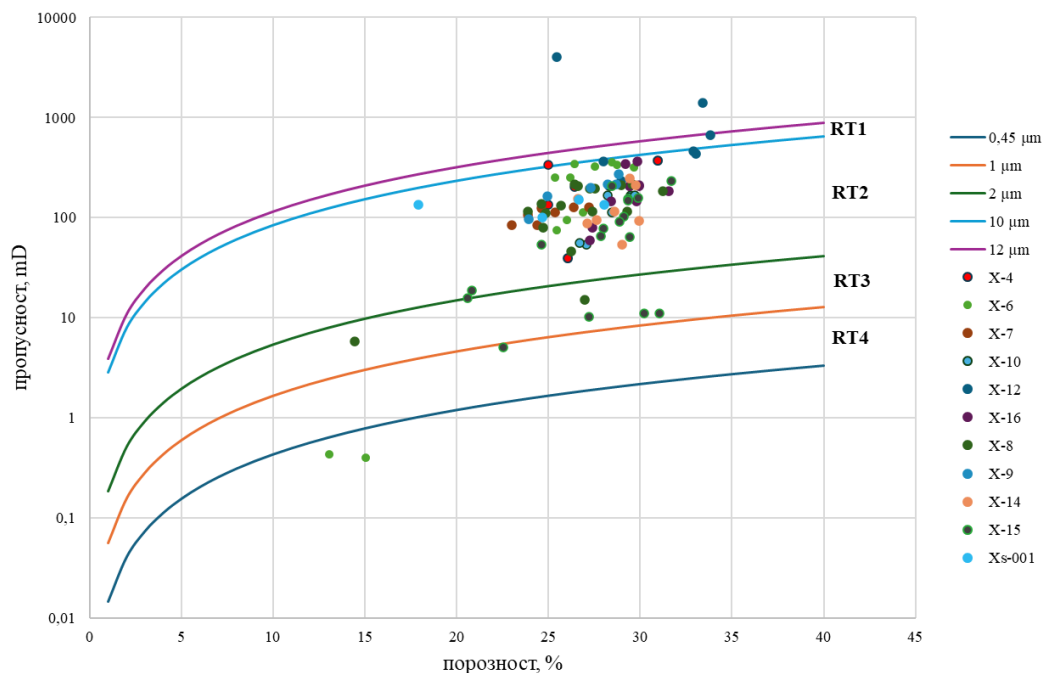
k – лабораторијска вредност пропусности, mD ;

ϕ – лабораторијска вредност порозности, %.

На основу Винландове методе, класификација стена зависи од радијуса порних грла (r_{35}), који су у директној вези са порозношћу и пропусношћу, и могу се поделити на четири типа стена (Krivoshchekov et al., 2023):

- 1) RT1 (rock type 1) – вредности радијуса порних грла r_{35} веће су од $10 \mu m$. Овај тип стене карактеришу велике поре (каверне) и представља тип стене са најбољим карактеристикама;
- 2) RT2 (rock type 2) – вредности радијуса порних грла r_{35} крећу се од 2 до $10 \mu m$. Овај тип стене карактеришу макропоре и представља тип стене са веома dobrim карактеристикама;
- 3) RT3 (rock type 3) – вредности радијуса порних грла r_{35} крећу се од 0,5 до $2 \mu m$. Овај тип стене карактеришу мезопоре (средње величине) и одликује се умереним карактеристикама;
- 4) RT4 (rock type 4) – вредности радијуса порних грла r_{35} су мање од $0,5 \mu m$. Овај тип стене карактеришу микропоре (веома мале поре), односно има веома лоше карактеристике.

Типови стена одређени Винландовом методом за гасно лежиште „Л” добијени на основу лабораторијских података порозности и пропусности који су рађени на језгрима у укупно 11 бушотина, дати су на слици 7.51.



Слика 7.51. Винландов дијаграм са дефинисаним изолинијама величине порних грла

У табели 7.65. дате су учесталост и вероватноћа појаве одређеног типа стене дефинисаних на основу доступних лабораторијских испитивања језгара.

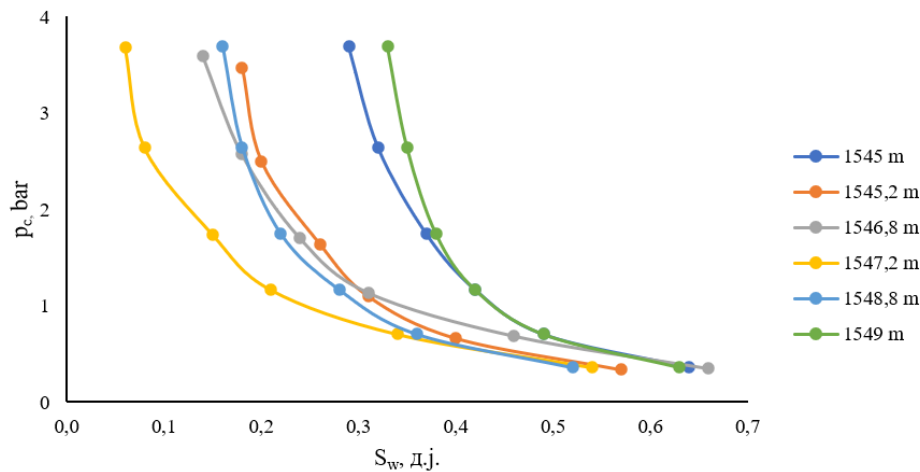
Табела 7.65. Учесталост и вероватноћа појаве одређеног типа стене

Тип стене	Учесталост	Вероватноћа, %
RT1	4	3,03
RT2	125	94,70
RT3	1	0,76
RT4	2	1,52

На основу слике 7.51. и табеле 7.65. може се закључити да је најзаступљенији тип стене RT2 са вероватноћом скоро 95% који се са аспекта петрофизичких особина и радијуса порних грла може окарактерисати као веома добар колектор. С обзиром на јако малу вероватноћу појављивања осталих типова стена (RT1, RT3 и RT4) и могуће грешке приликом лабораторијске анализе језгара, може се усвојити RT2 као доминантан и репрезентативан тип стене у гасном лежишту „Л”. Пошто је лежиште прилично хомогено и усвојен је један тип стене као репрезентативан за даљу анализу, то омогућава коришћење јединствених функција капиларног притиска и релативних пропусности.

- Капиларни притисак и релативне пропусности

За гасно лежиште „Л” (алтернатива А1) вршена су лабораторијска мерења капиларног притиска центрифугалном методом на узорцима језгара са укупно 11 бушотина. На слици 7.52. приказане су криве капиларног притиска за бушотину X-4 узетих са дубине од 1545 до 1549 m.



Слика 7.52. Криве капиларних притисака у функцији засићења водом мерене на језгрима из бушотине X-4

Када се повуче хоризонтална асимптота на криве капиларног притиска у функцији засићења водом у тачкама највећег измереног капиларног притиска, читава се почетно засићење лежишта водом S_{wi} за сваку криву и те вредности варирају од 4% до 32%.

Када лабораторијски подаци релативних пропусности гаса и воде нису доступни, примењује се низ емпиријских корелација за њихово одређивање. У докторској дисертацији коришћена је корелација коју су развили Brooks и Corey (Honarpour et al., 1986; Li & Horne, 2006; Pintér & Bódi, 2012). С обзиром на то да се ради о једном типу стене, одређивање релативних пропусности на основу капиларног притиска биће урађено на једној бушотини (X-4) и та вредност ће бити усвојена за цело лежиште.

Релативне пропусности за воду и гас одређују се коришћењем једначина 7.2 и 7.3:

$$k_{rw} = S_w^* \frac{2+3\lambda}{\lambda} \quad (7.2)$$

$$k_{rg} = (1 - S_w^*)^2 \cdot \left[1 - (S_w^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right] \quad (7.3)$$

где су:

λ – индекс дистрибуције пора по величини;

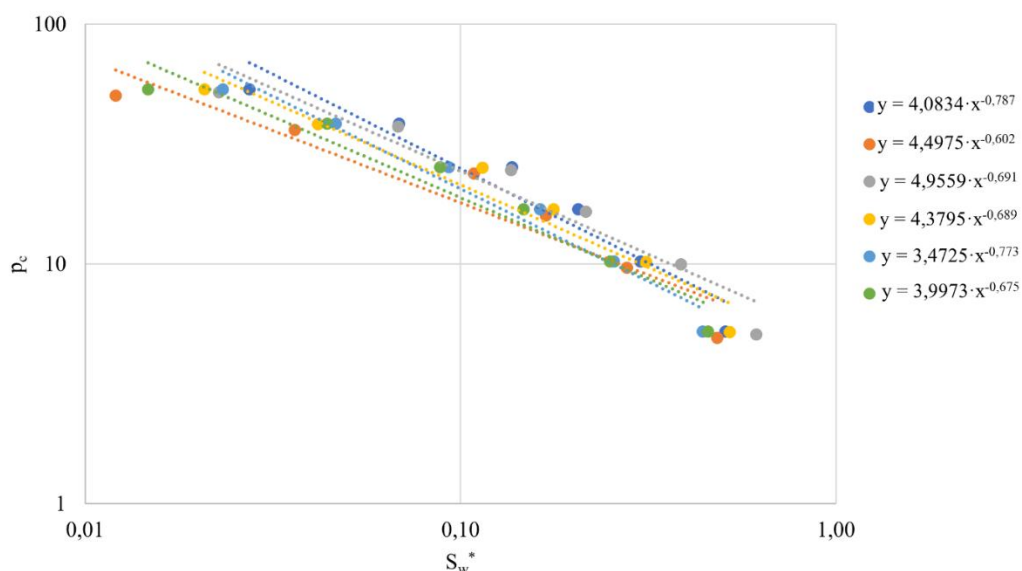
S_w^* – ефективно (нормализовано) засићење водом и одређује се једначином 7.4:

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{gc}} \quad (7.4)$$

Резидуално засићење гасом S_{gc} одређује се помоћу корелације (Ahmed, 2019):

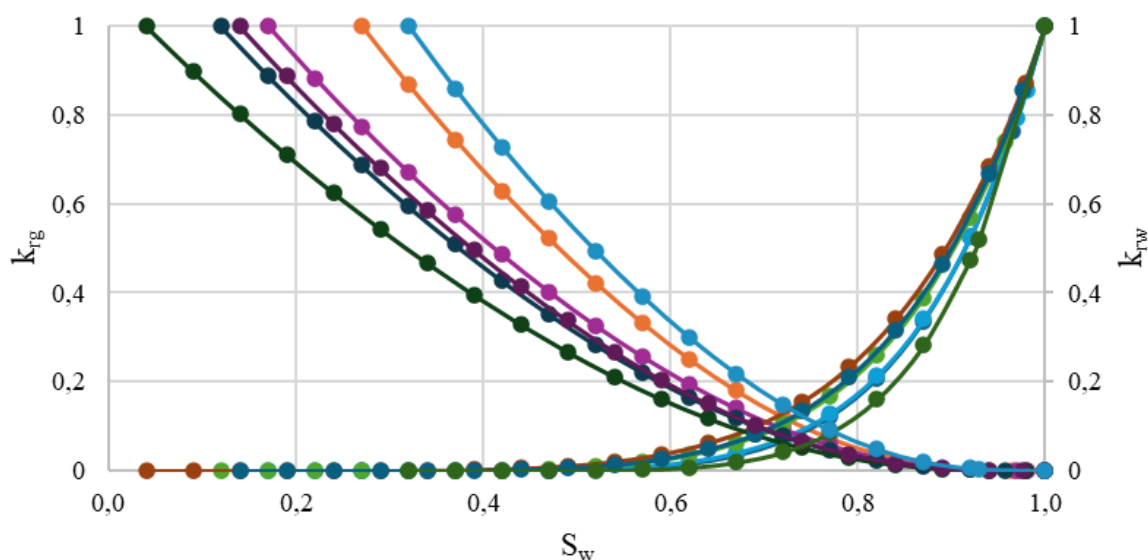
$$S_{gc} \approx 0,15 - 0,05 \log k \quad (7.5)$$

Конструисањем log-log дијаграма капиларног притиска у функцији ефективног засићења водом, нагиб праве линије представља индекс дистрибуције пора по величини ($y = a \cdot x^{-\lambda}$). Слика 7.53. представља графичко одређивање индекса дистрибуције пора по величини за сваки узорак бушотине X-4.



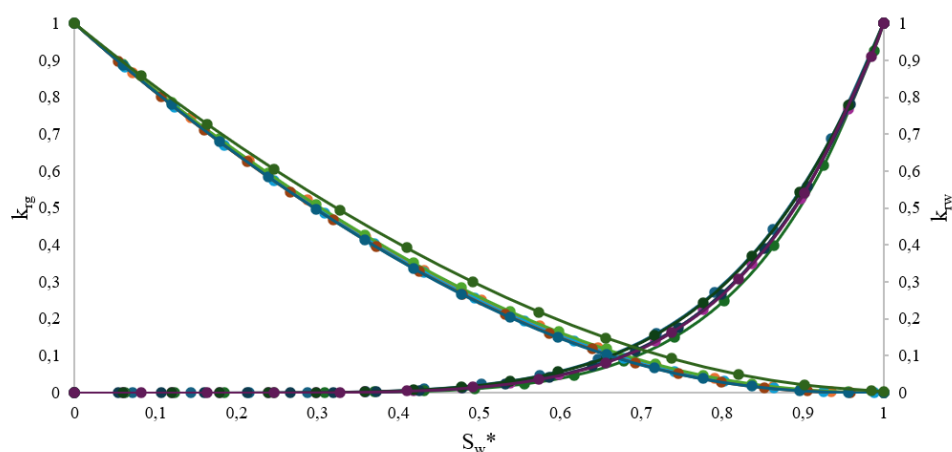
Слика 7.53. *log-log* дијаграм капиларног притиска у функцији ефективног засићења водом

На слици 7.54. дате су релативне пропусности за воду и гас, које су одређене коришћењем једначина 7.2 и 7.3 за шест узорака у бушотини X-4.



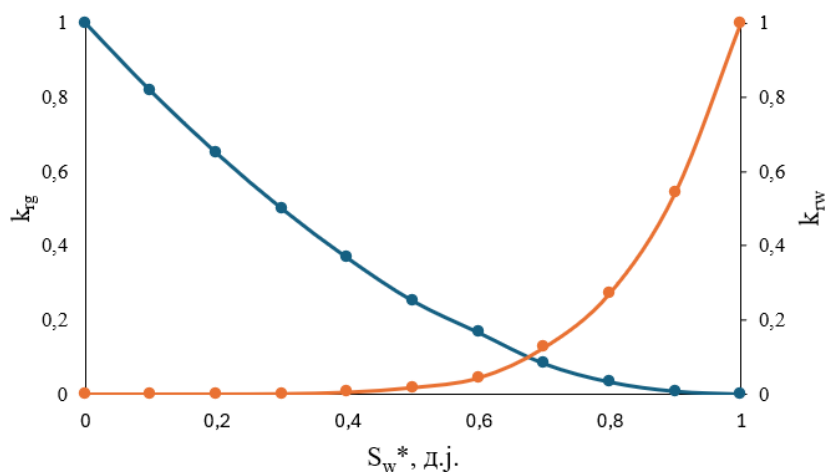
Слика 7.54. Релативне пропусности за воду и гас

Пошто су релативне пропусности израчунате за сваки језгровани слој, неопходно је урадити нормализацију кривих чије вредности се крећу од 0 до 1 и на тај начин избећи утицај различитих вредности резидуалних засићења воде и гаса (S_{gr} , S_{wi}) (слика 7.55.).



Слика 7.55. Нормализоване вредности релативних пропусности за гас и воду за бушотину X-4

Осредњавањем нормализованих вредности релативних пропусности за воду и гас добија се репрезентативна крива релативних пропусности која је дата на слици 7.56.

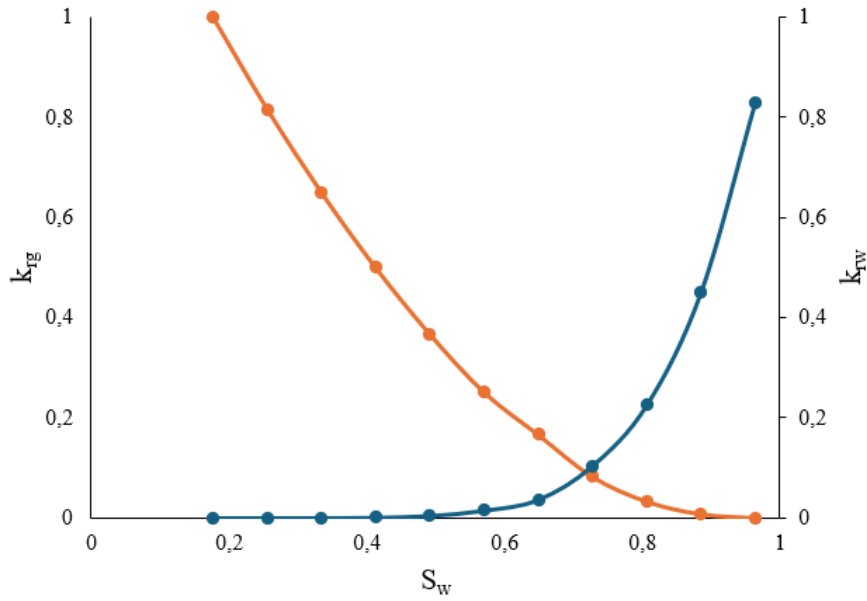


Слика 7.56. Средња нормализована вредност релативне пропусности за воду и гас (бушотина X-4)

Како би се криве релативних пропусности примениле на реалне услове, неопходно је урадити денормализацију средње нормализоване криве која ће узети у обзир стварна резидуална zasiћења водом и гасом. Вредности денормализоване криве релативних пропусности за гас и воду дате су у табели 7.66. и на слици 7.57.

Табела 7.66. Денормализоване вредности релативних пропусности за бушотину X-4

S_w	k_{rg}	k_{rw}
0,1767	1,0000	0,0000
0,2554	0,8164	$2,7672 \cdot 10^{-6}$
0,3342	0,6498	$8,8272 \cdot 10^{-5}$
0,4130	0,4997	0,0008
0,4917	0,3667	0,0042
0,5705	0,2509	0,0147
0,6492	0,1659	0,0363
0,7280	0,0820	0,1039
0,8068	0,0328	0,2250
0,8855	0,0076	0,4499
0,9643	0,0000	0,8285



Слика 7.57. Денормализоване криве релативних пропусности

Након што се одреде релативне пропусности флуида, за потребе лежишне симулације неопходно је дефинисати Коријеве експоненте који дефинишу облик криве релативне пропусности и на тај начин се врши усклађивање са доступним подацима (Zhou et al., 2017; Badawy & Ganat, 2022; Pairoys & Caubit, 2022). Вредности Коријевих експонената за воду (N_w) и гас (N_g) одређују се итеративним поступком, где се њихове вредности варирају све док се не добије најбоље подударање са кривама релативних пропусности добијених у претходном кораку, односно врши се њихова корекција. Једначине за одређивање релативних пропусности коришћењем Коријевих експонената су:

$$k_{rw} = k_{rw@S_{gc}} \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{gc}} \right)^{N_w} \quad (7.6)$$

$$k_{rg} = k_{rg@S_{wi}} \left(\frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{wi} - S_{gc}} \right)^{N_g} \quad (7.7)$$

Где су:

N_w – Коријев експонент за воду;

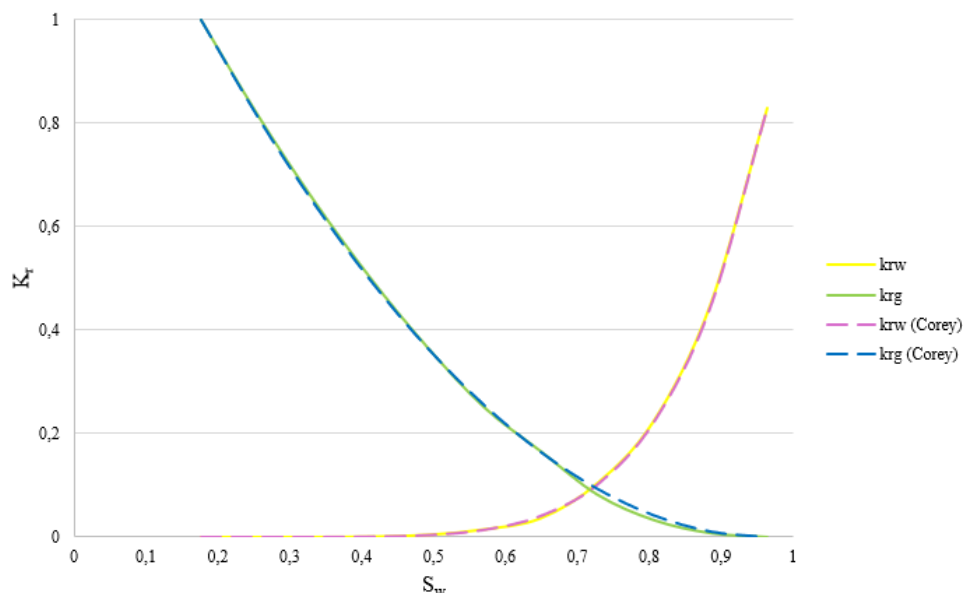
N_g – Коријев експонент за гас;

S_{gc} – критично засићење гасом, д.ј.;

$k_{rw@S_{gc}}$ – релативна пропусност воде за вредност резидуалног засићења гасом;

$k_{rg@S_{wi}}$ – релативна пропусност гаса за вредност резидуалног засићења водом.

На слици 7.58. дато је подударање моделоване криве применом Коријевих експонената са кривом релативних пропусности добијених у претходном кораку (слика 7.57.). Експоненти коришћени у једначинама 7.6 и 7.7 који дају најбоље подударање кривих су $N_w = 5,89$ и $N_g = 1,99$.



Слика 7.58. Подударање моделоване криве применом Коријевих експонената са кривом релативних пропусности

7.3.1.2. Особине гаса гасног лежишта „Л”

Компонентални састав гаса гасног лежишта „Л” приказан је у табели 7.67.

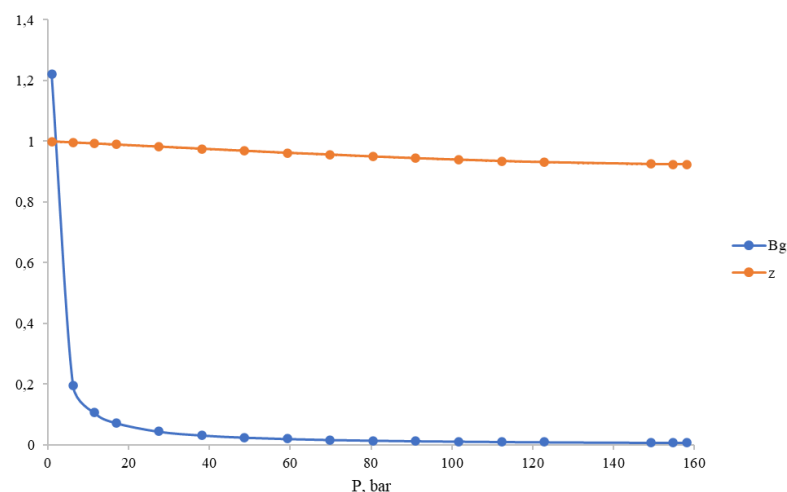
Табела 7.67. Компонентални састав гаса

Компонентални састав гаса	mol %
Угљен диоксид	0,34
Азот	0,25
Метан	99,29
Етан	0,08
Пропан	0,02
Изо-бутан	0,01
n-бутан	0,01

Лабораторијска PVT анализа није рађена за гасно лежиште „Л” и из тог разлога PVT особине гаса одређене су аналитички користећи податке компоненталног састава, почетног лежишног притиска и температуре. Почетни лежишни притисак износи 158,16 bar и температура 80,1°C. Графички приказ вредности фактора волумена формације за гас (B_g) и фактора компресибилитета (z) дат је на слици 7.59. На почетном лежишном притиску (158,16 bar) добијене су следеће вредности:

$$B_{gi} = 0,00724 \frac{m^3}{m^3}$$

$$z_i = 0,92423$$



Слика 7.59. PVT карактеристике гаса

7.3.1.3. Историјат производње и лежишног притиска гасног лежишта „Л”

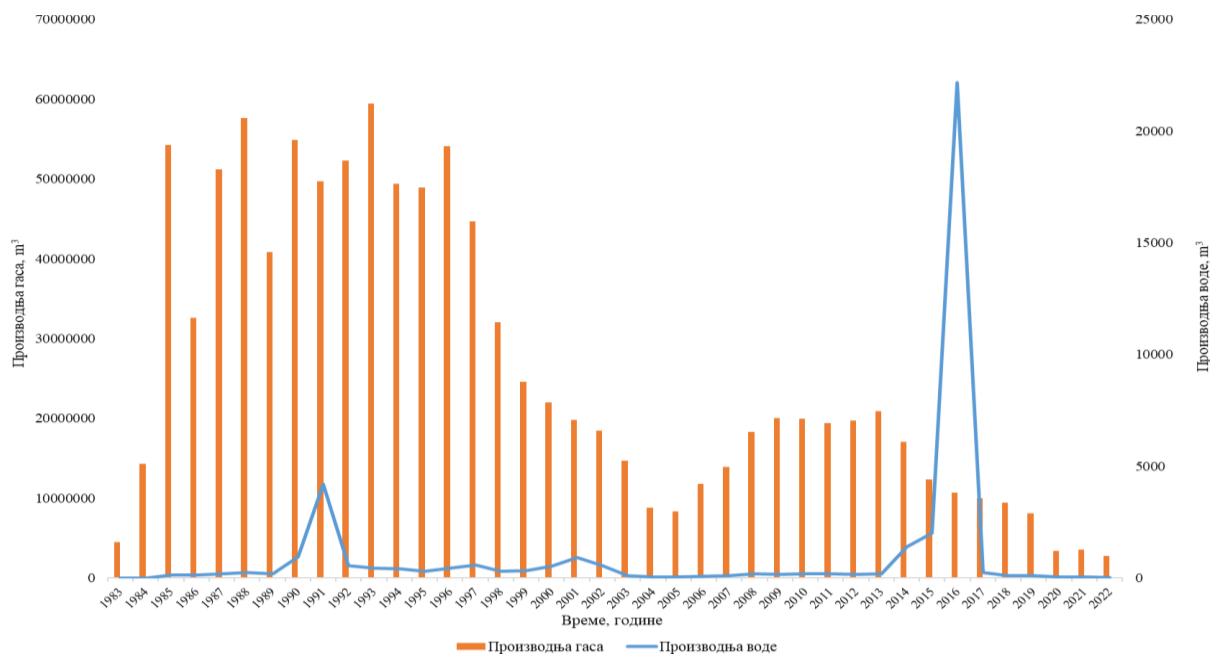
Производња гаса из гасног лежишта „Л” (алтернатива А1) почела је у октобру 1983. године у три бушотине (Х-10, Х-12 и Х-13), а четврта бушотина (Х-4) пуштена је у производњу у новембру исте године. Наредних година производња гаса одвијала се из још четири бушотине (Х-6, Х-7, Х-16 и Хs-001). У табели 7.68. дат је историјат производње гаса и воде гасног лежишта „Л” за период од 1983. године до 2022. године.

