

ВЕЋУ ДЕПАРТМАНА ЗА ПОСЛЕДИПЛОМСКЕ СТУДИЈЕ

Одлуком Већа Департмана за последипломске студије број 4 – 66/2025. од 10.04.2025., одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Бранислав Радомировић**, под називом: „Унапређење детекције абнормалне мождане активности класификацијом временских серија електроенцефалографских података коришћењем модела дугорочне краткорочне меморије неуронских мрежа оптимизованих метахеуристикама“ о чему подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату

Кандидат Бранислав Радомировић је рођен 30.01.1974. год. у Шапцу, Србија, где је завршио основну школу "Хероји Подриња". У Шапцу је завршио Гимназију „Вера Благојевић“ природно математичког смера, усмерење математичко-програмерски сарадник, као одличан ученик. Након завршетка гимназије уписао Вишу Школу за Информатику Универзитета у Новом Саду на образовном профилу „Инжењер информатике“ у октобру 1994. године у трајању од 6 семестара. Дипломирао је у марту 1998. год. са просечном оценом 7.33.

Након завршетка Више школе за информатику Универзитета у Новом Саду, уписао је Технички факултет „Михајло Пупин“ Универзитета у Новом Саду на образовном профилу „Професор информатике“ у октобру 1998 године у трајању од 8 семестара. Дипломирао је у септембру 2001. године са просечном оценом 7,65 на предмету „Геометрија и рачунарска графика“ са оценом 10 на одбрани дипломског рада. Након завршетка основних студија на Техничком факултету „Михајло Пупин“ Универзитета у Новом Саду, похађао је Школу за резервне официре Војске Југославије у трајању од 9 месеци од септембра 2001 године. Успешно је завршио школовање за резервне официре у јуну 2002. године са просечном оценом 8,90 у оквиру војно-евиденционе специјалности Техничке службе Војске Југославије и промоцијом у чин потпоручника Војске Југославије.

Након завршетка основних студија на Техничком Факултету „Михајло Пупин“ Универзитета у Новом Саду, уписао је исти факултет на образовном профилу „Дипломирани инжењер информатике“ у трајању од 10 семестара у октобру 2001. године. Дипломирао је у септембру 2005. године са просечном оценом 7,63 на предмету Пројектовање информационих система и оценом 10 из дипломског рада.

Током основних студија на образовном профилу „Дипломирани инжењер информатике“ на Техничком факултету „Михајло Пупин“ Универзитета у Новом Саду, уписао је специјалистичке студије на Факултету организационих наука Универзитета у Београду на образовном профилу „Електронско пословање и Јава технологије“ у трајању од 2 семестара у марту 2003. године. Дипломирао је у новембру 2005. године са оценом 10 из специјалистичког рада из предмета Интернет технологија.

1.1. Научни радови кандидата

Кандидат Бранислав Радомировић као први аутор има прихваћен научно-истраживачки рад у часопису *Complex & Intelligent Systems* (M21 категорије) који је прошао строгу верификацију еминентних стручњака из ове области и тиме је кандидат испунио предуслов за одбрану докторске дисертације.

Референца рада:

Радомировић, Б., Бачанин, Н., Јовановић, Л., Симић, В., Његуш, А., Памучар, Д., Коппен, М., анд Живковић, М., (2024), „*Optimizing Long-short Term Memory Neural Networks for Electroencephalogram Anomaly Detection using Variable Neighborhood Search with Dynamic Strategy Change*“, *Complex & Intelligent Systems* (M21), pp. 1 - 23, Dec, 2024., <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-024-01592-z>

Додатне информације о научном часопису:

Часопис *Complex & Intelligent Systems* (издавач: *Springer*) сврстава се у Q1 категорију у области *Computer Science Applications*, заузимајући високу позицију у оквиру ранг-листе часописа у тој области. Према подацима из базе *SCImago Journal Rank* (SJR), овај часопис је међу водећим међународним часописима, што му у складу са Правилником о вредновању научних резултата обезбеђује категорију M21. Часопис је индексиран у релевантним међународним базама као што су *Scopus*, *Web of Science (ESCI)*, *DBLP*, и *Google Scholar*, што потврђује његову научну релевантност и видљивост у глобалном академском простору.

