

ПОДАЦИ О ЧЛАНУ КОМИСИЈЕ

Име и презиме: Проф. др Драган Игњатовић

Звање: Редовни професор, Универзитет у Београду Рударско-геолошки факултет

Списак радова који квалификују за учешће у Комисији за одбрану докторске дисертације:

1. Djenadić, S.; Tanasijević, M.; Jovančić, P.; **Ignjatović, D.**; Petrović, D.; & Bugarić, U. Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM. *Mathematics* **2022**, 10 (5), 811, (M21a), IF=2,4. <https://doi.org/10.3390/math10050811>
2. Bugarić, U.; Tanasijević, M.; Đenadić, S.; **Ignjatović, D.**; & Janković, I. Development of the Cost-Based Model for Monitoring the Lifetime of the Earth Moving Machines. *Machines* **2022**, 10 (11), 995, (M22), IF=2,6. <https://doi.org/10.3390/machines10110995>
3. Miletić, F.; Jovančić, P. D.; Milovančević, M.; & **Ignjatović, D.** Adaptive neuro-fuzzy prediction of operation of the bucket wheel drive based on wear of cutting elements. *Advances in Engineering Software* **2020**, 146, 102824, (M21), IF=4,141. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102824>
4. Jankovic, I.; Đenadić, S.; **Ignjatović, D.**; Jovančić, P.; Šubaranović, T.; & Ristović, I. Multi-Criteria Approach for Selecting Optimal Dozer Type in Open-Cast Coal Mining. *Energies* **2019**, 12 (12), 2245, (M22), IF=2,702. <https://doi.org/10.3390/en12122245>
5. Đenadić, S.; **Ignjatović, D.**; Tanasijević, M.; Bugarić, U.; Jankovic, I.; & Šubaranović, T. Development of the Availability Concept by Using Fuzzy Theory with AHP Correction, a Case Study: Bulldozers in the Open-Pit Lignite Mine. *Energies* **2019**, 12 (21), 4044, (M22), IF=2.702. <https://doi.org/10.3390/en12214044>

ДЕКАН

Рударско-геолошког факултета

Проф. др Александар Цвјетић

ПОДАЦИ О ЧЛАНУ КОМИСИЈЕ

Име и презиме: Доц. др Мирјана Банковић

Звање: Доцент, Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет

Списак радова који квалификују за учешће у Комисији за одбрану докторске дисертације:

1. Ignjatović Jelena, Stevanović Dejan, **Banković Mirjana**, & Marković Petar (2026). A Genetic Algorithm Model for Short-Term Planning and Quality Management in Open-Pit Mining [MDPI AG]. Applied Sciences, 16(6), 2642, ISSN 2076-3417 (M22) IF=2.5 <https://doi.org/10.3390/app16062642>
2. Čelebić Miodrag, Bajić Dragoljub, Bajić Sanja, **Banković Mirjana**, Torbica Duško, Milošević Aleksej, & Stevanović Dejan (2024): Development of an Integrated Model for Open-Pit-Mine Discontinuous Haulage System Optimization [MDPI AG]. Sustainability 16(8), 3156, ISSN 2071-1050 (M23) IF=3.9 <https://doi.org/10.3390/su16083156>
3. Gomilanović Miljan, Bugarić Uglješa, **Banković Mirjana**, Stanić Nikola, & Stepanović Saša (2024): Determining the Availability of Continuous Systems in Open Pits Using ANFIS and a Simulation Model [MDPI AG]. Energies 17(5), 1138, ISSN: 1996-1073 (M23) IF=3.2 <https://doi.org/10.3390/en17051138>
4. Doderović Aleksandar, Doderović Svetozar-Milan, Stepanović Saša, **Banković Mirjana**, & Stevanović Dejan (2023). Hybrid Model for Optimisation of Waste Dump Design and Site Selection in Open Pit Mining [MDPI AG]. Minerals, 13(11), 1401. (M21) IF=2.5, <https://doi.org/10.3390/min13111401>
5. **Banković Mirjana**, Stevanović Dejan, Pešić-Georgiadis Milica, Tomašević Aleksandra, & Kolonja Ljiljana (2018). Improving efficiency of thermal power plants through mine coal quality planning and control [Vinča Institute of Nuclear Sciences]. Thermal Science, 22(1 Part B), 721–733. (M22) IF=1.541, <https://doi.org/10.2298/tsci170605209b>

ДЕКАН

Рударско-геолошког факултета

Проф. др Александар Цвјетић

ПОДАЦИ О ЧЛАНУ КОМИСИЈЕ

Име и презиме: др Даниел Кржановић

Звање: Виши научни сарадник, Институт за рударство и металургију, Бор

Списак радова који квалификују за учешће у Комисији за одбрану докторске дисертације:

