

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ФАКУЛТЕТ ОРГАНИЗАЦИОНИХ НАУКА

НАУЧНО-НАСТАВНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Зорнића

Одлуком 05-01 бр. 3/13-1 од 08.02.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Зорнића под насловом

**Методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења
у моделе симулације засноване на агентима**

После прегледа достављене дисертације, других пратећих материјала и разговора са кандидатом Николом Зорнићем, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Никола Зорнић је процес израде докторске дисертације започео пријавом теме приступног рада 09.07.2020. године. Комисија за преглед и одбрану приступног рада и оцену научне заснованости пријављене докторске дисертације је формирана 15.07.2020. године одлуком Наставно-научног већа ФОН-а 05-01 бр. 59-9, а приступни рад је одбранио 25.11.2020. године. Одлука о усвајању извештаја Комисије о научној заснованости пријављене докторске дисертације под бројем 05-01 бр. 3/116-8 донета је 23.12.2020. године. Одлуком 02 број: 61206-298/2-21 Универзитета у Београду од 28.01.2021. године даје се сагласност на предлог теме докторске дисертације Николе Зорнића под називом „Методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима“, а за ментора је именован проф. др Александар Марковић, редовни

професор Факултета организационих наука Универзитета у Београду. Ментор је известио Наставно-научно веће Факултета организационих наука да је кандидат Никола Зорнић завршио израду докторске дисертације, а Наставно-научно веће Факултета организационих наука је именovalo Комисију за оцену и одбрану завршене докторске дисертације одлуком 05-01 бр. 3/13-1 од 08.02.2023. године.

1.2. Научна област дисертације

Дисертацијом кандидата Николе Зорнића обухваћен је развој методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима. На основу тога докторска дисертација припада области техничких наука и подручју организационих наука. Ужа научна област дисертације је Моделирање пословних система и пословно одлучивање. Ментор дисертације је др Александар Марковић, редовни професор Факултета организационих наука Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола Зорнић је рођен 22.05.1990. године у Краљеву. Средњу економско-трговинску школу у Краљеву је завршио 2009. године. Исте године уписује Факултет организационих наука Универзитета у Београду, студијски програм Менаџмент и организација, студијска група Менаџмент. Положио је испите предвиђене наставним планом и програмом и одбранио завршни рад основних академских студија на тему *Примена софтверског пакета @RISK у симулацији стохастичких система* под менторством проф. др Александра Марковића у септембру 2013. године. Основне академске студије је завршио са просечном оценом 9,74 (девет и 74/100) и стекао звање дипломирани инжењер организационих наука.

Школске 2013/2014 уписао је Мастер академске студије на Факултету организационих наука на студијском програму Менаџмент и организација, модул Пословна интелигенција и одлучивање. Положио је испите предвиђене наставним планом и програмом студијског програма и одбранио је завршни мастер рад на тему *Примена модела динамике система за анализу популације студената*, под менторством проф. др Александра Марковића у октобру 2014. године. Мастер академске студије је завршио са просечном оценом 9,71 (девет и 71/100) и стекао звање мастер инжењер организационих наука.

Школске 2014/2015 уписао је Мастер академске студије на Факултету организационих наука на студијском програму Пословна аналитика, модул Пословна статистика. Положио је испите предвиђене наставним планом и програмом студијског програма и одбранио је завршни мастер рад на тему *Симулациони модел заснован на агентима за анализу саобраћаја у реалном времену*, под менторством проф. др Александра Марковића у септембру 2017. године.

Мастер академске студије је завршио са просечном оценом 10,00 (10 и 00/100) и стекао звање мастер инжењер организационих наука.

Током августа 2017. године је као добитник Erasmus+ стипендије похађао курс *Dynamic Business Models* на летњој школи на Radboud University у Најмегену у Холандији.

Радно и наставно искуство

Никола Зорнић је од марта 2014. до новембра 2016. године био ангажован на Факултету организационих наука као демонстратор и сарадник ван радног односа – демонстратор за ужу научну област Моделирање пословних система и пословно одлучивање. Током ангажовања на Факултету организационих наука, учествовао је у припреми и одржавању вежби и испита на основним академским студијама, на предметима *Симулација у пословном одлучивању* и *Симулациони модели у финансијама*. Од децембра 2016. године је ангажован на Факултету организационих наука прво као сарадник у настави, а затим и као асистент на Катедри за организацију пословних система, за ужу научну област Моделирање пословних система и пословно одлучивање.

Поседује искуство у раду са студентима на Факултету организационих наука. Педагошки рад кандидата се може оценити као успешан са просечном оценом изнад 4,7 (на скали 1-5), што потврђују резултати анкете које Факултет спроводи код студената. У летњем семестру школске 2018/2019 године био је најбоље оцењени сарадник на Факултету.