Табела 7.68. Годишња и укупна производња гаса и воде

Година	Годишња производња гаса (m ³)	Укупна производња гаса (m ³)	Годишња производња воде (m ³)	Укупна производња воде (m ³)
1983.	4 514 300	4 514 300	0	0
1984.	14 273 900	18 788 200	0	0
1985.	54 275 450	73 063 650	128,7	128,7
1986.	32 628 480	105 692 130	135,6	264,3
1987.	51 178 400	156 870 530	199	463,3
1988.	57 621 600	214 492 130	237,6	700,9
1989.	40 849 244	255 341 374	189,062	889,962
1990.	54 881 600	310 222 974	940,195	1 830,157
1991.	49 734 700	359 957 674	4 208,087	6 038,244
1992.	52 313 200	412 270 874	548,011	6 586,255
1993.	59 427 300	471 698 174	435,14	7 021,395
1994.	49 432 300	521 130 474	404,056	7 425,451
1995.	48 943 700	570 074 174	307,265	7 732,716
1996.	54 100 200	624 174 374	444,89	8 177,606
1997.	44 717 700	668 892 074	589,737	8 767,343
1998.	32 049 137	700 941 211	294,574	9 061,917
1999.	24 612 000	725 553 211	319,477	9 381,394
2000.	21 984 700	747 537 911	523,684	9 905,078
2001.	19 779 500	767 317 411	927,78	10 832,858
2002.	18 439 600	785 757 011	545,017	11 377,875
2003.	14 678 000	800 435 011	104,851	11 482,726
2004.	8 820 000	809 255 011	48,739	11 531,465
2005.	8 313 000	817 568 011	45,482	11 576,947

2006.	11 797 500	829 365 511	65,293	11 642,24
2007.	13 906 450	843 271 961	111,469	11 753,709
2008.	18 269 860	861 541 821	183,366	11 937,075
2009.	20 028 897	881 570 718	171,483	12 108,558
2010.	19 938 328	901 509 046	194,917	12 303,475
2011.	19 443 844	920 952 890	194,547	12 498,022
2012.	19 683 906	940 636 796	172,087	12 670,109
2013.	20 919 764	961 556 560	180,836	12 850,945
2014.	17 046 828	978 603 388	1393	14 243,945
2015.	12 346 569	990 949 957	2 021,737	16 265,682
2016.	10 696 153,16	1 001 646 110	22 155,356	38 421,038
2017.	9 995 888,962	1 011 641 999	243,591	38 664,629
2018.	9 407 409,608	1 021 049 409	92,464	38 757,093
2019.	8 094 108,436	1 029 143 517	93,456	38 850,549
2020.	3 420 582,237	1 032 564 099	37,286	38 887,835
2021.	3 573 692,425	1 036 137 792	48,329	38 936,164
2022.	2 797 520,19	1 038 935 312	15,016	38 951,18

На слици 7.60. представљена је динамика производње гаса и воде. Види се пораст производње воде 1991. године јер је дошло до заводњавања у бушотини X-12, па је убрзо затворена. Такође, нагли пораст производње воде био је 2016. године у бушотини X-16. Тај проблем је решен затварањем интервала који производи воду и перфорирањем новог интервала. Ова операција дала је очекиване резултате и бушотина је наставила да производи гас до октобра 2018. године.



Слика 7.60. Годишња производња гаса и воде

У табели 7.69. дате су вредности историјата лежишног притиска који су мерени у пет бушотина.

Табела 7.69. Историјат лежишног притиска (bar)

Датум мерења	Бушотина				
	X-4	X-6	X-10	X-12	X-13
28. 3. 1984.	156,5		156,3	155,8	154,9
1. 4. 1984.			156,2	155,8	154,9
22. 5. 1984.	155,9		155,7	155,4	155,6
1. 6. 1984.			155,6	155,4	155,5
16. 10. 1984.		154,7			
19. 5. 1985.	150,7	150,0		150,2	149,3
1. 6. 1985.		149,7		149,9	149,0
1. 6. 1986.	145,4	145,0	145,4	144,7	144,4
16. 6. 1986.		144,9	145,3	144,7	144,4
16. 9. 1987.		137,8	138,4	137,6	137,5
1. 8. 1988.	132,4	131,9	132,3	131,8	131,4
16. 8. 1988.		131,7	132,1	131,6	131,4
1. 6. 1989.	126,0	125,6	126,1	125,4	125,2
9. 6. 1989.		125,6	126,2	125,4	125,1
1. 4. 1990.	121,0	120,5			119,8
16. 4. 1990.		120,3			119,7
1. 4. 1991.	114,4	113,8	114,9	114,4	113,2
13. 4. 1991.		113,8	114,7	114,2	113,2
10. 3. 1992.	108,9	108,5	109,1	107,5	108,0
18. 3. 1992.		108,4	108,9	107,4	107,9
1. 9. 1993.		99,4			99,2
8. 9. 1993.		99,0			98,7
16. 8. 1994.	93,5	93,4	92,8	94,1	94,1
24. 8. 1994.		93,3	92,7	94,0	94,0

7.3.2. Усаглашавање историјата

На основу доступних историјских података и дефинисања дистрибуције параметара добијених корелацијама одређених зависности, започиње се унос података у симулациони модел. Након иницијализације модела, један од кључних и најзахтевнијих корака је провера конзистентности модела, односно његова валидација која се врши усаглашавањем историјата добијеног у моделу и расположивих историјских података производње и притиска. Дакле, циљ „мечовања” је креирање модела који веродостојно описује реално понашање лежишта и једино такав може да се користи за даљу анализу тј. на тај начин обезбеђује се адекватно предвиђање будућег производног понашања, што представља предуслов развоја оптималног плана управљања лежиштем.

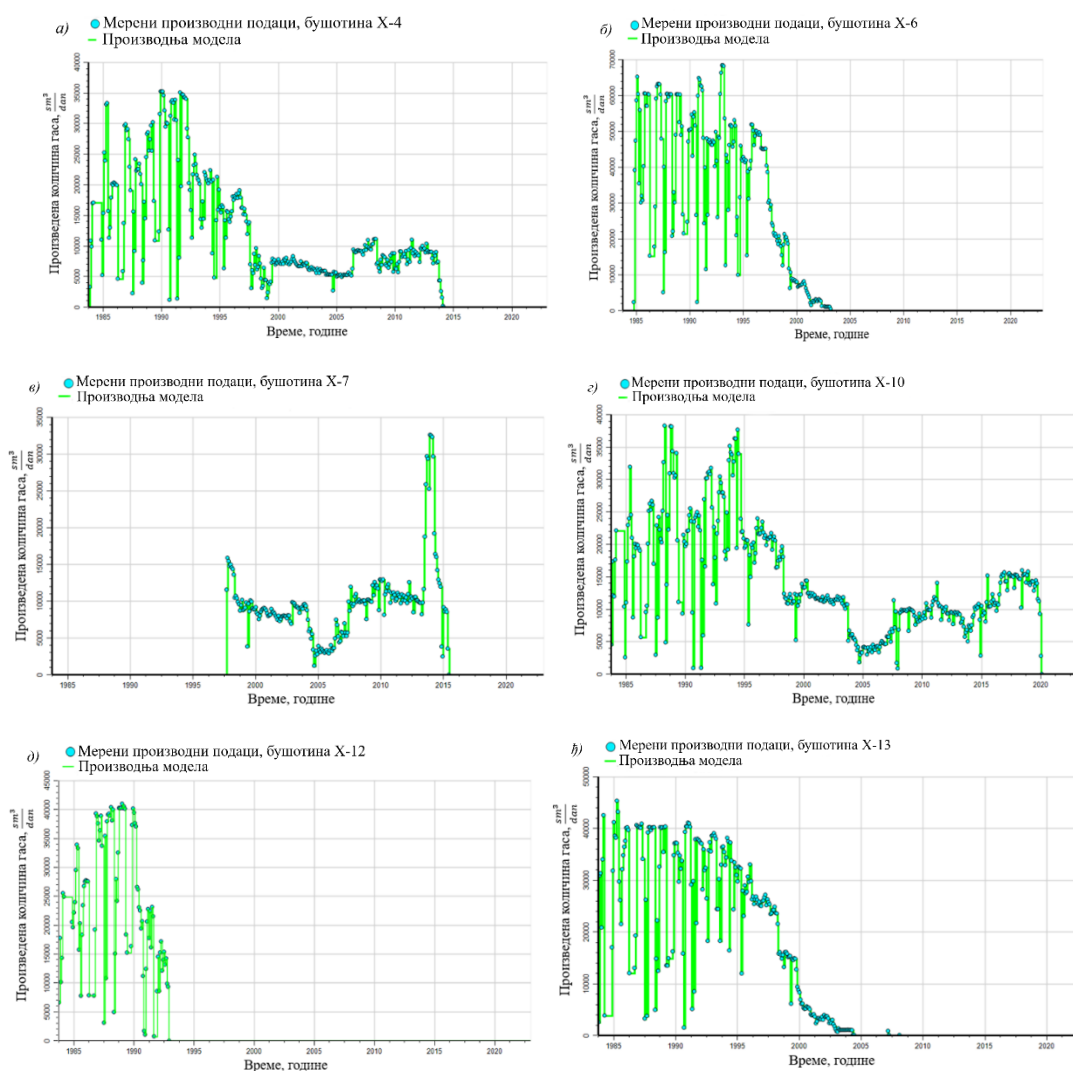
Приликом првог „мечовања” није добијено потпуно слагање историјских података са подацима добијеним у моделу. С обзиром на то да је циљ прилагођавање улазних параметара како би се добило потпуно слагање у подацима, параметар са највећим степеном неизвесности је пропусност и његовом корекцијом дошло је до подударања. Корелација за одређивање пропусности, на основу које је добијено подударање у подацима је: $k = 2 \cdot 0,2128 \cdot e^{23,197 \cdot \phi}$.

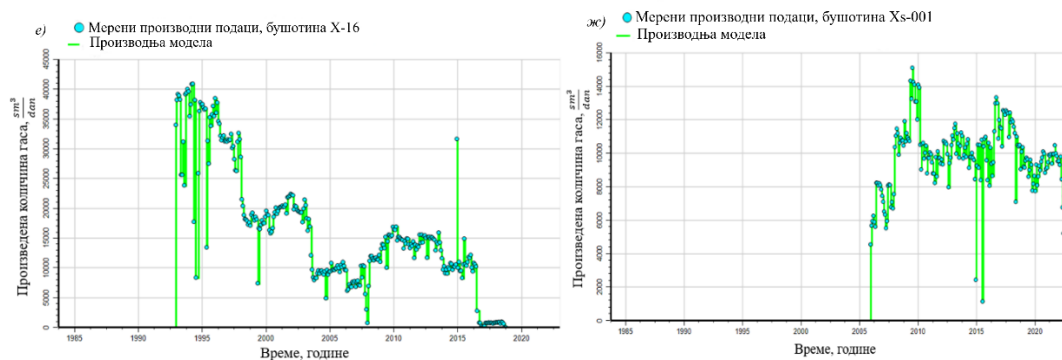
Приликом „мечовања” историјата коришћени су подаци о производњи гаса и притиску. „Мечовање” историјата добијеног у моделу са реалним историјатом производње рађено је за цело лежиште, као и за сваку производну бушотину. Слика 7.61. даје приказ усаглашавања историјата производње гаса за цело лежиште, док је на слици 7.62. (а–ж) дато „мечовање” за сваку производну бушотину појединачно. Подаци о историјату пада притиска у лежишту расположиви су у пет бушотина, и приказ „мечовања” за те бушотине дат је на слици 7.63. (а–

д). Плаве тачке на сликама представљају мерене вредности притиска и производње, док зелене линије представљају резултате симулације. На основу приказаних резултата (слике 7.61.–7.63.), може се закључити да је постигнуто потпуно усаглашавање историјских података са подацима добијеним у моделу како у погледу динамике производње тако и у погледу промене лежишног притиска.

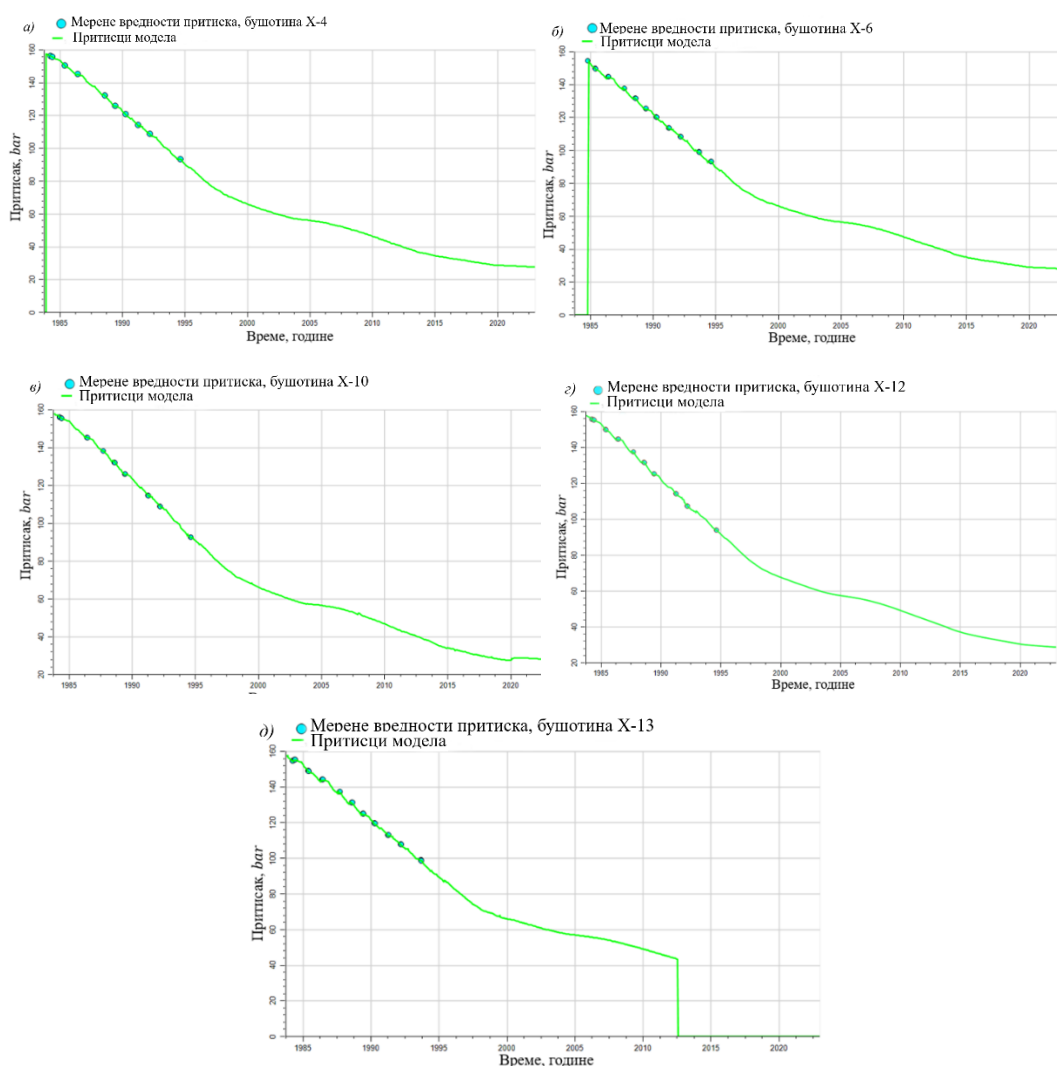


Слика 7.61. „Мечовање” производног историјата и историјата модела за гасно лежиште „Л”





Слика 7.62. „Мечовање” производног историјата и историјата модела за бушотине: а) X-4, б) X-6, в) X-7, г) X-10, д) X-12, ђ) X-13, е) X-16 и жс) Xs-001



Слика 7.63. „Мечовање” мереног притиска и притиска добијеног моделом за бушотине: а) X-4, б) X-6, в) X-16, г) X-2 и д) X-13

Поред усаглашавања историјата притиска и производње са подацима добијеним у моделу, урађена је и верификација почетних геолошких резерви гаса. Због поверљивости података, приказ „мечовања” геолошких резерви није приказан, али је потврђено усаглашавање у подацима. На овај начин потврђена је поузданост модела, тј. да симулациони модел квалитетно и реално описује лежиште и могуће је наставити са даљим анализама и предвиђањима.

7.3.3. Прогноза утискивања угљен диоксида и праћење будућег понашања лежишта

Након успешног „мечовања” које је доказано подударењем историјата производње и притисака са резултатима добијеним симулационим моделом, приступа се следећем кораку који се односи на поступке одређивања параметара процеса утискивања угљен диоксида и анализу понашања лежишта у различитим условима. За анализу процеса утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л” примењен је композитни симулациони лежишни модел који укључује ефекте фазних понашања и њихових карактеристика, односно омогућава моделовање интеракција између CO_2 и лежишних флуида (гаса и воде), као и анализу различитих механизма акумулирања који се јављају у лежишту.

У овој фази дефинише се осам сценарија утискивања угљен диоксида са аспекта различитих инјекционих бушотина, као и њиховог распореда и локације у лежишту. У сценаријима су постојеће производне бушотине примењене као инјекционе бушотине за утискивање угљен диоксида у циљу складиштења (8 производних бушотина = 8 инјекционих бушотина = 8 сценарија).

У свим симулационим сценаријима анализирано је утискивање угљен диоксида са константном дневном количином од $250\,000\text{ sm}^3$ до вредности максималног дозвољеног притиска на дну бушотине (ВНР) од 160 bar, који је дефинисан у циљу очувања интегритета лежишта и заштитних стена. Када се достигне вредност максималног дозвољеног притиска, утискивање угљен диоксида се завршава. Након завршеног периода утискивања, бушотине се затварају и ради се дугорочна симулација праћења понашања тј. кретања CO_2 у лежишту и врши анализа механизма акумулирања у временском периоду од 500 година. Овај дужи временски интервал праћења понашања угљен диоксида веома је важан за сагледавање механизма акумулирања који су доминантни тек после одређеног временског периода, као што су резидуално акумулиран CO_2 и CO_2 растворен у води.

Добијени резултати симулационог модела за сваки сценарио обухватају: вредности кумулативне количине утиснутог угљен диоксида који се утискује до вредности максимално дозвољеног притиска, просторна и временска дистрибуција угљен диоксида у лежишту, као и детаљна анализа доминантних механизма акумулирања, односно приказ понашања угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након његовог престанка.

Овако дефинисани сценарији омогућавају свеобухватну анализу ефикасности процеса складиштења, као и анализу утицаја просторне локације инјекционе бушотине на понашање угљен диоксида у лежишту. Такође, дугорочна симулација омогућава и анализу механизма акумулирања који се јављају у лежишту, нарочито када је реч о резидуално акумулираном CO_2 и CO_2 раствореном у води. Ови механизми акумулирања доприносе безбедном задржавању у лежишту и представљају основу за оптимизацију стратегије утискивања и складиштења угљен диоксида.

У табели 7.70. дат је преглед дефинисаних сценарија, време трајања процеса утискивања, као и кумулативне количине утиснутог CO_2 у лежиште.

Табела 7.70. Преглед дефинисаних симулационих сценарија

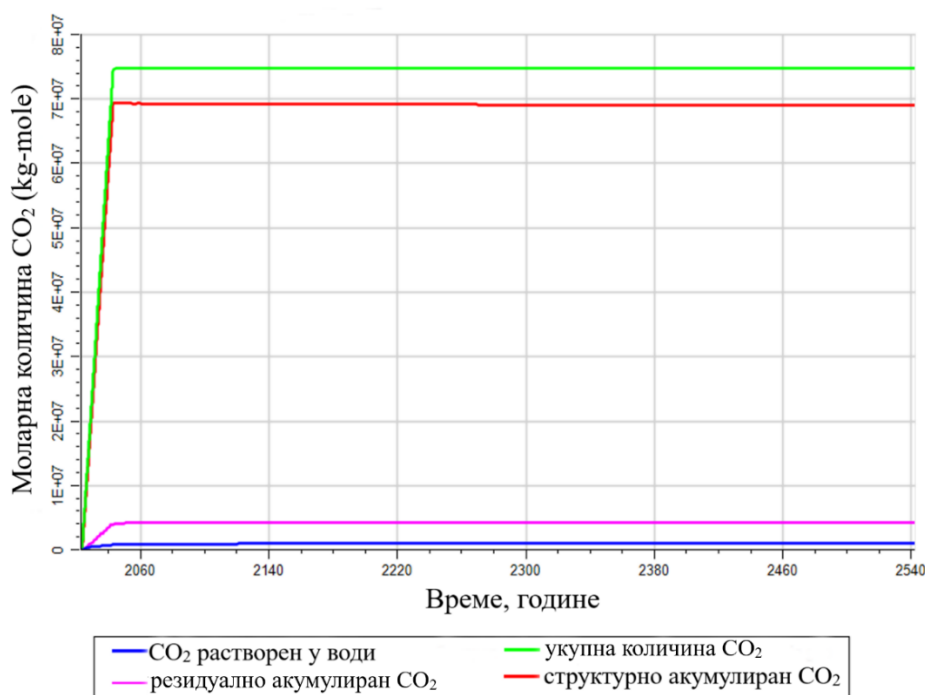
Сценарио	Бушотина	Период утискивања	Кумулативна количина утиснутог CO ₂ (sm ³)	Моларна кумулативна количина утиснутог CO ₂ (kg-mole)
Сценарио 1	X-4	1. 1. 2023 – 1. 6. 2042.	1 772 699 520	$7,49 \cdot 10^7$
Сценарио 2	X-6	1. 1. 2023 – 16. 4. 2042.	1 761 261 184	$7,438 \cdot 10^7$
Сценарио 3	X-7	1. 1. 2023 – 16. 8. 2043.	1 882 946 304	$7,952 \cdot 10^7$
Сценарио 4	X-10	1. 1. 2023 – 1. 8. 2039.	1 513 912 064	$6,394 \cdot 10^7$
Сценарио 5	X-12	1. 1. 2023 – 1. 6. 2042.	1 772 802 688	$7,488 \cdot 10^7$
Сценарио 6	X-16	1. 1. 2023 – 1. 11. 2042.	1 810 939 904	$7,648 \cdot 10^7$
Сценарио 7	X-13	1. 1. 2023 – 22. 6. 2032.	865 062 080	$3,655 \cdot 10^7$
Сценарио 8	Xs-001	1. 1. 2023 – 18. 7. 2026.	323 503 488	$1,369 \cdot 10^7$

У наставку је дат приказ резултата симулације за сваки дефинисани сценарио.

7.3.3.1. Резултати примене симулационог модела – сценарио 1

Период утискивања угљен диоксида у бушотину X-4 трајао је до јуна 2042. године и кумулативна количина утиснутог CO₂ износи 1 772 699 520 sm³.

Анализа механизма акумулирања угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након престанка утискивања дата је на слици 7.64. и у табели 7.71. Моларна количина угљен диоксида (kg-mole) приказана је за случај растварања у води, резидуалног акумулирања и структурног акумулирања (слободна фаза CO₂). Резултати симулационог модела показују да је структурно акумулирање CO₂ доминантан механизам акумулирања. Након престанка утискивања, долази до прерасподеле CO₂ у лежишту, при чему се благо смањује количина слободног угљен диоксида, а повећава количина резидуално акумулираног CO₂ и CO₂ раствореног у води. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (јун 2542. године), $69,247 \cdot 10^6$ kg-mol CO₂ је структурно акумулирано, $4,438 \cdot 10^6$ kg-mol угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $11,926 \cdot 10^5$ kg-mol CO₂ растворено у води.

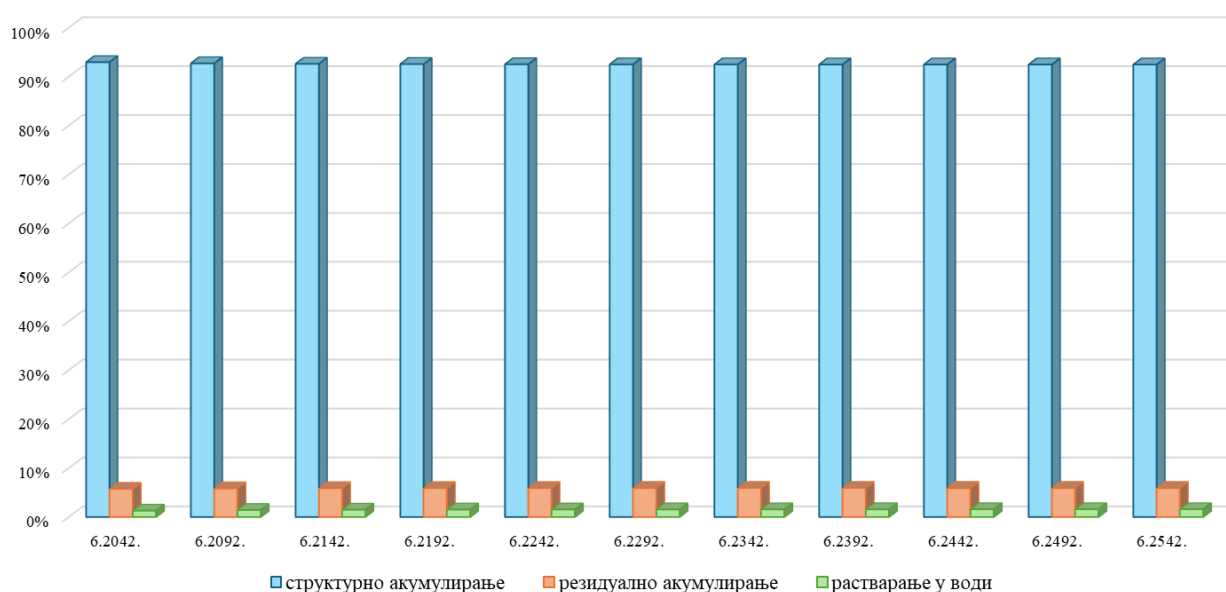


Слика 7.64. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 1)

Табела 7.71. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 1)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO ₂ , kg-mole	Резидуално акумулиран CO ₂ , kg-mole	CO ₂ растворен у води, kg-mole
100	69,348·10 ⁶	4,414·10 ⁶	11,128·10 ⁵
200	69,292·10 ⁶	4,435·10 ⁶	11,504·10 ⁵
300	69,267·10 ⁶	4,4398·10 ⁶	11,705·10 ⁵
400	69,255·10 ⁶	4,4394·10 ⁶	11,831·10 ⁵
500	69,247·10 ⁶	4,438·10 ⁶	11,926·10 ⁵

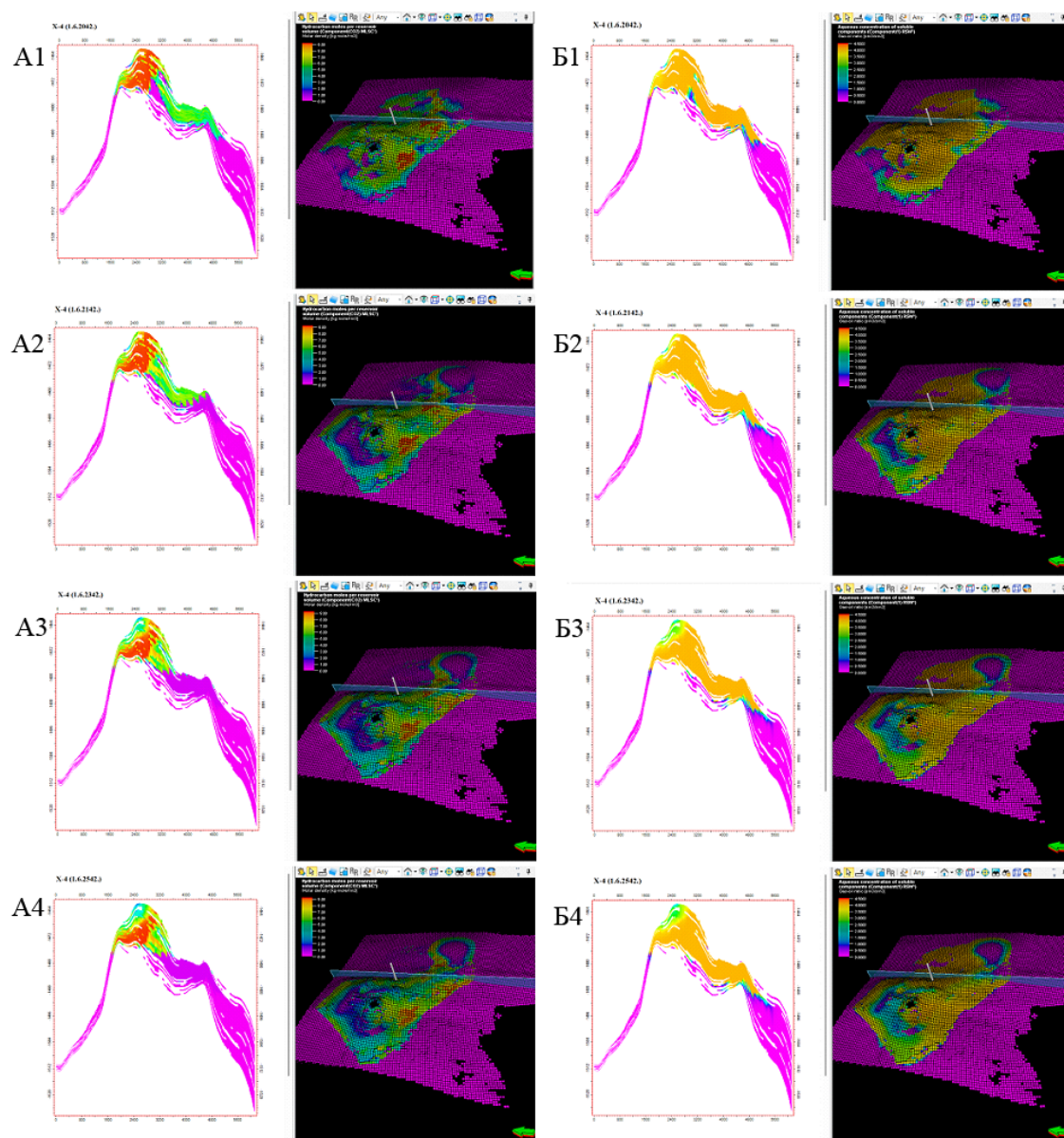
Процентуално учешће механизма акумулирања током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.65. На крају праћења понашања CO₂ у лежишту, структурно је акумулирано 92,48%, 5,93% је резидуално акумулирано и 1,59% угљен диоксида је растворено у води. Иако је структурно акумулирање доминантан режим, веома је значајан пораст удела резидуално акумулираног и раствореног CO₂ у води, јер се на тај начин смањује мобилност угљен диоксида која ће са временом бити све израженија.