1. **Kržanović, D.**; Stojičić, I.; Gomilanović, M.; Miletić, F.; Stanić N. Application of Modal Analysis and Vibration Diagnostics for the Reconstruction of the Gearbox of the Drive System of the Bucket Wheel in the SRs1200 Rotor Bucket Excavator. *Appl. Sci.* **2026**, *16*(5), 2569; (M21) IF=2.5. <https://doi.org/10.3390/app16052569>
2. Simonović, D.; **Kržanović, D.**; Kovacević, R.; Šteharik, M.; Stanković, S.; Urošević, D.; Krstić, V. Assessment of Cu and As in Wheat (*Triticum aestivum* L.) and Arable Land in the Vicinity of Bor (Serbia): Implications for Food Safety and Human Health. *Plants* **2026**, *15*, 631, (M21), IF=4.1. <https://doi.org/10.3390/plants15040631>
3. Nasirinezhad, A.; Stevanovic, D.; **Krzanovic, D.**; Rahmanpour, M. Model for Optimizing Waste-Haulage Systems in Open-Pit Mines (Trucks vs. IPCC System). *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 13148. (M21) IF=2.5. <https://doi.org/10.3390/app152413148>
4. Markovic, P.; Stevanovic, D.; Kolonja, B.; Slavkovic, D.; **Krzanovic, D.** A Hybrid Model for Risk-Based Strategic Planning in Open-Pit Mining: Integrating Deterministic, Stochastic, and ISO 31000 Approaches. *Appl. Sci.* **2025**, *15*, 2500. (M21) IF=2.5 <https://doi.org/10.3390/app15052500>
5. Ivana Jovanović, Fardis Nakhaei, **Daniel Kržanović**, Vesna Conić and Daniela Urošević, Comparison of Fuzzy and Neural Network Computing Techniques for Performance Prediction of an Industrial Copper Flotation Circuit, *Minerals* 2022, *12* (12), 1493. (M21) IF=2.5 <https://doi.org/10.3390/min12121493>

ДЕКАН

Рударско-геолошког факултета

Проф. др Александар Цвјетић

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет: Извештај о оцени докторске дисертације кандидата Петра П. Марковића,
мастер инжењера рударства**

Одлуком Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, бр. 1/191 од 27.04.2026. године донетој на седници одржаној 23.04.2026. године, именовани смо за Комисију за оцену докторске дисертације Петра П. Марковића, мастер инжењера рударства, под насловом:

**„Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању
површинских копова”**

и након прегледа докторске дисертације и приложеног материјала, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ И ДИСЕРТАЦИЈИ

1.1. Биографски подаци о кандидату

Петар Марковић рођен је 9. јануара 1997. године у Приштини, Република Србија. Основно образовање завршио је у Костолцу, а средње у Политехничкој школи у Пожаревцу. Основне академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина, завршио је 2019. године са просечном оценом 9,02. Мастер академске студије на истом факултету завршио је 2020. године са просечном оценом 10,00.

Докторске академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду уписао је 2020. године, где је положио све испите предвиђене студијским програмом са просечном оценом 10,00. Тема докторске дисертације под називом „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“ прихваћена је 27.05.2025. године на Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду (заведено под бројем 61206/2-25).

Од 2019. године запослен је на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, најпре као стручни сарадник, а од 2022. године у звању асистента на Катедри за пројектовање и планирање површинских копова. У настави је ангажован на

предметима из области пројектовања, оптимизације и планирања површинских копова, као и геостатистичког моделирања лежишта и техно-економске анализе рударских пројеката.

У досадашњем раду учествовао је у изради преко 40 рударских пројеката, студија и техничких елабората, као и у научноистраживачком раду. Аутор је и коаутор укупно 12 научних радова објављених у међународним и домаћим научним часописима, укључујући радове публиковане на SCI листи, као и радове презентоване на међународним научним конференцијама.

Од 2019. кандидат је члан највећег светског удружења из области рударства „Society for Mining, Metallurgy & Exploration“ (SME). Годину дана касније постаје и члан „Савеза инжењера рударства и геологије Србије“, а две године касније и члан „Коморе рударских и геолошких инжењера Србије“. Од 2025. године члан је и удружења „Society of Mining Professors/Societät der Bergbaukunde“.

У марту 2023. године, положио је стручни испит прописан Законом о рударству и геолошким истраживањима (Сл. Гласник РС број 101/2015, 95/2018 и 40/2021).

Његова истраживачка интересовања усмерена су на оптимизацију површинских копова, управљање ризиком у рударским пројектима, геостатистичко моделирање лежишта и примену стохастичких метода у планирању експлоатације минералних ресурса.

1.2. Наслов и обим дисертације

Наслов докторске дисертације кандидата Петра П. Марковића, мастер инжењера рударства је: „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“.

Дисертација садржи:

- 208 страна рачунарски обрађеног текста А4 формата укључујући и додатке, 189 страна рачунарски обрађеног текста, А4 формата, без додатака;
- 18 табела у тексту;
- 101 графичких илустрација, дијаграма и шема;
- 346 литературних навода у списку литературе;
- 3 прилога - Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу.

1.3. Хронологија одобравања и израде дисертације

Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на седници одржаној 27.03.2025. године, донело је Одлуку о именовању Комисије за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације, кандидата Петра Марковића, мастер инжењера рударства: „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“, документ број 1/71 од 01.04.2025. године.

На седници Наставно-научног већа, Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду, одржаној 24.04.2025. године усвојен је позитиван Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације, кандидата Петра Марковића, мастер инжењера рударства, под називом „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“, за ментора је именован др Дејан Стевановић, ванредни професор Универзитета у Београду, Рударско-геолошког факултета. Одлуком број 1/99 од 25.04.2025. дато је одобрење на предложену тему докторске дисертације.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 26. и 27.05.2025. године, донело је Одлуку број 61206/2-25 којом се даје сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Рударско-геолошког факултета о прихватању теме докторске дисертације кандидата Петра Марковића, под називом: „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“ и одређивању проф. др Дејана Стевановића за ментора.