Научно-истраживачки и стручни пројекти

Кандидат Никола Зорнић је до сада учествовао или активно учествује на следећим пројектима:

- *Инфраструктура за електронски подржано учење у Србији*, научно-истраживачки пројекат у оквиру програма технолошког развоја Министарства науке Републике Србије. Број пројекта ИИИ47003. Од 2016 – сада.
- Унапређење мастер програма Пословна аналитика, пројекат финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја током школске 2017/2018 године.
- *IPA 2015 Multi-beneficiary statistical cooperation programme*, пројекат финансиран од стране Европске Комисије, као консултант 2018. године.
- *Financial management, accounting and controlling for capacity building of public administration (FINAC)*, пројекат финансиран од стране Европске Комисије, 2019. године.
- *Accelerating the transition towards Edu 4.0 in HEIs (TEACH4EDU4)*, Erasmus+ програм KA2 - *Cooperation for innovation and the exchange of good practices*. Од 2020 – сада.

- Унапређење предмета на ФОН-у у области моделирања и рачуарске симулације пословних система (Рачуарска симулација - ФОН), пројекат финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја током школске 2021/2022 године.
- *Supply of IT Equipment, Software and Ancillary Services for Improvement of Centralised Case Management System (CCMS) in Courts*, пројекат финансиран од стране Европске Комисије. Од 2021 – сада.
- *Постављање основа за јачање капацитета заједнице економије дељења у Србији(PANACEA)*, пројекат Фонда за науку Републике Србије. Број пројекта 7523041. Од 2022 – сада.

Награде

Никола Зорнић је награђен за најбољи рад конференције у две прилике: *The 27th Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CEIIS 2016)*, као и *XVI International Symposium SymOrg 2018 – Doing Business in the Digital Age: Challenges, Approaches and Solutions*.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Николе Зорнића, под насловом „Методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима” написана је на 93 странице и груписана је у шест поглавља. Посебан део дисертације односи се на коришћену литературу. Дисертација садржи 15 слика, 8 табела и 11 графикана.

Докторска дисертација садржи теоријски и методолошко-емпиријски део. Структура теоријског дела изложена је у следећим целинама: *Моделирање и симулација засновани на агентима; Употреба функције корисности у АВМ; Модели одлучивања базирани на историјским подацима*. Методолошко-емпиријски део садржи дефинисање, имплементацију, примену и евалуацију предложеног методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима. На почетку дисертације дат је сажетак на српском и енглеском језику, а на крају дисертације налази се биографија аутора и три обавезна прилога: *Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије рада и Изјава о коришћењу*.

Садржај

1. Увод.....	1
1.1. Предмет и циљ истраживања.....	2

1.2. Полазне хипотезе.....	2
1.3. Методе истраживања.....	3
2. Моделирање и симулација засновани на агентима.....	5
2.1. Процес изградње симулационог модела.....	6
2.2. Протокол за представљање АВМ.....	8
2.3. Трендови у примени моделирања и симулације засноване на агентима.....	9
2.4. Коришћење алгоритама машинског учења за изградњу АВМ.....	14
2.5. Софтверско окружење за имплементацију модела.....	14
2.6. Преглед софтверских окружења за развој модела заснованих на агентима	16
3. Употреба функције корисности у АВМ.....	24
3.1. Примери дефинисаних функција корисности.....	24
3.2. Уочени проблеми приликом дефинисања функција корисности.....	29
4. Модели одлучивања базирани на историјским подацима.....	30
5. Методолошки оквир за замену функције корисности алгоритмима машинског учења.....	34
5.1. Примена предложеног методолошког оквира на примеру анализе непожељног одласка клијената.....	38
5.2. Примена предложеног методолошког оквира на примеру одустајања студената од онлајн курсева.....	56
6. Закључак.....	65
7. Литература.....	68

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дефинисан је предмет и циљ докторске дисертације, наведене су полазне хипотезе и методе истраживања, а након тога дат је садржај и опис структуре докторске дисертације.

У другом поглављу су разматране теоретске основе моделирања и симулације засноване на агентима, као методологије која је у фокусу овог истраживања. Ово

укључује дефинисање процеса изградње модела, као и преглед протокола за представљање модела. Поред тога, извршена је детаљна библиографска анализа трендова у примени моделирања и симулације заснованих на агентима. У овом поглављу су представљена и софтверска окружења за развој модела заснованих на агентима.