Кључни библиометријски показатељи:

- Impact Factor: 5.0
- CiteScore: 9.6
- SCImago Journal Rank (SJR): 1.321
- SNIP (Source Normalized Impact per Paper): 1.876
- h-индекс: 46

Рангирање по научним областима (*CiteScore*, 2025):

- Computational Mathematics: 7. место од 189 (Q1, 96. перцентил)
- Engineering (miscellaneous): 15. место од 204 (Q1, 92. перцентил)
- Information Systems: 58. место од 394 (Q1, 85. перцентил)
- Artificial Intelligence: 68. место од 350 (Q1, 80. перцентил)

Часопис је индексиран у следећим међународним базама података:

- Web of Science (SCIE)
- Scopus
- Directory of Open Access Journals (DOAJ)
- Google Scholar

Додатне информације:

- Званична страница часописа: <https://link.springer.com/journal/40747>
- SCImago: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101095931&tip=sid&clean=0>
- Scopus база: <https://www.scopus.com/sourceid/21101095931>

Додатне информације о доприносу научног рада:

Примена LSTM модела вештачких неуронских мрежа у анализи EEG сигнала у циљу детекције епилептичких напада код пацијената представља централни допринос овог научног рада. У оквиру докторске дисертације развијен је оптимизовани модел LSTM вештачке неуронске мреже за класификацију временских серија EEG података, уз употребу напредних метахеуристичких алгоритама оптимизације хиперпараметара *Particle Swarm Optimization* (PSO) и модификованог *Variable Neighborhood Search* (VNS-DS). Начни допринос докторске дисертације се огледа у следећем:

- Предложена је интеграција дубоког учења са метахеуристиком, чиме се омогућава ефикасна хиперпараметарска оптимизација LSTM модела у медицинској неуродијагностици;
- Примењена су три експериментална приступа на јавно доступним и означеним EEG подацима, где је показано је значајно повећање тачности и осетљивости у откривању напада код пацијената у односу на стандардне методе;
- Дисертација доприноси области интерпретабилне вештачке интелигенције увођењем SHAP анализа, које објашњавају важност карактеристика улазног EEG сигнала и омогућавају клиничарима да ефективно интерпретирају резултате који су добијени анализом EEG сигнала путем LSTM вештачке неуронске мреже;

- Научни резултати истраживања објављени су у међународном часопису *Complex & Intelligent Systems*, категорије M21.

На тај начин, кандидат је дао оригиналан допринос развоју напредних интелигентних система који се могу користити као подршка у клиничком одлучивању, посебно у областима где је детекција абнормалне мождане активности од кључног значаја.

Преостали објављени радови:

Поглавља у научним уџбеницима категорије M13:

- [1] Radomirovic B., Petrovic A., Zivkovic M., Njegus A., Budimirovic N., and Bacanin N., (2024), *Efficient spam email classification logistic regression model trained by modified social network search algorithm*, Chapter in *Advanced Studies in Complex Systems, Computational Intelligence and Blockchain in Complex Systems*, pp. 39 - 55, Elsevier, Apr, 2024. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780443132681000108>
- [2] Volas I., Jovanovic L., Mihajlovic M., Malisici S., Zivkovic T., Zivkovic M., Radomirovic B., and Bacanin N., (2025), *Optimizing Renewable Energy Production Forecasting Using Modified Metaheuristic Optimizers*, Chapter in *AI Horizons: From Learning to Understanding— Navigating Challenges Across Industries*, Conference June 2025, Available at: <https://link.springer.com/book/9783031867484>
- [3] Radomirovic, B., Jovanovic, L., Njeguš, A., Zivkovic, M., Bačanin, N., Dobrojevic, M., (2024), *Augmentation and substitution of medical training data with generative adversarial networks for machine learning*. MIDS 2024, The International Conference on Modelling and Development of Intelligent Systems, October 17, 2024, hosted by the Research Center in Informatics and Information Technology, Faculty of Sciences Lucian Blaga University of Sibiu, Romania. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-87386-7_10

Истраживачки часописи категорије M21:

- [1] Bulaja D., Zivkovic T., Pavkovic M., Zeljkovic V., Jovic N., Radomirovic B., Zivkovic M., Bacanin N., *Benzene Pollution Forecasting by Recurrent Neural Networks Tuned with Adapted Elk Heard Optimizer*, Journal of Industrial Intelligence, Volume 3, Issue 1, 2025, Pages 1-11, Available at: https://www.acadlore.com/article/JII/2025_3_1/jii030101
- [2] Tamara Zivkovic T., Zorana Krsmanovic Z., Minic A., Zeljkovic V., Marevic V, Varsandan C., Radomirovic B, Bacanin N. *Photovoltaic Farm Production Prediction Using Long Short-Term Memory Networks Tuned By Adapted Reptile Search Algorithm*, EUROHPC-JU, Journal of Industrial Intelligence (JII), 30 January 2025, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10858704>
- [3] Radomirović, B., Jovanović, V., Nikolić, B., Stojanović, S., Venkatachalam, K., Zivkovic, M., Njeguš, A., Bacanin, N., and Strumberger I., (2023), *Text Document Clustering Approach by Improved Sine Cosine Algorithm*. *Information Technology and Control*, Information Technology and Control Vol. 52 No.2, Pages 541-561. 23rd June 2023 Available at: <https://itc.ktu.lt/index.php/ITC/article/view/33536>

