

Факултет Рударско-геолошки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

„Развој хибридног модела машинског учења за повећање поузданости роторних багера“

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Рударско инжењерство

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

Милош (Милоје) Живановић, маг. инж. рударство

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Рударско инжењерство

Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

3. Година завршетка

претходног нивоа студија: 2018.

4. Година уписа на докторске студије: 2018/19.

5. Назив студијског програма
докторских студија:

Рударско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: др Филип Милетић

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

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Miletic, F., Jovancic, P., Milovancevic, M., & Ignjatovic, D. (2020) Adaptive neuro-fuzzy prediction of operation of the bucket wheel drive based on wear of cutting elements, *Advances in Engineering Software*, Volume 146, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102824>; (IF = 4.194), M21a.
2. Miletic, F.M., Jovancic, P.D., Milovancevic, M.D. et al. Determining the Impact of Cutting Elements State on the Bucket–Wheel Excavator Vibration and Energy Consumption. *J. Vib. Eng. Technol.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00482-3>, (IF = 2.333), M22.
3. Gomilanovic, M., Tanasijevic, M., Stepanovic, S., Miletic, F. (2023) A Model for Determining Fuzzy Evaluations of Partial Indicators of Availability for High-Capacity Continuous Systems at Coal Open Pits Using a Neuro-Fuzzy Inference System, *Energies* 2023, 16(7), 2958; <https://doi.org/10.3390/en16072958>; (IF = 3.252), M22.
4. Jovancic, P., Aleksandrovic, S., Djenadic, S., Madzarevic, A., Miletic, F. & Milenovic, A. (2025). Influence of dynamic behavior of excavator steel structure on correction of human vibrations: operator cabin case study. *Journal of Vibroengineering*, 27 (3), pp. 479-496. doi: 10.21595/jve.2025.24624; IF: 0.8, M23.
5. Krzanovic, D., Stojicic, I., Gomilanovic, M., Miletic, F. & Stanic, N. (2026) 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. *Applied Sciences*, 2026, 16, 2569. (IF = 2,7), M22.

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 181. став 6. Статута Универзитета у Београду и члана 175. став 6. Статута Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду на својој седници одржаној 24.10.2024. године, донело је

О Д Л У К У

Одобрава се продужење рока за завршетак докторских студија на лични захтев **Милошу Живановићу, маг. инж. рударства**, на докторским студијама на студијском програму Рударско инжењерство у школској 2024/2025. години, највише до троструког броја школских година потребних за реализацију студијског програма.

Д Е К А Н

др Александар Цвјетић, ред. проф.

Достављено:

- Ментору
- Именованом
- Одељењу за студентска питања

На основу члана 181. став 6. Статута Универзитета у Београду и члана 175. став 6. Статута Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду на својој седници одржаној 23.10.2025. године, донело је

О Д Л У К У

Одобрава се продужење рока за завршетак докторских студија на лични захтев **Милошу Живановићу, маг. инж. рударства**, на докторским студијама на студијском програму Рударско инжењерство у школској 2025/2026. години, највише до троструког броја школских година потребних за реализацију студијског програма.

Д Е К А Н

др Александар Цвјетић, ред. проф.

Достављено:

- Ментору
- Именованом
- Одељењу за студентска питања

На основу члана 40. Закона о високом образовању, члана 113. Статута Универзитета у Београду - Рударско-геолошког факултета (пречишћен текст) и члана 34. Правилника о докторским студијама на Рударско-геолошком факултету, Наставно-научно веће Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, на својој седници одржаној 20.05.2026. године, донело је

О Д Л У К У

1. Усваја се извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације **Милоша Живановића, маг. инж. рударства** са измењеним насловом теме.
2. Одобрава се именованом израда докторске дисертације под насловом *„Развој хибридног модела машинског учења за повећање поузданости роторних багера“*.
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 Филип Милетић, доцент Универзитета у Београду - Рударско-геолошког факултета.
5. Сагласност на предлог теме докторске дисертације из ове одлуке даје Веће научних области техничких наука.

Д Е К А Н

др Александар Цвјетић, ред. проф.

Достављено:

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ
НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Научна заснованост теме докторске дисертације кандидата Милоша Живановића, мастер инжењера рударства

Одлуком бр. 1/194 Наставно-научног Већа Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду, од 27.04.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Милоша Живановића, мастер инжењера рударства, под насловом:

"Развој хибридног модела вештачког учења за повећање поузданости роторних багера"

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, и спроведене одбране предложене теме која је одржана 06.05.2026. године у 14:00 сати на Рударско-геолошком факултету, Комисија подноси следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Општи биографски подаци и образовање

Милош Живановић је рођен 09.09.1994. године у Лазаревцу. Средњу школу „Гимназија Лазаревац“ у Лазаревцу, друштвено језички смер, похађао је у периоду од 2009. до 2013. године.

Основне академске студије на Рударско-геолошком факултету, Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина уписао је 2013. године и завршио у року са просечном оценом 8,77 (осам и 77/100). Завршни рад под називом „Анализа параметара бушења и минирања дацита у циљу израде засека за трасу аутопута на локацији Момин камен“ – одбранио је 28. августа 2017. године са оценом 10. Тиме је стекао звање **дипломирани инжењер рударства**.