Треће поглавље посвећено је анализи коришћења функције корисности у моделима симулације засноване на агентима. Дат је систематизован преглед радова у којима је функција корисности имплементирана у моделу. Посебно су идентификовани проблеми са којима се моделари сусрећу приликом дефинисања функције корисности.

У четвртном поглављу су представљене методе за креирање модела одлучивања на основу историјских података, такозвани *data-driven* алгоритми, као што су алгоритми машинског учења. Како се у приказу примене предложеног методолошког оквира користе класификациони алгоритми, приказане су уобичајене мере њихових перформанси.

У петом поглављу, које представља кључни део и основни допринос докторске дисертације предложен је методолошки оквир којим се предлаже начин замене функције корисности алгоритмима машинског учења, чиме се превазилази већи број уочених проблема идентификованих у трећем поглављу. Предложени хибридни приступ се заснива на увођењу алгоритма машинског учења, које агенти користе уместо функције корисности приликом доношења одлука. У наставку поглавља, у практичном делу рада, представљени су модели у којима је имплементиран предложени методолошки оквир из теоретског дела рада.

У последњем поглављу дата су закључна разматрања и одговори на питања у вези са постављеним циљем дисертације и хипотезама. Посебно су дати научни доприноси докторске дисертације и предлози будућих истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Тема докторске дисертације је савремена и, како у научном тако и у практичном смислу, веома атрактивна. Истраживање и развој методологије за укључивање алгоритама машинског учења за потребе одлучивања агената има велики значај за унапређивање објективности и тачности модела симулације засноване на агентима.

У докторској дисертацији је предложен нови методолошки оквир за укључивање алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима, који

приступа проблему на оригиналан начин и као такав представља значајан допринос научној заједници.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Кандидат је у докторској дисертацији користио релевантну и савремену домаћу и међународну литературу. Коришћене су публикације еминентних истраживача у области симулације засноване на агентима, информационих система и технологија, операционих истраживања и машинског учења. Велики број коришћених извора је публикован на водећим конференцијама и у часописима из поменутих области.

У изради докторске дисертације кандидат је користио 129 извора релевантних за обраду ове теме.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе, примењене у дисертацији, у потпуности одговарају предмету истраживања и захтевима у погледу провере постављених хипотеза. Основни метод истраживања базирао се на прикупљању, анализи и класификацији постојеће литературе и теоријских и експерименталних резултата у предметној области. За потребе истраживања, сакупљана је и проучавана доступна литература која се односи на израду симулационих модела заснованих на агентима, са посебним освртом на моделирање процеса доношења одлука од стране агената. Сакупљена литература је детаљно анализирана и систематизована, са циљем да се покаже оправданост и корисност развоја новог методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у разматране моделе.

У циљу тестирања постављених хипотеза у току израде дисертације коришћен је већи број научних метода. Коришћене су следеће опште методе: методе индукције-дедукције, методе дескриптивне анализе, методе анализе и синтезе, компаративне анализе, статистичке методе, као и метода моделирања.

На основу анализе докторске дисертације, може се закључити да примењене научне методе и технике одговарају, по свом значају и структури, проблему, предмету и циљевима истраживања. Такође, процедура имплементације предложеног модела је јасно и прецизно описана, тако да се експерименти и истраживања могу поновити, а добијени резултати проверити.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације имају широку практичну примену у области моделирања и симулације засноване на агентима. Предложени методолошки оквир омогућава интеграцију различитих алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима.

Предложени методолошки оквир је успешно проверен емпиријски, на примерима анализе непожељног одласка клијената из телекомуникационе компаније и одустајања студената од онлајн курсева.

Одлучивање агената коришћењем наученог алгоритма машинског учења повећава тачност изграђеног модела. Предложени методолошки оквир пружа моделарима могућност да користећи историјске податке, на објективан начин, представе процес доношења одлука од стране агената.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Никола Зорнић стекао је педагошко и научно-истраживачко искуство радећи на Факултету организационих наука, Универзитета у Београду као сарадник у настави и асистент за ужу научну област Моделирање пословних система и пословно одлучивање.

Кандидат је у досадашњем научно-истраживачком раду показао изузетну способност да истражи и критички анализира релевантну литературу, идентификује истраживачка питања и на основу њих постави и спроведе истраживање. У току досадашњег научно-истраживачког рада и током рада на дисертацији објавио је као аутор или коаутор 32 рада у водећим међународним и националним часописима, као и зборницима радова националних и међународних конференција. Као истраживач, учествовао је, или и даље учествује, у четири домаћа научно-истраживачка пројекта, као и у два међународна пројекта.

Узевши у обзир целокупно залагање и остварене резултате у научно истраживачком раду, као и потенцијале кандидата, закључујемо да је кандидат способан да се у потпуности самостално бави научно-истраживачким радом.