- [1] Radomirovic, B., Bacanin, N., Jovanovic, L., Simic, V., Njegus, A., Pamucar, D., Koppen, M., and Zivkovic, M., (2024), *Optimizing Long-short Term Memory Neural Networks for Electroencephalogram Anomaly Detection using Variable Neighborhood Search with Dynamic Strategy Change*, Complex & Intelligent Systems, pp. 1 - 23, Dec, 2024. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40747-024-01592-z>

IEEE конференције категорије M33:

- [1] Golubovic, S., Jovanovic, L., Radomirovic, B., Njegus, A., Zivkovic, M. and Bacanin, N., (2023), *Evolving Deep Neural Network Architectures by Sine Cosine Algorithm for Healthcare 4.0*, InC4, 2023 IEEE International Conference on Contemporary Computing and Communications, Bangalore, India, 2023, pp. 1-6, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10263180>
- [2] Radomirovic, B., Jovanovic, L., Stoean, C., Zivkovic, M., Njegus, A. and Bacanin, N., (2023) *Solar flare classification using modified metaheuristic optimized XGBoost*, SYNASC 2023, 25th International Symposium on Symbolic And Numeric Algorithms for Scientific Computing. Nancy, France, 11-14 September 2023, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10522695>
- [3] Abdulla, T., Jovanovic, L., Radomirovic, B., Njegus, A., Zivkovic, M., and Bacanin, N., (2024), *Extreme Learning Machine Optimization for Employee Satisfaction With Modified Metaheuristic*, ICOECA 2024, 4th International Conference on Expert Clouds and Applications 18-19, April 2024, Bengaluru, India. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10612405>
- [4] Jovanovic, L., Bacanin, N., Radomirovic, B., Zivkovic, M., Njegus, A. and Antonijevic, M., (2024), *Natural Language Processing and AdaBoost Optimized by Modified Metaheuristic for Online Harassment Detection*, ICIACS 2024, International Conference on Innovations and Advances in Cognitive Systems, 27-28, May 2024. Organized by Builders Engineering College Kangayam, Tamil Nadu, India, Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-69201-7_33
- [5] Dubljanin, D., Jovanovic, L., Bacanin, N., Spalevic, P., Radomirovic, B., Zivkovic, M., and Njegus, A., (2024), *Racism detecting in Twitter comments using metaheuristics optimized text mining and classification*, ASCIS 2024, Third International Conference, October 16–18, 2024, Rajkot, India, Revised Selected Papers, Part III. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-86296-0_16
- [6] Jovanovic, L., Antonijevic, M., Zivkovic, M., Radomirovic, B., Njegus, A. and Bacanin, N., (2024), *Forecasting Energy Production at Solar Substations Using Long Short-Term Memory Networks Optimized by Adaptive Metaheuristics*, ICMEET 2024, 9th International Conference on Micro-Electronics, Electromagnetics and Telecommunications, December 20, 2024. National Institute of Technology Mizoram, India in Association with Software Technology Parks of India (STPI), Kolkata, West Bengal, India. (Прихваћен)
- [7] Ivanovic, S., Jovanovic, L., Njegus, A., Zivkovic, M., Radomirovic, B. and Bacanin, N., (2024), *Optimizing Convolutional Networks for Plant Disease Detection Applications Using a Modified Optimizer*, ICICC-2025, 8th International Conference on Innovative Computing and Communication 2025, February 14-15, 2025, Organized by Shaheed Sukhdev College of business studies, University of Delhi, New Delhi, in association with National institute of technology Patna & University of Valladolid Spain. (Прихваћен)