Слика 7.65. Процентуално учешће механизма акумулирања CO₂ (сценарио 1)

На слици 7.66. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO₂ раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања. На основу 3D приказа дистрибуције угљен диоксида у лежишту омогућене су идентификација зона са највећом концентрацијом CO₂, анализа миграције кроз лежиште, као и праћење прерасподеле током времена.

У тренутку престанка утискивања, уочава се релативно добра распрострањеност угљен диоксида у лежишту, при чему је вертикална миграција доминантнија у односу на латерално ширење облака CO₂. У тренутку престанка утискивања максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта износи 9,27 kg-mole/m³. Након престанка утискивања, долази до постепене миграције и прерасподеле угљен диоксида у лежишту под утицајем гравитационих сила и разлике у густини између CO₂ и лежишних флуида. Највеће вредности моларне густине CO₂ јављају се у структурно највишим деловима, што потврђује да је структурно акумулирање доминантан механизам акумулирања. Сто година након престанка утискивања долази до благог смањења зона са највећим концентрацијама слободног угљен диоксида и његовог кретања ка врху структуре, док се обухват раствореног CO₂ у води повећава, што указује на то да се процес растварања наставља и након завршетка утискивања. 300 година од престанка утискивања, слободни угљен диоксид је претежно концентрисан у

врху структуре, док растворени CO_2 захвата већи део лежишта него у ранијим фазама. На основу тога закључује се да долази до постепеног смањења мобилности слободног угљен диоксида и повећања количине раствореног CO_2 у води. После 500 година промене у дистрибуцији угљен диоксида су мање изражене што указује на то да је расподела у лежишту у стабилном стању.



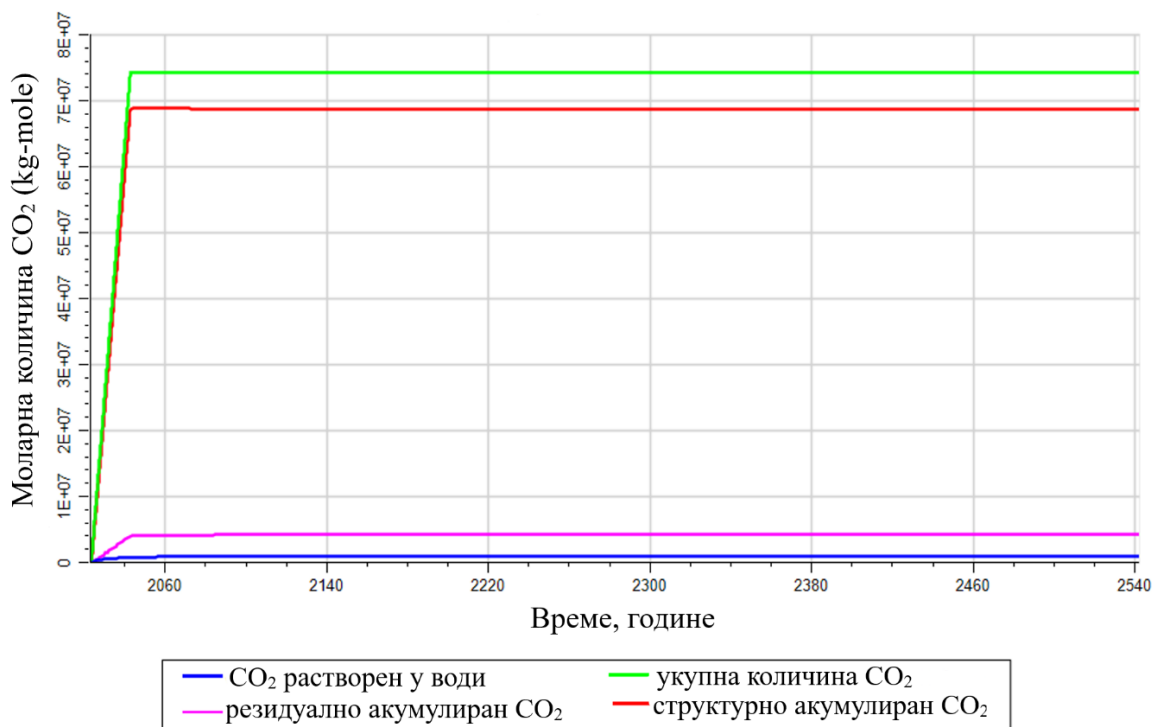
Слика 7.66. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 1

7.3.3.2. Резултати примене симулационог модела – сценарио 2

Период утискивања угљен диоксида у бушотину Х-6 трајао је до средине априла 2042. године. Динамика утискивања у овом сценарију има сличан тренд као претходни, при чему је период утискивања неколико месеци краћи што резултује и мало мањом кумулативном количином утиснутог CO_2 . Утиснута кумулативна количина CO_2 у овом случају износи 1 761 261 184 sm^3 .

Приказ анализе моларне количине угљен диоксида (kg-mole) за различите механизме акумулирања који се јављају у лежишту за време утискивања и након престанка утискивања дат је на слици 7.67. и у табели 7.72. Резултати симулационог модела показују да је структурно

акумулирање CO_2 доминантан механизам акумулирања, што је у суштини и карактеристично за исцрпљена гасна лежишта. Након престанка утискивања, долази до кретања CO_2 у лежишту и благог пораста удела резидуално акумулираног CO_2 и CO_2 раствореног у води.



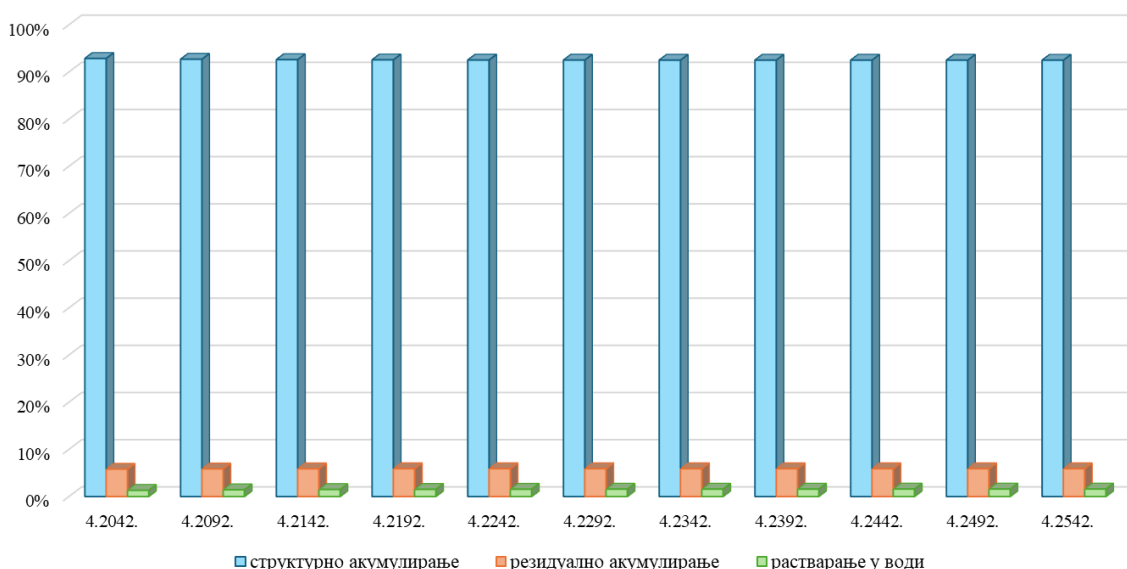
Слика 7.67. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 2)

У табели 7.72. дат је квантитативни приказ расподеле угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у лежишту за све механизме акумулирања у различитим временским интервалима. Анализа резултата показује да током времена долази до благог смањења слободног CO_2 и прерасподеле у лежишту. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (април 2542. године), $68,03 \cdot 10^6$ kg-mol CO_2 је структурно акумулирано, $4,394 \cdot 10^6$ kg-mol угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $11,878 \cdot 10^5$ kg-mol CO_2 растворено у води.

Табела 7.72. Дистрибуција CO_2 по механизмима акумулирања (сценарио 2)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO_2 , kg-mole	Резидуално акумулиран CO_2 , kg-mole	CO_2 растворен у води, kg-mole
100	$68,886 \cdot 10^6$	$4,384 \cdot 10^6$	$11,119 \cdot 10^5$
200	$68,831 \cdot 10^6$	$4,4012 \cdot 10^6$	$11,513 \cdot 10^5$
300	$68,814 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^6$	$11,69 \cdot 10^5$
400	$68,807 \cdot 10^6$	$4,397 \cdot 10^6$	$11,798 \cdot 10^5$
500	$68,803 \cdot 10^6$	$4,394 \cdot 10^6$	$11,878 \cdot 10^5$

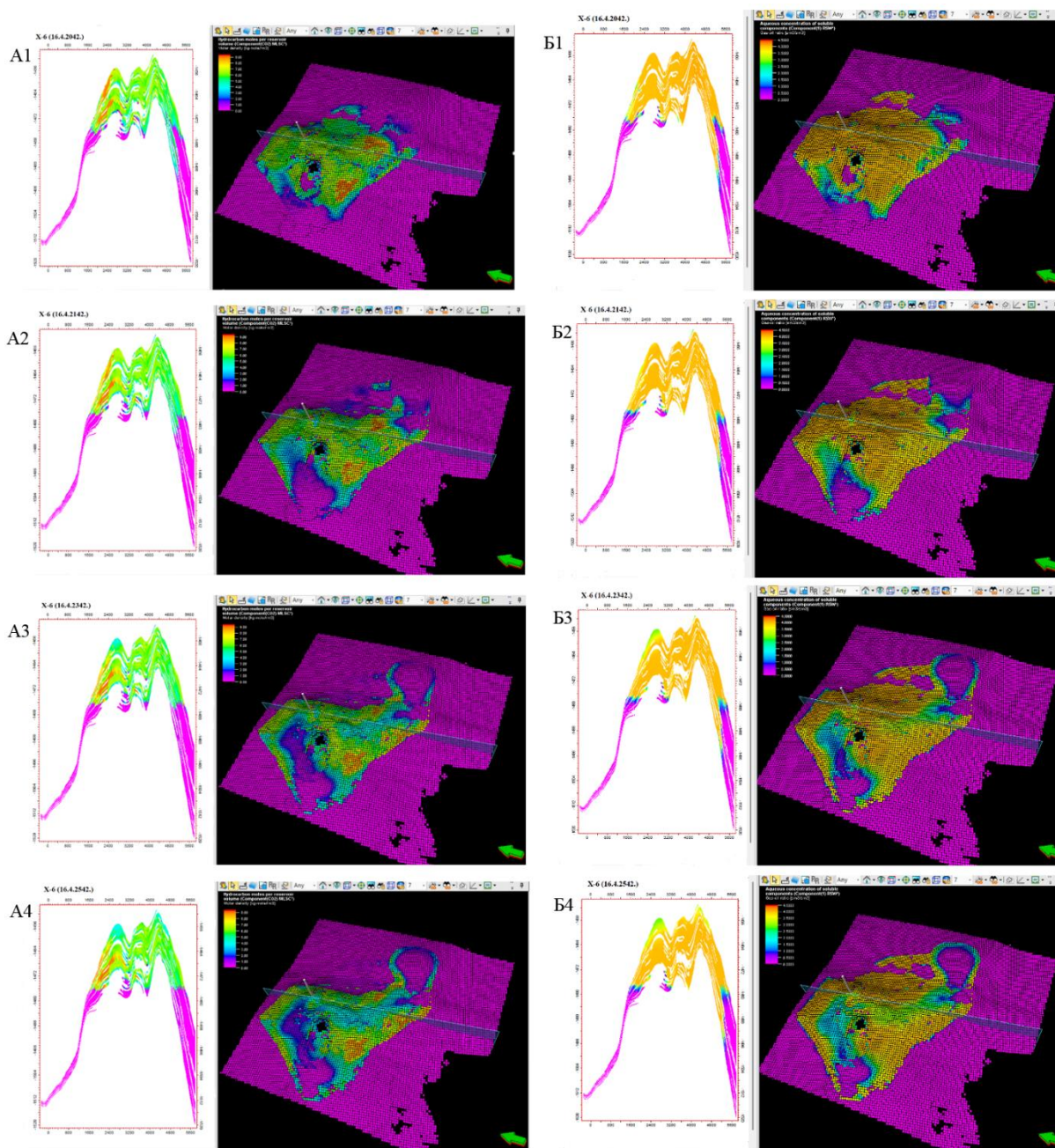
Процентуално учешће механизма акумулирања током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.68. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, структурно је акумулирано 92,5%, 5,9% је резидуално акумулирано и 1,6% угљен диоксида је растворено у води. Уочава се сличност процентуалног учешћа механизма акумулирања са претходним сценаријом односно просторна локација бушотине Х-6 има скоро исту динамику као и бушотина Х-4 (сценарио 1).



Слика 7.68. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 2)

На слици 7.69. представљен је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

У поређењу са претходним сценариом, могу се уочити одређене разлике у просторној дистрибуцији угљен диоксида у дефинисаним временским интервалима, на шта пре свега утиче локација инјекционе бушотине у лежишту. У тренутку престанка утискивања максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта износи $9,45 \text{ kg-mole/m}^3$. Разлике се огледају у путевима миграције и обухвату лежишта облаком CO_2 , док су механизми акумулирања и њихово процентуално учешће током мониторинга приближни. Дакле, положај бушотине утиче на просторну дистрибуцију угљен диоксида у лежишту, али осим тога нема значајне разлике у механизмима акумулирања у односу на сценарио 1.

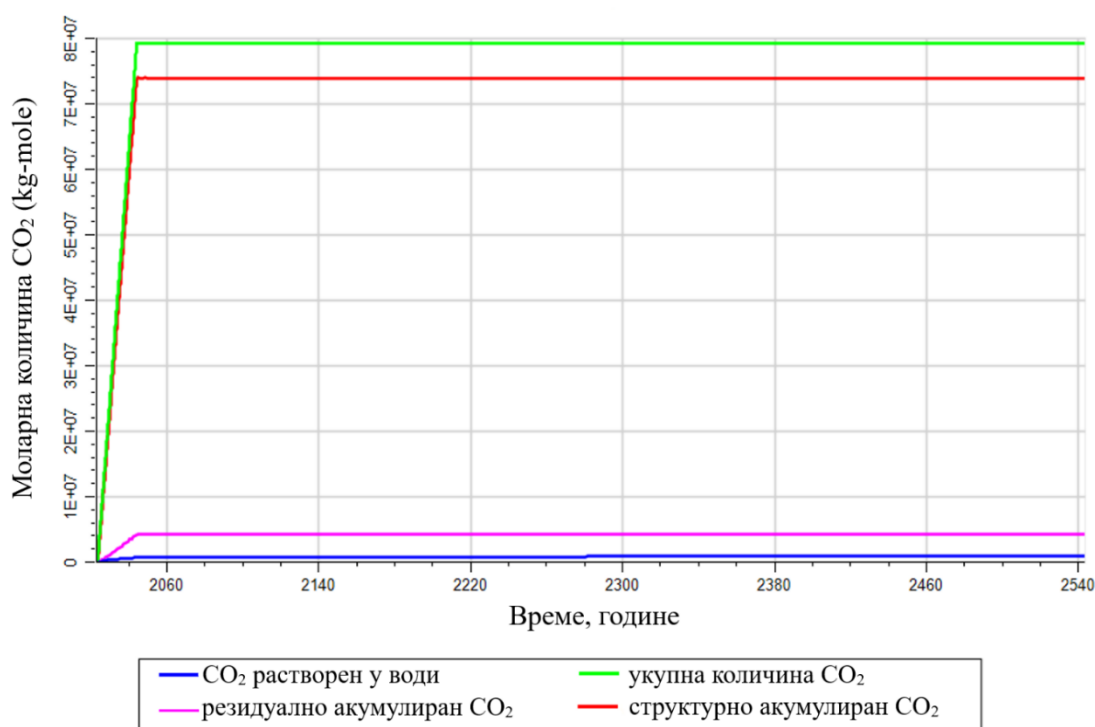


Слика 7.69. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 2

7.3.3.3. Резултати примене симулационог модела – сценарио 3

Овај сценарио утискивања угљен диоксида у бушотину X-7 карактерише највећа кумулативна количина угљен диоксида која износи $1\,882\,946\,304\text{ sm}^3$, као и најдужи период утискивања који траје до 16. августа 2043. године.

Моларна количина механизма акумулирања угљен диоксида (CO_2 растворен у води, резидуално и структурно акумулиран) за време утискивања и након престанка у kg-mole data је на слици 7.70.



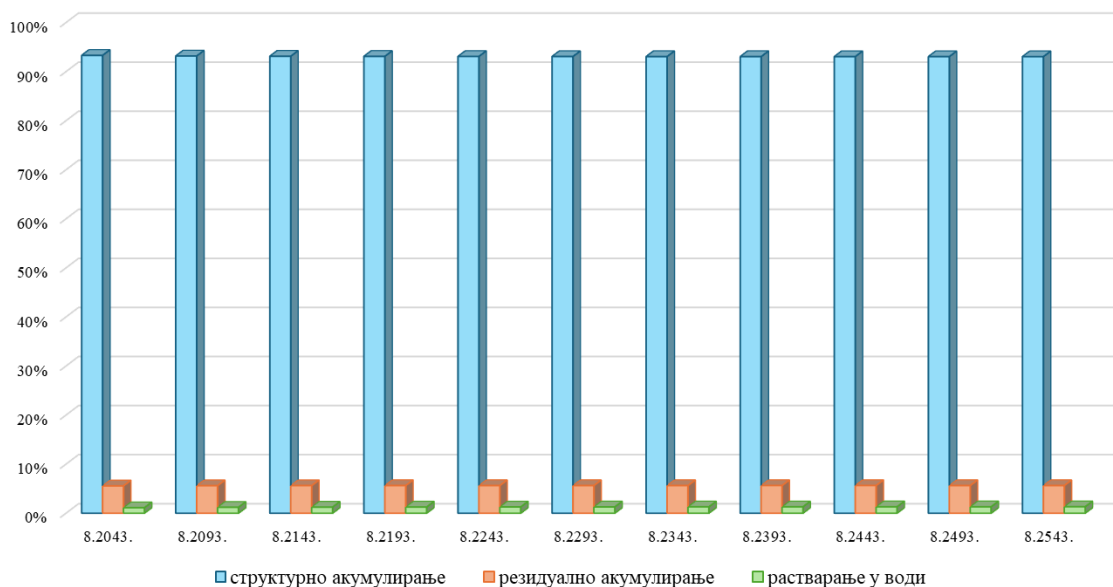
Слика 7.70. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 3)

У табели 7.73. дат је квантитативни приказ моларне количине угљен диоксида у одређеним временским интервалима. Највећа утиснута количина CO_2 узрокује и његово кретање ка врху структуре, што резултује и највећом количином структурно акумулираног угљен диоксида. Током времена долази до прерасподеле и део структурно акумулираног CO_2 постаје резидуално акумулиран, док се део раствара у води. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (август 2543. године), $73,994 \cdot 10^6 \text{ kg-mol CO}_2$ је структурно акумулирано, $4,485 \cdot 10^6 \text{ kg-mol}$ угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $10,44 \cdot 10^5 \text{ kg-mol CO}_2$ растворено у води.

Табела 7.73. Дистрибуција CO_2 по механизмима акумулирања (сценарио 3)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO_2 , kg-mole	Резидуално акумулиран CO_2 , kg-mole	CO_2 растворен у води, kg-mole
100	$74,062 \cdot 10^6$	$4,474 \cdot 10^6$	$9,855 \cdot 10^5$
200	$74,029 \cdot 10^6$	$4,483 \cdot 10^6$	$10,12 \cdot 10^5$
300	$74,0099 \cdot 10^6$	$4,4865 \cdot 10^6$	$10,27 \cdot 10^5$
400	$73,999 \cdot 10^6$	$4,4872 \cdot 10^6$	$10,37 \cdot 10^5$
500	$73,994 \cdot 10^6$	$4,485 \cdot 10^6$	$10,44 \cdot 10^5$

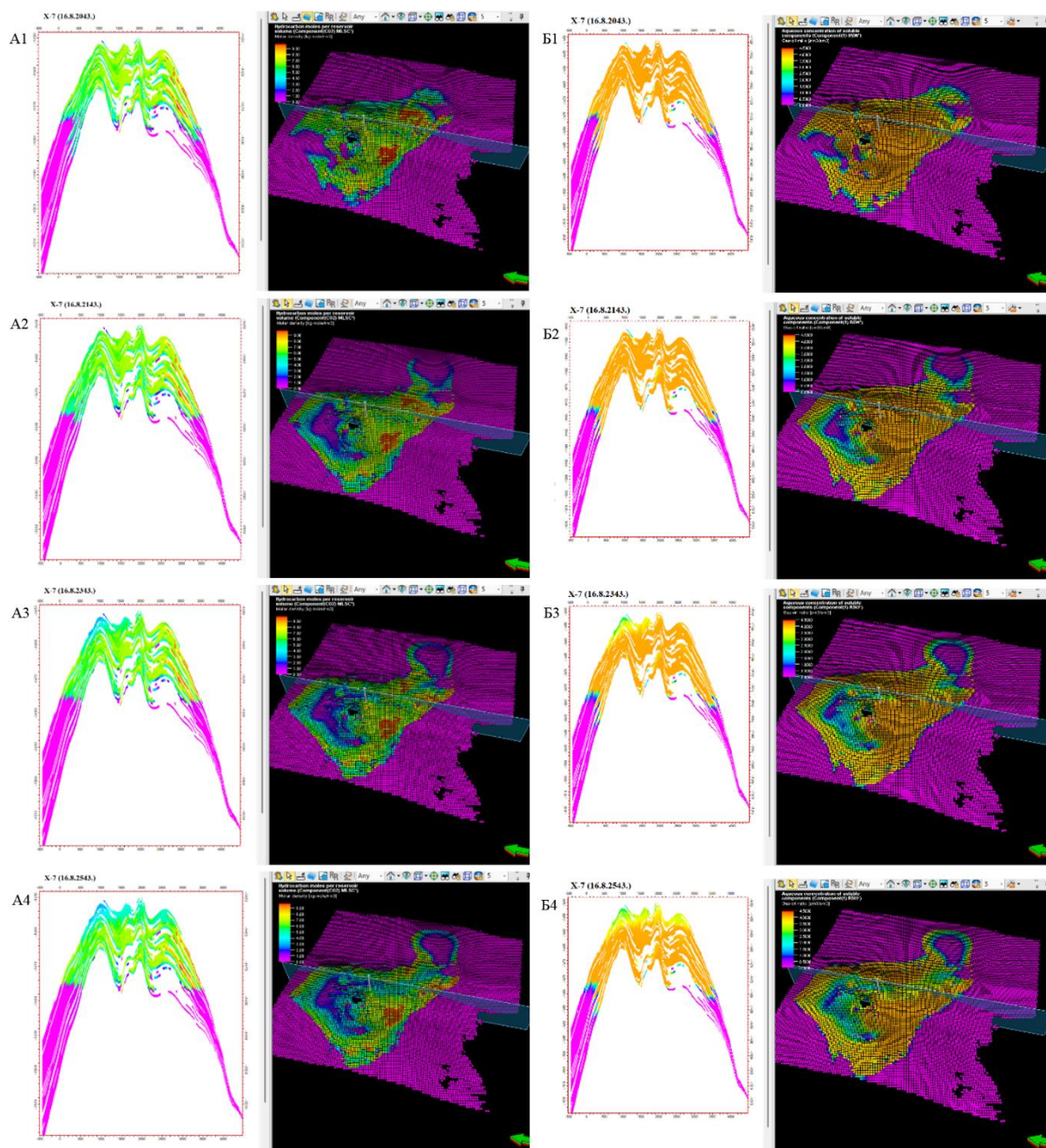
Процентуално учешће механизма акумулирања током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.71. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, структурно је акумулирано 93,05%, 5,64% је резидуално акумулирано и 1,31% угљен диоксида је растворено у води. Иако је капацитет складиштења у овом сценарију највећи, удео резидуално акумулираног угљен диоксида и угљен диоксида у води је низак.