Кандидат Петар Марковић, мастер инжењера рударства, дана 08.04.2026. поднео је Молбу бр. 1/165 за именовање комисије за оцену докторске дисертације под називом: „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“. На основу Молбе, Катедра за пројектовање и планирање површинских копова, је својом одлуком (бр. 1/169 од 09.04.2026.) предложила Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду, формирање Комисије за оцену докторске дисертације кандидата. Наставно-научно веће је на седници одржаној 23.04.2026. донело одлуку (бр. 1/191 од 27.04.2026. године) о именовању комисије, чиме су се стекли услови за писање Извештаја о урађеној докторској дисертацији.

1.4. Место дисертације у одговарајућој научној области

Докторска дисертација кандидата Петра Марковића, мастер инжењера рударства, припада научној области Рударско инжењерство, односно ужој научној области Пројектовање и планирање површинских копова (Студијски програм Рударско инжењерство, Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет). За ментора дисертације је одређен др Дејан Стевановић, ванредни професор Универзитета у Београду Рударско-геолошког факултета, уже научне области Пројектовање и планирање површинских копова.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Тема ове докторске дисертације је „Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“. Истраживање је усмерено на интеграцију детерминистичких метода оптимизације, стохастичког моделовања неизвесности и принципа међународног стандарда ISO 31000, са циљем унапређења процеса доношења одлука у условима изражене геолошке, техничке и економске неизвесности. Посебна пажња посвећена је квантитативној процени ризика и развоју приступа који омогућава прелазак са класичног детерминистичког на пробабилистички модел планирања.

Циљ дисертације је развој интегрисаног методолошког оквира који омогућава идентификацију, анализу, евалуацију и третман ризика у процесу оптимизације површинских копова, уз истовремено укључивање више извора неизвесности. Развијени модел омогућава квантитативну процену поузданости оптимизационих решења кроз анализу расподела економских показатеља и увођење пробабилистичког модела експлоатације блокова, чиме се обезбеђује реалистичнија основа за доношење стратешких одлука.

Предмет и циљ ове докторске дисертације обрађени су кроз више међусобно повезаних фаза, које заједно чине целовит истраживачки процес.

У првој фази спроведена је систематска анализа релевантне научне и стручне литературе из области развоја рударских пројеката, оптимизације површинских копова, управљања ризиком и моделовања неизвесности. Идентификовани су кључни приступи, методе и истраживачке празнине, што је послужило као основа за дефинисање концептуалног оквира истраживања.

У другој фази извршена је анализа улазних параметара који утичу на економску евалуацију и техничку изводљивост рударског пројекта, укључујући геолошке, техничко-технолошке и економске факторе. Посебан акценат стављен је на идентификацију и избор параметара који су предмет стохастичког моделовања.

Трећа фаза обухвата примену геостатистичких симулација за моделовање геолошке неизвесности, као и Monte Carlo симулација за моделовање варијабилности техно-економских параметара. На тај начин генерисан је скуп подједнако вероватних сценарија који представљају основу за даљу анализу.

У четвртој фази извршена је оптимизација површинског копа применом Lerchs–Grossmann (LG) алгоритама за одређивање оптималне контуре копа, при чему је за сваки генерисани сценарио дефинисано оптимално решење засновано на критеријуму максимизације нето садашње вредности (NPV). Поред тога, као резултат оптимизације добијени су и кључни технички показатељи, који обухватају параметре геометрије копа, количине руде и откривке, као и основне показатеље динамике експлоатације.

Интеграцијом ових резултата, односно скупа оптималних решења, омогућено је формирање расподела економских показатеља, као и развој пробабилистичког модела експлоатације блокова, којим се дефинише вероватноћа експлоатације сваког појединачног блока у простору (енгл. Block Extraction Probability - BEP).

У петој фази спроведена је анализа резултата и квантитативна процена ризика, кроз расподеле економских показатеља и примену индикатора као што су вероватноћа негативног исхода $P(NPV < 0)$, као и Value-at-Risk (VaR), Conditional Value-at-Risk (CVaR). На основу добијених расподела извршена је процена ризика потенцијалног негативног исхода пројекта, као и могућих губитака у неповољним сценаријима, док су са друге стране анализирани и потенцијали за остваривање већих вредности NPV у повољним условима. Додатно, резултати су анализирани применом пробабилистичког модела експлоатације блокова, који омогућава квантитативну и просторну процену

поузданости оптимизационог решења, идентификацију стабилних зона високе вероватноће експлоатације и издвајање маргиналних зона са повећаним ризиком.

На основу добијених резултата развијен је хибридни модел управљања ризиком, који представља основни научни допринос ове дисертације и омогућава унапређење процеса стратешког планирања површинских копова.

Дисертација је структурирана кроз седам међусобно повезаних целина, које обухватају уводна разматрања, теоријски оквир и преглед литературе, анализу постојећих метода оптимизације површинских копова, развој хибридног методолошког оквира управљања ризиком, његову примену на конкретном лежишту минералних сировина, анализу и дискусију резултата, као и закључна разматрања. На тај начин дисертација пружа свеобухватан увид у процес интеграције оптимизације и управљања ризиком у стратешком планирању површинских копова, са значајним доприносом како научној области, тако и практичној примени у рударској индустрији.

3. ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ И ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ

Истраживање представљено у овој докторској дисертацији заснива се на више основних претпоставки које се у раду анализирају, тестирају и научно верификују. Савремени приступи стратешком планирању површинских копова све више указују на ограничења класичних детерминистичких метода, које се заснивају на фиксним вредностима улазних параметара и не омогућавају адекватно сагледавање неизвесности која је присутна у свим фазама развоја рударског пројекта.