- [8] Bacanin, N., Vicentijevic, M., Jovanovic, L., Njegus, A., Radomirovic, B., and Zivkovic, M., (2024), *Optimizing Machine Learning for Malicious Blockchain Node Detection Using Modified Metaheuristic*, ICAET-25, IEEE International Conference on AIML-Applications for Engineering & Technology, Organized by Cummins College Engineering Pune, Maharashtra, India. January 16-17th, 2025, Pune. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10932157>
- [9] Kozakijevic S., Jovanovic L., Mihajlovic M., Antonijevic M., Jankovic B., Radomirovic B., Zivkovic M., Bacanin N., and A. Stojiljkovic, (2024), *Consumer Feedback Sentiment Classification Improved Via Modified Metaheuristic Optimization Natural Language Processing*, Organized by International Journal of Robotics and Automation Technology, United Kingdom, Part of ISSN: 2409-9694, Available at: <https://zealpress.com/jms/index.php/ijrat/article/view/608>
- [10] Bacanin, N., Radomirovic B., Dubljanin D., Jovanovic L., Spalevic P., Radomirovic B., Zivkovic M. and Njegus, A., (2024), *Racism detecting in Twitter comments using metaheuristics optimized text mining and classification*, ASCIS 2024, 3rd International Conference on Advancements in Smart Computing and Information Security, 17-18, October 2024. Organized by Marwadi University, India. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-86296-0_16
- [11] Jankovic, N., Radomirovic B., Jovanovic Lj., Ivanovic S., Tedic S., Zivkovic M., and Bacanin N., (2024), *Classifying Birds of South America via Audio Analysis with Convolutional Networks Optimized by Metaheuristics*, CRM 2025, 3rd Congress on Control, Robotics, and Mechatronics, Feb 1, 2025 - Feb 2, 2025, Organized by SR University, Warangal, India. (Прихваћен)
- [12] Jankovic N., Tanaskovic T., Markovic V., Radomirovic B., Zivkovic M., Jovanovic Lj., and Bacanin N., (2024), *Intrusion Detection Systems in IoT Networks by LightGBM Optimized with Altered Firefly Algorithm*, ICCCT 2025, 7th International Conference on Communication and Computational Technologies, February 14-15, 2025, Organized by National Forensic Sciences University Goa Campus, India and Florida International University, Miami, FL, USA. (Прихваћен)
- [13] Malisic S., Andjelic S., Tedic S., Radomirovic B., Jovanovic L., Bacanin N., and Zivkovic M., (2025), *Solar Energy Production Forecasting with Long Short-Term Memory Networks Optimized by Modified Firefly Algorithm*, WCSC2025, 2nd World Congress on Smart Computing, February 22-23, 2025 Organized by School of Engineering, Babu Banarasi Das University, Lucknow, India. (Прихваћен)
- [14] Babic L., Jovanovic L., Kozakijevic S., Zivkovic M., Zivkovic T., Andjelic S., Radomirovic B., and Bacanin N., (2025), *Mental Disorder Classification via Modified Metaheuristic Optimized Machine Learning*, PEIS2025, 3rd International Conference on Power Engineering and Intelligent Systems, March 08-09, 2025 Organized by National Institute of Technology Uttarakhand, India. (Прихваћен)
- [15] Marevic V., Jovanovic L., Tomic M., Radomirovic B., Markovic Blagojevic M., Zivkovic M., and Bacanin N., (2025), *Modifying Metaheuristics for Machine Learning Optimization An Application in IoT Security*, INFUS 2025, 7th conference on intelligence and fuzzy systems conference series, July 29-31, 2025, Organized by Istanbul Technical University, Management Faculty, Macka, Besiktas, Istanbul, Turkey. (Прихваћен)

- [16] Petrovic A., Marevic V., Andjelic S., Zivkovic M., Jovanovic L., Radomirovic B., Antonijevic M., and Bacanin N., (2025), *Modified Optimization Metaheuristics Applied in Photovoltaic Power Production Forecasting*, AIR 2025, International Conference on AI and Robotics, May 09-11, 2025, Organized by Nazarbayev University Kazakhstan in association with Soft Computing Research Society, Kazakhstan. (Прихваћен)
- [17] Babic L., Ivanovic S., Jovanovic L., Markovic Blagojevic M., Zeljkovic V., Zivkovic M., Radomirovic B., and Bacanin N., (2025), *Click Pattern Classification Using Modified Metaheuristic Optimized Long-Short Term Neural Networks for Fraud Detection*, ICIVC 2025, 5th International Conference on Intelligent Vision and Computing, June 13-14, 2025, Organized by The ICFAI University, Dehradun Technically Sponsored by of Computing Research Society. (Прихваћен)
- [18] Bulaja D., Radomirovic B., Tomic M., Zeljkovic V., Zivkovic T., Zivkovic M., Babic L., and Bacanin N., (2025), *Optimizing XGBoost for Online Tweets Harassment Detection Using Word2Vec and Modified Metaheuristics*, ICDSA 2025, 6th International Conference on Data Science and Applications, July 16-18, 2025, Organized by Malaviya National Institute of Technology Jaipur, India in association with Soft Computing Research Society. (Прихваћен)

2. Основни подаци о докторској дисертацији

Докторска дисертација кандидата Бранислава Радомировића, урађена је на укупно 197 страна, укључујући списак акронима, списак литературе и прилоге.

Списак литературе обухвата преко 78 референци, међу којима се налазе научни радови, стручне монографије, законски и регулаторни документи, као и релевантни електронски извори из области вештачке интелигенције, биомедицине и софтверског инжењерства.