Слика 7.71. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 3)

На слици 7.72. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

Просторна дистрибуција угљен диоксида у овом случају је слична сценарију 1, с тим што су зоне са већим концентрацијама CO_2 израженије. У тренутку престанка утискивања, максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта износи $9,83 \text{ kg-mole/m}^3$, што потврђују и веће количине структурно акумулираног угљен диоксида. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, моларна густина по јединици запремине лежишта износи $9,11 \text{ kg-mole/m}^3$, што указује на смањење количине слободног угљен диоксида. Растворени CO_2 у води захвата већи део лежишта, међутим има мање учешће у односу на претходне сценарије.

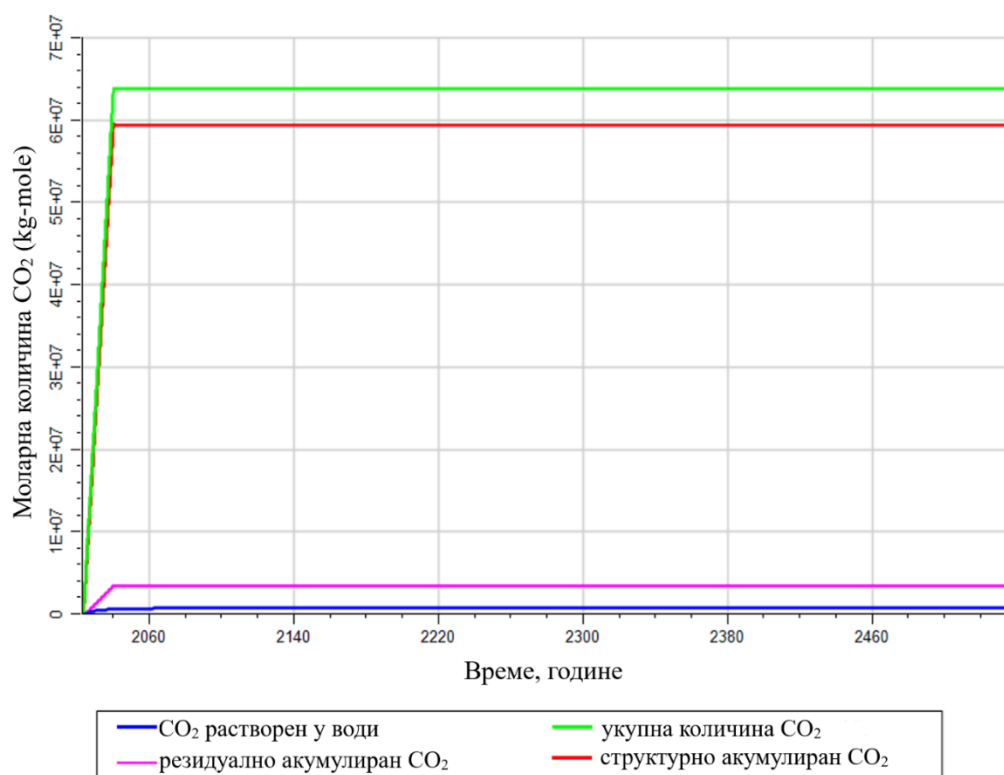


Слика 7.72. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 3

7.3.3.4. Резултати примене симулационог модела – сценарио 4

У поређењу са претходним сценаријима, приликом утискивања угљен диоксида у бушотину X-10 најбрже се достиже максимални дозвољени притисак на дну бушотине. Ово резултује краћим временом утискивања (до 1. августа 2039. године), а самим тим и мањом кумулативном количином утиснутог CO_2 која у овом случају износи 1 513 912 064 sm^3 .

Моларна количина угљен диоксида (kg-mole) за случај растварања у води, резидуалног акумулирања и структурно акумулираног CO_2 приказана је на слици 7.73.



Слика 7.73. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 4)

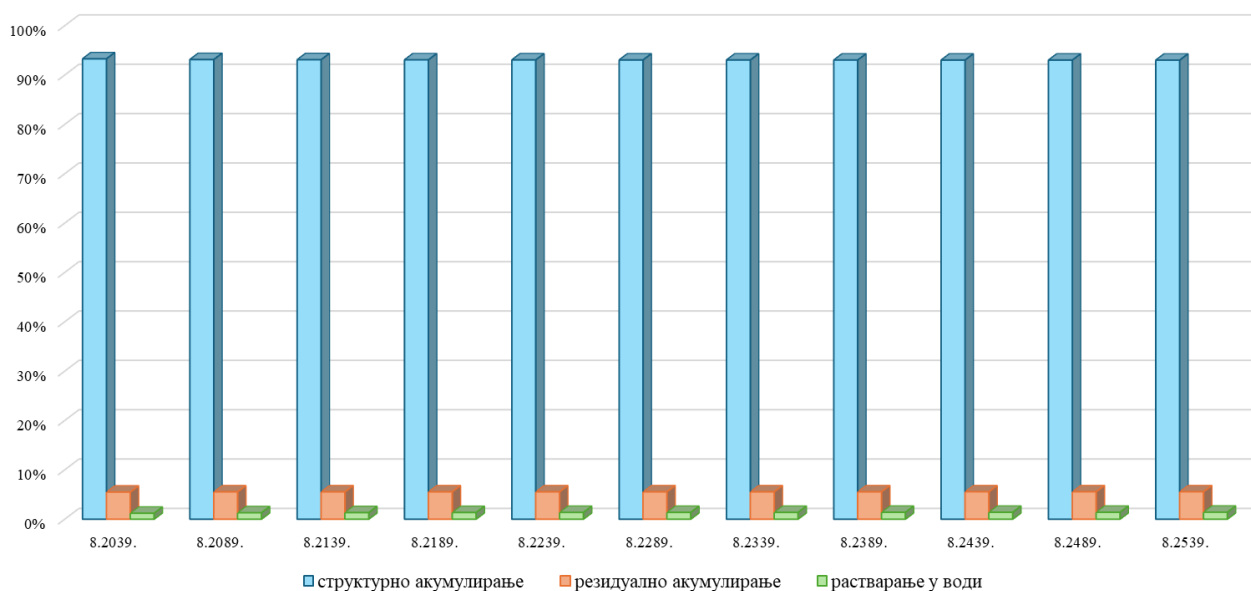
У табели 7.74. дат је квантитативни приказ расподеле угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у лежишту. У поређењу са сценаријима 1 и 2 где су утиснуте веће количине угљен диоксида, у овом случају је доминантније структурно акумулирање CO_2 , и мање су количине резидуално акумулираног и раствореног у води што није баш најповољнији случај. Дакле, иако током времена долази до благог смањења слободног CO_2 , део постаје резидуално акумулиран, а одређена количина је растворена у води, те промене су мале.

На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (август 2539. године), $59,476 \cdot 10^6 \text{ kg-mol CO}_2$ је структурно акумулирано, $3,556 \cdot 10^6 \text{ kg-mol}$ угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $9,052 \cdot 10^5 \text{ kg-mol CO}_2$ растворено у води.

Табела 7.74. Дистрибуција CO_2 по механизмима акумулирања (сценарио 4)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO_2 , kg-mole	Резидуално акумулиран CO_2 , kg-mole	CO_2 растворен у води, kg-mole
100	$59,5054 \cdot 10^6$	$3,548 \cdot 10^6$	$8,565 \cdot 10^5$
200	$59,4997 \cdot 10^6$	$3,553 \cdot 10^6$	$8,77 \cdot 10^5$
300	$59,492 \cdot 10^6$	$3,555 \cdot 10^6$	$8,888 \cdot 10^5$
400	$59,485 \cdot 10^6$	$3,5558 \cdot 10^6$	$8,9783 \cdot 10^5$
500	$59,476 \cdot 10^6$	$3,556 \cdot 10^6$	$9,052 \cdot 10^5$

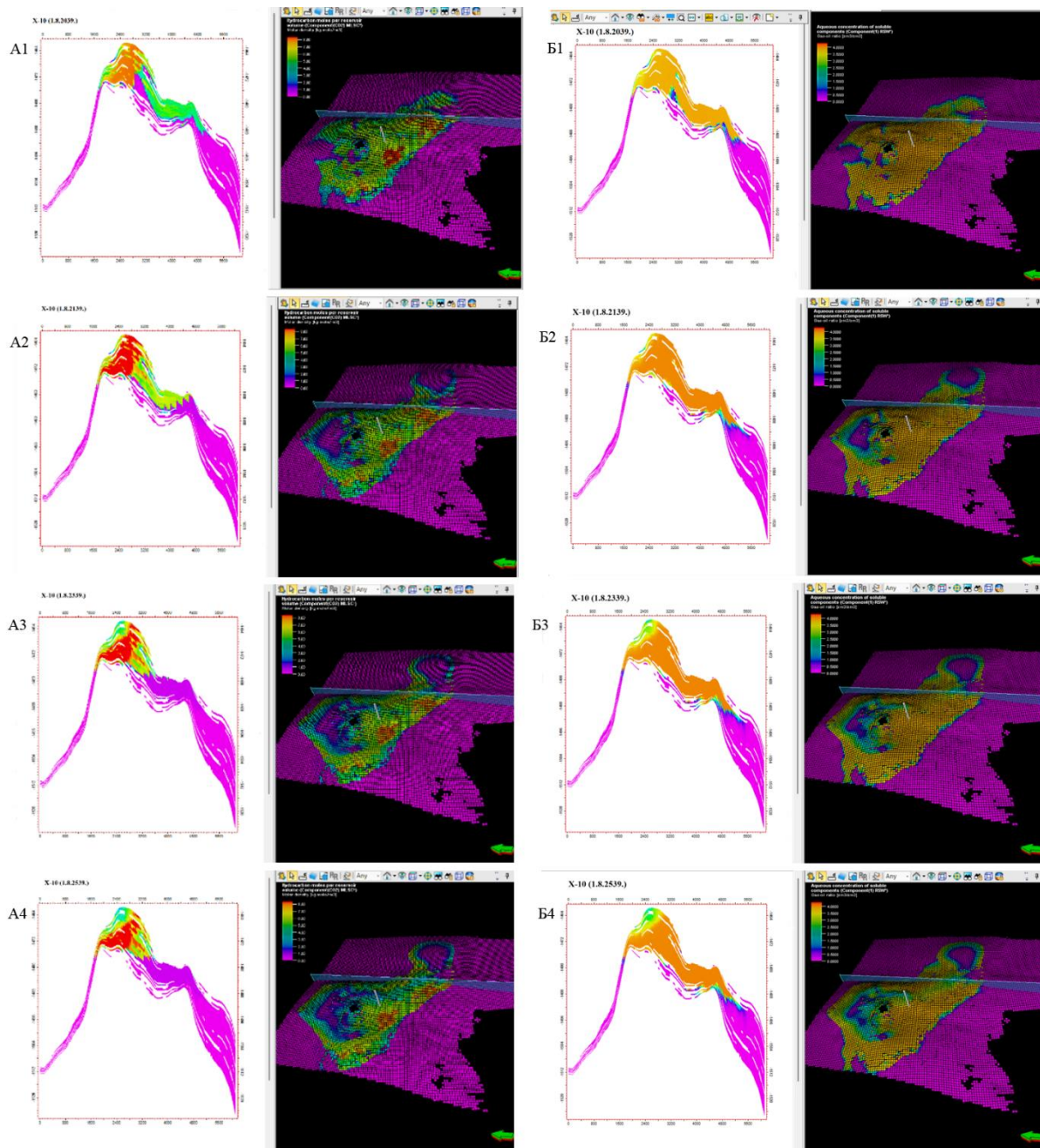
Процентуално учешће механизма током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.74. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, структурно је акумулирано 93,02%, 5,56% је резидуално акумулирано и 1,42% угљен диоксида је растворено у води.



Слика 7.74. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 4)

На слици 7.75. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

Просторна дистрибуција угљен диоксида по облику и правцу миграције у овом случају је најсличнија сценарију 3. У тренутку престанка утискивања, максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта износи $8,39 \text{ kg-mole/m}^3$, што је мање него у претходним сценаријима, на шта утиче и мања утиснута кумулативна количина угљен диоксида. CO_2 растворен у води захвата већи део лежишта и има веће учешће од сценарија 3, а мање од сценарија 1 и 2.

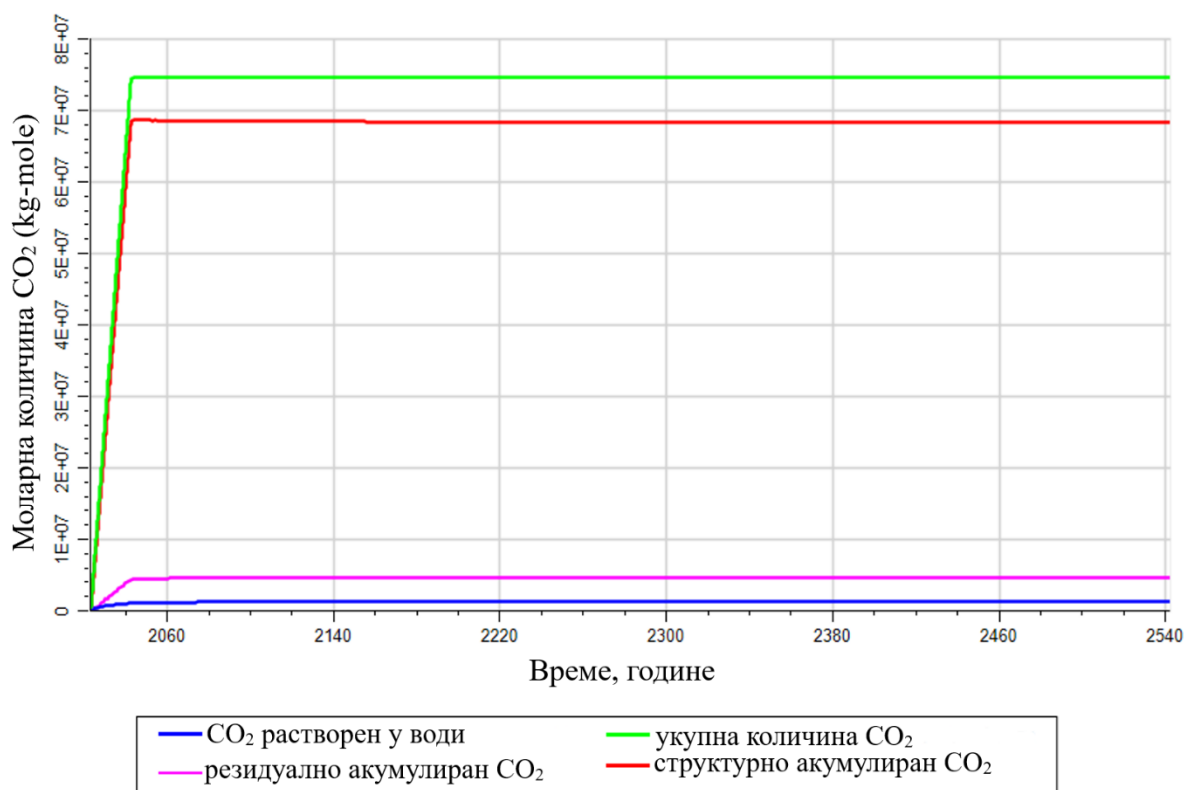


Слика 7.75. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 4

7.3.3.5. Резултати примене симулационог модела – сценарио 5

Време утискивања угљен диоксида у овом сценарију траје до 1. јуна 2042. године, као у сценарију 1, међутим, у овом случају утиснута је већа количина CO_2 јер је трајало неколико сати дуже. Укупна количина утиснутог CO_2 до вредности дозвољеног притиска на дну бушотине износи $1\,772\,802\,688\text{ sm}^3$ ($7,488 \cdot 10^7\text{ kg-mole}$).

На слици 7.76. дат је приказ механизма акумулирања угљен диоксида у лежишту за време утискивања и након престанка утискивања. Моларна количина угљен диоксида (kg-mole) дата је за случај растварања у води, резидуалног акумулирања и структурног акумулирања.



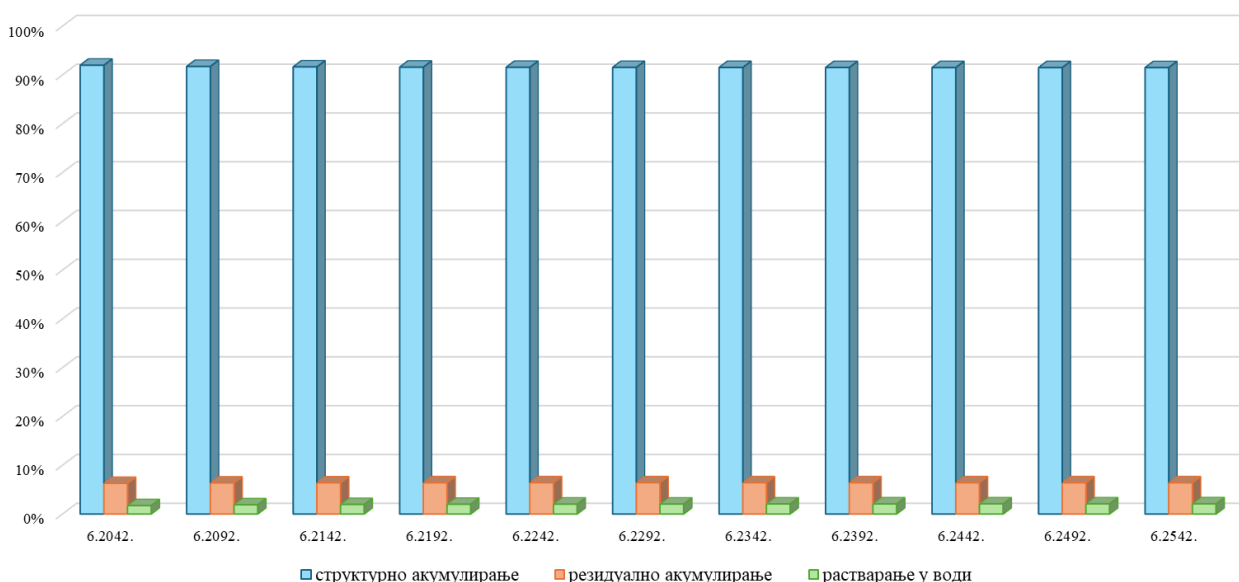
Слика 7.76. Молярна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 5)

Табела 7.75. даје квантитативни приказ дистрибуције угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у дефинисаним временским периодима. Као и у претходним случајевима, доминантно је структурно акумулирање CO₂, али овај сценарио има највећи удео резидуално акумулираног угљен диоксида и CO₂ раствореног у води, што је веома значајно. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (јун 2542. године), $68,5517 \cdot 10^6$ kg-mol CO₂ је структурно акумулирано, $4,797 \cdot 10^6$ kg-mol угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $15,714 \cdot 10^5$ kg-mol CO₂ растворено у води.

Табела 7.75. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио 5)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO ₂ , kg-mole	Резидуално акумулиран CO ₂ , kg-mole	CO ₂ растворен у води, kg-mole
100	$68,622 \cdot 10^6$	$4,792 \cdot 10^6$	$14,69 \cdot 10^5$
200	$68,563 \cdot 10^6$	$4,8023 \cdot 10^6$	$15,193 \cdot 10^5$
300	$68,538 \cdot 10^6$	$4,802 \cdot 10^6$	$15,452 \cdot 10^5$
400	$68,524 \cdot 10^6$	$4,79991 \cdot 10^6$	$15,607 \cdot 10^5$
500	$68,517 \cdot 10^6$	$4,797 \cdot 10^6$	$15,714 \cdot 10^5$

Процентуално учешће механизма током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.77. На крају праћења понашања CO₂ у лежишту, структурно је акумулирано 91,5%, 6,4% је резидуално акумулирано и 2,1% угљен диоксида је растворено у води.



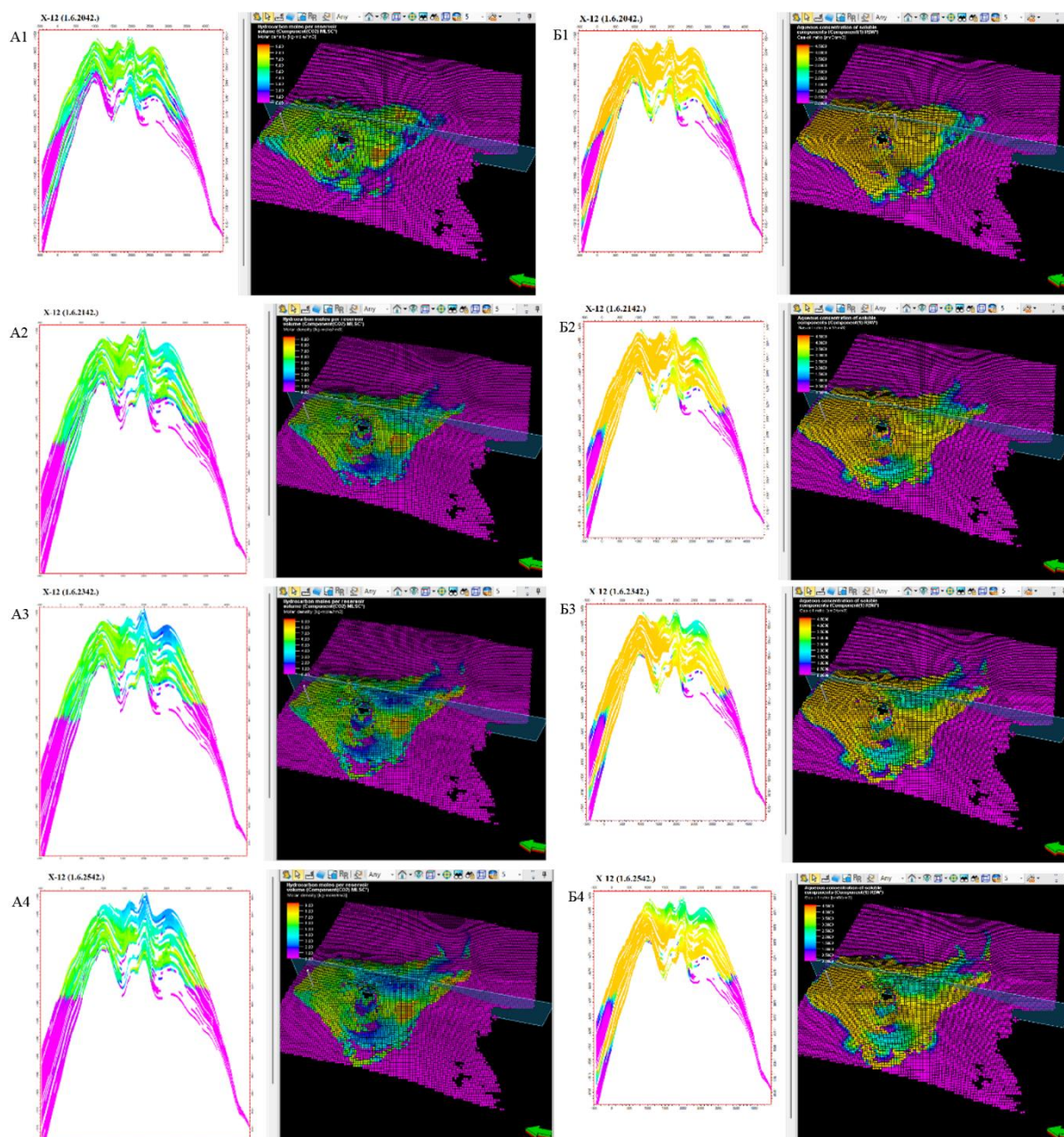
Слика 7.77. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 5)

На слици 7.78. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

У тренутку престанка утискивања угљен диоксида, просторна дистрибуција угљен диоксида по облику и правцу миграције најсличнија је сценарију 2, међутим, током периода праћења понашања кретања CO_2 у лежишту, долази до другачијих путева миграције. У овом сценарију уочава се да већ након 100 година од престанка утискивања угљен диоксида, долази до ширења облака CO_2 у зонама које нису биле захваћене у претходним сценаријима.

У тренутку престанка утискивања, максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта износи $9,42 \text{ kg-mole/m}^3$, што је мање него у сценаријима 2 и 3. Уколико се направи паралела са сценариом 2, уочава се да, иако је већа кумулативна количина утиснута у сценарију 5, мања је максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта, што значи да је и мање учешће структурно акумулираног CO_2 , односно веће учешће резидуално акумулираног и раствореног у води што је веома пожељно.

Угљен диоксид растворен у води захвата већи део лежишта и има веће учешће од свих претходно описаних сценарија.

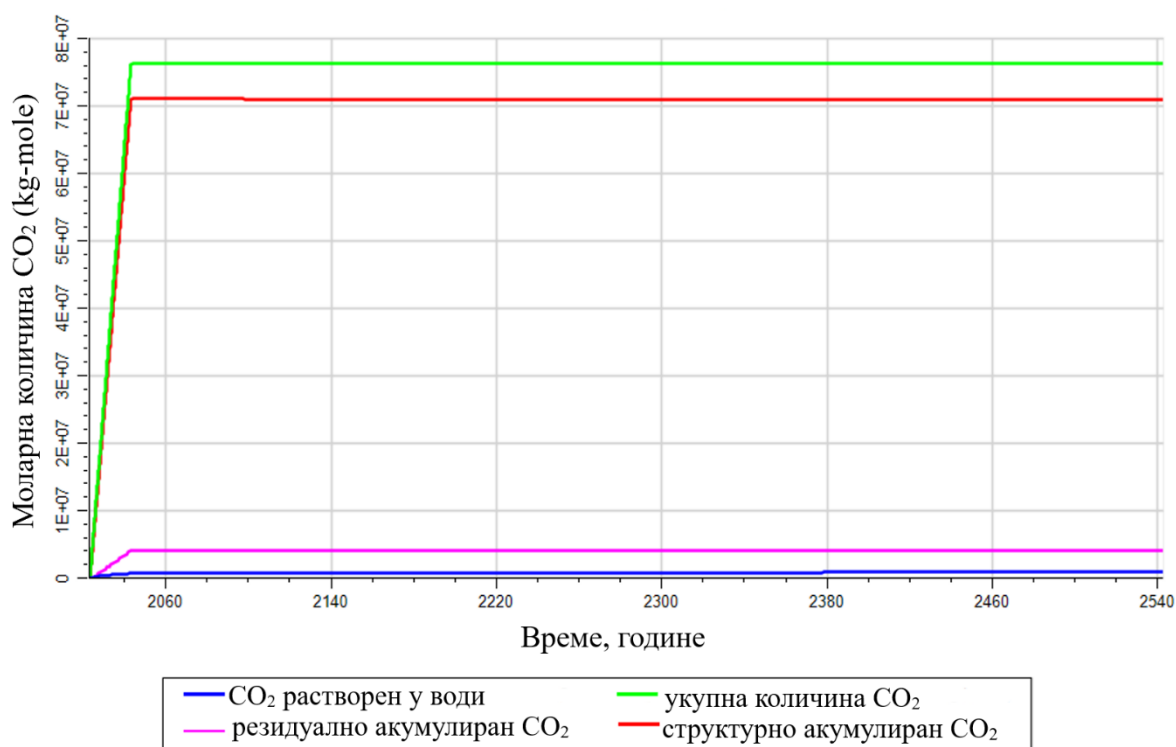


Слика 7.78. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 5

7.3.3.6. Резултати примене симулационог модела – сценарио 6

Са аспекта капацитета складиштења угљен диоксида, сценарио 6 се налази на другом месту, одмах после сценарија 3. Укупна количина утиснутог CO_2 до вредности максимално дозвољеног притиска на дну бушотине износи $1\,810\,939\,904\,\text{sm}^3$ ($7,648 \cdot 10^6\,\text{kg-mole}$).