Школске 2017/2018. године уписао је мастер академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Рударско инжењерство, модул Површинска експлоатација лежишта минералних сировина, које је завршио са просечном оценом 10. Мастер рад под називом „Примена специјалних метода минирања за уклањање стенске масе на локацији будућег стамбено-пословног комплекса у улици Кнеза Милоша 1, Београд“ одбранио је 10. јула 2018. године са оценом 10. Тиме је стекао звање **мастер инжењер рударства**.

Школске 2018/2019. године кандидат је уписао докторске академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Рударско инжењерство. Списак положених испита дат је у табели:

Табела 1. Списак положених испита на докторским академским студијама

Предмет	Оцена
Вишекритеријумско одлучивање у рударском инжењерству	10
Геостатистика и геоинформациони системи	10
Примена метода меког рачунарства у рударском инжењерству	9
Информациони системи	10
Израда докторске дисертације 1	10
Израда докторске дисертације 2	10
Техноекономска оцена пројеката у рударству 2	10
Планирање и оптимизација површинских копова	10
Методе избора рударских машина	10
Оптимизација система површинске експлоатације	10
Израда докторске дисертације 3	10
Израда докторске дисертације 4	10
Израда докторске дисертације 5	10
Израда докторске дисертације 6	10
Научно-истраживачки рад	10
Научно-истраживачки рад	10

Кандидат је 18.06.2019. године започео радни однос у Рударском басену “Колубара” на радном месту рударски инжењер у оперативи на површинском копу “Поље Б/Ц”.

У периоду од маја 2020. до октобра 2022.године обављао је послове сменског рударског инжењера на површинском копу “Поље Б/Ц”.

У периоду од октобра 2022. до јануара 2025.године обављао је посао руководиоца система на површинском копу “Поље Е”.

Кандидат од 01.02.2025.године ступа у радни однос у огранку “Пројект” Рударског басена “Колубара”, где обавља послове пројектанта при површинској експлоатацији лежишта минералних сировина. До сада је учествовао у изради 3 упрошћена рударска пројекта као водећи пројектант и као сарадник на једној студији.

Стручни испит за дипломираног инжењера рударства при површинској експлоатацији положио је 16.новембра 2021.године.

Школске 2016/2017 и 2017/2018. кандидат је био добитник награде општине Лазаревац, за просечну оцену током студија већу од 8,50.

1.3. Релевантни радови и резултати

Кандидат је у протеклом периоду као аутор објавио следеће радове: 5 рада из категорије М33 и 1 рад из категорије М63. Списак поменутих радова дат је у наставку.

Категорија М30 – Зборници међународних научних скупова

М33 – Саопштење са међународног скупа штампано у целини

Живановић М. (2023). Искуства примене дисконтинуалне механизације при експлоатацији угља на источном делу Рударског басена Колубара. Зборник радова, XI Међународна конференција ССМ 2023, Југословенски комитет за површинску експлоатацију, Златибор, 11-14. октобар, с. 265-276. ISBN 978-86-83497-30-0;

Живановић М. (2024). Употреба беспилотне летелице за потребе функционисања површинског копа “Поље Е“ Рударског басена Колубара. Зборник радова, XVI Међународна конференција ОМС 2024, Југословенски комитет за површинску експлоатацију, Златибор, 9-12 октобар, с. 330-343. ISBN 978-86-83497-31-7;

Живановић М. Стојковић Н. (2024). Determining the effectiveness of bucket wheel excavators on the exploitation of overburden at the surface mine “Field E“ using the Fuzzy Topsis method. Зборник радова, III Међународни симпозијум Рударство и геологија данас, Рударски институт, Београд, 28-29 новембар, с. 81-95. ISBN 978-86-82673-24-8;

Живановић М., Стојковић Н. (2025). Formation of an external dump at the Drmno surface mine for sustainable and safe coal exploitation, Зборник радова, XVI Стручно советување на тема: Технологија на подземна и површинска експлоатација на минерални сировини, Охрид, 3-5. октобар, с. 66-72. ISBN 978-608-65530-9-8;

Стојковић Н., **Живановић М.,** Јаковљевић И. (2025). Угаљ и његова перспектива у будућности, Зборник радова, XII Међународна конференција ССМ 2025, Југословенски комитет за површинску експлоатацију, Златибор, 8-11. октобар, с. 197-207. ISBN 978-86-83497-32-4;

Категорија М60 – Зборници скупова националног значаја

М63 - Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу

Живановић М, Милетић Ф., Лазић М (2025). Анализа поузданости погона за копање роторног багера SRs 1200x24/4+Vr, 16. Симпозијум са међународним учешћем „Рударство 2025“, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Привредна комора Србије и Савез инжењера металургије Србије, Врњачка Бања, 27-30. мај, с. 263-273. ISBN 978-86-80420-29-5.

1.4. Оцена подобности кандидата

У досадашњем раду кандидат се систематски бавио проблематиком поузданости и ефективности рада роторних багера, као и анализом технолошких процеса на површинским коповима. Резултате истраживања публиковао је на домаћим и међународним конференцијама, чиме је потврдио оспособљеност за самосталан научно-истраживачки рад у предметној области.