Поред основног текста, докторска дисертација садржи 30 слика, 13 табела и 15 алгоритамских приказа, чиме се обезбеђује јасноћа презентације теоријских математичких модела и експерименталних резултата. Илустрације и алгоритми детаљно прате процес математичког моделовања, оптимизације и евалуације LSTM вештачких неуронских мрежа коришћених за анализу ЕЕГ сигнала.

Дисертација је подвргнута провереном софтверу за откривање плагијаризма (*iThenticate Plagiarism Detection Software*), при чему је укупни проценат сличности износио 4%, што је значајно испод дозвољене границе. Већина уочених подударности односи се на уобичајене техничке изразе и референце на научне изворе у оквиру поглавља која садрже преглед литературе, као и стандардизоване формулације у вези са методологијом и експерименталним окружењем.

Докторска дисертација је израђена у складу са правилником Универзитета Сингидунум и представља оригинални научни допринос у области примене интелигентних софтверских система за медицинску дијагностику, са посебним фокусом на детекцију епилептичких напада анализом временских серија ЕЕГ сигнала.

2.1. Предмет и циљ истраживања

У оквиру докторске дисертације истражују се методолошке, техничке и практичне могућности примене напредних математичких модела вештачке интелигенције за потребе аутоматизоване неуродијагностике.

Докторске дисертација је усмерена на решавање проблема ниске прецизности и недовољне поузданости традиционалних клиничких метода анализе ЕЕГ сигнала у детекцији епилептичких напада, а кроз имплементацију математичког модела дугорочне краткорочне меморије (*Long Short-Term Memory* – LSTM) вештачких неуронских мрежа чији су хиперпараметри оптимизовани употребом метахеуристичких алгоритама, попут алгорита роја честица (*Particle Swarm Optimization* – PSO) и модификоване варијабилне претраге суседства (*Variable Neighborhood Search* – VNS-DS).

Предмет истраживања докторске дисертације представља:

- развој математичког модела на бази LSTM неуронских мрежа,
- примена метахеуристичких техника у оптимизацији хиперпараметара LSTM неуронске мреже,
- интеграција математичког модела у аутоматизовану детекцију епилептичких напада из ЕЕГ података,
- анализа и верификација математичког модела у реалним клиничким сценаријима.

У теоријском делу рада извршена је анализа постојећих метода и алгоритама машинског учења применљивих у анализи ЕЕГ сигнала, као и ограничења класичних рекурентних неуронских мрежа (*Recurrent Neural Network* – RNN) и њихових варијанти попут GRU вештачких неуронских мрежа (*Gated Recurrent Unit* – GRU).

Истраживање указује на предности LSTM архитектуре у одржавању дугорочне зависности података, што је кључно за обраду секвенцијалних медицинских података, као што су ЕЕГ записи, који су подложни врло суптилним променама што отежава процес медицинске неуродијагностике у клиничкој пракси.

Циљ докторске дисертације је двојак: научни и друштвени.

Научни циљеви:

- Развој напредног LSTM модела прилагођеног карактеристикама ЕЕГ сигнала.
- Увођење и прилагођавање модификованог VNS-DS алгорита у функцији оптимизације хиперпараметара LSTM неуронске мреже.
- Формална евалуација перформанси модела у поређењу са традиционалним методама и другим архитектурама (RNN, GRU).
- Визуелна интерпретација резултата уз помоћ SHAP анализа и анализа важности карактеристика.

- Објављивање научног рада у часопису категорије M21 (*Complex & Intelligent Systems*), што потврђује релевантност и научну вредност истраживања.

Друштвени циљеви:

- Примена предложеног модела у клиничкој пракси за рану и поузданију дијагностику епилепсије.
- Смањење субјективности у тумачењу ЕЕГ записа и подршка медицинском особљу у доношењу одлука.
- Унапређење квалитета живота пацијената кроз правовремену терапијску интервенцију.
- Пружање основе за развој интегрисаних система за анализу биомедицинских података у реалном времену.
- Употреба модела у окружењима са ограниченим ресурсима захваљујући смањеној комплексности и оптимизованом времену обуке.

Практични део истраживања у оквиру докторске дисертације кандидата је спроведен кроз три експеримента на бази јавног скупа означених података:

- Примена основног LSTM модела са фиксним хиперпараметрима (основни LSTM).
- Примена LSTM модела са хиперпараметарском оптимизацијом кроз PSO (LSTM+PSO).
- Примена LSTM модела са модификованим VNS-DS алгоритмом за динамичко прилагођавање претраге (LSTM+VNS-DS).