Моларна количина угљен диоксида (kg-mole) дата је на слици 7.79.



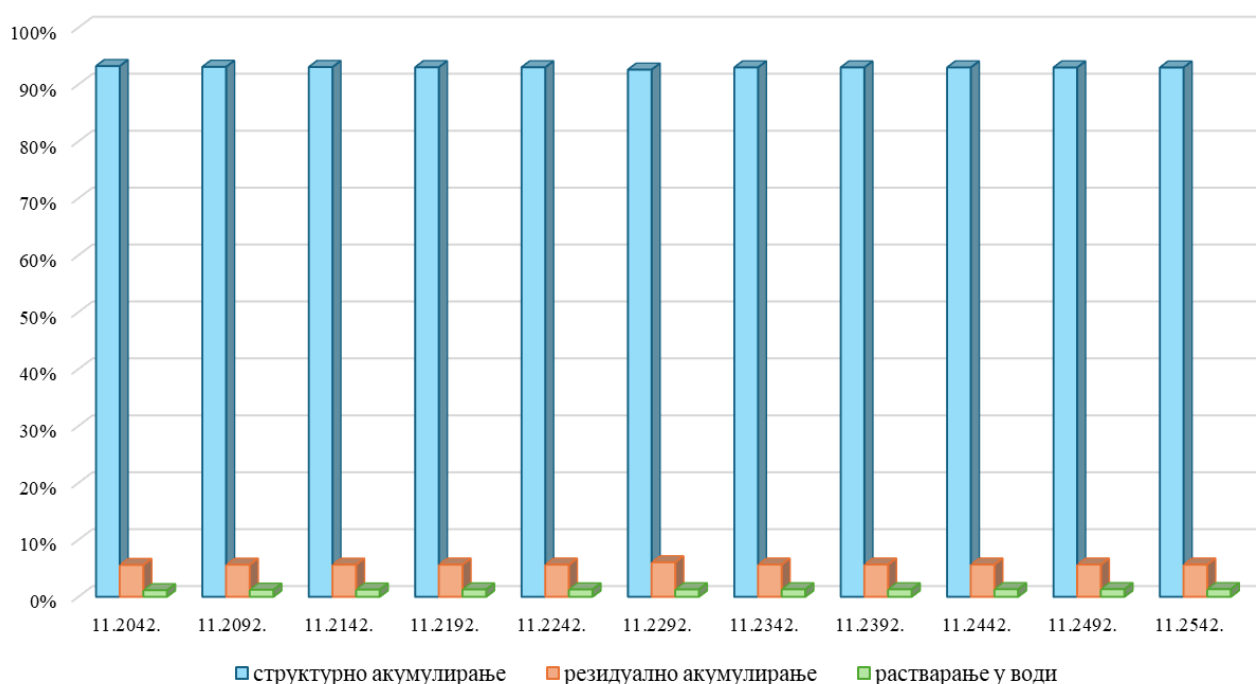
Слика 7.79. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио б)

Квантитативни приказ расподеле угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у лежишту дат је у табели 7.76. Структурно акумулирање CO₂ представља доминантан механизам акумулирања. Током времена долази до благог смањења слободног угљен диоксида и део структурно акумулираног CO₂ прелази у резидуално акумулиран, а део се раствара у води. Иако с временом долази до прерасподеле угљен диоксида, и даље су то мале количине. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (новембар 2542. године), $71,117 \cdot 10^6$ kg-mol CO₂ је структурно акумулирано, $4,33 \cdot 10^6$ kg-mol угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $10,31 \cdot 10^5$ kg-mol CO₂ растворено у води.

Табела 7.76. Дистрибуција CO₂ по механизмима акумулирања (сценарио б)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO ₂ , kg-mole	Резидуално акумулиран CO ₂ , kg-mole	CO ₂ растворен у води, kg-mole
100	$71,175 \cdot 10^6$	$4,323 \cdot 10^6$	$9,783 \cdot 10^5$
200	$71,146 \cdot 10^6$	$4,329 \cdot 10^6$	$10,0198 \cdot 10^5$
300	$71,131 \cdot 10^6$	$4,3309 \cdot 10^6$	$10,15 \cdot 10^5$
400	$71,122 \cdot 10^6$	$4,33118 \cdot 10^6$	$10,24 \cdot 10^5$
500	$71,117 \cdot 10^6$	$4,33 \cdot 10^6$	$10,31 \cdot 10^5$

Процентуално учешће механизма током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту приказано је на слици 7.80. На крају праћења понашања CO₂ у лежишту, структурно је акумулирано 93%, 5,7% је резидуално акумулирано и 1,3% угљен диоксида је растворено у води. Однос удела механизма акумулирања у овом сценарију је готово идентичан сценарију 3.

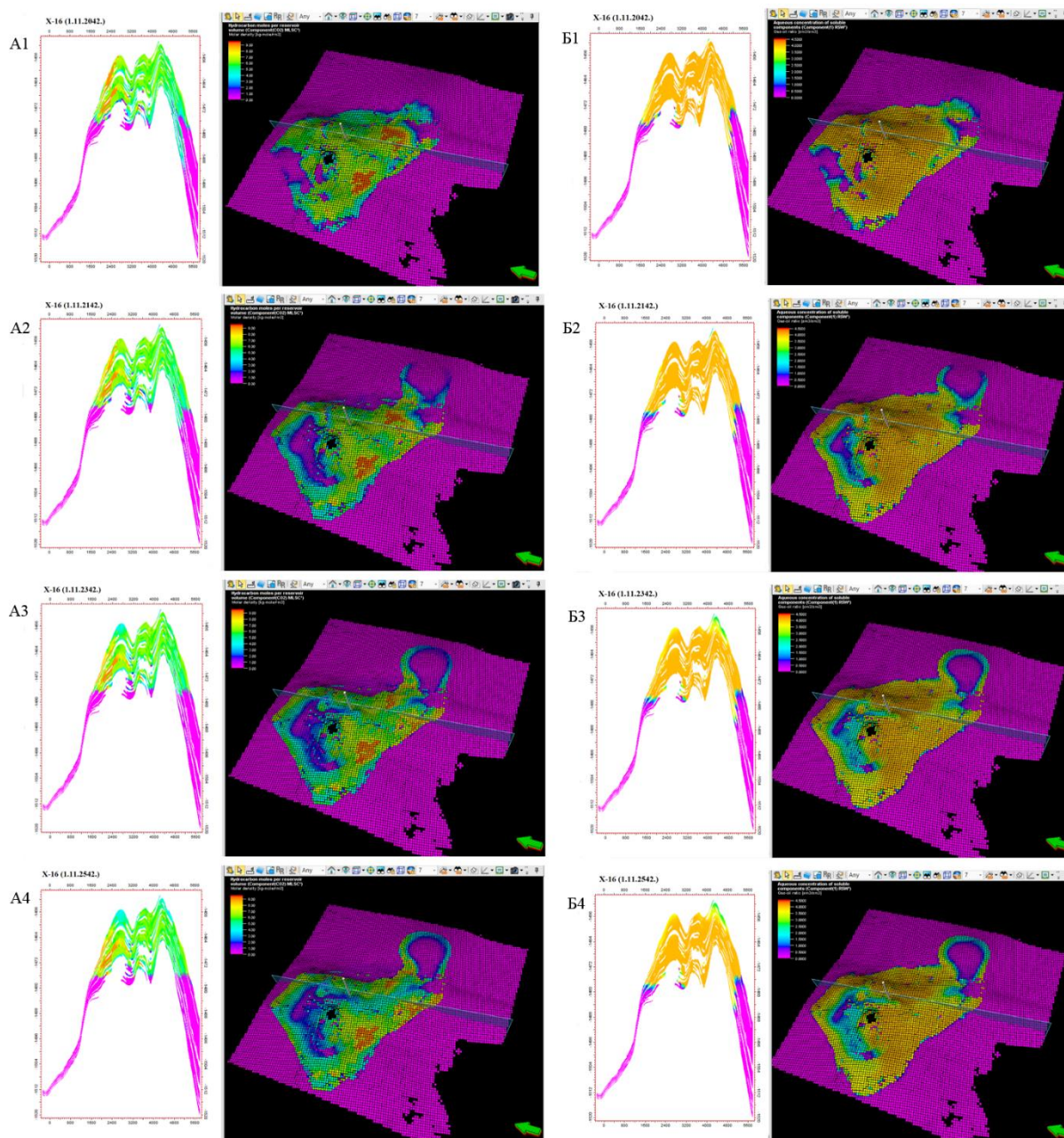


Слика 7.80. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 6)

На слици 7.81. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

У тренутку престанка утискивања угљен диоксида, просторна дистрибуција има највећу сличност са сценариом 3, с тим што су концентрације мање изражене у овом сценарију на шта утиче и мања кумулативна количина утиснутог CO_2 . Максимална концентрација моларне густине по јединици запремине лежишта у тренутку престанка утискивања износи $9,64 \text{ kg-mole/m}^3$. Током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту (100, 300 и 500 година), облак кретања CO_2 подсећа на сценарије 3 и 1, али су зоне обухваћене слободним угљен диоксидом израженије него у сценарију 1, а мање у односу на сценарио 3.

Зоне са раствореним угљен диоксидом у води захватају већи део лежишта, што је случај и у свим претходним сценаријима.

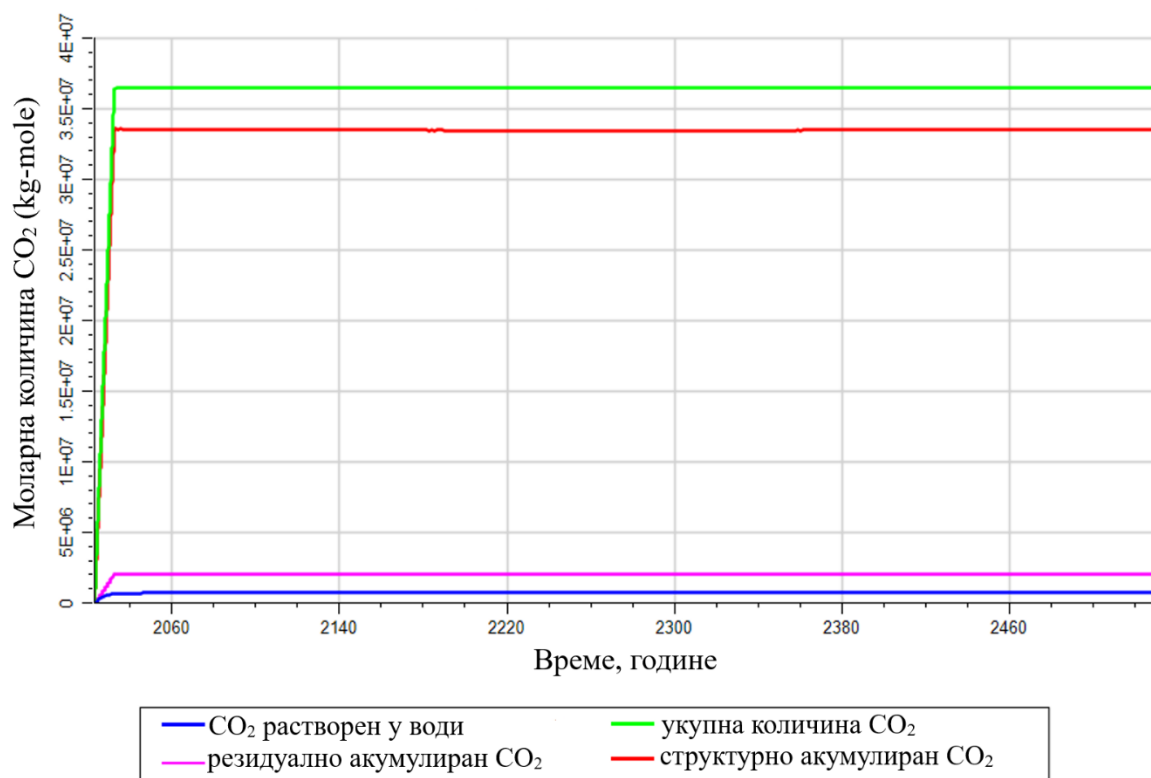


Слика 7.81. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио б

7.3.3.7. Резултати примене симулационог модела – сценарио 7

Максимални дозвољени притисак у овом сценарију достигнут је много раније него у претходним сценаријима. Укупна утиснута количина угљен диоксида износи $865\,062\,080\text{ sm}^3$ ($3,655 \cdot 10^7\text{ kg-mole}$).

На слици 7.82. дат је графички приказ моларне количине угљен диоксида (kg-mole) за случајеве растварања у води, резидуалног акумулирања и структурног акумулирања.



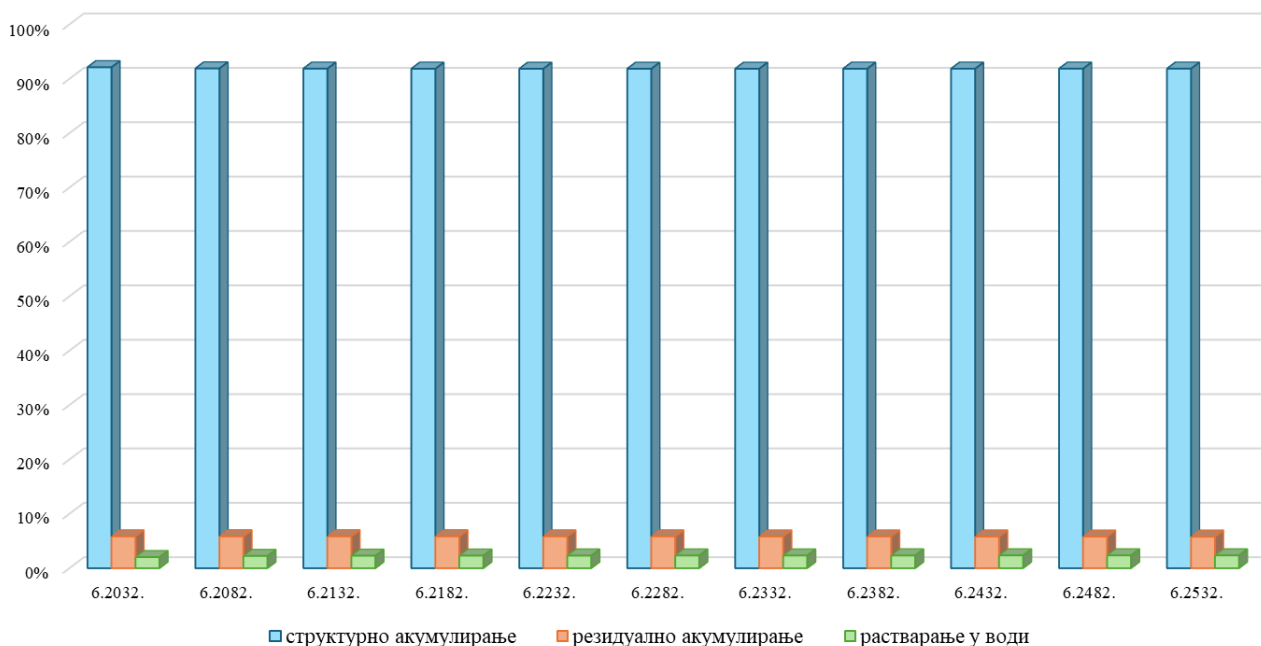
Слика 7.82. Молярна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 7)

У табели 7.77. приказана је расподела угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у лежишту у одређеним временским интервалима. Преовлађује структурно акумулирање CO_2 као у свим претходним случајевима, затим следи резидуално акумулиран угљен диоксид и угљен диоксид растворен у води. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (јун 2532. године) $33,571 \cdot 10^6 \text{ kg-mol CO}_2$ је структурно акумулирано, $2,119 \cdot 10^6 \text{ kg-mol}$ угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $8,588 \cdot 10^5 \text{ kg-mol CO}_2$ растворено у води.

Табела 7.77. Дистрибуција CO_2 по механизмима акумулирања (сценарио 7)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO_2 , kg-mole	Резидуално акумулиран CO_2 , kg-mole	CO_2 растворен у води, kg-mole
100	$33,572 \cdot 10^6$	$2,1413 \cdot 10^6$	$8,347 \cdot 10^5$
200	$33,564 \cdot 10^6$	$2,138 \cdot 10^6$	$8,475 \cdot 10^5$
300	$33,565 \cdot 10^6$	$2,131 \cdot 10^6$	$8,532 \cdot 10^5$
400	$33,567 \cdot 10^6$	$2,125 \cdot 10^6$	$8,5672 \cdot 10^5$
500	$33,571 \cdot 10^6$	$2,119 \cdot 10^6$	$8,588 \cdot 10^5$

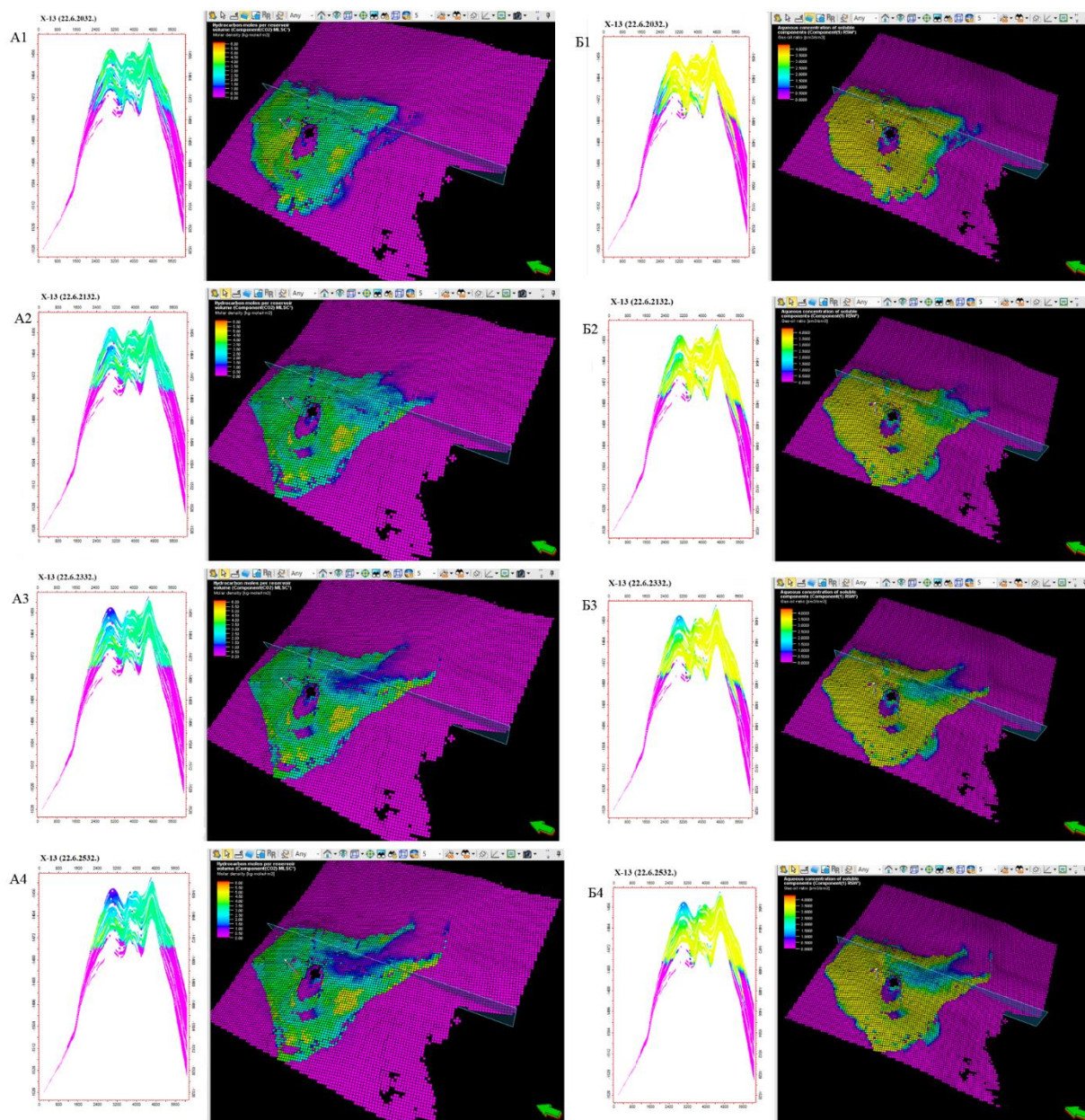
Процентуално учешће механизма током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту представљено је на слици 7.83. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, структурно је акумулирано 91,9%, 5,8% је резидуално акумулирано и 2,3% угљен диоксида је растворено у води. У односу на већину претходних сценарија, однос удела механизма акумулирања је повољнији.



Слика 7.83. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 7)

На слици 7.84. дат је приказ просторне и временске дистрибуције угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

У поређењу са претходно датим сценаријима, у овом се примећује другачија дистрибуција. Најсличнији је сценарију 5, међутим, ако се та два упореде, разликују се зоне које су засићене угљен диоксидом. Овај сценарио карактерише знатно мања кумулативна утиснута количина CO_2 , па самим тим и концентрације моларне густине по јединици запремине лежишта много су мање у односу на претходне сценарије. У тренутку престанка утискивања, максимална моларна густина износи 6,22 kg-mole по јединици запремине лежишта. Дистрибуција раствореног CO_2 прати правац кретања слободне фазе, али се током времена повећава обухват захваћеног подручја.

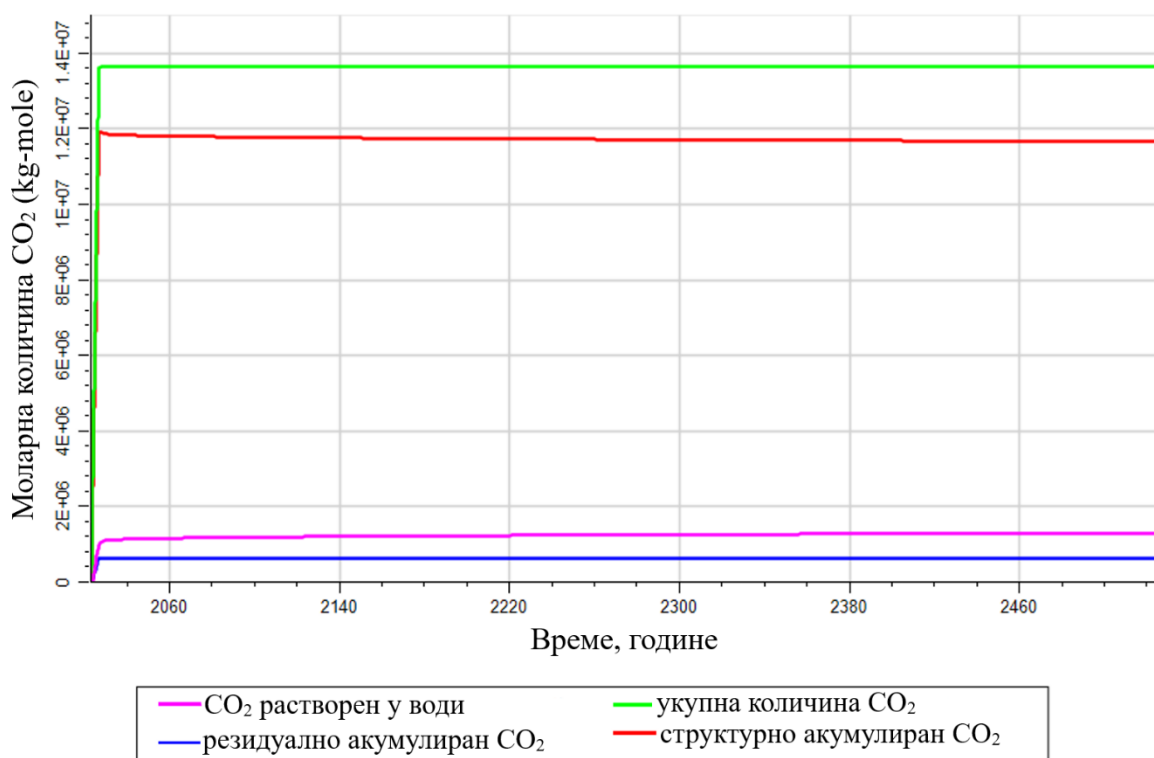


Слика 7.84. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 7

7.3.3.8. Резултати примене симулационог модела – сценарио 8

С аспекта капацитета утискивања, овај сценарио је најнеповољнији на шта утиче брзо достизање максимално дозвољеног притиска. Укупна количина утиснутог CO_2 у лежиште износи $323\,503\,488\text{ sm}^3$ ($1,369 \cdot 10^7\text{ kg-mole}$).

Графички приказ моларне количине механизма акумулирања који се јављају у лежишту дат је на слици 7.85.



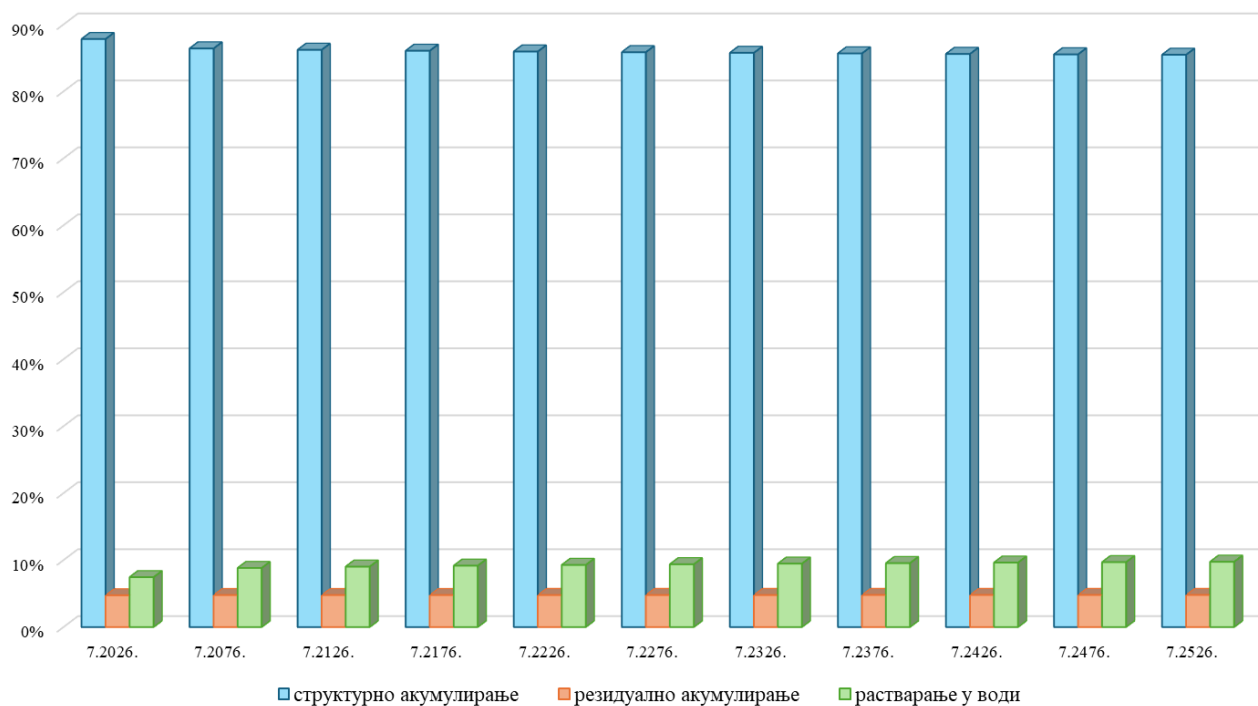
Слика 7.85. Моларна количина угљен диоксида по механизмима акумулирања (сценарио 8)

У табели 7.78. је квантитативни приказ расподеле угљен диоксида у лежишту за време праћења његовог понашања у лежишту. Иако се у овом сценарију утискују најмање количине угљен диоксида, значајне су количине резидуално акумулираног угљен диоксида и CO_2 раствореног у води, које су изузетно повољне. На крају праћења понашања угљен диоксида у лежишту (јул 2526. године), $11,697 \cdot 10^6$ kg-mol CO_2 је структурно акумулирано, $6,5531 \cdot 10^5$ kg-mol угљен диоксида резидуално је акумулирано у лежишту, док је $13,34 \cdot 10^5$ kg-mol CO_2 растворено у води.

