

Рударско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: проф. др Весна Каровић Маричић

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Danilović, D., **Karović Maričić, V.**, Elhaddad, N., Leković, B. (2016). An oilfield in Libya: A new model to enhance waste water disposal. *Energy & Environment*, 27(6): 704-712. Doi: 10.1177/0958305X16674403; M23; IF: 0,302.
2. **Karovic Maricic, V.**, Danilovic, D., Lekovic, B., Crnogorac, M. (2018). Energy policy reforms in the Serbian oil sector: An update. *Energy Policy*, 113: 348–355. Doi: 10.1016/j.enpol.2017.11.011; M21; IF: 4,880.
3. Crnogorac, M., Tanasijević, M., Danilović, D., **Karović Maričić, V.**, Leković, B. (2020). Selection of Artificial Lift Methods: A Brief Review and New Model Based on Fuzzy Logic. *Energies* 13(7): 1758. Doi: 10.3390/en13071758; M22; IF: 3,004.
4. 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*. Doi: 10.1080/15567036.2021.1936303; M22; IF: 2,902.
5. Stanisavljevic, B., **Karovic Maricic, V.**, Isakov, I. (2023). Development and evaluation of fracture gradient curve model: a case study of south-central Kazakhstan. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 32(2): 126-140. Doi: 10.1504/IJOGCT.2023.128042; M23; IF: 0,723.

Обавештавамо вас да је Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета

(назив надлежног тела факултета)

на седници одржаној _____ размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

- Прилог
1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
 2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

На основу члана 67. и 114. Статута Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду и члана 30. Правилника о докторским студијама на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на својој седници одржаној 18.04.2024. године, донело је

О Д Л У К У

1. Усваја се извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације **Лоле Томић, маг. инж. рударства**.
2. Одобрава се именованој израда докторске дисертације под насловом *„Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л““*.
3. Тема докторске дисертација је оригинална идеја, од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.
4. За ментора се именује др Весна Каровић Маричић, ред. проф.
5. Сагласност на предлог теме докторске дисертације из ове одлуке даје Веће научних области техничких наука.

Д Е К А Н

др Биљана Аболмасов, ред. проф.

Достављено:

- Већу научних области техничких наука
- Ментору
- Именованој
- Одељењу за студентска питања

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Научна заснованост теме докторске дисертације кандидата **Лоле Томић**, мастер инжењера рударства

Одлуком бр. 1/89 од 22.03.2024. године, именовали смо чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Лоле Томић, мастер инжењера рударства, под насловом *Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л”*.

На основу приложеног материјала, уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1. Биографски подаци

Лола Томић је рођена 18. маја 1995. године у Подгорици. Осму београдску гимназију, природно-математички смер завршила је 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 11. септембра 2017. године са највишом оценом 10. Основне академске студије је завршила са просечном оценом 8,39 и стекла стручни назив дипломирани инжењер рударства. Школске 2017/18. године, Лола Томић уписала је мастер академске студије, студијски програм инжењерство нафте и гаса. Мастер рад под називом „Анализа критеријума могућности геолошког складиштења угљен-диоксида” одбранила је 18. септембра 2018. године са оценом 10. Мастер академске студије завршила је са просечном оценом 9,80 и стекла стручни назив мастер инжењер рударства. Школске 2018/19. године, Лола Томић уписује докторске академске студије, студијски програм рударско инжењерство. Према плану и програму је успешно положила све предмете са просечном оценом 10.

Лола Томић поседује сертификат за учешће на Конгресу студената технике одржаног 2016. године под називом „Изазови у модерним технологијама” и 2017. године под називом „Потенцијал енергије и очување животне средине”. Крајем 2021. године, постала је члан Комитета младих професионалаца Националног нафтног комитета Србије – Светског нафтног савета. Такође, од априла 2021. године је члан студентског

SPE (Society of Petroleum Engineers) Chapter-a. У јуну 2022. године похађала је летњу школу у Дубровнику под називом „Petroleum Engineering Summer School (PESS)”.