4. ОСТВАРЕН НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни допринос докторске дисертације представља дефинисање оригиналног методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима. Применљивост предложеног методолошког оквира потврђена је у дисертацији на два примера.

Кључни научни доприноси докторске дисертације су:

- Детаљан библиографски преглед коришћења ABMS у научној литератури;
- Преглед софтверских окружења за развој ABMS;
- Преглед примене функције корисности за моделирање доношења одлука од стране агената у ABM;

- Развој методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима;
- Примена развијеног методолошког оквира за интеграцију алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима на примерима анализе непожељног одласка клијената и одустајања студената од онлајн курсева.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Кандидат је у докторској дисертацији предложио нови методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима. Предложени методолошки оквир се заснива на коришћењу историјских података за учење алгорита машинског учења и његово коришћење у процесу доношења одлука од стране агената.

Методолошки оквир је експериментално проверен изградњом модела за два примера и поређењем са методологијом која се користи у практичним применама. Показано је да предложени методолошки оквир доприноси унапређењу развоја модела симулације засноване на агентима.

4.3. Верификација научних доприноса

Области научног интересовања кандидата Николе Зорнића су рачунарска симулација, динамика система, машинско учење и пословна аналитика. Током свог научно-истраживачког рада објавио је велики број научних радова и то у следећим категоријама: M21 – један рад; M22 – један рад; M23 – два рада; M24 – два рада; M33 – петнаест радова; M34 – два рада; M44 – два рада; M51 – два рада; M63 – четири рада и M64 – један рад.

У наставку је дат је одабрани подскуп радова у којима су директно или индиректно описани кључни доприноси из теме ове дисертације разврстани по категоријама.

Категорија M23:

Zornić, N., & Marković, A. (2022). A methodological framework for the integration of machine learning algorithms into agent-based simulation models. *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 28(5), 540–562. <https://doi.org/10.3897/jucs.73924>. **[IF (2021): 1.056 | M23]**

Категорија M33:

Marković, A., & Zornić, N. (2016). Trends in the Application of Agent-Based Modeling and Simulation. *Central European Conference on Information and Intelligent Systems*, September 21-23, 65-70 Varaždin, Croatia. ISSN: 1848-2295. **[награда за најбољи рад конференције | M33]**

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа докторске дисертације под називом „Методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване на агентима“, кандидата Николе Зорнића, Комисија констатује да је докторска дисертација написана у складу са свим захтевима стандарда научно-истраживачког рада, као и да испуњава услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима, правилницима и Статутом Факултета организационих наука, Универзитета у Београду.

Докторска дисертација се бави развојем хибридног приступа моделирању процеса доношења одлука од стране агената, односно укључивањем алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима. Циљ докторске дисертације је био да се развије и имплементира методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у симулационе моделе засноване на агентима. Представљен је начин за унапређење традиционалног приступа, који се заснива на коришћењу функције корисности, а која у моделе уноси одређени ниво субјективности и умањује веродостојност модела.

Тема докторске дисертације је веома актуелна, а резултати добијени истраживањем одговарају предмету и циљевима истраживања. Све хипотезе постављене у истраживању су тестиране на релевантним примерима. Такође, резултатима истраживања је потврђена општа хипотеза, тј. након спроведеног истраживања, развијен је и у дисертацији представљен хибридни приступ за интеграцију алгоритама машинског учења у разматране моделе.

Истраживање приказано у дисертацији је оригинално, а резултати пружају допринос развоју науке у домену рачунарске симулације. Резултати истраживања могу бити примењени у пракси, приликом развоја симулационих модела засноване на агентима, када су доступни историјски подаци који се односе на доношење одлука од стране агената.

Из истраживања уско везаног за тему докторске дисертације, проистекла су два научна рада, од којих је један објављен у међународном часопису *Journal of Universal Computer Science (J.UCS)* и други, који је изабран за најбољи рад на конференцији *Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS)* 2016. године. С обзиром на постигнуте резултате, комплексност, актуелност и интердисциплинарност обрађене теме, ова дисертација задовољава највише научне критеријуме и показује способност кандидата Николе Зорнића за самосталан научно-истраживачки рад.

На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета организационих наука да се докторска дисертација под називом „Методолошки оквир за интеграцију алгоритама машинског учења у моделе симулације засноване

на агентима“, кандидата Николе Зорнића, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Александар Марковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

др Милија Сукновић, редовни професор
Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

др Борис Делибашић, редовни професор
Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

др Вељко Јеремић, редовни професор
Универзитет у Београду – Факултет организационих наука

др Феђа Нетјасов, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет