

Факултет Технички факултет у Бору

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

(Број захтева)

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

(Датум)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ **РАДМИЛА (Љубомир) ЈАНКОВИЋ**
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму **Инжењерски менаџмент**

пријавио је докторску дисертацију под називом:

Развој и имплементација нумеричког модела за предикцију вредности еколошког отиска, засновано на методама машинског учења

из научне области: **Инжењерски менаџмент**

Универзитет је дана 28.11.2019. својим актом под бр. 61206-4690/2-19 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Развој и имплементација нумеричког модела за предикцију вредности еколошког отиска, засновано на методама машинског учења

Име и презиме ментора: **Др Иван Михајловић,**
редовни професор, Технички факултет у Бору

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној **14.06.2021.** године одлуком факултета под бр. VI/4-23-4 , у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Ђорђе Николић	ред. професор	Инжењерски менаџмент	Технички факултет у Бору
2.	Др Предраг Ђорђевић	ван. професор	Инжењерски менаџмент	Технички факултет у Бору
3.	Др Лазар Велимировић	виши научни сарадник	Математика, компјутерске науке и механика	Математички институт САНУ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 05.07.2021.године

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 16.09.2021. године

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној 16.09.2021. године

одлуком факултета под бр. VI/4-25-146, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Ђорђе Николић	ред. професор	Инжењерски менаџмент	Технички факултет у Бору
2.	Др Предраг Ђорђевић	ван. професор	Инжењерски менаџмент	Технички факултет у Бору
3.	Др Лазар Велимировић	виши научни сарадник	Математика, компјутерске науке и механика	Математички институт САНУ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

- Прилози:
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

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

Универзитет у Београду
Технички факултет у Бору
Број: VI/4-25-14а
Бор, 16. 09. 2021. године

На основу чл. 49. Статута Техничког факултета у Бору, чл. 44. Правилника о докторским студијама на Техничком факултету у Бору и чл. 20. став 11. Пословника о раду Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору, Наставно-научно веће Факултета електронским изјашњавањем до 15. 09. 2021. године, донело је

ОДЛУКУ

I Усваја се Извештај Комисије за оцену докторске дисертације кандидата **Радмиле Јанковић**, мастер инж. менаџмента, студента докторских академских студија студијског програма Инжењерски менаџмент, под називом: „Развој и имплементација нумеричког модела за предикцију вредности еколошког отиска, засновано на методама машинског учења“, на који није било примедби.

II Универзитет у Београду је дана **28. 11. 2019. године** дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

III Радови из научних часописа са листе која је утврђена као релевантна за вредновање научне компетенције у одређеном научном пољу:

Рад у међународном часопису (M21)

1. **Janković, R.**, Mihajlović, I., Štrbac, N., & Amelio, A. (2020). Machine learning models for ecological footprint prediction based on energy parameters. Neural Computing & Applications. 33, (pp. 7073-7087). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05476-4>; часопис је на SCI листи са IF(2019)=4.774, ранг часописа M21 - 23/137 за 2019. годину.

IV Одлуку доставити надлежном Већу научних области Универзитета у Београду, ради давања сагласности. Докторска дисертација из става 1. ове одлуке подобна је за одбрану након добијања сагласности именованог Већа Универзитета.

Доставити:

- именованој
- Већу научних области Универзитета у Београду
- студентској служби
- архиви

ПРЕДСЕДНИК
НАСТАВНО НАУЧНОГ ВЕЋА

ДЕКАН

Проф. др Нада Штрбац

Универзитет у Београду
Технички факултет у Бору
Број: VI/4-25-146
Бор, 16. 09. 2021. године

На основу чл. 49. Статута Техничког факултета у Бору, чл. 45. Правилника о докторским студијама на Техничком факултету у Бору и чл. 20. став 11. Пословника о раду Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору, Наставно-научно веће Факултета електронским изјашњавањем до 15. 09. 2021. године, донело је

О Д Л У К У

I Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације кандидата **Радмиле Јанковић**, мастер инж. менаџмента, студента докторских академских студија студијског програма Инжењерски менаџмент, под називом: „Развој и имплементација нумеричког модела за предикцију вредности еколошког отиска, засновано на методама машинског учења“, у саставу:

1. **др Ђорђе Николић**, радовни професор, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, председник комисије;
2. **др Предраг Ђорђевић**, ванредни професор, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, члан комисије;
3. **др Лазар Велимировић**, виши научни сарадник, Математички институт САНУ, члан комисије.