Лола Томић је изабрана у звање сарадника у настави за ужу научну област инжењерство нафте и гаса на Катедри за експлоатацију нафте, гаса и технику дубинског бушења, где је почела да ради 12. фебруара 2018. године. Уписом на докторске студије, стекла је услов за избор у више звање. У звање асистента је изабрана у фебруару 2019. године, и поново изабрана 2022. године. Као студент докторских студија, од почетка школске 2018/19. године активно учествује у припреми и извођењу практичног дела наставе (вежби) из предмета: „Физика лежишта флуида”, „Разрада нафтних и гасних лежишта 1”, „Разрада нафтних и гасних лежишта 2”, „Управљање лежиштима угљоводоничних флуида”, и „Методе повећања искоришћења нафтних лежишта”. Такође, од 1. јуна 2019. године, Лола Томић је ангажована на пројекту финансираном од стране Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, под називом „Истраживање могућности повећања енергетске ефикасности коришћењем енергетских потенцијала на примеру НИС-Нафтагаса”, евиденциони број: 33001.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат, Лола Томић, докторске студије на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, на студијском програму Рударско инжењерство, уписала је школске 2018/19. године. Током докторских студија, Лола Томић је испунила све обавезе и положила све испите предвиђене програмом докторских студија, са просечном оценом 10,00. Списак положених испита је дат у табели:

Предмет	Оцена
Феномени преноса топлоте и масе	10
Вишекритеријумско одлучивање у рударском инжењерству	10
Примена метода меког рачунарства у рударском инжењерству	10
Израда докторске дисертације	10
Израда докторске дисертације	10
Одабрана поглавља физике	10
Одабрана поглавља из експлоатације нафте и гаса	10
Неконвенционални нафтни и гасни ресурси	10
Израда докторске дисертације	10
Одабрана поглавља из припреме и транспорта нафте и гаса	10
Израда докторске дисертације	10
Одабрана поглавља из стимулације производних система	10
Израда докторске дисертације	10
Научно-истраживачки рад	10
Научно-истраживачки рад	10
Израда докторске дисертације	10

Као аутор или коаутор, Лола Томић, објавила је десет научно-стручних радова публикованих на домаћим и међународним скуповима, као и домаћим и међународним научно-стручним часописима:

Категорија M22 - Рад у истакнутом међународном часопису

- 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*. Doi: 10.1080/15567036.2021.1936303

Категорија M33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини

- Karović Maričić, V., Leković, B., Danilović, D., Crnogorac, M., Tomić, L. (2019). Technological Advances in Application of Methods For Heavy Oil Reservoir Exploitation. In *7th International Symposium Mining and Environmental Protection, Vrdnik, Srbija, 25. - 28. Sep*, pp. 351 - 358. ISBN: 978-86-7352-354-5
- Tomić, L., Karović Maričić, V., Danilović, D., Leković, B., Crnogorac, M. (2021). Available technological procedures for capturing CO₂ in the industrial and power generation sectors. In: *8th International Conference Mining and Environmental Protection, Sokobanja, Srbija, 22.-25. Sept*. ISBN: 978-86-7352-372-9

Категорија M34 - Саопштења са међународног скупа штампано у изводу

- Crnogorac, M., Danilović, D., Karović Maričić, V., Tomić, L. (2019). An overview of artificial lift selection methods with case of selection using multi-criteria decision-making methods. In: *1st International Conference on Advanced Production and Processing, Novi Sad, 10. - 11. Oct*. ISBN: 978-86-6253-102-5

Категорија M51 - Рад у врхунском часопису националног значаја

- Tomić, L., Karović Maričić, V., Danilović, D., & Crnogorac, M. (2018). Criteria for CO₂ storage in geological formations. *Underground Mining Engineering*, 32: 61-74. Doi: 10.5937/PodRad1832061T
- 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. *Underground Mining Engineering* 34: 43-57. Doi: 10.5937/PodRad1934043T
- Tomić, L., Danilović, D., Karović Maričić, V., Leković, B., Crnogorac, M. (2020). Application of membrane technology for separation CO₂ from natural gas. *Underground Mining Engineering* 36: 61-68. Doi: 10.5937/podrad2036061t
- Danilović, D., Ilić, M., Crnogorac, M., & Tomić, L. (2022). Gas-lift wells optimization at the oil field "K". *Underground Mining Engineering*, 41: 31-42. Doi: 10.5937/podrad2241031D

Категорија M53 - Рад у националном часопису

- Илић, М., Живковић, М., Даниловић, Д., Crnogorac, М., Karović Maričić, V., & Tomić, L. (2023). Određivanje teorijskog termičkog potencijala napuštenih naftnih i gasnih bušotina. *Tehnika*, 74: 667-672. Doi: 10.5937/tehnika23066671