Предложена тема докторске дисертације „Развој хибридног модела вештачког учења за повећање поузданости роторних багера“ представља научно утемељену и актуелну истраживачку област. Досадашња истраживања кандидата у области поузданости техничких система, конкретно, роторних багера и експлоатације на површинским коповима представљају адекватну основу за даљи развој модела заснованих на методама вештачког учења.

На основу увида у досадашњи рад и остварене резултате, може се констатовати да кандидат поседује потребна теоријска знања, методолошку оспособљеност, као и истраживачке компетенције за реализацију предложене докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

2.1. Предмет истраживања и полазни ставови

Савремено енергетско тржиште и растуће потребе за стабилним снабдевањем електричном енергијом постављају пред рударски сектор, а нарочито пред површинску експлоатацију лигнита, императив максималне оперативне готовости и економске ефикасности. У Републици Србији, Рударски басен Колубара представља стуб енергетске независности. Континуална површинска експлоатација минералних сировина изводи се путем БТО система (багер–транспортер са гуменом траком–одлагач) и БТД (багер–транспортер са гуменом траком–дробилана/депонија) система. Основна улога ових система је откопавање, транспорт и депоновање/одлагање угља или јаловине. Примарну улогу у систему има роторни багер који представља највећу самоходну машину у индустрији. Роторни багери раде непрекидно у три смене, при чему су услови радне средине променљиви.

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације је роторни багер SRs 1200x24/4+VR који је ангажован на откопавању откривке у оквиру III БТО система површинског копа „Поље Е“. Багери SRs 1200 се појављују у два различита типа, као SRs 1200x22/2+VR и SRs 1200x24/4+VR. Багера типа SRs 1200x24/4+VR има укупно 4, где су три активна на ПК „Поље Е“, а четврти је на ПК „Поље Г“. Багер из студије случаја је у експлоатацији од 1976. године.

Рад у отежаним условима, променљивим динамичким оптерећењима током процеса откопавања, изложеност абразивној прашини и високим радним температурама, неминовно доводе до појаве отказа. Одржавање експлоатационих система до сада се доминантно ослањало на комбинацију корективног и превентивног одржавања, заснованој на временским интервалима.

Овакав приступ, иако опште прихваћен, често резултује или непотребним трошковима услед преране замене делова или, што је знатно опасније, изненадним катастрофалним ломовима који узрокују вишемилионске губитке због застоја у производњи.

Инжењерска пракса показује да један сат застоја багера генерише не само губитак у количинама откопане откритке, већ покреће ланчану реакцију неефикасности у целом систему. Стога, дефинисање прецизног тренутка за интервенцију постаје питање од изузетног економског и технолошког значаја.

Теорија поузданости традиционално користи параметарске моделе, попут Вејбулове расподеле за процену времена рада до појаве отказа. Иако ови модели пружају добру основу, они се суочавају са озбиљним ограничењима када је у питању моделирање високо нелинеарних и комплексних зависности које карактеришу рад роторних багера. Фактори попут температуре лежајева, амплитуда вибрација, струјног оптерећења и услова радне средине нису у потпуности обухваћени линеарним моделима и класичним методама статистиком. Додатно, огроман ресурс знања похрањен у неструктурираним инжењерским дневницима застоја остаје неискоришћен јер класичне методе немају капацитет за обраду природног језика.

Предмет истраживања докторске дисертације постављен је на пресеку машинског инжењерства, статистичке теорије поузданости и напредних архитектура дубоког учења. Суштинско тежиште истраживања није усмерено само на изоловану машину, већ на целокупни процес настанка, евидентирања и предвиђања машинских и електро застоја на сложеним техничким системима, какав је роторни багер SRs 1200×24/4+VR. Истраживање се фокусира на анализу поузданости његових погонских група, који су најодговорнији за континуитет производног процеса:

- **погон радног точка:** као примарни орган за откопавање материјала, изложен променљивим динамичким оптерећењима и абразивном хабању;
- **погон кружног кретања:** (окретања горње градње): механизам који омогућава радијус деловања багера и трпи велика инерцијална оптерећења горње градње;
- **погон за подизање и спуштање стреле радног точка:** механизам који осигурава прецизно позиционирање радног точка по етажама.
- **погон транспортера са траком:** омогућава транспорт материјала од пресипног места на радном точку до пресипа на етажни транспортер, где отказ једног елемента зауставља цео систем;
- **погон транспорта багера:** омогућава померање багера приликом откопавања реза и његов транспорт на нову радну позицију;

Предмет истраживања обухвата како механичке компоненте (редукторе, елементе унутар њега; лежајеве, вратила, зупчанике, затим челичну конструкцију, гусенице багера и слично), тако и електро-енергетске системе (електромоторе, управљачке јединице и слично), третирајући их као интегрисану целину.

Истраживање се бави трансформацијом сирових инжењерских података у статистички релевантне моделе. Предмет анализе није проста фреквенција отказа, већ време до настајања догађаја (Time-to-Event Analysis). Кључни аспекти овог дела истраживања су:

- **време између отказа (TBF–Time Between Failure):** моделирање временских интервала од тренутка враћања багера у рад до следећег непланираног застоја;
- **проблем цензурисања:** специфичан предмет истраживања је правилно третирање десно цензурисаних података. Представља ситуације када багер не ради због отказа, већ због планског ремонта или краја периода посматрања. Истраживање поставља методолошки оквир који спречава да ови подаци унесу необјективност у процену поузданости.
- **функција хазарда:** истраживање настоји да прецизно моделира тренутни ризик од отказа у сваком моменту рада машине, узимајући у обзир њено претходно стање и радно оптерећење.