Табела 7.78. Дистрибуција CO_2 по механизмима акумулирања (сценарио 8)

Време након престанка утискивања, год.	Структурно акумулиран CO_2 , kg-mole	Резидуално акумулиран CO_2 , kg-mole	CO_2 растворен у води, kg-mole
100	$11,798 \cdot 10^6$	$6,53 \cdot 10^5$	$12,35 \cdot 10^5$
200	$11,763 \cdot 10^6$	$6,5382 \cdot 10^5$	$12,695 \cdot 10^5$
300	$11,7361 \cdot 10^6$	$6,546 \cdot 10^5$	$12,956 \cdot 10^5$
400	$11,714 \cdot 10^6$	$6,551 \cdot 10^5$	$13,173 \cdot 10^5$
500	$11,697 \cdot 10^6$	$6,5531 \cdot 10^5$	$13,34 \cdot 10^5$

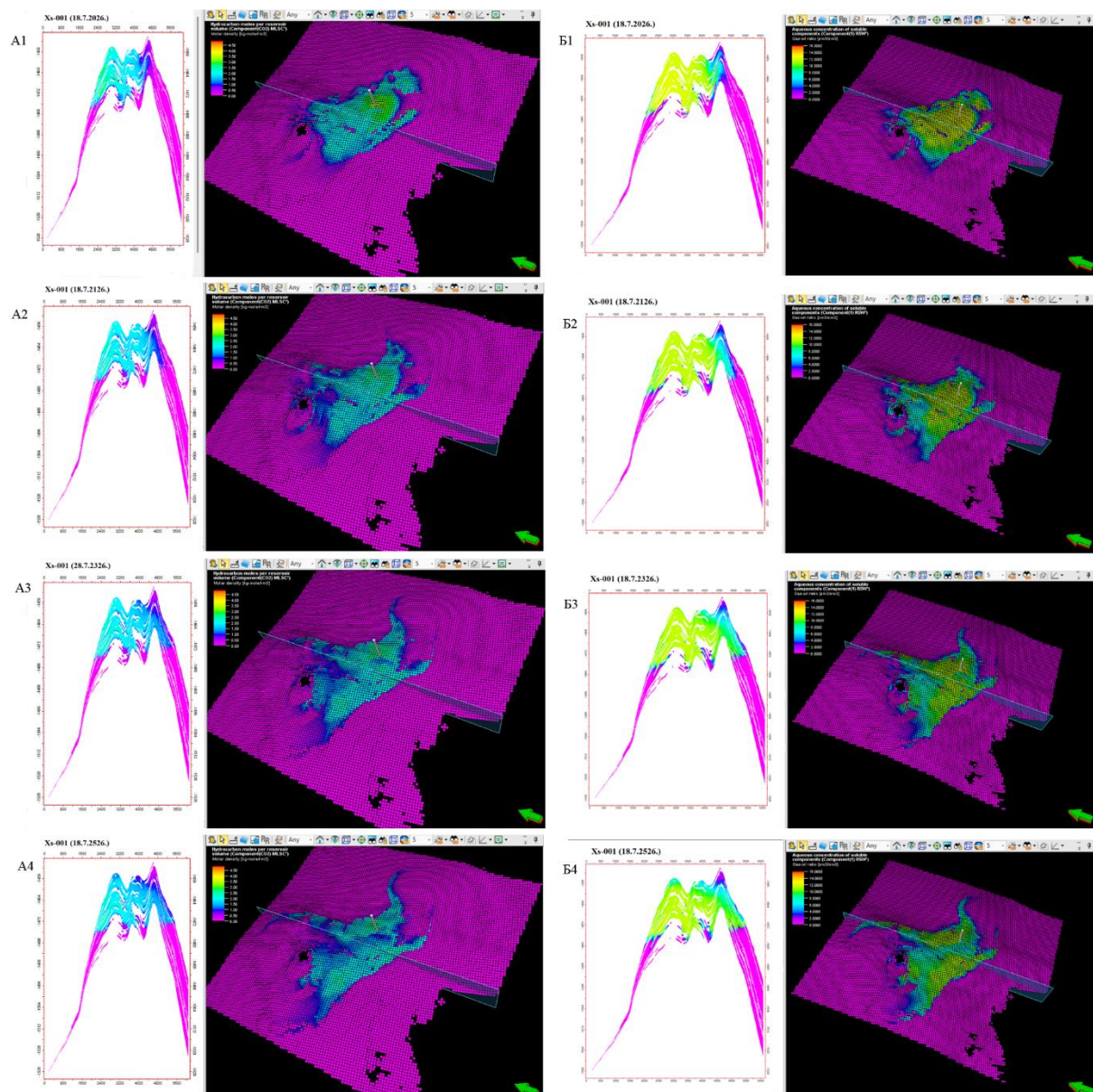
Процентуално учешће механизма током периода праћења понашања угљен диоксида у лежишту дато је на слици 7.86. На крају праћења понашања CO_2 у лежишту, структурно је акумулирано 85,5%, 4,8% је резидуално акумулирано и 9,7% угљен диоксида је растворено у води. Оваква расподела угљен диоксида веома је повољна с аспекта сигурног и дугорочног задржавања CO_2 у геолошку формацију. Уочава се да се утискивањем угљен диоксида у бушотину Xs-001 остварује највеће учешће раствореног CO_2 у односу на укупну количину у лежишту. Разлог томе је већи контакт угљен диоксида и воде, што утиче на интензивније растварање у води у односу на остале сценарије.



Слика 7.86. Процентуално учешће механизма акумулирања CO_2 (сценарио 8)

На слици 7.87. приказана је просторна и временска дистрибуција угљен диоксида у лежишту и CO_2 раствореног у води у тренутку престанка утискивања, као и након 100, 300 и 500 година праћења понашања.

Сценарио 8 знатно се разликује од претходно анализираних сценарија, пре свега по кратком времену утискивања, тј. најмањој кумулативној количини утиснутог CO_2 и нижим вредностима моларне густине слободног угљен диоксида. У тренутку престанка утискивања максимална моларна густина износи $4,89 \text{ kg-mole/m}^3$. После 100 година максимална вредност моларне густине износи $2,54 \text{ kg-mole}$ по јединици запремине лежишта и она остаје константна до краја праћења понашања CO_2 у лежишту. Такође, за разлику од свих претходних сценарија, у овом случају удео раствореног угљен диоксида у води је највећи. Иако је капацитет складиштења мали, процес растварања је веома значајан.



Слика 7.87. Просторна дистрибуција моларне густине угљен диоксида по јединици запремине лежишта (А) и угљен диоксида раствореног у води (Б), 1 – у тренутку престанка утискивања, 2 – 100 година, 3 – 200 година и 4 – 500 година након престанка утискивања за сценарио 8

У табели 7.79. дат је сумарни приказ кумулативних количина утиснутог угљен диоксида, као и процентуалних учешћа механизма акумулирања на крају процеса праћења понашања кретања CO₂ у лежишту за све горе наведене сценарије.

Табела 7.79. Приказ процентуалног учешћа механизма акумулирања и кумулативно утиснутих количина CO₂ за све дефинисане сценарије

Сценарији	Структурно акумулирање, %	Резидуално акумулирање, %	Количина CO ₂ раствореног у води, %	Кумулативна количина утиснутог CO ₂ , sm ³
Сценарио 1 (X-4)	92,48	5,93	1,59	1 772 699 520
Сценарио 2 (X-6)	92,5	5,9	1,6	1 761 261 184
Сценарио 3 (X-7)	93,05	5,64	1,31	1 882 946 304
Сценарио 4 (X-10)	93,02	5,56	1,42	1 513 912 064
Сценарио 5 (X-12)	91,5	6,4	2,1	1 772 802 688
Сценарио 6 (X-16)	93	5,7	1,3	1 810 939 904
Сценарио 7 (X-13)	91,9	5,8	2,3	865 062 080
Сценарио 8 (Xs-001)	85,5	4,8	9,7	323 503 488

7.4. Вишекритеријумска анализа избора оптималне стратегије утискивања CO₂

Након завршеног симулационог моделовања процеса утискивања и складиштења угљен диоксида у одабрано гасно лежиште „Л”, приступа се завршној фази развијеног модела, тј. вишекритеријумској анализи у циљу избора оптималне стратегије утискивања CO₂ за складиштење.

Полазну основу мултикритеријумске оптимизације чини осам дефинисаних симулационих сценарија развијеног модела из претходне фазе. Сваки дефинисани сценарио представља засебну алтернативу у вишекритеријумском моделу одлучивања, где ефикасност, тј. евалуација алтернатива, зависи од разматраних критеријума. Параметри (критеријуми) од којих зависи избор најповољније опције утискивања и безбедног складиштења представљају динамичке излазне параметре симулационог модела. У односу на досадашње конвенционалне моделе оптимизације, који се заснивају на максималној утиснутој количини утиснутог угљен диоксида, у оквиру докторске дисертације урађена је свеобухватна анализа која поред капацитета складиштења укључује и понашање CO₂ током времена, односно механизме акумулирања који се јављају у лежишту.

Циљ вишекритеријумске анализе јесте да се на основу интегрисане анализе одабере оптимална стратегија утискивања угљен диоксида која представља компромис између капацитета складиштења и доминантних механизма акумулирања.

Шематски приказ почетне матрице одлучивања дат је у табели 7.80., где су x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) нумеричке вредности елемената матрице, односно алтернативе (A_i) у односу на критеријум (C_j).

Табела 7.80. Схематски приказ почетне матрице одлучивања

АЛТЕРНАТИВЕ (сценарији утискивања)	КРИТЕРИЈУМИ			
	C1: укупна количина утиснутог CO ₂	C2: структурно акумулиран CO ₂	C3: резидуално акумулиран CO ₂	C4: CO ₂ растворен у води
	Макс.	Мин.	Макс.	Макс.
A1 (буш. X-4)	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
A2 (буш. X-6)	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
A3 (буш. X-7)	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}
A4 (буш. X-10)	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}
A5 (буш. X-12)	x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{54}
A6 (буш. X-16)	x_{61}	x_{62}	x_{63}	x_{64}
A7 (бушотина X-13)	x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{74}
A8 (бушотина Xs-001)	x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}

Алгоритам примене вишекритеријумске fuzzy TOPSIS методе дат је у наставку.

- 1) Дефинисање улазних параметара, тј. вредности критеријума за сваку алтернативу и формирање почетне матрице одлучивања (табела 7.81.).

Табела 7.81. Почетна матрица одлучивања

	K1	K2		
A1	1 772 699 520	69 246 936	69 300 559	69 413 408
A2	1 761 261 184	68 802 576	68 841 945	68 946 288
A3	1 882 946 304	73 993 632	74 028 085	74 091 736
A4	1 513 912 064	59 359 336	59 481 714	59 508 688
A5	1 772 802 688	68 516 872	68 572 969	68 689 320
A6	1 810 939 904	71 069 120	71 137 305	71 208 040
A7	865 062 080	33 558 844	33 567 920	33 586 240
A8	323 503 488	11 697 219	11 767 765	11 954 219

Табела 7.81. (наставак) – Почетна матрица одлучивања

	K3			K4		
A1	4 290 398	4 415 807	4 440 033	961 918	1 136 610	1 192 568
A2	4 308 190	4 384 742	4 401 162	982 770	1 137 264	1 187 727
A3	4 432 878	4 476 343	4 487 272	887 366	1 004 248	1 044 142
A4	3 499 634	3 547 820	3 556 057	768 860	870 652	905 178
A5	4 692 305	4 787 071	4 802 454	1 289 389	1 502 466	1 571 439
A6	4 268 044	4 352 295	4 660 331	882 199	994 195	1 030 995
A7	2 118 576	2 132 022	2 141 271	740 210	838 010	858 790
A8	644 975	653 510	655 305	1 013 788	1 258 395	1 334 048

Укупна количина утиснутог угљен диоксида представља критеријум K1 и његова вредност се максимизира. Вредности овог критеријума су коначне и из тог разлога су дате као обичан број („crisp number”). Алтернатива A3 (сценарио 3 – бушотина X-7) има највећу кумулативну вредност утиснутог CO₂ и она износи 1 882 946 304 sm³, док се најмања количина утисне у сценарију 8 (бушотина Xs-001) тј. 323 503 488 sm³.

Структурно акумулиран угљен диоксид дефинисан је критеријумом K2 и он представља критеријум корисности. Средње очекиване вредности fuzzy скупа крећу се од 11 767 765 kg-

mole до 74 028 085 kg-mole. Алтернатива А8 (сценарио 8 – бушотина Xs-001) има најмању вредност структурно акумулираног CO₂ и представљена је троугластим fuzzy скупом (11 697 219; 11 767 765; 11 954 219).

Резидуално акумулиран угљен диоксид представљен је као критеријум К3. Пожељне су што веће вредности овог критеријума, јер он директно утиче на безбедно задржавање унутар геолошке формације. Средње очекиване вредности fuzzy скупа крећу се од 653 510 kg-mole до 4 787 071 kg-mole. Алтернатива А5 (сценарио 5 – бушотина X-12) има најпожељнију вредност и представљена је троугластим fuzzy скупом (4 692 305; 4 787 071; 4 802 454).

Количина раствореног угљен диоксида у води представља критеријум К4 и његова вредност се максимизира. Овај критеријум је такође од великог значаја за безбедно складиштење CO₂. Највећу вредност раствореног угљен диоксида има алтернатива А5 (сценарио 5 – бушотина X-12) и представљена је троугластим fuzzy скупом (1 289 389; 1 502 466; 1 571 439).

- 2) На основу почетне матрице одлучивања, користећи једначину 4.47 одређују се нормализоване вредности критеријума које су дате у табели 7.82.

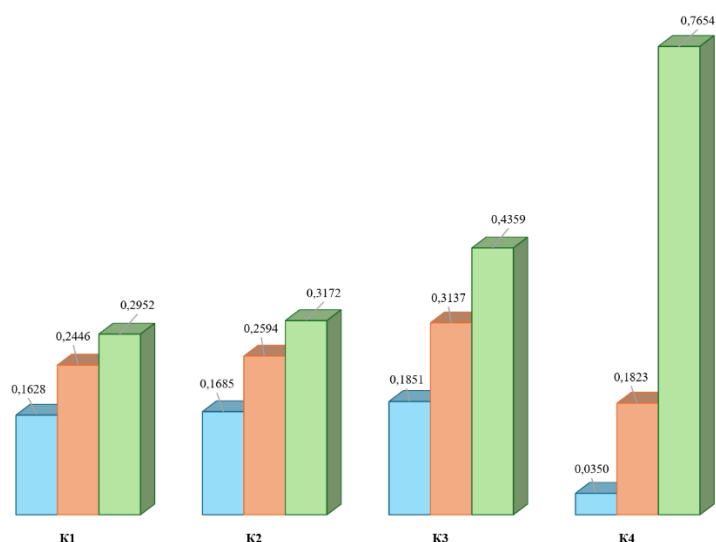
Табела 7.82. Нормализована матрица

	K1	K2		
A1	0,1515	0,15139	0,15151	0,15176
A2	0,1505	0,15042	0,15051	0,15074
A3	0,1609	0,16177	0,16185	0,16199
A4	0,1294	0,12978	0,13004	0,13010
A5	0,1515	0,14980	0,14992	0,15017
A6	0,1547	0,15538	0,15553	0,15568
A7	0,0739	0,07337	0,07339	0,07343
A8	0,0276	0,02557	0,02573	0,02614

Табела 7.82. (наставак) - Нормализована матрица

	K3			K4		
A1	0,14721	0,15152	0,15235	0,10542	0,12456	0,13069
A2	0,14782	0,15045	0,15101	0,10770	0,12463	0,13016
A3	0,15210	0,15359	0,15397	0,09725	0,11006	0,11443
A4	0,12008	0,12173	0,12202	0,08426	0,09542	0,09920
A5	0,16100	0,16426	0,16478	0,14130	0,16466	0,17221
A6	0,14645	0,14934	0,15991	0,09668	0,10895	0,11299
A7	0,07269	0,07316	0,07347	0,08112	0,09184	0,09412
A8	0,02213	0,02242	0,02249	0,11110	0,13791	0,14620

- 3) На слици 7.88. дати су тежински коефицијенти критеријума који су одређени Шеноновом ентропијом применом једначина 4.49–4.54.



Слика 7.88. Тежинско учешће критеријума

- 4) Тежински нормализоване вредности критеријума ($\tilde{v}_{ij}$) добијају се множењем нормализованих вредности критеријума ($\tilde{r}_{ij}$) (табела 7.82.) са одговарајућим тежинским коефицијентом ($\tilde{w}_j$) (слика 7.88.). Вредности тежински нормализованих критеријума ($\tilde{v}_{ij}$) приказане су у табели 7.83.

Табела 7.83. Тежински нормализована матрица одлучивања

	K1			K2		
A1	0,0247	0,0371	0,0447	0,02551	0,03930	0,04814
A2	0,0245	0,0368	0,0444	0,02534	0,03904	0,04782
A3	0,0262	0,0394	0,0475	0,02725	0,04198	0,05139
A4	0,0211	0,0316	0,0382	0,02186	0,03373	0,04127
A5	0,0247	0,0371	0,0447	0,02524	0,03889	0,04764
A6	0,0252	0,0379	0,0457	0,02618	0,04034	0,04939
A7	0,0120	0,0181	0,0218	0,01236	0,01904	0,02329
A8	0,0045	0,0068	0,0082	0,00431	0,00667	0,00829

Табела 7.83. (наставка) - Тежински нормализована матрица одлучивања

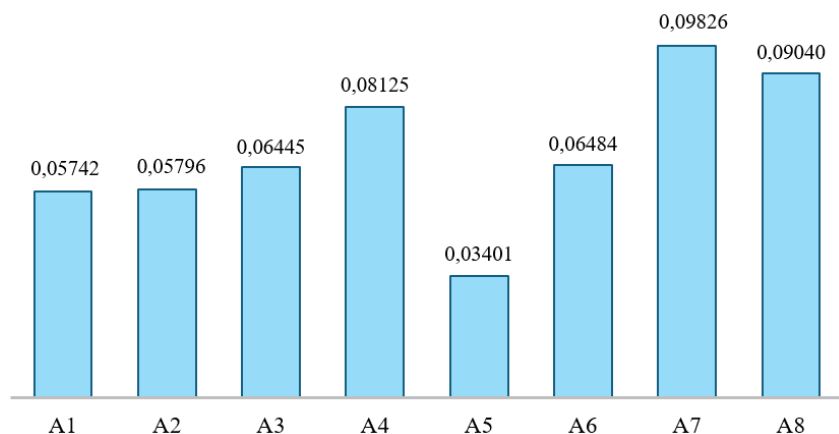
	K3			K4		
A1	0,0272	0,0475	0,0664	0,0037	0,0227	0,1000
A2	0,0274	0,0472	0,0658	0,0038	0,0227	0,0996
A3	0,0282	0,0482	0,0671	0,0034	0,0201	0,0876
A4	0,0222	0,0382	0,0532	0,0030	0,0174	0,0759
A5	0,0298	0,0515	0,0718	0,0049	0,0300	0,1318
A6	0,0271	0,0468	0,0697	0,0034	0,0199	0,0865
A7	0,0135	0,0229	0,0320	0,0028	0,0167	0,0720
A8	0,0041	0,0070	0,0098	0,0039	0,0251	0,1119

- 5) У табели 7.84. дате су вредности fuzzy позитивно и негативно идеалног решења. Критеријум K1 (укупна количина утиснутог угљен диоксида) представља критеријум корисности, односно пожељне су веће вредности. Позитивно идеално решење представља најбољу перформансу алтернативе и у случају овог критеријума то је вредност ($\tilde{A}^+(A3) = 0,0262; 0,0394; 0,0475$). Уколико постоји критеријум корисности, као што је то K2 (структурно акумулирање), позитивно идеално решење има најмању вредност. Fuzzy позитивно идеално решење критеријума K2 је ($\tilde{A}^+(A8) = 0,00431; 0,00667; 0,00829$).

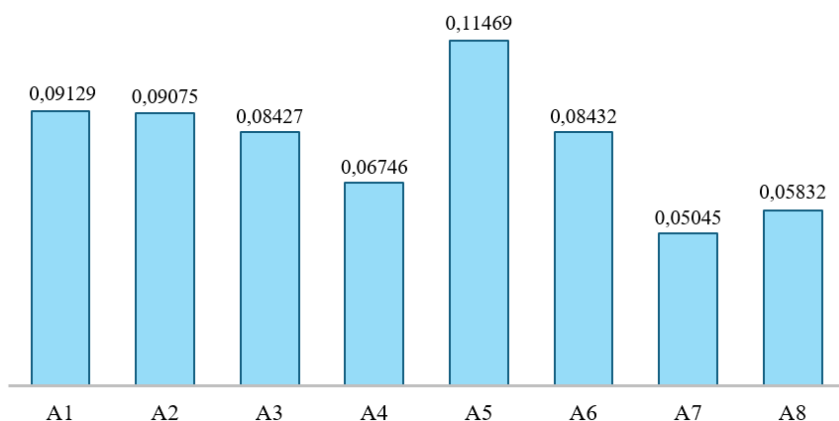
Табела 7.84. Fuzzy позитивно ($\tilde{A}^+$) и негативно ($\tilde{A}^-$) идеално решење

	K1			K2			K3			K4		
$\tilde{A}^+$	0,0262	0,0394	0,0475	0,00431	0,00667	0,00829	0,0298	0,0515	0,0718	0,0049	0,0300	0,1318
$\tilde{A}^-$	0,0045	0,0068	0,0082	0,0273	0,0420	0,0514	0,0041	0,0070	0,0098	0,0028	0,0167	0,0720

- 6) На сликама 7.89. и 7.90. дат је приказ удаљености алтернатива од позитивно и негативно идеалног решења, чије вредности су добијене користећи једначине 4.37 и 4.38. Алтернатива A5 (сценарио 5 – бушотина X-12) има најмању удаљеност од позитивно идеалног решења и њена вредности је $S_i^+ = 0,03401$. Највећу удаљеност од негативно идеалног решења има сценарио 5 тј. алтернатива A5 и њена вредност износи $S_i^- = 0,11469$.



Слика 7.89. Удаљеност алтернатива од позитивно идеалног решења



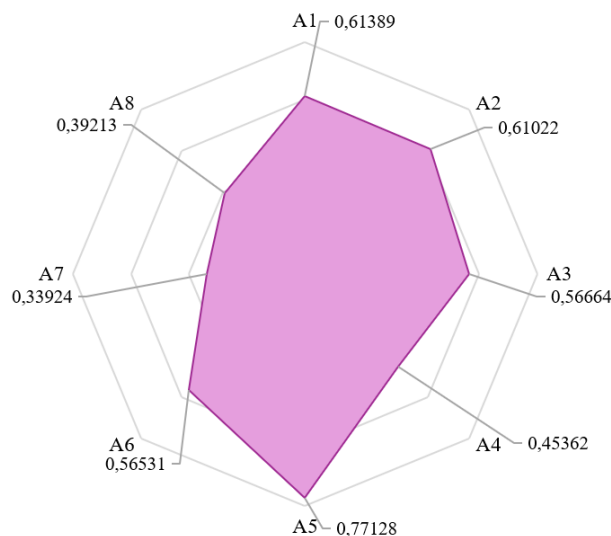
Слика 7.90. Удаљеност алтернатива од негативно идеалног решења

- 7) Вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу представљене су у табели 7.85. Алтернатива A5 има највећу блискост позитивно идеалном решењу и она износи $c_i = 0,77128$.

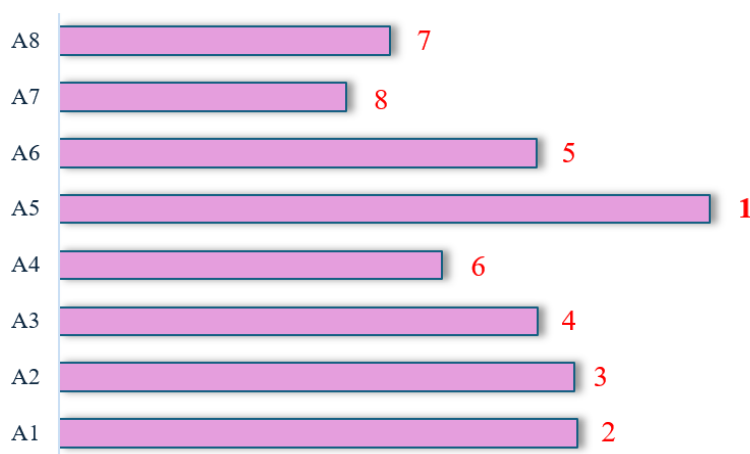
Табела 7.85. Релативне блискости алтернатива

A1	0,61389
A2	0,61022
A3	0,56664
A4	0,45362
A5	0,77128
A6	0,56531
A7	0,33924
A8	0,39213

На основу вредности релативних блискости алтернатива датих у табели 7.85. и на слици 7.91. врши се евалуација (рангирање алтернатива). Алтернативе се рангирају опадајућим редоследом, тј. најбоље рангирана алтернатива има највећу вредност и то је приказано на слици 7.92.



Слика 7.91. Графички приказ вредности релативне блискости алтернатива позитивно идеалном решењу



Слика 7.92. Поредак алтернатива

Вредновање разматраних алтернатива има следећи редослед: $A5 > A1 > A2 > A3 > A6 > A4 > A8 > A7$.

На основу вредности релативне блискости и функције рангирања, може се закључити да алтернатива A5, односно сценарио 5 представља најповољнију и најпоузданију опцију за утискивање и складиштење угљен диоксида. Такође, алтернативе A1, A2 имају високе вредности релативне блискости, што указује да и оне имају повољне карактеристике за геолошко складиштење угљен диоксида. Вредности за алтернативу A1 и A2 практично су исте, што значи да имају сличне перформансе. С друге стране, алтернативе A7 и A8 имају најмање вредности релативне блискости и из тог разлога представљају неповољне опције за утискивање и складиштење CO₂.

8. ДИСКУСИЈА И ИНТЕРПРЕТАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

Применом предложене методологије развијене у докторској дисертацији, добијено је оптимално решење за избор најпогоднијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида, као и оптималне стратегије утискивања CO_2 .