Категорија M63 - Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу

- Црногорац, М., Даниловић, Д., Томић, Л. (2020). Управљање производњом нафте – нови алат на бази фази логике. *IX Научно – стручни скуп предузетништво, инжењерство, менаџмент, Зрењанин, 24. Октобар*. ISBN: 978-86-84289-90-4

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Лола Томић, мастер инжењер рударства, положила је све предмете предвиђене акредитованим докторским академским студијама на студијском програму Рударско инжењерство. Током докторских студија и извођења планираних истраживања, Лола Томић представила се као темељан истраживач, која је током времена значајно унапредила свој истраживачки потенцијал. На основу претходног приказа резултата досадашњег стручног и научно-истраживачког рада, јасно се види да је рад кандидата директно везан за област којој припада тема докторске дисертације.

Комисија сматра да кандидат Лола Томић, испуњава све неопходне предуслове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

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), усвојен је Париски споразум 2015. године 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, 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 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 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 области енергетске ефикасности, обновљивих извора енергије и за смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште.

Према последњим доступним подацима Међународне агенције за енергетику (International Energy Agency - IEA), укупне емисије угљен диоксида у Републици Србији у 2021. години износиле су 44,2 Mt. Највећи удео у емисијама угљен диоксида има енергетски сектор (производња електричне и топлотне енергије), који износи више од 80 %. У поређењу са европским земљама, Србија емитује мање угљен диоксида по становнику у односу на две трећине држава, односно припада групи држава са најнижим емисијама по становнику. Међутим, 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 издвајања 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 су превасходно: 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 recovery by CO₂ injection method - „EOR-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 задржавања угљен диоксида у складиштеном простору, најадекватније је вршити складиштење угљен диоксида у исцрпљеним лежиштима угљоводоника у односу на друге типове геолошких формација. Ова тврдња 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. Такође, складиштење угљен диоксида у исцрпљена лежишта угљоводоника има предност у односу на остале опције складиштења због знатно нижих капиталних и оперативних трошкова с обзиром на постојећи ниво истражености и присуство инфраструктуре.

Такође, 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.

Имајући у виду претходно наведено, предмет истраживања у докторској дисертацији је развој интегралног модела којим ће се извршити избор најповољнијег гасног лежишта за складиштење угљен диоксида и оптимизација процеса утискивања угљен диоксида у одабрано лежиште. За селекцију лежишта примениће се модел мултидимензионалног одлучивања, а на основу резултата развијеног модела извршиће 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, елиминисаће се лежишта која не задовољавају разматране критеријуме складиштења, а преостала лежишта ће се користити 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 користиће 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 дефинишу се количине утискивања угљен диоксида, као и максимални дозвољени притисак који је једнак почетном лежишном притиску. Разматраће 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 примениће 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 четворој 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 могло 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.

Конечан 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 би се применом различитих критеријумских параметара вршило вредновање исцрпљених гасних лежишта у циљу избора најповољнијег лежишта за утискивање и складиштење угљен диоксида, као и оптимизације процеса утискивања угљен диоксида. Креирани мултидимензионални-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 представљаће подршку у стратешком одлучивању и решавању проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума. Модел карактерише флексибилност и адаптибилност што ће се огледати у једноставности промене улазних параметара, при чему га је могуће применити за анализу на било којем лежишту.

3. РЕЛЕВАНТНА ЛИТЕРАТУРА

За потребе израде докторске дисертације кандидат ће користити доступну и релевантну литературу:

1. Agartan, E., Gaddipati, M., Yip, Y., Savage, B., & Ozgen, C. 2018. CO₂ storage in depleted oil and gas fields in the Gulf of Mexico. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 72, pp. 38–48. Doi: 10.1016/j.ijggc.2018.02.022
2. Alcalde, J., Heinemann, N., James, A., Bond, C.E., Ghanbari, S., Mackay, E.J., Haszeldine, R.S., Faulkner, D.R., Worden, R.H., & Allen, M.J. 2021. A criteria-driven approach to the CO₂ storage site selection of East Mey for the acorn project in the North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105309. Doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105309