У условима изражене геолошке, техничке и економске неизвесности, доношење стратешких одлука засновано искључиво на једном оптималном решењу може довести до значајних одступања између планираних и реалних резултата. Због тога се намеће потреба за развојем интегрисаних приступа који омогућавају истовремено сагледавање варијабилности улазних параметара, квантитативну процену ризика и унапређење поузданости оптимизационих решења.

Постојећи приступи у области оптимизације површинских копова најчешће третирају оптимизацију, моделовање неизвесности и управљање ризиком као одвојене процесе. Међутим, савремени трендови указују на потребу њихове интеграције у јединствен методолошки оквир, који омогућава свеобухватнију анализу и доношење одлука у условима неизвесности. У том контексту, посебан значај има примена стохастичких метода и принципа управљања ризиком, као и њихово повезивање са моделима оптимизације површинских копова.

Полазећи од наведених чињеница, у овој дисертацији формулисане су основне хипотезе истраживања које се односе на развој и примену хибридног модела управљања ризиком при стратешком планирању површинских копова:

- Хипотеза 1: Интеграција детерминистичких и стохастичких метода у јединствени хибридни модел омогућава реалистичнију процену резултата оптимизације површинских копова у односу на класичне детерминистичке приступе, кроз уважавање варијабилности улазних параметара и генерисање спектра могућих решења.
- Хипотеза 2: Истовремено моделовање више извора неизвесности (геолошких, техничких и економских) у оквиру хибридног модела омогућава поузданију квантитативну процену ризика рударског пројекта, изражену кроз расподеле економских показатеља и индикаторе ризика као што су вероватноћа негативне нето садашње вредности, VaR и CVaR.
- Хипотеза 3: Примена принципа управљања ризиком заснованих на стандарду ISO 31000 у процесу оптимизације површинских копова омогућава структурирану идентификацију, анализу, евалуацију и третман ризика, чиме се унапређује транспарентност и конзистентност доношења стратешких одлука.
- Хипотеза 4: Примена стохастичког приступа оптимизацији омогућава дефинисање пробабилистичког модела експлоатације блокова у оквиру лежишта, којим се квантификује поузданост експлоатације и идентификују стабилне и ризичне зоне, што није могуће постићи класичним детерминистичким приступом.

Полазни подаци коришћени у оквиру овог истраживања обухватају геолошке, техничке и економске параметре неопходне за формирање економског блок модела и спровођење оптимизације површинског копа. Основу анализе чини геолошки блок модел лежишта, формиран на основу података истражних бушотина, који садржи информације о просторном распореду и квалитету минерализације.

Поред геолошких података, коришћени су и технички параметри који се односе на услове експлоатације, укључујући геометријске карактеристике копа, технолошке параметре процеса откопавања и прераде, као и ограничења која проистичу из експлоатационих услова. Економски параметри обухватају цене метала, трошкове експлоатације и прераде, као и инвестиционе трошкове, који су дефинисани на основу доступних података и релевантних извора.

У циљу уважавања неизвесности, варијабилност улазних параметара моделована је применом различитих приступа, у зависности од њихове природе. Геолошка неизвесност описана је кроз геостатистичке симулације, које омогућавају генерисање различитих просторних реализација лежишта, док су техничко-економски параметри третирани као случајне променљиве дефинисане одговарајућим расподелама вероватноће.

Овако дефинисани полазни подаци омогућавају интегрисано сагледавање различитих извора неизвесности и представљају основу за развој и верификацију хибридног модела управљања ризиком, чиме се обезбеђује поузданија и реалистичнија основа за доношење стратешких одлука у планирању површинских копова.

4. ОПИС САДРЖАЈА ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација кандидата Петра Марковића, садржи следећа поглавља:

1. Увод,
2. Контекст развоја рударских пројеката и управљања ризиком,
3. Модели оптимизације површинских копова,
4. Развој хибридног модела за управљање ризиком,
5. Имплементација хибридног модела на маталичном лежишту,
6. Анализа резултата и дискусија,
7. Закључак,
8. Литература.

4.1. Приказ појединачних поглавља

Ова докторска дисертација, поред уобичајених елемената као што су резимеи на српском и енглеском језику, кључне речи, предговор, садржај, спискови слика, табела и литературе, обухвата и седам тематски заокружених поглавља која чине њену основну структуру.

Прво поглавље – Увод – садржи дефинисање предмета и циља истраживања, формулацију основних хипотеза, приказ примењених научних метода и очекиваних научних доприноса. У овом делу рада дат је општи приказ проблематике стратешког планирања површинских копова у условима неизвесности, као и значај интеграције процеса оптимизације и управљања ризиком.

Друго поглавље обухвата анализу контекста развоја рударских пројеката и управљања ризиком. У оквиру овог поглавља разматрају се фазе развоја рударских пројеката, процеси планирања у површинској експлоатацији, као и основни појмови, класификација и методолошки приступи управљању ризиком.

Треће поглавље посвећено је моделима оптимизације површинских копова. У овом делу анализирају се улазни параметри оптимизације, концепт економског блок модела, детерминистички и стохастички модели оптимизације, као и постојећи приступи моделовању неизвесности. Друго и треће поглавље заједно чине теоријско-методолошку основу истраживања и преглед релевантне научне и стручне литературе.

Четврто поглавље обухвата развој хибридног модела управљања ризиком. У овом делу дефинисан је концептуални оквир модела у складу са принципима стандарда ISO 31000, укључујући фазе идентификације, анализе, евалуације и третмана ризика, као и интеграцију детерминистичких и стохастичких приступа у јединствен методолошки оквир.