За разлику од постојећих конвенционалних приступа који се базирају на анализи статичких геолошких параметара, или искључиво на лежишној симулацији, развијени хибридни мултидимензионално-симулациони модел интегрише статистичку анализу, fuzzy вишекритеријумско одлучивање и лежишну симулацију у јединствен процес доношења одлуке, у којем резултати сваке фазе представљају улазне податке за наредну фазу модела. На овај начин омогућена је свеобухватна анализа процене могућности геолошког складиштења угљен диоксида и оптимизација стратегије његовог утискивања у одабрано лежиште.

У првој фази модела урађена је статистичка анализа петрофизичких параметара за седам исцрпљених и делимично исцрпљених гасних лежишта која се налазе у Србији. Анализирани параметри представљају кључне критеријуме који утичу на избор потенцијалног геолошког складишта угљен диоксида и на тај начин је омогућена карактеризација лежишта која представља основу за објективни избор критеријума за следећу фазу вишекритеријумског одлучивања.

У другој фази примењена је fuzzy вишекритеријумска метода TOPSIS за избор најпогоднијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида. За разлику од класичних метода који користе строге граничне вредности, коришћење троугластих fuzzy бројева омогућава моделовање неизвесности и непрецизности улазних података, при чему је смањен утицај недовољне расположивости података. На основу дефинисаних критеријума и алтернатива, резултати показују да алтернатива A1 тј. гасно лежиште „Л” представља најпогоднију опцију геолошког складиштења CO_2 . Гасно лежиште „Л” има највећу вредност теоретског капацитета складиштења у односу на остале алтернативе (лежишта) и веома повољне вредности порозности, пропусности и ефективне дебљине лежишта. Што се тиче другорангиране алтернативе, A6, она се одликује веома dobrим вредностима пропусности и порозности, међутим, има знатно мању дебљину лежишта, па самим тим и мањи потенцијални капацитет за складиштење угљен диоксида. Избор је извршен на основу већег броја конфликтних критеријума, чиме је омогућено доношење адекватније одлуке и анализирана лежишта су рангирана следећим редоследом: $A1 > A6 > A3 > A5 > A2 > A7 > A4$. Анализом свих дефинисаних критеријума закључује се да је алтернатива A4 неадекватна опција за складиштење угљен диоксида, јер је карактеришу неповољне вредности.

Трећа фаза развијеног модела обухватила је нумеричку симулацију процеса утискивања и складиштења угљен диоксида у одабрано гасно лежиште „Л”. Разматрано је осам сценарија са истим дефинисаним почетним условима, тј. утискивање $250\,000\text{ sm}^3\text{ CO}_2$ по дану кроз различите инјекционе бушотине до дозвољеног максималног притиска од 160 bar. Након тога приступило се поређењу њихових перформанси и резултата. На основу резултата симулације утврђено је да положај инјекционе бушотине у лежишту утиче на укупну количину утиснутог CO_2 , просторну дистрибуцију CO_2 , као и учешће механизма акумулирања CO_2 . Посебан значај резултата у овој фази представља и чињеница да највеће утиснуте количине CO_2 не представљају аутоматски и најбоље услове за дугорочно складиштење. Анализом резултата уочено је да различити сценарији дају различите кумулативне количине утиснутог CO_2 , као и различита учешћа механизма акумулирања CO_2 . Поједини сценарији остварују већи капацитет складиштења, док са друге стране, у сценаријима са мањим капацитетима значајно је интензивније растварање CO_2 у води, као и веће учешће резидуално акумулираног CO_2 . Највеће количине CO_2 утиснуте су у бушотину X-7 (сценарио 3), међутим није присутан најповољнији однос између количине утиснутог угљен диоксида и заступљености механизма акумулирања. Сценарио 8 има највеће количине раствореног угљен диоксида у води, али због

брзог достизања максималног дозвољеног притиска на дну бушотине, укупна количина утиснутог CO₂ знатно је мања у односу на остале анализиране сценарије.

Након завршеног симулационог моделовања процеса утискивања и складиштења угљен диоксида у одабрано гасно лежиште „Л”, приступило се завршној фази развијеног модела, тј. вишекритеријумској анализи у циљу избора оптималне стратегије утискивања CO₂ за складиштење. Полазну основу мултикритеријумске оптимизације чини осам дефинисаних симулационих сценарија дефинисаних у претходној фази развијеног модела. Сваки сценарио представља засебну алтернативу у вишекритеријумском моделу одлучивања, при чему евалуација алтернатива зависи од скупа разматраних критеријума. Параметри (критеријуми) од којих зависи избор најповољније опције утискивања и безбедног складиштења угљен диоксида представљају динамичке излазне параметре добијене симулацијом процеса утискивања и складиштења CO₂. За разлику од постојећих конционалних приступа оптимизације геолошког складиштења CO₂, који се најчешће заснивају на максимизацији укупне количине утиснутог угљен-диоксида, у овој фази развијеног модела урађена је свеобухватна анализа која поред капацитета складиштења укључује и понашање CO₂ током времена, односно механизме акумулирања угљен диоксида који се јављају у лежишту. На основу интегрисане анализе свих дефинисаних динамичких критеријума, извршен је избор најоптималније стратегије угљен диоксида која представља компромис између капацитета складиштења и доминантних механизма акумулирања CO₂. Сценарији су рангирани следећим редоследом: A5>A1>A2>A3>A6>A4>A8>A7. То значи да је оптимални сценарио утискивања 1 772 802 688 sm³ (7,488·10⁷ kg-mole) CO₂ у бушотину X-12 гасног лежишта „Л”, до вредности дозвољеног притиска на дну бушотине у разматраном периоду до 1. јуна 2042. године.

9. ЗАКЉУЧАК

Климатске промене представљају значајан глобални проблем који последњих деценија привлачи пажњу стручњака и међународне јавности. Технологија геолошког складиштења угљен диоксида представља једно од најзначајнијих перспективних решења смањења емисије антропогеног угљен диоксида на путу остварења циља нулте емисије до 2050. године.

Према последњим доступним подацима, укупне емисије угљен диоксида у Републици Србији у 2024. години износиле су 42,02 Mt. Највећи удео у емисијама угљен диоксида има енергетски сектор који износи око 60%. Емисије угљен диоксида у Србији нису занемарљиве и неопходно је предузети одговарајуће активности и мере како би се оне смањиле и свеле на минимум.

До данас, у Србији не постоји ни један пројекат складиштења угљен диоксида у геолошке формације и самим тим истраживање могућности примене исцрпљених гасних лежишта за подземно складиштење угљен диоксида, које се разматра и анализира у докторској дисертацији, представља значајну новину у научном раду на нашем простору.

Геолошко складиштење је комплексан процес који обухвата примену различитих технологија хватања угљен диоксида из индустријског и енергетског сектора, компримовање угљен диоксида и транспорт најчешће цевоводима, и на крају његово утискивање у циљу подземног складиштења у одговарајуће геолошке формације.

Предмет истраживања у докторској дисертацији је развој интегралног модела којим се врши избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизација процеса утискивања CO_2 у одабрано лежиште. За селекцију лежишта примењује се модел мултидимензионалног одлучивања, а на основу резултата развијеног модела врши се избор оптималне опције утискивања и складиштења CO_2 упоредном применом нумеричке симулације и вишекритеријумског одлучивања.

Циљ дисертације је креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела, где се применом различитих критеријумских параметара врши вредновање исцрпљених гасних лежишта у циљу избора најповољнијег лежишта за утискивање и складиштење угљен диоксида, као и оптимизације процеса утискивања. Креирани мултидимензионално-симулациони модел представља систематску интеграцију fuzzy логики, вишекритеријумских метода и метода нумеричке симулације у области вештачке интелигенције.

Циљ докторске дисертације је да се нафтним и гасним инжењерима пружи примењив модел на основу кога је могуће извршити избор адекватног гасног лежишта за складиштење угљен диоксида, као и оптимизација процеса утискивања.

Предности развијеног интегралног мултидимензионално- симулационог модела су:

- систематска интеграција статистичке анализе, fuzzy вишекритеријумских метода и нумеричке симулације у области геолошког складиштења угљен диоксида;
- геолошке параметре на основу којих се доноси одлука о складиштењу угљен диоксида карактерише неодређеност и често недовољна расположивост за карактеризацију лежишта на одговарајући начин, па из тог разлога примена fuzzy вишекритеријумских модела представља веома ефикасан приступ за минимизирање или елиминисање поменутог проблема;
- вишекритеријумски модели базирани на fuzzy логици елиминишу субјективност и повећавају ефикасност и прецизност приликом решавања комплексних проблема;
- оптимизација процеса утискивања и складиштења CO_2 врши се на основу динамике понашања угљен диоксида за време и након престанка утискивања што значајно утиче на количине утискивања, као и на обезбеђивање сигурног складиштења. Досадашњи избор оптималне стратегије углавном се базирао на максималним количинама утиснутог CO_2 , што представља непотпун и нерелевантан приступ;

- представља подршку у стратешком одлучивању и решавању проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума;
- флексибилност и адаптивност развијеног модела, што се огледа у једноставности промене улазних параметара, при чему га је могуће применити за анализу на било којем лежишту.

Поред тога што развијени интегрисани модел представља свеобухватни приступ за избор и оптимизацију геолошког складиштења, његова примена има и одређене недостатке и ограничења. Пре свега, на поузданост модела директно утичу квалитет и репрезентативност улазних података. Такође, резултати вишекритеријумске анализе зависе од избора методе, дефинисаних критеријума и њихових тежинских коефицијената.

Развијени интегрисани модел врши евалуацију гасних лежишта на основу геолошких критеријума и оптимизује стратегију утискивања на основу динамичких резултата из нумеричке симулације, али не обухвата економску анализу исплативости геолошког складиштења, као што су трошкови хватања, транспорта и утискивања CO₂, трошкови мониторинга и трошкови инфраструктурних улагања. Интеграција техничких, економских и законских (регулаторних) критеријума представља правац будућих истраживања и даљег развоја хибридног мултидимензионално-симулационог модела.

Резултати истраживања добијени у докторској дисертацији показују да је интеграцијом статичких и динамичких параметара омогућено прецизније и поузданије доношење одлука приликом избора одговарајућег лежишта и оптимизације стратегије утискивања. Оптимизација стратегије утискивања и складиштења CO₂ треба да се заснива на динамичким параметрима, тј. понашању угљен диоксида у лежишту за време утискивања и током мониторинга.

Развијени хибридни мултидимензионално-симулациони модел представља значајан напредак у односу на постојеће моделе и може се користити за планирање будућих пројеката геолошког складиштења угљен диоксида.

ЛІТЕРАТУРА

- Abou-Kassem, J., & Osman, M. (2008). An Engineering Approach to the Treatment of Constant Pressure Boundary Condition in Block-Centered Grid in Reservoir Simulation. *Petroleum Science and Technology*, 26(10-11), 1187-1204.
- Abou-Kassem, J., Farouq Ali, S., & Islam, M. (2006). *Petroleum Reservoir Simulation: A Basic Approach*. Gulf Publishing Company, Houston, TX.
- Abou-Kassem, J., Islam, M., & Ali, S. (2020). *Petroleum Reservoir Simulation: The Engineering Approach*. Gulf Professional Publishing.
- Ahmed, T. (2016). *Equations of State and PVT Analysis: Applications for Improved Reservoir Modeling* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.
- Ahmed, T. (2019). *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed.). Gulf Professional Publishing.
- Ajayi, T., Salgado Gomes, J., & Bera, A. (2019). A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*, 16(5), 1028-1063.
- Akyar, E., Akyar, H., & Düzce, S. (2012). A New Method for Ranking Triangular Fuzzy Numbers. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 20(5), 729-740.
- Al Mansoori, S. (2009). *Impact of Carbon Dioxide Trapping on Geological Storage*. Doctoral dissertation, Imperial College London.
- Al-Hashami, A., Ren, S., & Tohidi, B. (2005). CO₂ Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage: Reservoir Simulation and Economics. *Proceedings of the SPE Europe/EAGE Annual Conference*. Madrid: Society of Petroleum Engineers (SPE).
- Al-Husseini, A., & Hamad-Allah, S. (2023). History Matching of Reservoir Simulation Model: A Case Study from the Mishrif Reservoir, Buzurgan Oilfield, Iraq. *Iraqi Geological Journal*, 56(1C), 215-234.
- Ali, M., Jha, N., Pal, N., Keshavarz, A., Hoteit, H., & Sarmadivaleh, M. (2022). Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, influencing parameters, and future outlook. *Earth-Science Reviews*, 225, 103895.
- Ali, M. Y., Sultana, A., & Khan, A.F.M.K. (2016). Comparison of Fuzzy Multiplication Operation on Triangular Fuzzy Number. *IOSR Journal of Mathematics*, 12(4), 35-41.
- Allah Bukhsh, Z., Stipanovic Oslakovic, I., Klanker, K., Hoj, N., Imam, B., & Xenidis, Y. (2017). Multi-criteria decision making: AHP method applied for network bridge prioritization. *The Value of Structural Health Monitoring for the Reliable Bridge Management: Proceedings of the Joint COST TU1402 – COST TU1406 – IABSE WC1 Workshop*. Zagreb, Croatia: University of Zagreb.
- Alper, D., & Başdar, C. (2017). A Comparison of TOPSIS and ELECTRE Methods: An Application on the Factoring Industry. *Business and Economics Research Journal*, 8(3), 627-646.
- Amanipoor, H. (2019). Static Modeling of the Reservoir for Estimate Oil in Place Using the Geostatistical Method. *Geodesy and Cartography*, 45(4), 147-153.
- Aminu, M., Nabavi, S., Rochelle, C., & Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208, 1389-1419.

- Anand, M., & Bharatraj, J. (2017). Theory of Triangular Fuzzy Number. *National Conference on Applicable Trends in Mathematics (NCATM 2017)*.
- Ansari, M., Al-Zahrani, F., Pandey, D., & Agrawal, A. (2020). A fuzzy TOPSIS based analysis toward selection of effective security requirements engineering approach for trustworthy healthcare software development. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20.
- Appau, P., Dankwa, O., & Brantson, E. (2019). A comparative study between finite difference explicit and implicit method for predicting pressure distribution in a petroleum reservoir. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 11(4), 23-40.
- Archer, J., & Wall, C. (1986). *Petroleum Engineering: Principles and Practice*. Graham & Trotman Ltd.
- Arora, H., & Naithani, A. (2023). Some Distance Measures for Triangular Fuzzy Numbers Under Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution Environment. *OPSEARCH*, 60(2), 701-719.
- Arts, R., Vandeweyer, V., Hofstee, C., Pluymaekers, M., Loeve, D., Kopp, A., & Plug, W. (2012). The feasibility of CO₂ storage in the depleted P18-4 gas field offshore the Netherlands (the ROAD project). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11S, S10-S20.
- Azhar, N., Radzi, N., & Wan Ahmad, W. (2021). Multi-Criteria Decision Making: A Systematic Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, 14(8), 779–801.
- Aziz, N., Sorooshian, S., & Mahmud, F. (2016). MCDM-AHP Method in Decision Makings. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(11), 7217–7220.
- Bachu, S. (2000). Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41, 953-970.
- Bachu, S. (2002). CO₂ Sequestration in Geological Media: The Road Map for Site Selection Using the Transform of the Geological Space into the CO₂ Phase Space. *Energy Conversion and Management*, 43, 87-102.
- Bachu, S. (2003). Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology*, 44(3), 277-289.
- Bachu, S. (2006). *The Capacity for Carbon Dioxide Storage in Oil and Gas Pools in Northeastern Alberta (EUB/AGS Client Report)*. Alberta Geological Survey (AGS).
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N., & Mathiassen, O. (2007). CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1(4), 430–443.
- Bachu, S., Gunter, W., & Perkins, E. (1994). Aquifer Disposal of CO₂: Hydrodynamic and Mineral Trapping. *Energy Conversion and Management*, 33(4), 269-279.
- Badawy, A., & Ganat, T. (2022). *Rock Properties and Reservoir Engineering: A Practical View*. Springer Nature Switzerland AG.
- Baes, C., Beall, S., Lee, D., & Marland, G. (1980). The Collection, Disposal, and Storage of Carbon Dioxide. In W. Bach, J. Pankrath, & J. Williams (Eds.), *Interaction of Energy and Climate* (pp. 495-519). D. Reidel Publishing Co.
- Bashir, A., Ali, M., Patil, S., Aljawad, M., Mahmoud, M., Al-Shehri, D., Dhafer, H., & Kamal, M. (2024). Comprehensive review of CO₂ geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. *Earth-Science Reviews*, 249, 104672.

- Bennaceur, K. (2014). CO₂ Capture and Sequestration. In *Future Energy* (pp. 583-611). Oxford: Elsevier.
- Bernasconi, M., Choirat, C., & Seri, R. (2010). The Analytic Hierarchy Process and the Theory of Measurement. *Management Science*, 56(4), 699-711.
- Bjørlykke, K. (2015). *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics* (2nd ed.). Springer.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N., & Mathiassen, O. (2007). CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 62-68.
- Brans, J.-P., & De Smet, Y. (2016). PROMETHEE Methods. In S. Greco, J. Figueira, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer.
- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE Methods. In J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer.
- Brans, J.-P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to Select and How to Rank Projects: The PROMETHEE Method. *European Journal of Operational Research*, 24, 228-238.
- Brantson, E., Osei, H., Madubuike, I., Fuseini, N., Domeh, M., & Amoah, A. (2020). Comparison of Analytical and Numerical Water Influx Models in Bottom Water Reservoir. *Proceedings of the 6th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. Tarkwa, Ghana.
- Brennan, S., & Burruss, R. (2006). Specific Storage Volumes: A Useful Tool for CO₂ Storage Capacity Assessment. *Natural Resources Research*, 15(3), 165-182.
- Buckley, J., & Eslami, E. (2002). *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Physica Heidelberg.
- Busch, A., Amann-Hildenbrand, A., Bertier, P., Waschbüsch, M., & Krooss, B. (2010). The Significance of Caprock Sealing Integrity for CO₂ Storage. *SPE International Conference on CO₂ Capture, Storage, and Utilization*. New Orleans, Louisiana, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE).
- Cai, B., Li, Q., Liu, G., Liu, L., Jin, T., & Shi, H. (2017). Environmental Concern-Based Site Screening of Carbon Dioxide Geological Storage in China. *Scientific Reports*, 7, 7598.
- Cannon, S. (2018). *Reservoir Modelling: A Practical Guide* (1st ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Cao, C., Liu, H., Hou, Z., Mehmood, F., Liao, J., & Feng, W. (2020). A Review of CO₂ Storage in View of Safety and Cost-Effectiveness. *Energies*, 13(3), 600.
- CGS Europe. (2013). *State of the Art Review of CO₂ Storage Site Selection and Characterisation Methods*. CGS Europe / CO₂GeoNet.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., & Zweigel, P. (2008). *Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers: Observations and Guidelines from the SACS and CO₂STORE Projects*. British Geological Survey.
- Chakraverty, S., Sahoo, D., & Mahato, N. (2019). *Concepts of Soft Computing: Fuzzy and ANN with Programming*. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for Group Decision-Making under Fuzzy Environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1-9.
- Chen, Z. (2007). *Reservoir Simulation: Mathematical Techniques in Oil Recovery*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

- Cheng, C.-B. (2004). Group Opinion Aggregation Based on a Grading Process: A Method for Constructing Triangular Fuzzy Numbers. *Computers & Mathematics with Applications*, 48, 1619-1632.
- Cheng, Y. (2009). Reservoir Simulation. U *Petroleum Engineering – Upstream*. EOLSS Publishers Co. Ltd.
- Choptiany, J., & Pelot, R. (2014). A Multicriteria Decision Analysis Model and Risk Assessment Framework for Carbon Capture and Storage. *Risk Analysis*, 34(9), 1720-1737.
- Christie, M. (1996). Upscaling for Reservoir Simulation. *Journal of Petroleum Technology*, 48(11), 1004-1010.
- Clarke, A., Imber, J., Davies, R., van Hunen, J., Daniels, S., & Yielding, G. (2017). Application of material balance methods to CO₂ storage capacity estimation within selected depleted gas reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 23, 339-352.
- CO₂ Capture Project. (n.d.). *CO₂ Trapping Mechanisms*. CO₂ Capture Project. https://www.co2captureproject.org/ccs_explained/co2_trapping.php
- Coats, K. (1980). *Elements of Reservoir Simulation*. INTERCOMP Resource Development and Engineering, Inc.
- Coats, K. (1982). Reservoir Simulation: State of the Art. *Journal of Petroleum Technology*, 34(8), 1633–1642.
- Cosham, A. (2016). *Fundamentals of Applied Reservoir Engineering* (1st ed.). Elsevier.
- Cossé, R. (1993). *Basics of Reservoir Engineering: Oil and Gas Field Development Techniques*. Éditions Technip.
- Council of the European Union. (n.d.). *Fit for 55*. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>
- CSLF. (2003). *Charter for the Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF): A Carbon Capture and Storage Technology Initiative*. Carbon Sequestration Leadership Forum.
- CSLF. (2007). *Phase II Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation*.
- Dammak, F., Baccour, L., & Alimi, A. (2016). The Impact of Criterion Weights Techniques in TOPSIS Method of Multi-Criteria Decision Making in Crisp and Intuitionistic Fuzzy Domains. In *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems* (pp. 507-519). Springer.
- Denduluri, V., & Thakur, G. (2022). *Carbon Capture and CO₂ EOR/Storage—A Game Changer CCUS Technology*. *Journal of Petroleum Technology – The Way Ahead*. <https://jpt.spe.org/twa/carbon-capture-and-co2-eor-storage-a-game-changer-ccus-technology>
- Deveci, M., Demirel, N., John, R., & Özcan, E. (2015). Fuzzy multi-criteria decision making for carbon dioxide geological storage in Turkey. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27(Part 2), 692-705.
- Druetta, P., Tesi, P., De Persis, C., & Picchioni, F. (2016). Methods in Oil Recovery Processes and Reservoir Simulation. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 6(4), 399-435.
- Durlofsky, L. (2005). Upscaling and Gridding of Fine Scale Geological Models for Flow Simulation. *Proceedings of the 8th International Forum on Reservoir Simulation, Stresa, Italy, June 20–24, 2005*. International Forum on Reservoir Simulation (IFRS).

- Eigestad, G., Dahle, H., Hellevang, B., Riis, F., Johansen, W., & Øian, E. (2009). Geological modeling and simulation of CO₂ injection in the Johansen formation. *Computational Geosciences*, 13, 435-450.
- European Commission. (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal (COM(2019) 640 final)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- European Commission. (2020). *Stepping up Europe's 2030 climate ambition: Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people COM(2020) 562 final (The 2030 Climate Target Plan)*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562>
- European Commission. (2025). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. https://commission.europa.eu/topics/climate-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- European Union. (2003). *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC*.
- European Union. (2009). *Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/31/oj/eng>
- European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/410 of the European Parliament and of the Council of 14 March 2018 amending Directive 2003/87/EC to enhance cost-effective emission reductions and low-carbon investments, and Decision (EU) 2015/1814*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0410>
- European Union. (2021). *Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law)*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- European Union. (2023). *Directive (EU) 2023/959 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/959/oj>
- Ewing, R. (1983). *The Mathematics of Reservoir Simulation*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Ezekwe, N. (2011). *Petroleum Reservoir Engineering Practice*. Prentice Hall (Pearson Education, Inc.).
- Fanchi, J. (2000). *Integrated Flow Modeling*. Gulf Publishing Company.
- Fanchi, J. (2018). *Principles of Applied Reservoir Simulation*. Gulf Professional Publishing.
- Farajzadeh, R., Eftekhari, A., Dafnomilis, G., Lake, L., & Bruining, J. (2020). On the sustainability of CO₂ storage through CO₂ - Enhanced oil recovery. *Applied Energy*, 261, 114467.
- Fei, L., Xia, J., Feng, Y., & Liu, L. (2019). An ELECTRE-Based Multiple Criteria Decision Making Method for Supplier Selection Using Dempster-Shafer Theory. *IEEE Access*, 7, 84701–84715.
- Firtina Ertiř, İ. (2018). Application of Multi-Criteria Decision Making for Geological Carbon Dioxide Storage Area in Turkey. *Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, 19(2), 536-545.
- Fu, Y.-g. (2008). The TOPSIS Method of Multiple Attribute Decision Making Problem with Triangular-Fuzzy-Valued Weight. *Proceedings of the 2008 International Workshop on Modelling, Simulation and Optimization (WMSO 2008)*. IEEE.

- Gao, S., Zhang, Z., & Cao, C. (2009). Multiplication Operation on Fuzzy Numbers. *Journal of Software*, 4(4), 331-338.
- Gerami Seresht, N., & Robinson Fayek, A. (2019). Computational Method for Fuzzy Arithmetic Operations on Triangular Fuzzy Numbers by Extension Principle. *International Journal of Approximate Reasoning*, 106, 172-193.
- Ghomian, Y., Pope, G., & Sepehrnoori, K. (2008). Reservoir simulation of CO₂ sequestration pilot in Frio brine formation, USA Gulf Coast. *Energy*, 33, 1055-1067.
- Giachetti, R., & Young, R. (1997). A Parametric Representation of Fuzzy Numbers and Their Arithmetic Operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 91, 185-202.
- Gligoric, M., & Gligoric, Z. (2015). Model of Strategic Decision Making in Mining Industry Based on Fuzzy Dynamic TOPSIS Method. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 2(3), 470-475.
- Goodman, A., Hakala, A., Bromhal, G., Deel, D., Rodosta, T., Frailey, S., Small, M., Allen, D., Romanov, V., Fazio, J., Huerta, N., McIntyre, D., Kutchko, B., & Guthrie, G. (2011). U.S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(5), 952-965.
- Görener, A. (2012). Comparing AHP and ANP: An Application of Strategic Decisions Making in a Manufacturing Company. *International Journal of Business and Social Science*, 3(11), 194–208.
- Gozalpour, F., Ren, S., & Tohidi, B. (2005). CO₂ EOR and Storage in Oil Reservoirs. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 60(3), 537-546.
- Gunter, W., Perkins, E., & McCann, T. (1993). Aquifer Disposal of CO₂-Rich Gases: Reaction Design for Added Capacity. *Energy Conversion and Management*, 34(9-11), 941-948.
- Ha, M., Nguyen, H., Bui, D., Nguyen, H., Truong, H., & Pham, N. (2023). Improving Carbonate Reservoir Characterization by Applying Rock Typing Methods: A Case Study from the Nam Con Son Basin, Offshore Vietnam. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 64(1), 38-49.
- Habib, M., Guangqing, Y., Xie, C., Charles, S., Jakada, H., Danlami, M., Ahmed, H., & Omeiza, I. (2017). Optimizing Oil and Gas Field Management Through a Fractal Reservoir Study Model. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7(1), 43-53.
- Hanss, M. (2005). *Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Heriot-Watt University. (n.d.). *Numerical methods in reservoir simulation*. Institute of Petroleum Engineering.
- Holloway, S., & Savage, D. (1993). The Potential for Aquifer Disposal of Carbon Dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management*, 34(9-11), 925-932.
- Honarpour, M., Koederitz, L., & Harvey, A. (1986). *Relative Permeability of Petroleum Reservoirs*. CRC Press.
- Hosseini, S., Lashgari, H., Choi, J., Nicot, J.-P., Lu, J., & Hovorka, S. (2013). Static and dynamic reservoir modeling for geological CO₂ sequestration at Cranfield, Mississippi, U.S.A. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 449-462.
- Hosseinzadeh Lotfi, F., & Fallahnejad, R. (2010). Imprecise Shannon's Entropy and Multi Attribute Decision Making. *Entropy*, 12(1), 53–62.