3. Aminu, M.D., Nabavi, S.A., Rochelle, C.A., Manovic, V. 2017. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208, pp.1389–1419. Doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.015
4. Azhar, N.A., Radzi, N.A.M. and Ahmad, W.S.H.M.W. 2021. Multi-Criteria Decision Making: A Systematic Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, 14, pp.779-801. Doi:10.2174/2352096514666211029112443
5. Bachu, S. 2000. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion & Management*, 41, pp. 953-970. Doi: 10.1016/S0196-8904(99)00149-1
6. Bachu, S. 2003. Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology*, 44, pp. 277–289. Doi: 10.1007/s00254-003-0762-9
7. Buckley, J.J. and Eslami E. 2002. *An introduction to fuzzy logic and fuzzy sets*, Heidelberg; NewYork, Physica-Verlag
8. Bump, A.P., Bhakshian, S., Hovorka, S.D., Rhodesand, J., & Neades, S. 2022. Criteria for depleted reservoirs to be developed for CO₂ storage. *16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies GHGT-16*, 23-27th October 2022, Lyon, France
9. Calla, C., Saltzer, S.D., Davis, J.S., Hashemi, S.S., Kavscek, A.R., Okoroafor, E.R., Wen, G., Zoback, M.D., Benson, S.M. 2022. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. *Applied Energy*, 324, 119668. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119668
10. Chen, C.-T. 2000. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114 (1) pp. 1-9. Doi: 10.1016/S0165-0114(97)00377-1
11. Deveci, M., Demirel, N.C., 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 (2), pp. 692–705. Doi: 10.1016/j.jngse.2015.09.004
12. Ertis, I. F. 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), pp. 536–45. Doi: 10.18038/aubtda.339002
13. Guo, J., Yin, J., Zhang, L., Lin, Z., & Li, X. 2020. Extended TODIM method for CCUS storage site selection under probabilistic hesitant fuzzy environment. *Applied Soft Computing Journal*, 93, 106381. Doi: 10.1016/j.asoc.2020.106381
14. Heidarabad, R.G., Shin, K. 2024. Carbon Capture and Storage in Depleted Oil and Gas Reservoirs: The Viewpoint of Wellbore Injectivity. *Energies*, 17, 1201. Doi: 10.3390/en17051201

15. Hsu, C.-W., Chen, L.-T., Hu, A.H., Chang, Y.-M. 2012. Site selection for carbon dioxide geological storage using analytic network process. *Separation and Purification Technology*, 94, pp. 146–153. Doi: 10.1016/j.seppur.2011.08.019
16. Hwang, C.L., Yoon, K.P. 1981. *Multiple attributes decision making methods and applications*, Berlin, Springer-Verlag
17. Kamashev, A., and Amanbek, Y. 2021. Reservoir Simulation of CO₂ Storage Using Compositional Flow Model for Geological Formations in Frio Field and Precaspian Basin. *Energies*, 14, 8023. Doi: 10.3390/en14238023
18. Kore, N. B., Ravi, K., & Patil, S. B. 2017. A simplified description of fuzzy TOPSIS method for multi criteria decision making. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (5), pp. 2047-2050.
19. 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, pp. 470 – 476. Doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.887
20. Llamas, B., and Cámara, A. 2014. Application of multicriteria algorithm to select suitable areas for storing CO₂: CO₂SiteAssess software. *Energy Procedia*, 63, pp. 4977–4986. Doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.527
21. Llamas, B., and Cienfuegos, P. 2012. Multicriteria decision methodology to select suitable areas for storing CO₂. *Energy Environment*, 23 (2–3), pp. 249–64. Doi: 10.1260/0958-305X.23.2-3.249
22. Llamas, B., Arribas, M., Hernandez, E., and Mazadiego, L.F. 2014. Pre-Injection Phase: Site Selection and Characterization. In: *CO₂ Sequestration and Valorization*, IntechOpen, Rijeka, Croatia. Doi: 10.5772/57405
23. Llamas, B., Luis, F., Mazadiego, L.F., Elio, J., Ortega, M.F., Grandia, F. & Rincones, M. 2014. Systematic approach for the selection of monitoring technologies in CO₂ geological storage projects. Application of multicriteria decision making. *Global NEST Journal*, 16 (1), pp. 36–42.
24. Luboń, K. 2022. Influence of InjectionWell Location on CO₂ Geological Storage Efficiency. *Energies*, 14, 8604. Doi:10.3390/en14248604
25. Ramirez, A., Hagedoorn, S., Kramers, L., Wildenborg, T., & Hendriks, C. 2009. Screening CO₂ storage options in the Netherlands. *Energy Procedia*, 1 (1), pp. 2801–2808. Doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.052
26. Raza, A., Gholami, R., Rabiei, M., Rasouli, V., & Rezaee, R. 2019. Injection rate estimation to numerically assess CO₂ sequestration in depleted gas reservoirs. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Doi: 10.1080/15567036.2019.1604871

27. Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Bing, C.H., Nagarajan, R., & Hamid, M.A. 2016. Preliminary assessment of CO₂ injectivity in carbonate storage sites. *Petroleum*, pp. 1-11. Doi: 10.1016/j.petlm.2016.11.008
28. Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Bing, C.H., Nagarajan, R., & Hamid, M.A. 2017. Preliminary assessments of CO₂ storage in carbonate formations: a case study from Malaysia. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14, pp. 533–554. Doi: 10.1088/1742-2140/aa5e71
29. Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Bing, C.H., Nagarajan, R., & Hamid, M.A. 2018. CO₂ storage in depleted gas reservoirs: A study on the effect of residual gas saturation. *Petroleum*, 4, pp. 95-107. Doi: 10.1016/j.petlm.2017.05.005
30. Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Rasouli, V., Bhatti, A.A., Bing, C.H. 2018. Suitability of depleted gas reservoirs for geological CO₂ storage: A simulation study. *Greenhouse Gases Science Technology*, 8, pp. 876–897. Doi: 10.1002/ghg.1802
31. Raza, A., Rezaee, R., Gholam, R., Bing, C.H., Nagarajan, R., & Hamid, M.A. 2016. A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, pp. 317-327. Doi: 10.1016/j.jngse.2015.11.053
32. 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), pp. 76-93. Doi: 10.46690/ager.2023.08.02
33. Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (3), pp. 338–353.

4. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

Истраживачки рад у дисертацији заснива се на следећим хипотезама:

- 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.

5. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Научне методе које ће се применити у овом истраживању су:

- Методе анализа садржаја и компаративна анализа које обухватају проучавање и систематизацију научне и стручне литературе из области складиштења угљен диоксида у исцрпљена гасна лежишта, fuzzy логики, вишекритеријумских метода одлучивања и нумеричке симулације.
- Прикупљање и статистичка анализа података укључују систематско прикупљање, статистичку обраду и анализу доступних петрофизичких параметара лежишта и особина флуида.
- Fuzzy вишекритеријумске методе, односно fuzzy TOPSIS (Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) метода.
- Нумеричка симулација утискивања угљен диоксида у гасно лежиште применом композитног симулационог модела омогућиће дефинисање понашања угљен диоксида у лежишту током и након престанка његовог утискивања.

6. ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

Тема докторске дисертације обухвата истраживање и анализирање проблематике складиштења угљен диоксида у исцрпљена гасна лежишта. Очекивани научни допринос представљаће креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела, где би се применом различитих критеријумских параметара вршило вредновање исцрпљених гасних лежишта у циљу избора најповољнијег лежишта за утискивање угљен диоксида, као и оптимизације процеса утискивања.

Научни допринос ће бити напредак у односу на досадашња научна достигнућа у области геолошког складиштења угљен диоксида, а огледаће се у елиминисању субјективности и повећавању ефикасности и прецизности приликом избора најповољнијег лежишта и оптимизације процеса утискивања. Докторска дисертација ће пружити нове увиде у

могућности примене вишекритеријумских метода базираних на fuzzy логици у области геолошког складиштења угљен диоксида. Креирање хибридног мултидимензионално-симулационог модела ће представљати систематску интеграцију fuzzy логики, вишекритеријумских метода и метода нумеричке симулације у области вештачке интелигенције. На такав начин представљаће значајан научни допринос постојећим приступима у овој области. Новина ове дисертације је што ће се разматрати исцрпљена гасна лежишта у Србији за подземно складиштење угљен диоксида. У нашој литератури и пракси представиће се први пут 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 ће представљати подршку у стратешком одлучивању и решавању комплексних проблема када је присутан велики број алтернатива и критеријума. Креирани модел ће карактерисати флексибилност и адаптивност што ће се огледати у једноставности промене улазних параметара, при чему га је могуће применити на било којем лежишту.