У свим фазама је вршена анализа метрика као што су тачност (*accuracy*), осетљивост (*sensitivity*), специфичност (*specificity*), F1-скор и матрица конфузије.

Подаци су преузети из јавног репозиторијума Универзитета Pompeu Fabra (UPF) у Шпанији, који садржи реалне, означене анонимизоване ЕЕГ записе пацијената са различитим неуролошким стањима.

2.2. Хипотетички оквир истраживања

На основу претходно постављених научних и друштвених циљева овог научно-истраживачког рада, формулисане су следеће хипотезе које су детаљно анализиране у оквиру докторске дисертације кандидата.

Општа хипотеза: „Оптимизација LSTM вештачке неуронске мреже помоћу метахеуристичких алгоритама може побољшати тачност детекције епилептичких напада код пацијената на основу ЕЕГ података“

Појединачне хипотезе су:

X1: LSTM вештачке неуронске мреже могу ефикасно класификовати ЕЕГ податке и детектовати аномалије у можданој активности код пацијената.

Ова хипотеза истражује способност модела LSTM вештачке неуронске мреже да препознаје сложене обрасце у ЕЕГ сигнаlima, а који су кључни за идентификацију неуролошких поремећаја, као што су епилептични напади код пацијената. Претпоставка је да примена ових математичких модела вештачке интелигенције може довести до значајног унапређења тачности детекције абнормалних можданих активности код пацијената.

X2: Метаксеуристички алгоритми могу значајно унапредити перформансе модела LSTM вештачке неуронске мреже у детекцији епилептичних напада код пацијената.

Ова хипотеза се фокусира на могућности оптимизације модела LSTM вештачке неуронске мреже кроз примену метаксеуристичких алгоритама, као што су генетски алгоритми (*Genetic Algorithm*, GA) и оптимизација роја честица (PSO). Циљ је да се истражи како ови алгоритми оптимизације могу побољшати прецизност и брзину детекције епилептичних напада код пацијената оптимизацијом хиперпараметара LSTM вештачке неуронске мреже.

X3: Модификована претрага путем алгоритма варијабилне претраге суседства (VNS) може додатно побољшати прилагођавање модела LSTM вештачке неуронске мреже специфичностима ЕЕГ сигнала.

Ова хипотеза сугерише да примена модификоване верзије алгоритма варијабилне претраге суседства (VNS) може повећати тачност и ефикасност математичког модела LSTM вештачке неуронске мреже у анализи ЕЕГ података. Тестира се како овај приступ може оптимизовати хиперпараметре LSTM вештачке неуронске мреже, а самим тиме и процес детекције епилептичних напада код пацијената, посебно у ситуацијама са ограниченом количином података.

Предложене горе неведене научне хипотезе постављају оквир за развој напредног математичког модела LSTM вештачке неуронске мреже ради анализе ЕЕГ сигнала, а са циљем да се унапреди прецизност и брзина детекције неуролошких поремећаја код пацијената и са посебним фокусом на епилепсију као једну од најчешћих и најсложенијих неуролошких стања код пацијената код нас и у свету.

2.3. Методологија истраживања

У складу са предметом и циљевима дисертације, током научно-истраживачког рада су коришћене основне научне методе које се односе на истраживање, као што су: аналитичко-синтетичка метода, компаративна и експериментална метода. Током примене експерименталне методе коришћене су математичке методе метаксеуристичке оптимизације хиперпараметара вештачке неуронске мреже.

- **Аналитичко-синтетичка метода:** За анализу релевантне научне литературе и доступних података о ЕЕГ сигнаlima и епилепсији, као и за синтезу постојећих математичких модела и техника у сврху развијања новог побољшаног математичког модела.

- **Компаративна метода:** Коришћена је за упоређивање перформанси развијеног математичког модела са постојећим решењима, као и за евалуацију различитих приступа оптимизацији хиперпараметара модела LSTM вештачке неуронске мреже.
- **Експериментална метода:** Ова метода је примењивана у фази тренирања и тестирања модела LSTM вештачке неуронске мреже на стварним ЕЕГ подацима, где су мерени кључни индикатори перформанси, укључујући тачност, прецизност и осетљивост.
- **Метахеуристичке методе оптимизације:** У овом научно-истраживачком раду примењени су алгоритми оптимизације као што су генетски алгоритам (GA) и алгоритам оптимизације роја честица (PSO), како би се оптимизовали хиперпараметри модела LSTM вештачке неуронске мреже, укључујући величину слојева, број неурона и дужину временског прозора.

Примена метахеуристичких алгоритама оптимизације у овом контексту је била кључна за решавање проблема високог нивоа варијабилности у ЕЕГ подацима, пре свега јер омогућава динамичну оптимизацију хиперпараметара вештачке неуронске мреже у складу са специфичностима ЕЕГ сигнала (нелинеарност, шум,...).