- Hsu, C.-W., Chen, L.-T., Hu, A., & Chang, Y.-M. (2012). Site selection for carbon dioxide geological storage using analytic network process. *Separation and Purification Technology*, 94, 146-153.
- Huang, J. (2011). Combining Entropy Weight and TOPSIS Method for Information System Selection. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 113-125.
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.
- IEA. (2015). *Storing CO₂ through Enhanced Oil Recovery: Combining EOR with CO₂ Storage (EOR+) for profit*. International Energy Agency (IEA). Paris: OECD/International Energy Agency.
- IEA. (2021, February 17). *Is carbon capture too expensive?*. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- IEA. (2025). *Serbia*. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/countries/serbia>
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (2009a). *CCS Site Characterisation Criteria*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (2009b). *CO₂ Storage in Depleted Gas Fields (Technical Study Report No. 2009/01)*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. IEA Environmental Projects Ltd.
- IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Islam, M., Hossain, M., Moussavizadegan, S., Mustafiz, S., & Abou-Kassem, J. (2016). *Advanced Petroleum Reservoir Simulation: Towards Developing Reservoir Emulators*. Scrivener Publishing LLC (co-published by John Wiley & Sons, Inc.).
- Jiang, X. (2011). A review of physical modelling and numerical simulation of long-term geological storage of CO₂. *Applied Energy*, 88, 3557-3566.
- Kaarstad, O. (1992). Emission-Free Fossil Energy from Norway. *Energy Conversion and Management*, 33(5-8), 781-789.
- Kacprzak, D. (2018). Fuzzy TOPSIS Method for Group Decision Making. *Multiple Criteria Decision Making*, 13, 116-132.
- Kaldi, J., Daniel, R., Tenthorey, E., Michael, K., Schacht, U., Nicol, A., Unterschultz, J., & Backe, G. (2013). Containment of CO₂ in CCS: Role of Caprocks and Faults. *Energy Procedia*, 37, 5403–5410.
- Kali, R., Fan, D., Hazel, N., & Striolo, A. (2022). Techno-socio-economic analysis of geological carbon sequestration opportunities. *Environmental Science: Advances*, 1(1), 138-155.
- Karović Maričić, V., Leković, B., & Danilović, D. (2014). Factors Influencing Successful Implementation of Enhanced Oil Recovery Projects. *Podzemni radovi*, 25, 41-50.
- Karović Maričić, V., Leković, B., Danilović, D., & Crnogorac, M. (2015). Environmental Benefits of Enhanced Oil Recovery by CO₂ Injection. *5th International Symposium on Mining and Environmental Protection*. Vrdnik, Serbia: University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology.
- Kavitha, C., & Frank gladson, T. (2018). Design and Analysis of Fuzzy Arithmetic Neutrosophic Soft Set Compositions Using Triangular Fuzzy Number. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 9(5), 425-435.

- Khalili, Y., & Ahmadi, M. (2023). Reservoir Modeling & Simulation: Advancements, Challenges, and Future Perspectives. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 57(2), 343-364.
- Khan, C., Amin, R., & Madden, G. (2013). Carbon dioxide injection for enhanced gas recovery and storage (reservoir simulation). *Egyptian Journal of Petroleum*, 22, 225-240.
- Khormali, A., Moradi, S., & Petrakov, D. (2014). Study of Explicit Finite Difference Method in One Dimensional System. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 8(2), 399-403.
- Klins, M. (1977). *Utiskivanje ugljen-dioksida u ležišta nafte: Osnovni mehanizmi i projektovanje*. (B. Pejović, Prev.) DIT Naftagas.
- Koelbl, B., van den Broek, M., van Ruijven, B., Faaij, A., & van Vuuren, D. (2014). Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 81-102.
- Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K., & Shindo, Y. (1992). Subterranean Containment and Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs. *Energy Conversion and Management*, 33(5-8), 619-626.
- Korbøl, R., & Kaddour, A. (1995). Sleipner Vest CO₂ Disposal – Injection of Removed CO₂ into the Utsira Formation. *Energy Conversion and Management*, 36(6-9), 509-512.
- Kore, N., Ravi, K., & Patil, S. (2017). A Simplified Description of FUZZY TOPSIS Method for Multi Criteria Decision Making. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), 1-4.
- Krivoshchekov, S., Kochnev, A., Kozyrev, N., Botalov, A., Kochneva, O., & Ozhgibesov, E. (2023). Rock Typing Approaches for Effective Complex Carbonate Reservoir Characterization. *Energies*, 16(18).
- Krohling, R., & Pacheco, A. (2015). A-TOPSIS – An Approach Based on TOPSIS for Ranking Evolutionary Algorithms. *Procedia Computer Science*, 55, 308-317.
- Kumar, A., & Kaur, P. (2010). A New Method for Fuzzy Critical Path Analysis in Project Networks with a New Representation of Triangular Fuzzy Numbers. *Applications and Applied Mathematics: An International Journal (AAM)*, 5(2), 345-369.
- Lai, Y.-T., Shen, C.-H., Tseng, C.-C., Fan, C.-H., & Hsieh, B.-Z. (2015). Estimation of Carbon Dioxide Storage Capacity for Depleted Gas Reservoirs. *Energy Procedia*, 76, 470-476.
- Lakshmi, T., Anand, A., Vetrisevi, K., & Venkatesan, V. (2016). A Study on Different Types of Normalization Methods in Adaptive Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). *NCETCS 2016*. Vol. 4, pp. 1-7. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*.
- Lavanya, P. (2017). Various Fuzzy Numbers and Their Various Ranking Approaches. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(5), 73-82.
- Law, D.-S., & Bachu, S. (1996). Hydrogeological and Numerical Analysis of CO₂ Disposal in Deep Aquifers in the Alberta Sedimentary Basin. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8), 1167-1174.
- Lee, K. (2005). *First Course on Fuzzy Theory and Applications*. Springer-Verlag.

- Li, K., & Horne, R. (2006). Comparison of Methods to Calculate Relative Permeability From Capillary Pressure in Consolidated Water-Wet Porous Media. *Water Resources Research*, 42(6).
- Li, X., Wang, K., Liu, L., Xin, J., Yang, H., & Gao, C. (2011). Application of the Entropy Weight and TOPSIS Method in Safety Evaluation of Coal Mines. *Procedia Engineering*, 26, 2085-2091.
- Llamas, B., & Cienfuegos, P. (2012). Multicriteria decision methodology to select suitable areas for storing CO₂. *Energy & Environment*, 23(2-3), 249-264.
- Llamas, B., Arribas, M., Hernandez, E., & Mazadiego, L. (2014a). Pre-Injection Phase: Site Selection and Characterization. In *CO₂ Sequestration and Valorization* (pp. 281-304). Rijeka, Croatia: InTech.
- Llamas, B., Mazadiego, L., Elío, J., Ortega, M., Grandia, F., & Rincones, M. (2014b). Systematic approach for the selection of monitoring technologies in CO₂ geological storage projects. Application of multicriteria decision making. *Global NEST Journal*, 16, 36-42.
- Llamas, B., Navarre, B., Vega, F., Rodriguez, E., Mazadiego, L., Cámara, Á., & Otero, P. (2016). Greenhouse Gas Emissions – Carbon Capture, Storage and Utilisation. In *Greenhouse Gases*. InTech.
- Lu, J., Kordi, M., Hovorka, S., Meckel, T., Christopher, C., & Luetgert, R. (2013). Reservoir characterization and complications for trapping mechanisms at Cranfield CO₂ injection site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 18, 361-374.
- Marchetti, C. (1977). On Geoengineering and the CO₂ Problem. *Climatic Change*, 1, 59-68.
- Marcondes, F., Maliska, C., & Zambaldi, M. (2009). A Comparative Study of Implicit and Explicit Methods Using Unstructured Voronoi Meshes in Petroleum Reservoir Simulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31(4), 353-361.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple Criteria Decision-Making Techniques and Their Applications – A Review of the Literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571.
- Maroto-Valer, M. (Ed.). (2010). *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology* (Vol. 2). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Maschio, C., & Schiozer, D. (2003). Selection of Parameters for History Matching of Petroleum Fields Using Streamline Simulation. *Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2003)*. São Paulo, Brazil.
- Mat Razali, N., Mustapha, K., Kashim, M., Misnan, M., Md Shah, S., & Abu Bakar, Z. (2022). Critical rate analysis for CO₂ injection in depleted gas field, Sarawak Basin, offshore East Malaysia. *Carbon Management*, 13(1), 294-309.
- Mattax, C., & Dalton, R. (1990). *Reservoir Simulation*. Society of Petroleum Engineers.
- Mazumder, S., & Wolf, K. H. (2008). Differential swelling and permeability change of coal in response to CO₂ injection for ECBM. *International Journal of Coal Geology*, 74(2), 123-138.
- Nădăban, S., Dzitac, S., & Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Computer Science*, 91, 823-831.
- Nagoor Gani, A., & Mohamed Assarudeen, S. (2012). A New Operation on Triangular Fuzzy Number for Solving Fuzzy Linear Programming Problem. *Applied Mathematical Sciences*, 6(11), 525-532.

- Nawir, S., Manda, R., Rahman, T., & Fatmah, A. (2017). Implementation of ELECTRE Method in Determining the Priority of a Sustainable Tourist Attraction Development in Gorontalo Regency. *1st Annual Applied Science and Engineering Conference*. 180, 012067. IOP Publishing.
- Nermoen, A., Berenblyum, R., Coussy, P., Guichet, X., Canteli, P., Martínez Orio, R., Mesquita, P., Carneiro, J., Khrulenko, A., & Rocha, P. (2022). A Techno-economic Analysis Tool for Regional CO₂ Capture, Transport, Use and Storage Scenarios. *Proceedings of the 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-16)*. Lyon, France.
- Nilsen, H., Lie, K.-A., & Andersen, O. (2015). Analysis of CO₂ Trapping Capacities and Long-Term Migration for Geological Formations in the Norwegian North Sea Using MRST-co2lab. *Computers & Geosciences*, 79, 15-26.
- Okotie, S., & Ikporo, B. (2016). *Reservoir Engineering: Fundamentals and Applications*. Springer Nature Switzerland AG.
- Oldenburg, C., Pruess, K., & Benson, S. (2001). Process Modeling of CO₂ Injection into Natural Gas Reservoirs for Carbon Sequestration and Enhanced Gas Recovery. *Energy & Fuels*, 15(2), 293-298.
- Oloo, M., & Xie, C. (2018). Three-Dimensional Reservoir Modeling Using Stochastic Simulation, a Case Study of an East African Oil Field. *International Journal of Geosciences*, 9(4), 214-235.
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2007). Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods. *European Journal of Operational Research*, 178(2), 514–529.
- Pairoys, F., & Caubit, C. (2022). Water-Gas Imbibition Relative Permeability: Literature Review, Direct versus Indirect Methods and Experimental Recommendations. *Society of Core Analysts International Symposium (SCA 2022)*. Austin, Texas, USA.
- Pakchotanon, P., Chaianansutcharit, T., Benjamin, P., Wilson, M., Jankaew, K., & Noosri, R. (2025). Development of a ranking-based framework for saline aquifers for CO₂ storage. *Carbon Management*, 16(1), 2514528.
- Papathanasiou, J., & Ploskas, N. (2018). *Multiple Criteria Decision Aid: Methods, Examples and Python Implementations*. Springer.
- Papiernik, B., & Michna, M. (2019). Methodology and Results of Digital Mapping and 3D Modelling of the Lower Palaeozoic Strata on the East European Craton, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 89(4), 405-427.
- Pathinathan, T., Ponnivalavan, K., & Mike Dison, E. (2015). Different Types of Fuzzy Numbers and Certain Properties. *Different Types of Fuzzy Numbers and Certain Properties*, 6(11), 631-651.
- Pavan, M., & Todeschini, R. (2009). Multicriteria Decision-Making Methods. In S. Brown, R. Tauler, & B. Walczak (Eds.), *Comprehensive Chemometrics: Chemical and Biochemical Data Analysis* (Vol. 1, pp. 591-629). Elsevier B.V.
- Pavlačka, O., & Talasová, J. (2007). Application of the Fuzzy Weighted Average of Fuzzy Numbers in Decision Making Models. *New Dimensions in Fuzzy Logic and Related Technologies: Proceedings of the 5th EUSFLAT Conference (Vol. 2)*. University of Ostrava.

- Peaceman, D. (1977). *Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Perera, M., & Ranjith, P. (2012). Carbon dioxide sequestration effects on coal's hydro-mechanical properties: A review. *International Journal of Energy Research*, 36(10), 1015-1031.
- Pintér, Á., & Bódi, T. (2012). Determination of Capillary Pressure and Relative Permeability Curves with a Novel Ultra Rock Centrifuge. *Geosciences and Engineering*, 1(1), 75-86.
- Polak, S., & Grimstad, A.-A. (2009). Reservoir simulation study of CO₂ storage and CO₂-EGR in the Atzbach–Schwanenstadt gas field in Austria. *Energy Procedia*, 1(1), 2961-2968.
- Pratama, E., Ismail, M., & Ridha, S. (2017). Screening Criteria of Optimum Carbon Dioxide Injection for Enhanced Coalbed Methane Recovery and Prediction of Carbon Dioxide Storage Capacity: A Case Study in South Sumatera Basin, Indonesia. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 997-1002.
- Preux, C., Le Ravalec, M., & Enchéry, G. (2016). Selecting an Appropriate Upscaled Reservoir Model Based on Connectivity Analysis. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 71(5).
- Pruess, K., & García, J. (2002). Multiphase flow dynamics during CO₂ disposal into saline aquifers. *Environmental Geology*, 42, 282-295.
- Qi, D., & Hesketh, T. (2005). An Analysis of Upscaling Techniques for Reservoir Simulation. *Petroleum Science and Technology*, 23(7-8), 827-842.
- Qi, R. (2009). *Simulation of Geological Carbon Dioxide Storage*. Doctoral dissertation, Imperial College London, Department of Earth Science and Engineering, London, United Kingdom.
- Rasool, M., Ahmad, M., & Ayoub, M. (2023). Selecting Geological Formations for CO₂ Storage: A Comparative Rating System. *Sustainability*, 15(8), 6599.
- Raza, A., Gholami, R., Rabiei, M., Rasouli, V., & Rezaee, R. (2020). Injection Rate Estimation to Numerically Assess CO₂ Sequestration in Depleted Gas Reservoirs. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 42(13), 1608-1617.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Bing, C., Nagarajan, R., & Hamid, M. (2017a). Assessment of residual trapping in depleted reservoirs used for geosequestration. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44, 236-252.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Chua, H., Nagarajan, R., & Hamid, M. (2017b). Preliminary assessments of CO₂ storage in carbonate formations: A case study from Malaysia. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(3), 533-554.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Chua, H., Nagarajan, R., & Hamid, M. (2018a). CO₂ storage in depleted gas reservoirs: A study on the effect of residual gas saturation. *Petroleum*, 4, 95-107.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Rasouli, V., Bhatti, A., & Chua, H. (2018b). Suitability of depleted gas reservoirs for geological CO₂ storage: A simulation study. *Greenhouse Gases: Science and Technology*.
- Raza, A., Rezaee, R., Bing, C., Gholami, R., Hamid, M., & Nagarajan, R. (2016a). Carbon dioxide storage in subsurface geologic medium: A review on capillary trapping mechanism. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25, 367-373.
- Raza, A., Rezaee, R., Chua, H., Nagarajan, R., & Hamid, M. (2016b). A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 317-327.

- Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Rasouli, V., Chua, H., Nagarajan, R., & Hamid, M. (2015). Injectivity and quantification of capillary trapping for CO₂ storage: A review of influencing parameters. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 510-517.
- Ringrose, P. (2020). *How to Store CO₂ Underground: Insights from Early-Mover CCS Projects*. Springer.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *CO₂ emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Rubin, E., Davison, J., & Herzog, H. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 378-400.
- Saaty, T. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Saaty, T., & Vargas, L. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer.
- Satter, A., & Iqbal, G. (2016). *Reservoir Engineering: The Fundamentals, Simulation, and Management of Conventional and Unconventional Recoveries*. Gulf Professional Publishing.
- Satter, A., Iqbal, G., & Buchwalter, J. (2008). *Practical Enhanced Reservoir Engineering: Assisted with Simulation Software*. PennWell Corporation.
- Sayadi, M., Heydari, M., & Shahanaghi, K. (2009). Extension of VIKOR Method for Decision Making Problem with Interval Numbers. *Applied Mathematical Modelling*, 33, 2257–2262.
- Schlumberger. (2007). *ECLIPSE Blackoil Reservoir Simulation: Training and Exercise Guide. Version 2.0*. Schlumberger.
- Schlumberger. (2014a). *ECLIPSE Reference Manual*. Schlumberger.
- Schlumberger. (2014b). *ECLIPSE Technical Description, Version 2014.1*. Schlumberger.
- Schmelz, W., Hochman, G., & Miller, K. (2020). Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: Northeastern and midwestern United States. *Interface Focus*, 10, 20190065.
- Selase, A., Thompson, B., Junior, A., & Doreen, A. (2018). Development of Finite Difference Explicit and Implicit Numerical Reservoir Simulator for Modelling Single Phase Flow in Porous Media. *Earth Sciences*, 7(6), 242-259.
- Serintel. (n.d.). *Integrated Reservoir Modeling*. Oil & Gas Portal. <https://www.oil-gasportal.com/reservoir-management/integrated-reservoir-modeling/>
- Setijadji, L. (2009). Overview of Deep Geological CO₂ Storage and Its Area Selection Method. *Journal of Southeast Asian Applied Geology*, 1(1), 25-31.
- Şevkli, M., Zaim, S., Turkyilmaz, A., & Satır, M. (2010). An Application of Fuzzy TOPSIS Method for Supplier Selection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2010)*. IEEE.
- Siekelova, A., Podhorska, I., & Imppola, J. (2021). Analytic Hierarchy Process in Multiple-Criteria Decision-Making: A Model Example. *SHS Web of Conferences*, 90, 01019.

- Sievert, K., Cameron, L., & Carter, A. (2023). *Why the Cost of Carbon Capture and Storage Remains Persistently High*. Winnipeg, Canada.
- Smit, B., Reimer, J., Oldenburg, C., & Bourg, I. (2014). *Introduction to Carbon Capture and Sequestration* (Vol. 1). London: Imperial College Press.
- Smith, E., Morris, J., Kheshgi, H., Teletzke, G., Herzog, H., & Paltsev, S. (2021). The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109, 103367.
- Solomon, S. (2006). *Criteria for Intermediate Storage of Carbon Dioxide in Geological Formations*. The Bellona Foundation, Oslo, Norway.
- Song, G., Meng, C., Zhao, Z., & Yang, Q. (2024). Comprehensive Review of the Determination and Reduction of the Minimum Miscibility Pressure during CO₂ Flooding. *ACS Omega*, 9(13), 14747–14765.
- Sudha, T., & Jayalalitha, G. (2020). Fuzzy Triangular Numbers in Sierpinski Triangle and Right Angle Triangle. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing.
- Supraja, S., & Kousalya, P. (2016). ELECTRE Method for the Selection of Best Computer System. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(39).
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023a). A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi-Criteria Decision-Making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6(2), 5-16.
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023b). Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures. *Iris Journal of Economics & Business Management*, 1(1), 1-7.
- Tomić, L., Karović Maričić, V., & Danilović, D. (2021). The preliminary selection of oil reservoir in Serbia for carbon dioxide injection and storage by a multicriteria decision-making approach: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.
- Tomić, L., Karović Maričić, V., Danilović, D., & Crnogorac, M. (2018). Criteria for CO₂ storage in geological formations. *Podzemni radovi*, 32, 61-74.
- Tomić, L., Karović Maričić, V., Danilović, D., Leković, B., & Crnogorac, M. (2019). Application of the PROMETHEE and VIKOR methods for selecting the most suitable carbon dioxide geological storage option. *Podzemni radovi*, 34, 43-57.
- Trading Economics. (n.d.). *European Union Carbon Price*. <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.
- U.S. Department of Energy. (2015). *Carbon Storage Atlas. Fifth Edition*. National Energy Technology Laboratory (NETL). U.S. Department of Energy.
- Ulvestad, M., & Overland, I. (2012). Natural gas and CO₂ price variation: Impact on the relative cost-efficiency of LNG and pipelines. *International Journal of Environmental Studies*, 69(3), 407-426.
- UNFCCC. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. United Nations.

- van der Meer, L. (1992). Investigations Regarding the Storage of Carbon Dioxide in Aquifers in The Netherlands. *Energy Conversion and Management*, 33(5-8), 611-618.
- Velmurugan, R., Subramanian, S., & Manavalan, R. (2011). Multi criteria decision making to select the suitable method for the preparation of nanoparticles using an analytical hierarchy process. *Pharmazie*, 66(11), 836-842.
- Vishal, V., & Singh, T. (Eds.). (2016). *Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Behavior*. Springer International Publishing.
- Wang, H., Kou, Z., Ji, Z., Wang, S., Li, Y., Jiao, Z., Johnson, M., & McLaughlin, J. (2022). Investigation of enhanced CO₂ storage in deep saline aquifers by WAG and brine extraction in the Minnelusa Sandstone, Wyoming. *Energy*, 265, 126379.
- Wei, B., Wang, B., Li, X., Aishan, M., & Ju, Y. (2023). CO₂ storage in depleted oil and gas reservoirs: A review. *Advances in Geo-Energy Research*, 9(2), 76–93.
- Weir, G., White, S., & Kissling, W. (1995). Reservoir storage and containment of greenhouse gases. *Energy Conversion and Management*, 36(6-9), 531-534.
- Wheaton, R. (2016). *Fundamentals of Applied Reservoir Engineering: Appraisal, Economics, and Optimization*. Gulf Professional Publishing.
- Wu, Z., & Abdul-Nour, G. (2020). Comparison of Multi-Criteria Group Decision-Making Methods for Urban Sewer Network Plan Selection. *CivilEng*, 1(1), 26-48.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zavadskas, E., & Podvezko, V. (2016). Integrated Determination of Objective Criteria Weights in MCDM. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(2), 267-283.
- ZEP. (2011). *The Costs of CO₂ Transport: Post-demonstration CCS in the EU*. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. Brussels, Belgium: ZEP (European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants).
- Zhang, D., & Song, J. (2014). Mechanisms for geological carbon sequestration. *Procedia IUTAM*, 10, 319–327.
- Zhang, X., Ma, W., & Chen, L. (2014). New Similarity of Triangular Fuzzy Number and Its Application. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Zhang, Y. (2015). TOPSIS Method Based on Entropy Weight for Supplier Evaluation of Power Grid Enterprise. *2nd International Conference on Education Reform and Modern Management (ERMM 2015)*. Atlantis Press.
- Zhao, W.-J., & Liu, J.-C. (2018). Triangular Fuzzy Number-Typed Fuzzy Cooperative Games and Their Application to Rural E-Commerce Regional Cooperation and Profit Sharing. *Symmetry*, 10(12), 699.
- Zhao, X., & Liao, X. (2012). Evaluation Method of CO₂ Sequestration and Enhanced Oil Recovery in an Oil Reservoir, as Applied to the Changqing Oilfields, China. *Energy & Fuels*, 26(16), 5350–5354.
- Zhou, X., Al-Otaibi, F., & Kokal, S. (2017). Investigation of Relative Permeability Characteristics for Supercritical CO₂ Displacing Water and Remaining Oil after Seawater Flooding in Carbonate Rocks at Reservoir Conditions. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain: Society of Petroleum Engineers (SPE).

- Zhu, X., Meng, X., & Zhang, X. (2021). Application of Multiple Criteria Decision Making Methods in Construction: A Systematic Literature Review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), 372–403.
- Zimmermann, H.-J. (2001). *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. Springer Science+Business Media, LLC.
- Zou, F. (2013). Geologic and Engineering Modeling. U *Petroleum Exploration and Development* (str. 621-656). Elsevier.
- Zulqarnain, R., Saeed, M., Ali, B., Abdal, S., Saqlain, M., Ahamad, M., & Zafar, Z. (2020). Generalized Fuzzy TOPSIS to Solve Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Journal of New Theory*, 32, 40-50.
- Влада Републике Србије. (2022). *Национално утврђени допринос (NDC) Републике Србије за период 2021–2030. године*. Београд.
- ЕПС. (2025). *Извештај о стању животне средине у ЕПС АД за 2024. годину*. Београд. Акционарско друштво „Електропривреда Србије“, Београд.
- НИС. (2022). *Интерна техничка документација*. Нафтна индустрија Србије а.д. Нови Сад.
- Оприцовић, С. (1988). *Вишекритеријумска оптимизација система у грађевинарству*. Грађевински факултет Универзитета у Београду.
- Република Србија. (2015). *Закон о рударству и геолошким истраживањима*.

БИОГРАФИЈА

Лола Томић, рођена је 18. маја 1995. године у Подгорици. Завршила је Осму београдску гимназију, природно-математички смер 2013. године. Исте године уписала је основне академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Рударски одсек, студијски програм Инжењерство нафте и гаса. Дипломски рад под називом „Могућности производње нафте из неконвенционалних лежишта”, одбранила је 2017. године и стекла стручни назив дипломирани инжењер рударства. Школске 2017/18. године уписала је мастер академске студије, студијски програм Инжењерство нафте и гаса. Мастер рад под називом „Анализа критеријума могућности геолошког складиштења угљен-диоксида” одбранила је 2018. године и стекла стручни назив мастер инжењер рударства. Школске 2018/19. године уписала је докторске академске студије, студијски програм Рударско инжењерство.

Од фебруара 2018. године, запослена је на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, најпре као сарадник у настави за ужу научну област Инжењерство нафте и гаса на Катедри за експлоатацију нафте, гаса и технику дубинског бушења, а од 2019. године као асистент. У наставном процесу, Лола Томић, активно учествује и припреми и извођењу практичног дела наставе на предметима из области разраде нафтних и гасних лежишта и повећања искоришћења нафтних лежишта.

Као аутор и коаутор, Лола Томић, објавила је дванаест научно-стручних радова публикованих на домаћим и међународним скуповима, као и домаћим и међународним научно-стручним часописима, укључујући и рад објављен на SCI листи.

Члан је међународног студентског SPE Chapter-a, Комитета младих професионалаца Националног нафтног комитета Србије – Светског нафтног савета и Савеза инжењера рударства и геологије Србије. У јуну 2022. године похађала је летњу школу у Дубровнику под називом „Petroleum Engineering Summer School”.

Научно истраживачки рад јој је из области моделовања, разраде и експлоатације нафтних и гасних лежишта, повећања искоришћења нафтних лежишта, геолошког складиштења угљен диоксида и fuzzy вишекритеријумског одлучивања.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Лола Томић

Број индекса: P712/18

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно
лежиште „Л”

- 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, 02. 09. 2026.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Лола Томић

Број индекса: P712/18

Студијски програм: Рударско инжењерство

Наслов рада: Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л”

Ментор: проф. др Весна Каровић Маричић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања 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, 02. 09. 2026.

Изјава о коришћењу

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

Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л”

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, 02. 09. 2026.

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.