Нови развијени мултидимензионално-симулациони модел имаће бројне предности у односу на постојеће моделе. Пре свега избор најповољнијег лежишта за складиштење детаљном анализом параметара ће обезбедити 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 ће се оптимизација вршити на основу динамике понашања угљен диоксида за време и након престанка утискивања који значајно утичу на количине утискивања као и на обезбеђивање сигурног складиштења, и то представља додатни научни допринос.

Из наведених разлога сматра се да развој новог модела може представљати значајан допринос и искорак у односу на постојећа научна знања у области складиштења угљен диоксида у исцрпљена гасна лежишта како у нашој земљи, тако и у свету.

7. ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА

Истраживање у оквиру рада на докторској дисертацији ће се развијати кроз следеће сегменте:

- Теоријска основа и преглед литературе: Овај део ће обухватити детаљан преглед и анализу теоријских концепата у области fuzzy вишекритеријумског одлучивања и нумеричке симулације и њихове примене у одабиру потенцијалног геолошког складишта и оптимизације процеса утискивања угљен диоксида. Пажња ће бити посвећена и проучавању релевантних научних и стручних радова који се баве сличним тематикама.

- Прикупљање и обрада података: Овај сегмент подразумева систематско прикупљање петрофизичких података лежишта и особина флуида. Подаци ће бити анализирани и припремљени за даљу обраду.
- Развој и имплементација fuzzy вишекритеријумског и композитног симулационог модела: У овом делу ће бити представљен процес развоја и практичне примене fuzzy TOPSIS модела и нумеричке симулације лежишта. Циљ је стварање ефикасног модела који омогућава аутоматизован избор најповољније опције складиштења.
- Анализа и упоредно вредновање резултата: У овом делу ће се извршити анализа добијених резултата. Такође, биће испитана тачност, ефикасност и применљивост модела у реалним условима рада.
- Дискусија, анализа резултата и формулисање закључака: Последњи део дисертације биће посвећен дискусији о добијеним резултатима, анализи утицаја модела на праксу и формулисању закључака о значају и будућим перспективама примене овог модела.

Из свега наведеног, предлаже се следећи оквирни садржај докторске дисертације:

1. Увод – опис проблема, полазне хипотезе, опис и значај предмета истраживања, постављене циљеве и допринос истраживања.
2. Преглед и систематизација релевантне литературе – литературни преглед досадашњих истраживања везаних за предмет и методе анализе у докторској дисертацији
3. Теоријске основе складиштења угљен диоксида у геолошке формације
4. Теоријске основе вишекритеријумских и fuzzy вишекритеријумских метода
5. Теоријске основе нумеричке симулације лежишта
6. Прикупљање и анализа прикупљених података
7. Развој и имплементација fuzzy вишекритеријумског и симулационог модела
8. Анализа резултата и дискусија
9. Закључак
10. Предлог за даља истраживања.

Сазнања у току истраживања могу утицати да се у извесној мери одступи од наведених активност.

8. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и анализе достављене документације за пријаву теме докторске дисертације, Комисија сматра да кандидат Лола Томић, мастер инжењер рударства испуњава Законом предвиђене услове за пријаву теме и израду докторске дисертације.

На основу наведених података о стручној и научно-истраживачкој активности кандидата Лоле Томић, мастер инжењера рударства, значају и актуелности проблематике истраживања, Комисија закључује и предлаже:

1. Предложена тема докторске дисертације, под насловом ***Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л”***, научно је заснована и може да буде предмет докторске дисертације.
2. Очекивани резултати ће представљати значајан научни допринос у области рударског инжењерства, односно инжењерства нафте и гаса.
3. Сагласно наведеном, Комисија предлаже да се кандидату Лоли Томић, мастер инжењеру рударства одобри израда докторске дисертације под насловом ***Хибридни мултидимензионално-симулациони модел утискивања угљен диоксида у гасно лежиште „Л”***.
4. За ментора се предлаже др Весна Каровић Маричић, редовни професор Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 03.04.2024.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Весна Каровић Маричић, редовни професор
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет

др Зоран Глигорић редовни професор
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет

др Александар Миливојевић, редовни професор
Универзитет у Београду - Машински факултет