Пето поглавље односи се на имплементацију развијеног модела на конкретном металичном лежишту бабра. Приказане су основне карактеристике лежишта, геолошки блок модел, улазни параметри детерминистичке оптимизације и анализе осетљивости, као и формирање стохастичког симулационо-оптимизационог модела.

Шесто поглавље обухвата анализу и дискусију резултата. У овом делу приказани су резултати детерминистичке оптимизације, анализа осетљивости, резултати примене стохастичког приступа у оквиру хибридног модела, приказани кроз расподеле економских показатеља и квантитативну процену ризика, као и пробабилистички модел експлоатације блокова. Посебан акценат стављен је на синтезу резултата и њихове импликације за доношење одлука у условима неизвесности.

Седмо поглавље садржи закључна разматрања у којима су синтетизовани резултати истраживања, истакнути главни научни доприноси и указано на могућности даљих истраживања у области стратешког планирања површинских копова и управљања ризиком.

Дисертација се завршава списком коришћене литературе и биографијом аутора, чиме се заокружује целокупан садржај рада. Референтна литература обухвата најзначајније научне и стручне публикације из области развоја рударских пројеката, оптимизације површинских копова, управљања ризиком и моделовања неизвесности. Литература је систематично коришћена у циљу формирања теоријско-методолошке основе истраживања, а детаљно је приказана у поглављу Литература, са укупно наведених 346 референци.

5. ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС

5.1. Савременост, оригиналност и значај

Докторска дисертација кандидата Петра П. Марковића бави се актуелним изазовима у области стратешког планирања површинских копова у условима неизвесности, што представља једно од кључних питања савременог рударства. Савремени рударски пројекти карактеришу све већа сложеност, опадање квалитета лежишта услед дуготрајне експлоатације најбогатијих ресурса, изражена варијабилност геолошких, техничких и економских услова, као и све израженији јавни и еколошки притисак.

У таквим условима јавља се потреба за унапређењем постојећих приступа оптимизацији и управљању ризиком, са циљем обезбеђивања поуздане основе за доношење информисаних и рационалних стратешких одлука, посебно у домену дугорочних и инвестиционих одлука које су од суштинског значаја за развој рударства и реализацију нових пројеката. С обзиром на то да такве одлуке морају бити засноване на поузданој и свеобухватној анализи ризика, истраживање је у потпуности усклађено са савременим трендовима у области дигитализације рударства, примене стохастичких метода и доношења одлука заснованих на подацима.

Оригиналност истраживања огледа се у развоју хибридног модела за управљање ризиком који интегрисае детерминистичке методе оптимизације површинских копова, стохастичко моделовање неизвесности и принципе стандарда ISO 31000 у јединствен методолошки оквир. Посебан допринос представља увођење пробабилистичког модела експлоатације блокова, којим се омогућава квантитативна и просторна процена поузданости оптимизационих решења, што није могуће постићи класичним детерминистичким приступом. На овај начин омогућен је прелаз са концепта једног „оптималног“ решења ка сагледавању спектра могућих исхода и њихове вероватноће.

Савременост рада огледа се у примени интегрисаног приступа који обједињује различите методе моделовања неизвесности, укључујући геостатистичке симулације и Monte Carlo анализу, у оквиру јединственог хибридног модела. Овакав приступ је у складу са актуелним трендовима у рударској индустрији, који се заснивају на интеграцији података, квантитативној процени ризика и доношењу одлука заснованих на анализи више могућих сценарија. Развијени модел омогућава квантитативну процену ризика кроз расподеле економских показатеља и примену индикатора као што су вероватноћа негативне нето садашње вредности, VaR и CVaR, чиме се значајно унапређује процес доношења стратешких одлука у рударству.

Резултати дисертације имају вишеструки значај. Са практичног аспекта, примена предложеног модела омогућава унапређење процеса доношења одлука у рударској индустрији кроз поузданију процену ризика и реалистичније сагледавање могућих исхода развоја пројекта, као и поузданије планирање експлоатације и идентификацију стабилних и ризичних зона у оквиру лежишта. На тај начин стварају се услови за оптимизацију производње и смањење економских губитака. Развијени приступ доприноси повећању поузданости оптимизационих решења у условима неизвесности, омогућавајући систематичну анализу утицајних фактора и њихових међусобних интеракција, чиме се обезбеђује поузданија основа за доношење информисаних и робусних стратешких одлука.

Истовремено, рад даје научни допринос развоју методологије интеграције оптимизације и управљања ризиком у рударству, док се његов шири значај огледа у унапређењу одрживог управљања минералним ресурсима и повећању поузданости одлучивања у раним фазама развоја рударских пројеката.

Оригиналност докторске дисертације Петра П. Марковића, мастер инжењера рударства, под називом: *„Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању површинских копова“*, проверена је у складу са поступком дефинисаним у *„Правилнику о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду“*. Провером у софтверу *iThenticate* утврђено је да подударње по сличности износи 4 %.

5.2. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Петар Марковић је током израде докторске дисертације показао висок степен самосталности, одговорности и истрајности у научноистраживачком раду. Посебно се истичу његова способност критичког размишљања, аналитички приступ решавању сложених инжењерских проблема, као и способност синтезе и интерпретације великог обима података, што потврђује његову истраживачку зрелост.

На основу прегледане докторске дисертације и других расположивих података, Комисија констатује да је кандидат Петар П. Марковић, мастер инжењер рударства, у потпуности оспособљен за самосталан научноистраживачки рад.

5.3. Остварени научни допринос

Ова докторска дисертација бави се сложеним проблемом интеграције оптимизације површинских копова, моделовања неизвесности и управљања ризиком у процесу стратешког планирања. Истраживање је реализовано кроз више међусобно повезаних фаза – теоријску, методолошку и примењену – чиме је обезбеђена свеобухватна обрада проблематике и развој јединственог приступа анализи ризика у рударству.