Применом свих горе наведених научних метода идентификован је проблем детекције епилептичких напада код пацијената из ЕЕГ сигнала и предложена су апликативна решења базирана на примени математичког модела LSTM вештачке неуронске мреже која се оптимизује метахеуристичким алгоритмима.

2.4. Кратак приказ садржаја докторске дисертације

Полазећи од дефинисаних циљева и истраживачких хипотеза, докторска дисертација је структурирана у шест тематских поглавља, која се логички надовезују и граде јасан ток истраживачког процеса од теоријске основе до формулисаних резултата и закључака.

Поглавље 1 даје увод у тему истраживања и представља свеобухватну теоријску основу која уводи читаоца у домен вештачких неуронских мрежа, са посебним нагласком на LSTM архитектуру и примену вештачке интелигенције у обради биомедицинских података. У овом поглављу представљени су кључни појмови, дефинисани предмет, циљ, хипотезе и методолошки оквир рада. Посебна пажња посвећена је значају електроенцефалографије (ЕЕГ) у медицинској дијагностици неуролошких поремећаја, као и изазовима који проистичу из варијабилности у интерпретацији ових сигнала. Дискусија обухвата улогу вештачке интелигенције као подршке медицинској дијагностици, чиме се прецизира научни и друштвени допринос истраживања.

Поглавље 2 излаже научна истраживања у домену математичке теорије која потребна за разумевање модела вештачке интелигенције примењених у оквиру докторске дисертације. Овде су анализирани кључни резултати из области примене RNN и LSTM неуронских мрежа у класификацији временских серија, посебно у

области биомедицине. Истакнута су ограничења класичних приступа и потреба за унапређењем постојећих модела. Додатно, разматрани су регулаторни оквири, етички изазови и технолошки трендови у области примене вештачке интелигенције у медицини на глобалном нивоу и у Републици Србији.

Поглавље 3 представља детаљан опис методологије истраживања. У оквиру овог поглавља приказан је развој LSTM модела и начин на који се врши класификација EEG временских серија. Објашњена је архитектура LSTM мреже, као и поступак оптимизације хиперпараметара, применом три метахеуристичка приступа: генетског алгорита (GA), алгорита роја честица (PSO) и модификованог алгорита променљивог суседства (VNS-DS). Методологија је прилагођена специфичностима EEG сигнала и података добијених из реалног клиничког окружења.

Поглавље 4 обухвата опис експерименталне поставке и добијених резултата. Представљен је скуп података преузет са јавног репозиторијума Универзитета Pompeu Fabra, као и начин припреме и обраде података за обуку и тестирање математичког модела. Резултати су приказани кроз поређење три експериментална приступа (основни LSTM, LSTM+PSO, LSTM+VNS), а мере евалуације укључују тачност, осетљивост, специфичност, F1-меру и време обуке. Анализа резултата омогућила је идентификацију најефикасније стратегије за оптимизацију математичког модела.

Поглавље 5 бави се интерпретацијом резултата и научним доприносом научно-истраживачког рада. Истакнут је значај постигнутих резултата у контексту прецизности и брже дијагностике неуролошких поремећаја код пацијената. Приказани су доминантни параметри који утичу на ефикасност математичког модела, уз коришћење SHAP анализа за објашњење важности улазних карактеристика. У овом поглављу се такође налазе препоруке за унапређење математичког модела, као и смернице за даља истраживања.

Поглавље 6 садржи закључке истраживања. Сумирани су резултати у односу на постављене хипотезе, анализирана су ограничења приступа и дати предлози за даљи развој. Посебан акценат стављен је на потенцијалну примену математичког модела у пракси, нарочито у здравственим установама у Републици Србији, као и на могућности проширења система за примену у другим областима биомедицинског инжењеринга.

2.5. Постигнути резултати и научни допринос докторске дисертације

Истраживање представљено у докторској дисертацији резултирало је низом научних доприноса у области примене вештачке интелигенције и метахеуристичке оптимизације у анализи биомедицинских података, конкретно EEG временских серија. Остварени резултати директно потврђују постављене истраживачке хипотезе и отварају могућности за практичну примену предложеног модела у медицинској неуродијагностици.