Предмет истраживања је и историјски низ података о застојима багера SRs 1200 прикупљан током десетогодишњег периода експлоатације. Процес обраде ових података обухвата:

- **стандардизација путем NLP-а:** истраживање се бави применом метода за обраду природног језика (NLP) на инжењерске записе из дневника застоја. Циљ је да се неструктурирани текстуални описи (нпр. „пуцање вратила“, „прегревање намотаја“) претворе у униформне категорије које неуронска мрежа може да интерпретира;
- **екстракција коваријата:** предмет истраживања су фактори утицаја (обележја) који детерминишу ризик, као што су: кумулативни радни сати, сезонски утицаји (зима/лето), трајање претходних поправки и специфичност радне етаже на копу.

Научна база докторске дисертације представља развој и тестирање хибридног модела DeepSurv. Предмет истраживања у овом сегменту је:

- **интеграција дубоких неуронских мрежа и Сох-овог модела:** замена класичне линеарне функције у Сох-овом моделу дубоком нелинеарном архитектуром;
- **оптимизација хиперпараметара:** истраживање процеса финог подешавања мреже (број слојева, стопа учења, итд.) како би се спречила претренираност модела;
- **евалуација путем С-индекса и Brier-овог скорa:** прецизно дефинисање способности модела да предвиди вероватноћу настанка отказа у реалном времену.

Предмет истраживања је и синергија између дигиталних модела и физичких сензора. Истраживање анализира како подаци из система за праћење стања (Condition Monitoring System), попут:

- амплитуда и фреквенција вибрација на лежајевима;
- температурних профила уља у редукторима;
- струјних потписа погонских мотора (MCSA анализа), који постају улазни параметри (коваријате) који „хране“ DeepSurv модел, омогућавајући генерисање персонализованих кривих преживљавања за сваки конкретан подсистем багера у реалном времену.

Коначно, предмет истраживања је и економска и оперативна оправданост преласка са реактивног на предиктивно одржавање. Истраживање ће обухватити дефинисање како прецизна предикција времена рада до појаве отказа утиче на:

- **смањење непланираних трошкова:** избегавање хаваријских ломова који могу бити и до десет пута скупљи од планских интервенција;

- **оптимизацију залиха:** управљање складиштем резервних делова (ведрице, резни елементи, ваљци, лежајеви, итд.) на основу реално дефинисаног ризика, а не на бази интуиције или крутих временских планова.

На овај начин је предмет истраживања заокружен као свеобухватан систем који полази од „сировог податка“ о отказу елемената система, пролази кроз ригорозну математичку и алгоритамску обраду и завршава се као „конкретан алат“ за доношење одлука у инжењерској пракси на површинским коповима рударског басена Колубара.

2.2. Циљеви истраживања

Основни циљ истраживања докторске дисертације је развој и имплементација напредног математичко-алгоритамског оквира заснованог на DeepSurv архитектури (синтеза дубоког учења и анализе преживљавања) ради прецизног предвиђања времена до настанка отказа (Time-to-Event) на основним подсистемима роторног багера. Јасна намера је да се изврши научни и практични заокрет у начину на који се приступа одржавању капиталне рударске опреме.

Истраживање тежи да докаже да хибридни модели могу превазићи ограничења традиционалних статистичких метода (попут Вејбулове расподеле) у условима високог шума и нелинеарних зависности карактеристичних за површинске копове.

Истраживање има за циљ да пружи конкретна решења за оперативне изазове на површинском копу:

- **рана детекција аномалија:** имплементација модела (попут Isolation Forest-a) за препознавање одступања у раду која претходе катастрофалним ломовима, омогућавајући интервенцију пре него што настане трајна штета;
- **персонализација „криве преживљавања“:** генерисање јединствених визуелних приказа (кривих преживљавања) за сваки конкретни подсистем (нпр. погон радног точка, погон транспорта багера, погон кружног кретања, погон дизања и спуштања стреле, итд.) у реалном времену, на основу тренутних сензорских читавања;
- **повећање расположивости багера:** директно смањење непланираних застоја кроз прецизно планирање превентивних активности у математички дефинисаном интервалу пре настанка отказа, чиме се максимизира искоришћење багера у БТО систему;
- **интерпретабилност одлука вештачке интелигенције:** примена SHAP и LIME метода како би се запосленима пружио јасно образложење о томе који фактори (вибрације, температура, струја, и слично) у датом тренутку највише доприносе повећању ризика.

Циљ истраживања се односи и на домен логистике одржавања:

- **оптимизација залиха резервних делова:** развој предиктивног модела заснованог на LSTM мрежама који би на основу прогнозираних отказа оптимизовао ниво залиха критичних делова (ведрице, зуби, лежајеви);
- **унапређење логистичких токова:** Анализа и идентификација „уских грла“ у процесу поправке (логистичко и административно време) како би се смањило средње време поправке (MTTR – Mean-Time-to-Repair).

Крајњи **економски циљ** истраживања је да се кроз повећану прецизност предвиђања отказа оствари значајна редукција укупних трошкова одржавања. Истраживање настоји да докаже да је улагање у дигитализацију и AI моделе економски оправдано кроз:

- избегавање штета које настају при хаваријским ломовима;
- смањење трошкова неостварене експлоатације откривке;
- продужетак животног века багера изнад његових првобитно пројектованих граница кроз ревитализацију засновану на реалним подацима.

На овај начин је циљ истраживања постављен као свеобухватан мост који спаја најновија достигнућа информатичких наука са рударском индустријом, тежећи да од багера SRs 1200 направи „интелигентни систем“ који активно учествује у очувању поузданости

2.3. Осврт на литературу

Релевантни литературни извори који су до сада истражени у оквиру прегледа литературе која се надовезује на истраживања предложене теме докторске дисертације су подељене у неколико области, сходно предмету истраживања, постављеним хипотезама, циљу и научном доприносу дисертације и то:

- радови који се односе на техничке системе, са освртом на роторне багере: вибродијагностику, интегритет конструкције и слично;
- радови из области машинског учења, AI модела у предиктивном одржавању електро и механичких компонената техничких система; евалуација и тестирање модела; процена преосталог радног века система;
- уџбеници и скрипте из области поузданости и одржавања техничких система и слично.

Списак литературе је у наставку:

I) Инжењерство одржавања, предиктивно одржавање и AI модели, преостали радни век

[1] F. Miletić, P. Jovančić, M. Milovančević, and D. Ignjatović, “Adaptive neuro-fuzzy prediction of operation of the bucket wheel drive based on wear of cutting elements,” *Advances in Engineering Software*, vol. 146, 2020, Art. no. 102824.

[2] M. Gomilanović, M. Tanasijević, S. Stepanović, and F. Miletić, “A model for determining fuzzy evaluations of partial indicators of availability for high-capacity continuous systems at coal open pits using a neuro-fuzzy inference system,” *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 2958, 2023.

[3] P. Jovančić, D. Ignjatović, M. Tanasijević, and T. Maneški, “Vibration as a technical condition parameter of a dynamic system: Examples for the bucket wheel drive of bucket wheel excavator – OMC,” 2014.

[4] A. Brkić, T. Maneski, D. Ignjatović, P. Jovančić, and V. K. Spasojevic-Brkić, “Diagnostics of bucket wheel excavator discharge boom dynamic performance,” *Journal of Maintenance and Reliability*, vol. 16, no. 2, pp. 188–197, 2014.

- [5] P. Jovančić, S. Aleksandrović, S. Djenadić, A. Madžarević, F. Miletić, and A. Milenović, "Influence of dynamic behavior of excavator steel structure on correction of human vibrations: Operator cabin case study," *Journal of Vibroengineering*, vol. 27, no. 3, pp. 479–496, 2025.
- [6] D. Krzanović, I. Stojičić, M. Gomilanović, F. Miletić, and N. Stanić, "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," *Applied Sciences*, vol. 16, 2026, Art. no. 2569.
- [7] M. Milovančević, M. Pantić, and A. Đorđević, "Vibration diagnostics of industrial machinery using machine learning," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 131–142, 2022.
- [8] D. Li, J. Niu, S. Liang, et al., "Intelligent diagnosis of wheel faults based on multi-scale time-frequency maps and CNN," *Journal of Railway Science and Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 1032–1043, 2023.
- [9] L. Fernández, J. Pérez, and M. Rodríguez, "Predictive maintenance in mining equipment using deep learning and survival models," *Mining Engineering*, vol. 76, no. 3, pp. 45–53, 2024.
- [10] N. Farouk, A. Jaafar, and A. Ayoub, "LSTM-ANN-GA: A hybrid deep learning model for predictive maintenance of industrial equipment," *Proceedings on Engineering Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 861–868, 2025.
- [11] A. Jamshidi et al., "A survey of predictive maintenance: Machine learning and deep learning approaches," *arXiv preprint*, 2025.
- [12] S. Elsherif et al., "A hybrid CAE-LSTM model for remaining useful life prediction of turbofan engines," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [13] A. Kumar et al., "A hybrid CNN-BiLSTM model for predictive maintenance planning," *Autonomous Intelligent Systems*, vol. 5, 2025.
- [14] "Artificial intelligence and robotics in predictive maintenance: A review," *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 11, 2025.
- [15] W. Li and T. Li, "Comparison of deep learning models for predictive maintenance," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [16] J. Xu and Y. Zhang, "Device fault prediction model based on LSTM and random forest," *arXiv preprint*, 2024.
- [17] Y. Zhou, X. Liu, and J. Wu, "Hybrid deep learning framework for fault diagnosis and remaining useful life prediction of electrical machines," *Energy Reports*, vol. 10, 2024.
- [18] S. Ahmed, M. Hassan, and A. El-Din, "Deep learning-based fault prediction in electrical drive systems using LSTM networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 228, 2024.
- [19] H. Xu, J. Wang, and K. Li, "Deep reinforcement learning-assisted survival prediction for industrial systems with time-varying covariates," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, no. 6, pp. 4553–4564, 2024.
- [20] R. Singh, M. Singh, and P. Kumar, "A novel attention-based LSTM model for remaining useful life estimation in rotating machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 180, 2024.

- [21] M. Chen, Q. Liu, and T. Zhang, "Cox-Net: A deep learning enhanced Cox proportional hazards regression for predictive maintenance of complex equipment," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 35, pp. 1421–1437, 2024.
- [22] Y. Zhao, S. Li, and B. Yang, "Integration of deep survival models and sensor data fusion for industrial equipment prognosis," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 2167–2176, 2025.
- [23] F. Wang, Z. Li, and C. Yang, "Fault diagnosis and RUL prediction for electric drive systems using gated recurrent units and survival analysis," *Energy Conversion and Management*, vol. 277, 2024.
- [24] L. Hu, J. Feng, and X. Zhao, "AI-based prognostics for heavy industrial equipment under variable load conditions," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 139, 2025.
- [25] X. Guo, H. Pan, and Y. Feng, "A deep Cox proportional hazards network for predictive maintenance of complex systems," *Expert Systems with Applications*, vol. 235, 2024.
- [26] J. Li, Q. Zhang, and Y. Wang, "Data-driven prognostics for electromechanical systems using deep survival analysis," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 112345–112357, 2024.
- [27] D. Garcia, M. Lopez, and A. Ruiz, "Integration of SHAP explanations in deep learning-based predictive maintenance models," *Knowledge-Based Systems*, vol. 305, 2025.
- [28] Y. Shen, Z. Chen, and H. Li, "Explainable deep survival analysis for predictive maintenance applications," *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 6, 2025.
- [29] K. Brown, T. Wilson, and J. Clark, "Uncertainty-aware deep learning models for prognostics and health management," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 74, no. 1, 2025.
- [30] M. Zhang, K. Wang, and L. Sun, "Remaining useful life prediction using LSTM with attention mechanism for rotating machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 198, 2024.
- [31] B. Coutinho et al., "Survival analysis-based system for predictive maintenance optimization," *SN Computer Science*, vol. 6, 2025.
- [32] M. Cavus, "Predictive multiplicity in survival models for predictive maintenance," preprint, 2025.
- [33] A. Saxena et al., "Predictive maintenance using Cox proportional hazards model with deep learning," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 210, 2020.
- [34] J. Katzman et al., "DeepSurv: Personalized treatment recommender system using a Cox proportional hazards deep neural network," *BMC Medical Research Methodology*, vol. 18, 2018.
- [35] P. K. Sahu and R. N. Rai, "LSTM-based deep learning approach for remaining useful life prediction of rolling bearing using proposed C-MMPE feature," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, pp. 2197–2209, 2024.
- [36] Y. Wang et al., "Predictive maintenance scheduling based on remaining useful life prediction," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 3, 2024.
- [37] S. Taşcı et al., "Remaining useful lifetime prediction using machine learning and IoT data," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 182, 2023.
- [38] B. Yang et al., "Data-driven prognostics for heavy equipment in harsh operating conditions," *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [39] H. C. Chu, C. J. Lee, and H. Y. Yeh, "Developing deep survival model for remaining useful life estimation based on CNN and LSTM," *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020.

- [40] T. Nguyen, H. Tran, and D. Le, "Remaining useful life estimation for heavy-duty excavators using sensor fusion and LSTM networks," *Automation in Construction*, vol. 162, 2024.
- [41] Z. Zhang, Y. Li, and X. Wang, "DeepSurv-based prognostics model for remaining useful life prediction of industrial equipment under complex operating conditions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, 2024.
- [42] Z. Zhang, Y. Li, and X. Wang, "DeepSurv-based prognostics model for remaining useful life prediction of industrial equipment under complex operating conditions," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 243, 2024.
- [43] T. Nguyen, H. Tran, and D. Le, "Remaining useful life estimation for heavy-duty excavators using sensor fusion and LSTM networks," *Automation in Construction*, vol. 162, 2024.

3. Полазне хипотезе

❖ Нулта (главна) хипотеза (H0)

Хибридни модел дубоког учења заснован на DeepSurv архитектури омогућава значајно прецизније моделирање нелинеарне функције хазарда и предвиђање времена рада до појаве отказа (Time-to-Event) виталних склопова роторног багера у поређењу са традиционалним статистичким и линеарним моделима поузданости.

Образложење главне хипотезе: полази од претпоставке да су корелације између сензорских података (вибрације, струја, температура) и реалних отказа система високодимензионалне и нелинеарне. Док класични модели (Вејбул, линеарни Сох и слично) претпостављају фиксне облике расподеле или линеарне односе, хибридни DeepSurv модел користи дубоке неуронске мреже да „научи“ ове сложене зависности директно из података, што резултује вишим C-индексом (конкордантношћу) и мањим Brier-овим скором (грешком предвиђања).

Планиране опште хипотезе докторске дисертације су:

▪ Хипотеза 1 (X1): Значај стандардизације путем NLP-а

Образложење: Аутоматизована стандардизација инжењерских података из дневника застоја применом метода процесирања природног језика (NLP) значајно повећава квалитет улазних коваријата, што је у директној корелацији са повећањем прецизности модела за предвиђање преосталог века трајања.

Фокус хипотезе је тестирање тврдње да текстуални описи отказа које запослени наводе у дневнику застоја садрже скривене информације, које, када се правилно дигитализују и категоришу, постају кључни предиктори које сензори сами не могу да детектују (нпр. опис визуелних пукотина или специфичних звукова унутар мотора, редуктора).

▪ Хипотеза 2 (X2): Моделирање зависних (ланчаних) отказа

Моделирање процеса настанка отказа помоћу Марковљевих ланаца омогућава идентификацију и предвиђање каскадних (ланчаних) отказа, где појава специфичног електро отказа значајно мења вероватноћу и убрзава настанак машинског отказа на повезаном подсистему.

Фокус хипотезе је тестирање претпоставке да откази на багеру нису изоловани догађаји. Хипотеза претпоставља да постоји статистички мерљива зависност између подсистема (нпр. варијације у напајању које доводе до преоптерећења и отказа на лежају), што DeepSurv модел може да инкорпорира кроз промену унутрашњих стања ризика.

▪ Хипотеза 3 (X3): Реална применљивост персонализованих кривих преживљавања, оптимизација логистике и економска одрживост

Интеграција система за праћење стања (Condition Monitoring System) у реалном времену са DeepSurv моделом омогућава генерисање динамичких, персонализованих кривих преживљавања за сваки систем појединачно, пружајући радницима одржавања поуздан алат за интервенцију пре критичног отказа.

Фокус хипотезе представља практичну вредност докторске дисертације. Циљ је да се докаже да модел не даје само „општу слику“ већ и прецизан тајминг за превентивно деловање на машини у специфичном тренутку, чиме се директно доказује апликативни значај дисертације.

У оквиру докторске дисертације ће се провера постављених хипотеза вршити путем:

- 1. Унакрсне валидације** (k-fold cross-validation) ради потврде стабилности резултата;
- 2. Статистичких тестова:** коришћењем Wilcoxon-овог теста рангова за поређење перформанси DeepSurv модела са Random Survival Forest-ом и Cox-овим моделом;
- 3. Метрика перформанси:** примарно преко Harrell-овог C-индекса за мерење дискриминационе моћи и Brier-овог скорa за мерење тачности калибрације вероватноће.

4. Научне методе истраживања

Научне методе истраживања у докторској дисертацији представљају комплексан, интегрисан и структуриран скуп општенаучних, теоријских и експерименталних поступака. С обзиром на то да дисертација спаја традиционално инжењерство одржавања са најсавременијим дисциплинама вештачке интелигенције, примењена методологија је мултидисциплинарна.

Методе истраживања које се користе у оквиру дисертације се у општем смислу сврставају у:

- општенаучне и логичке;
- методе техничке дијагностике и мониторинга;
- математичко-статистичке;
- методе вештачке интелигенције и машинског учења;
- методе валидације и евалуације модела;

У оквиру **општенаучних и логичких метода** истиче се:

- **метода анализе и синтезе:** примењује се при декомпозицији багера SRs1200 на његове виталне подсистеме (погон радног точка, кружног кретања, транспортера, погон транспорта). Анализом појединачних узрока отказа (механичких и електричних), врши се каснија синтеза у јединствени хибридни модел поузданости који посматра багер као интегралну целину.
- **метода моделовања:** представљају **централну тему дисертације**, креирање математичког и дигиталног еквивалента багера (DeepSurv модел). Модел служи као апстракција реалног система која омогућава симулацију различитих сценарија експлоатације и предвиђање будућих стања (хазарда).

Методе техничке дијагностике и мониторинга (вибродиагностика, термографија, тробологија...) обезбеђују емпиријске улазне податке за креирање модела.

Математичко-статистичке методе обезбеђују егзактност истраживања и омогућавају рад са „шумовитим“ подацима из реалног рударског окружења. Методе које се користе су:

- анализа преживљавања (*Survival Analysis*): Ово је **примарна математичка метода**. За разлику од класичне регресије, овде се користи специфичан апарат за рад са временом до догађаја (Time-to-Event).
- *Kaplan-Meier-ова метода*: коришћена за непараметарску процену функције преживљавања и иницијалну визуелизацију вероватноће безотказног рада.
- *Cox-ов модел* пропорционалних хазарда: Служи као полазна основа за дефинисање утицаја коваријата (сензорских података) на стопу ризика.
- Марковљеви ланци: користе се за моделирање дискретних стања система (рад, квар типа А, квар типа В, ремонт). Ова метода омогућава идентификацију ланчаних отказа, односно вероватноће преласка из једног стања неисправности у друго.
- статистичке методе: користе се за обраду десетогодишњег низа података о застојима, одређивање средњих вредности (MTBF, MTTR), варијансе и тестирање статистичке значајности резултата.

Методе вештачке интелигенције и машинског учења представљају иновативну основу дисертације и омогућавају хибридизацију модела.

- метода дубоког учења (*Deep Learning*): користи вишеслојне неуронске мреже са нелинеарним активационим функцијама унутар DeepSurv архитектуре. Омогућава аутоматску екстракцију карактеристика (feature extraction) из комплексних сензорских података без потребе за мануелним дефинисањем математичких релација.
- процесирање природног језика (NLP): примењује се на неструктуриране инжењерске записе. Користи технике за филтрирање, речи како би текстуалне описе кварова претворио у нумеричке коваријате које AI модел може да процесира.