У теоријској фази извршена је критичка анализа релевантне научне и стручне литературе из области развоја рударских пројеката, оптимизације површинских копова, управљања ризиком и моделовања неизвесности. Посебна пажња посвећена је анализи детерминистичких и стохастичких приступа, као и принципа стандарда ISO 31000, чиме је успостављена теоријска основа за развој интегрисаног методолошког оквира.

У методолошкој фази развијен је хибридни модел управљања ризиком заснован на стохастичком приступу, који представља кључну основу за интеграцију геостатистичких симулација, Monte Carlo анализе и детерминистичких метода оптимизације у јединствен аналитички оквир. На овај начин омогућена је истовремена интеграција геолошке, техничко-технолошке и економске неизвесности у процес оптимизације површинског копа.

У примењеној фази извршена је имплементација развијеног модела на конкретном лежишту бакра, при чему је омогућена квантитативна анализа ризика кроз расподеле економских показатеља, као и развој пробабилистичког модела експлоатације блокова. Овај приступ омогућава прелаз са класичног детерминистичког приказа оптималне контуре копа ка пробабилистичкој интерпретацији, којом се дефинише вероватноћа експлоатације сваког појединачног блока у лежишту, на основу његовог појављивања у скупу оптималних решења.

На основу спроведеног истраживања, издвајају се следећи кључни научни доприноси дисертације:

1. Развој интегрисаног хибридног модела заснованог на ризику, који омогућава директно укључивање геолошке и техничко-економске неизвесности у процес стратешког планирања површинских копова, у складу са принципима стандарда ISO 31000.
2. Развој јединственог приступа за интеграцију више извора неизвесности кроз повезивање геостатистичких и Monte Carlo симулација у оквиру оптимизационог процеса.
3. Развој пробабилистичког модела експлоатације блокова заснованог на више оптимизационих сценарија, којим је омогућена квантитативна и просторна процена поузданости граница површинског копа.
4. Увођење новог квантитативног индикатора – вероватноће експлоатације блока (Block Extraction Probability – BEP), којим се дефинише ниво поузданости укључења појединачних блокова у оптималну контуру копа.
5. Унапређење интерпретације резултата оптимизације кроз дефинисање пробабилистичких контура копа и идентификацију стабилних и ризичних зона експлоатације.
6. Унапређење процеса доношења стратешких одлука кроз интеграцију резултата оптимизације и квантитативних показатеља ризика у јединствен аналитички оквир.

Остварени резултати представљају значајан допринос како научној области, тако и практичној примени у рударству, јер омогућавају поузданије, транспарентније и информисаније доношење одлука у условима неизвесности.

5.4. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати истраживања остварени у овој докторској дисертацији представљају значајан допринос како на теоријском, тако и на практичном нивоу у области стратешког планирања површинских копова у условима неизвесности. Развијени хибридни модел управљања ризиком омогућава интеграцију оптимизације, моделовања неизвесности и квантитативне процене ризика у јединствен аналитички оквир, чиме се превазилазе ограничења класичних детерминистичких приступа.

У завршним разматрањима истиче се да предложени модел представља значајан искорак у правцу унапређења методологије стратешког планирања, јер омогућава истовремено сагледавање више могућих сценарија развоја рударског пројекта и њихових техничких и економских исхода. Применом стохастичког приступа, заснованог на геостатистичким симулацијама и Monte Carlo анализи, обезбеђена је реалистичнија процена неизвесности и ризика, што директно утиче на повећање поузданости оптимизационих решења.

Посебна вредност модела огледа се у развоју пробабилистичког приступа интерпретацији резултата оптимизације, којим се уводи концепт вероватноће експлоатације блокова. На овај начин омогућено је идентификовање стабилних зона

високог степена поузданости, као и маргиналних зона са повећаним ризиком, што представља значајно унапређење у односу на класичан приступ заснован на једном оптималном решењу. Оваква интерпретација резултата омогућава боље разумевање просторне стабилности граница копа и пружа директну подршку процесу доношења одлука.

У практичном смислу, предложени модел показује висок степен применљивости у различитим условима експлоатације, јер омогућава интегрисано сагледавање геолошких, техничко-технолошких и економских фактора. Његова примена доприноси поузданијем планирању експлоатације, оптимизацији производње и смањењу ризика од неповољних економских исхода. Истовремено, модел омогућава транспарентнији и структурисанији приступ доношењу одлука, заснован на квантитативним показатељима ризика.

У контексту одрживог развоја, развијени приступ омогућава рационалније управљање минералним ресурсима, јер подржава доношење одлука које узимају у обзир неизвесност и варијабилност улазних параметара. На тај начин доприноси смањењу ризика у фазама развоја рударског пројекта пре доношења коначних одлука о експлоатацији, као и у избору оптималног начина експлоатације, чиме се повећава поузданост и дугорочна одрживост пројекта.

Ипак, као и сваки модел, и предложени приступ има одређена ограничења, пре свега у погледу зависности од квалитета улазних података и претпоставки коришћених у моделовању. У том смислу, будућа истраживања могу бити усмерена ка даљем унапређењу модела кроз интеграцију додатних извора неизвесности, примену напредних оптимизационих техника и развој робусних приступа планирању производње.

Сумирајући, резултати истраживања потврђују оправданост примене хибридног приступа и указују на значај интеграције оптимизације и управљања ризиком у савременом рударству. Развијени модел представља основу за примену напредних, ризиком информисаних приступа доношењу одлука, чиме се доприноси даљем развоју научних и стручних решења у области стратешког планирања површинских копова.

5.5. Очекивана примена резултата у пракси

Резултати овог истраживања имају значајан практични потенцијал и могу се применити у различитим фазама развоја рударских пројеката, посебно у домену стратешког планирања површинских копова у условима неизвесности. Развијени хибридни модел представља конкретан аналитички алат који омогућава стручњацима и доносиоцима одлука да на систематичан и квантитативан начин интегришу оптимизацију, моделовање неизвесности и процену ризика, са циљем доношења поузданијих и информисанијих одлука.

Применом предложеног приступа омогућава се реалистичније сагледавање могућих исхода развоја рударског пројекта кроз анализу више сценарија, што је од посебног значаја у раним фазама планирања, пре доношења коначних инвестиционих одлука.

Модел омогућава идентификацију стабилних и ризичних зона експлоатације, као и дефинисање оптималног концепта експлоатације, чиме се директно доприноси повећању економске ефикасности и смањењу ризика од неповољних исхода.

Развијени модел се може интегрисати у постојеће системе планирања и управљања у рударским компанијама, као допуна класичним детерминистичким приступима. Његова флексибилност омогућава примену на различитим типовима лежишта и у различитим условима експлоатације, што га чини применљивим у широком спектру рударских пројеката. Коришћењем овог приступа могу се унапредити процеси оптимизације, смањити економски и технички ризици, а такође и повећати поузданост дугорочних производних планова.

Поред тога, резултати истраживања представљају основу за развој напредних софтверских решења која би омогућила интеграцију стохастичког моделовања и оптимизације у јединствене платформе за планирање. Оваква решења би омогућила аутоматизацију анализе различитих сценарија и једноставнију интерпретацију резултата, што би допринело широј примени предложеног приступа у инжењерској пракси.

Значајан допринос огледа се и у потенцијалној примени резултата у образовном процесу, кроз увођење савремених приступа анализи неизвесности и управљању ризиком у наставне програме из области рударског инжењерства. На тај начин омогућава се додатно унапређење компетенција будућих инжењера у области пројектовања и планирања површинских копова

Коначно, резултати истраживања могу допринети унапређењу методолошких приступа и препорука у области планирања површинских копова, кроз афирмацију концепта ризиком информисаног доношења одлука. Тиме се остварује значајна веза између научних истраживања и практичне примене, са циљем унапређења ефикасности, поузданости и одрживости рударских пројеката.

5.6. Осврт на референтну и коришћену литературу

Коришћена референтна литература у овој докторској дисертацији обухвата широк спектар релевантних извора из области оптимизације површинских копова, управљања ризиком, економске евалуације рударских пројеката и моделовања неизвесности. Посебна пажња посвећена је избору савремених научних радова, монографија, стандарда и стручних публикација, који представљају основу за разумевање и развој интегрисаног приступа стратешком планирању у рударству.

Литература обухвата класичне радове који су поставили темеље оптимизације површинских копова (Lerchs–Grossmann, Whittle), као и савремена истраживања у области стохастичког планирања, геостатистичких симулација и квантитативне анализе ризика.

Значајан део извора односи се на развој и примену стохастичких приступа у стратешком планирању површинских копова, укључујући геостатистичке симулације, стохастичко и робусно оптимизационо моделирање, као и различите варијанте стохастичког програмирања и хеуристичких метода. Ова истраживања указују на могућност повећања економске вредности пројеката (NPV), смањења ризика и побољшања робусности производних планова у односу на класичне детерминистичке приступе. На тој основи заснива се и развој предложеног хибридног модела, који интегрише стохастички приступ са квантитативном анализом ризика у јединствен оквир за доношење одлука.

Поред тога, у раду су коришћени релевантни међународни стандарди и смернице (ISO 31000, IEC 31010, CRIRSCO, CIM, JORC, PERC), који представљају основу за систематски приступ управљању ризиком и класификацији минералних ресурса у рударству.

Избор и анализа литературе показују да кандидат поседује темељно познавање досадашњих научних и стручних достигнућа, као и способност њихове критичке интерпретације и примене у развоју сопственог модела. Све референце су прецизно наведене у посебном поглављу Литература, које садржи укупно 346 библиографских јединица, чиме се обезбеђује транспарентност и проверљивост извора на којима се заснива истраживање.

6. ОБЈАВЉЕНИ И САОПШТЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Током израде дисертације и истраживања у оквиру исте кандидат је аутор или коаутор више научних радова у међународним часописима, часописима националног значаја, зборницима скупова међународног и националног значаја. У наставку су приказани сви радови кандидата. Први наведени рад у категорији M22, на ком је кандидат први аутор, уско је повезан са истраживањем приказаним у предметној дисертацији и верификује научни допринос кандидата Петра Марковића.

Рад у истакнутом међународном часопису M22

- **Markovic P.**, Stevanovic D., Kolonja B., Slavkovic D., & Krzanovic D. (2025). *A Hybrid Model for Risk-Based Strategic Planning in Open-Pit Mining: Integrating Deterministic, Stochastic, and ISO 31000 Approaches*. Applied Sciences, 15(5), 2500, IF₂₀₂₄=2.5, <https://doi.org/10.3390/app15052500>
- Ignjatovic J., Stevanovic D., Bankovic M., & **Markovic P.** (2026). *A Genetic Algorithm Model for Short-Term Planning and Quality Management in Open-Pit Mining*. Applied Sciences, 16(6), 2642, IF₂₀₂₄=2.5, <https://doi.org/10.3390/app16062642>
- Stanic N., Gomilanovic M., **Markovic P.**, Krzanovic D., Doderovic A., Stepanovic S. (2024). *A Model for Determining the Dependability of Continuous Subsystems in Coal Mines Using the Fuzzy Logic Approach*. Applied Sciences, 14(17), 7947, IF₂₀₂₄=2.5, <https://doi.org/10.3390/app14177947>

Саопштење са међународног скупа штампано у целини М33

- **Marković P.**, Stevanović D., Šubaranović T., Banković M. (2025). *Application of Modern Software Tools for Production Management at the Ceramide Quarry*. Proceedings of the 12th International Conference Coal And Critical Minerals CCM 2025, Zlatibor, Serbia
- **Marković P.**, Stevanović D., Banković M., Lazić V. (2024). *Navigating the future: business risks and opportunities in the mining industry*. Proceedings of the 16th International Conference OMC 2024, Zlatibor, Serbia
- Doderović A., Gomilanović M., Stepanović S., Stanić N., Kržanović D., **Marković P.**, Stanković T. (2024). *Constructing dewatering facilities to stabilize the slope of an unstable opencast mine*. Proceedings of the 55th International Conference on Mining and Metallurgy, Kladovo, Serbia
- **Marković P.**, Stevanović D., Banković M. (2023). *Impact of geological uncertainty in the development of mining projects*. Proceedings of the 11th International Conference Coal and Critical Minerals CCM 2023, Zlatibor, Serbia
- Stevanović D., Ignjatović D., Šubaranović T., Banković M., **Marković P.** (2022). *Comparative analysis of the final designs of open pit Drmno*. Proceedings of the 15th International Conference OMC 2022, Zlatibor, Serbia
- Stevanović D., **Marković P.**, Banković M., Živković M. (2022). *Optimization of phased development of the Ciganuša–Škorac open pit for long-term production planning*. Proceedings of the 15th International Conference OMC 2022, Zlatibor, Serbia
- Nasirinezhad A., Stevanović D., Ignjatović D., **Marković P.** (2021). *Overview of In-Pit Crushing and Conveying Technology in Open Pit Mines*. Proceedings of the 8th International Conference on Mining and Environmental Protection, Sokobanja, Serbia
- Stevanović D., Banković M., Pešić-Georgiadis M., **Marković P.**, Ranković D. (2020). *Application constraints of optimization algorithms in the case of coal mines*. Proceedings of the 14th International Conference OMC 2020, Zlatibor, Serbia

Рад у водећем часопису националног значаја М51

- **Marković P.**, Stevanović D., Pešić-Georgiadis M., Banković M. (2021). *Application of MCDA in the determination of optimal block size for open-pit modelling and mine planning*. *Underground Mining Engineering*, 38, 67–85, <https://doi.org/10.5937/podrad2138067M>

7. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Петра П. Марковића, мастер инжењера рударства, под насловом „Развој хибридног модела за управљање ризиком у стратешком планирању површинских копова“, урађена је у складу са одобреном пријавом и представља самостално и оригинално научно дело.

Израдом докторске дисертације и постигнутим резултатима истраживања, који су делом публиковани у научном раду објављеном у истакнутом међународном часопису (M22 категорије), кандидат Петар П. Марковић је потврдио висок ниво знања у области планирања и оптимизације површинских копова, моделовања неизвесности и управљања ризиком у рударству. Његов досадашњи научноистраживачки рад указује на темељно познавање савремених методолошких приступа и способност примене сложених аналитичких и нумеричких метода у решавању инжењерских проблема.

Кроз спроведено истраживање, кандидат је развио оригиналан хибридни модел који интегрише детерминистичке и стохастичке приступе у оквиру јединственог аналитичког оквира, у складу са принципима стандарда за управљање ризиком ISO 31000. Посебан допринос огледа се у увођењу пробабилистичког приступа интерпретацији резултата оптимизације, економских и техничких исхода пројекта, укључујући дефинисање вероватноће експлоатације блокова и развој концепта пробабилистичких граница копа. На овај начин омогућено је унапређење процеса доношења стратешких одлука кроз квантитативно сагледавање неизвесности и ризика.

Остварени резултати имају значајан научни и практични значај, јер доприносе унапређењу постојећих методологија стратешког планирања површинских копова и омогућавају поузданије и информисаније доношење одлука у условима неизвесности. Развијени модел представља основу за даљи развој савремених приступа заснованих на интеграцији оптимизације и управљања ризиком у рударској индустрији.

Узимајући у обзир наведено, стекли су се сви услови за јавну одбрану докторске дисертације кандидата Петра П. Марковића.

Предлог Комисије наставно-научном већу

На основу свега изложеног, сматрамо да докторска дисертација кандидата Петра П. Марковића, мастер инжењера рударства, под насловом „Развој хибридног модела за управљање ризиком у стратешком планирању површинских копова“, представља оригинално научно дело из научне области Рударско инжењерство, односно уже научне области Површинска експлоатација лежишта минералних сировина.

Предлажемо Наставно-научном већу Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду да прихвати позитиван Извештај о урађеној докторској дисертацији и да кандидата Петра П. Марковића позове на усмену одбрану пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 29.04.2026.

Чланови комисије:

др Драган Игњатовић, редовни професор
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет

др Мирјана Банковић, доцент
Универзитет у Београду - Рударско-геолошки факултет

др Даниел Кржановић, виши научни сарадник
Институт за рударство и металургију Бор