Општа хипотеза докторске дисертације гласи:

X0: „Оптимизација LSTM вештачке неуронске мреже помоћу метахеуристичких алгоритама може побољшати тачност детекције епилептичких напада код пацијената на основу ЕЕГ података.“

Резултати истраживања у потпуности потврђују ову хипотезу, што је демонстрирано кроз верификацију појединачних хипотеза:

- Развијен је LSTM модел дубоког учења, оптимизован за класификацију ЕЕГ сигнала, који је у више експерименталних сценарија показао значајно боље перформансе у односу на класичне RNN и GRU моделе. **Потврђена је хипотеза X1:** да примена LSTM неуронске мреже омогућава ефикасну и поуздану детекцију епилептичких активности.
- Применом метахеуристичких алгоритама PSO и модификованог VNS-DS постигнута је значајна оптимизација хиперпараметара LSTM модела, што је довело до побољшања тачности, брзине обуке и стабилности математичког модела. **Потврђена је хипотеза X2:** да употреба метахеуристике повећава ефикасност и робусност модела у реалним условима.
- Увођењем прилагођене верзије VNS алгорита са динамичком променом стратегије током оптимизационог процеса постигнута је већа флексибилност претраге и побољшана глобална конвергенција. **Потврђена је хипотеза X3:** да модификовани VNS-DS алгоритам омогућава ефикаснију оптимизацију LSTM модела у односу на класичне приступе.

Научни допринос:

- Унапређен је LSTM модел применом адаптивне метахеуристике, чиме је пружен оригиналан допринос у области оптимизације хиперпараметара вештачких неуронских мрежа.
- Уведена је методолошка платформа која интегрише дубоко учење и оптимизацију у специфичном контексту биомедицинских сигнала.
- Употребом реалног, означеног и јавно доступног скупа података осигурана је репродуктивност и верификованост резултата.
- Истраживање је резултирало објављеним научним радом у међународно рецензираној публикацији (*Complex & Intelligent Systems*, категорија M21), што потврђује научну релевантност и применљивост резултата.

Друштвени и практични допринос:

- Омогућен је развој система за подршку у доношењу одлука у области неуродијагностике, са потенцијалом примене у установама здравствене заштите.
- Смањена је субјективност у интерпретацији ЕЕГ сигнала кроз аутоматизовани систем за препознавање шаблона и аномалија.

- Модел је дизајниран тако да буде применљив и у условима ограничених технолошких ресурса, што га чини погодним за примену у мање развијеним срединама и са ограниченим скупом података.
- Истраживање подстиче трансфер технологије из академског у клинички контекст, чиме доприноси иновацијама у здравственом сектору.

Постигнути резултати у докторској дисертацији представљају заокружен, оригиналан и применљив допринос у области примењене вештачке интелигенције, са потенцијалом за даљи развој, интеграцију и практичну имплементацију у медицини.

3. Мишљење и предлог Комисије о докторској дисертацији

На основу увида у целокупну структуру, теоријски и методолошки оквир, научну заснованост, релевантност теме и остварене резултате, Комисија је мишљења да докторска дисертација кандидата **Бранислава Радомировића**, под називом **„Унапређење детекције абнормалне мождане активности класификацијом временских серија електроенцефалографских података коришћењем модела дугорочне краткорочне меморије неуронских мрежа оптимизованих метахеуристикама“** представља оригиналан и научно релевантан рад, у потпуности у складу са академским и истраживачким стандардима који се захтевају за израду докторских дисертација. Дисертација обухвата актуелну и интердисциплинарни тему која повезује области вештачке интелигенције, биомедицинског инжењеринга и анализе временских серија. Рад показује висок ниво научног доприноса, како у домену развоја и оптимизације LSTM вештачких неуронских мрежа, тако и у примени иновативних метахеуристичких алгоритама оптимизације. Поред тога, у раду је представљена практична имплементација у виду софтверског алата и потврђена употребљивост у клиничком контексту.

Кандидат је током израде дисертације показао способност за самосталан и систематичан научно-истраживачки рад, а резултати истраживања су презентовани кроз објављени научни рад у међународном рецензираној публикацији.

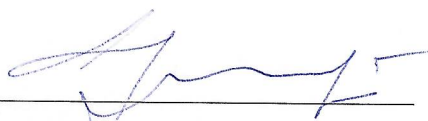
Комисија једногласно предлаже Већу департмана за последипломске студије и Сенату Универзитета Сингидунум да прихвати дисертацију кандидата Бранислава Радомировића, под називом „Унапређење детекције абнормалне мождане активности класификацијом временских серија електроенцефалографских података коришћењем модела дугорочне краткорочне меморије неуронских мрежа оптимизованих метахеуристикама“ и одобри њену јавну одбрану.

У Београду, 28.05.2025. године

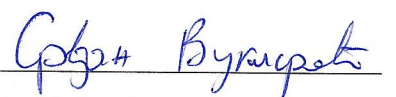
Чланови комисије:



проф. др Милош Станковић – ментор



проф. др Ангелина Његуш – председник



проф. др Срђан Вукмировић – члан