Методе валидације и евалуације модела се користе за проверу тачности креираног хибридног модела.

- 10-fold Cross-validation (унакрсна валидација): метода дељења скупа података на 10 делова, где се модел тренира на 9, а тестира на једном, уз 10 понављања. Ово осигурава да резултати нису плод случајности или претренираности (overfitting).
- Harrell-ов C-индекс (*Concordance Index*): метода за евалуацију дискриминационе моћи модела преживљавања. Мери колико добро модел рангира ризик између два насумично изабрана подсистема.
- Brier-ов скор: метода за мерење прецизности калибрације предвиђених вероватноћа у односу на стварне исходе.
- Wilcoxon-ов тест рангова: непараметарски статистички тест коришћен за доказивање да је супериорност DeepSurv модела у односу на базне моделе статистички значајна.

Конечно, дисертација примењује хибридни методолошки приступ, који полази од:

- емпиријског прикупљања података на терену,
- напредне дигиталне обраде (NLP и стандардизација),
- комплексног моделирања (*DeepSurv*) и
- ригорозне научне верификације.

Овакав систем метода омогућава да рад не буде само теоријска студија, већ апликативни инжењерски алат који има научни доказ и практичну примену у реалном индустријском систему.

5. Очекивани научни допринос

Научни допринос докторске дисертације даје искорак у области поузданости и одржавања техничких система јер по први пут на систематичан и математички ригорозан начин интегрише најсавременије архитектуре дубоког учења са формалним апаратом анализе преживљавања. Рад не нуди само техничко побољшање постојећих процеса, већ дефинише нову научну основу у предиктивном одржавању рударске механизације.

Главни научни допринос се огледа у:

- ❖ развоју и валидацији хибридног оквира заснованог на *DeepSurv* архитектури, који успешно превазилази ограничења класичних модела у анализи поузданости,
- ❖ креирање иновативне методологије за дигитализацију и стандардизацију деценијског инжењерског искуства путем процесирања природног језика (NLP).

Хибридни модел ће између осталог омогућити и:

- ❖ превентивно одржавање рударских машина, дефинисањем математички доказаног времена рада до појаве следећег отказа, што ће битно утицати на повећање временског искоришћења система експлоатације и смањење трошкова услед заостаја и
- ❖ прецизност у прогнози преосталог радног века машине.

6. План истраживања и структура рада

Кандидат је у складу са дефинисаним циљем истраживања и приказаним научним методама предвидео више фаза истраживачког рада које синтезно чине план истраживања, односно структуру и садржај докторске дисертације.

6.1. План истраживања

1. **прикупљање и припрема података** (преузимање дневника застоја, NLP стандардизација, feature engineering, стратификована подела тренинг/тест-70-30);
2. **референтни модели** (Kaplan-Meier, Cox PHM, Weibull/Log-нормална, параметарска анализа);
3. **модели машинског учења** (Random Survival Forests-RSF, Gradient Boosting Survival Analysis, оптимизација хиперпараметара);
4. **DeepSurv и напредне методе** (DeepSurv архитектура-тренирање, DRSA, TET, MTLR, Марковљеви ланци, Isolation Forest, LSTM);
5. **евалуација и валидација** (10-fold CV, C-индекс, IBS, MAE, Wilcoxon-ов тест- $P < 0,05$, Shar анализа интерпретабилности);
6. **имплементација и економска анализа.**

6.2. Предлог структуре поглавља

1. Увод
2. Преглед релевантне литературе
3. Роторни багери, погонске групе, карактеристични откази
4. Вештачка интелигенција и анализа преживљавања (Survival Analysis)
5. Теорија поузданости техничких система
6. Теорија одржавања техничких система и дијагностика
7. Развој хибридног модела
8. Резултати, тестирање модела и дискусија
9. Закључна разматрања
10. Списак литературних извора

7. Закључак и предлог

Увидом у материјал из Пријаве докторске дисертације, досадашње резултате постигнуте на докторским академским студијама и на основу одбране предложене теме, чланови Комисије констатују да је предложена докторска дисертација кандидата Милоша Живановића, мастер инжењера рударства под називом „**Развој хибридног модела вештачког учења за повећање поузданости роторних багера**“ иновативна, актуелна и научно оправдана.

Очекује се да докторска дисертација направи значајан научни искорак у односу на досадашње моделе коришћене при анализи поузданости техничких система у рударству. Тај искорак се заснива на способности моделирања нелинеарних и комплексних зависности, што омогућава тачнију процену времена рада до појаве отказа и идентификацију кључних утицајних фактора. Тиме се успоставља основа за унапређење предиктивног одржавања и даљу примену савремених метода машинског учења у анализи поузданости сложених техничких система, какав је роторни багер. Предложена тема докторске дисертације припада научној области Рударско инжењерство, односно ужој научној области Елементи машинских и енергетских система, за коју је матичан Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду. За ментора се предлаже др Филип Милетић, доцент Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 06.05.2026.

Чланови Комисије:

др Филип Милетић, доцент,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

др Милош Танасијевић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

др Ивица Ристовић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

др Стеван Ђенадић, доцент,
Универзитет у Београду – Рударско-геолошки факултет

др Милош Милованчевић, редовни професор,
Универзитет у Нишу – Машински факултет