II Одлуку доставити надлежном Већу научних области Универзитета у Београду, ради давања сагласности. Докторска дисертација из става 1. ове одлуке подобна је за одбрану након добијања сагласности именованог Већа Универзитета.

Доставити:

- именованој
- Већу научних области Универзитета у Београду
- студентској служби
- архиви

ПРЕДСЕДНИК
НАСТАВНО НАУЧНОГ ВЕЋА

ДЕКАН

Проф. др Нада Штрбац

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији кандидата Радмиле Јанковић, мастер инжењера менаџмента

Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору, број VI/4-23-4 од **13.06.2021. године**, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Радмиле Јанковић под насловом:

**“РАЗВОЈ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА ЗА ПРЕДИКЦИЈУ
ВРЕДНОСТИ ЕКОЛОШКОГ ОТИСКА, ЗАСНОВАНО НА МЕТОДАМА
МАШИНСКОГ УЧЕЊА“**

Након прегледа достављене докторске дисертације и других пратећих докумената, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Хронологија одобравања у изради докторске дисертације протекла је следећом динамиком:

- Дана **02.09.2019. године**, кандидат Радмила Јанковић, мастер инжењер менаџмента, поднела је пријаву предлога теме докторске дисертације, заведене под бројем **VI-1/10-164**, Катедри за менаџмент, Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду. Даље, Наставно-научном већу Техничког факултета у

Бору, Универзитета у Београду, предложена је Комисија за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације кандидата Радмиле Јанковић.

- **Дана 12.09.2019. године**, Наставно-научно веће Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, донело је одлуку број **VI/4-31-16**, о именовању Комисије за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације кандидата Радмиле Јанковић.
- **Дана 14.11.2019. године**, одлуком број **VI/4-2-9**, Наставно-научно веће Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, прихватило је Извештај Комисије о научној заснованости теме за израду докторске дисертације. При чему, за ментора је именован др Иван Михајловић, редовни професор Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду.
- Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду на седници одржаној дана **28.11.2019. године**, донело је одлуку број: **61206-4690/2-19**, о давању сагласности на предлог теме за израду докторске дисертације кандидата Радмиле Јанковић, под називом: “Развој и имплементација нумеричког модела за предикцију вредности еколошког отиска, засновано на методама машинског учења”.
- **Дана 13.06.2021. године**, Наставно-научно веће Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду одлуком број **VI/4-23-4** именовало је Комисију за преглед, оцену и одбрану урађене докторске дисертације кандидата Радмиле Јанковић, у саставу: др Ђорђе Николић, редовни професор, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору (председник Комисије); др Предраг Ђорђевић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору (члан); др Лазар Велимировић, виши научни сарадник, Математички институт САНУ (члан).

1.2. Научна област дисертације

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације припада техничко-технолошкој научној области, односно ужој научној области инжењерски менаџмент.

За ментора је одређен др Иван Михајловић, редовни професор Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, који је на основу досад објављених радова компетентан да руководи израдом ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Радмила Јанковић рођена је 16.04.1990. године у Бору (Србија), где је завршила основну и средњу школу. На Техничком факултету у Бору, на студијском програму Инжењерски менаџмент, 2015. године је завршила основне академске студије. Мастер студије је завршила на истом факултету 2016. године са просечном оценом 10/10 и оценом 10 на одбрани мастер рада чиме је стекла звање мастер инжењер менаџмента. По завршетку мастер студија уписала је докторске студије октобра 2016. године на Техничком

факултету у Бору на студијском програму Инжењерски менаџмент, где је положила све испите са просечном оценом 10/10.

Од 2017. године, ради на Математичком институту САНУ најпре као истраживач приправник, а затим од 2019. године као истраживач сарадник.

Марта 2018. године била је предавач по позиву на семинару Decision making – theory, technology and practice одржаном у Нишу, под темом "Using decision trees for educational data mining". Маја 2018. године учествовала је на манифестацији Мај месец математике, где је одржала радионицу под називом "Креирање анимације еколошке пирамиде употребом Јава скрипт-а", док је маја 2019. године на истој манифестацији одржала радионицу за ученике основне школе под називом „Одређивање температуре на основу географске ширине и дужине“. Члан је организационог одбора eNergetics конференције од 2017-2021. године, а била је и у организационом одбору радионице Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding Workshop (VIPERC2019) која је била одржана у склопу конференције Italian Research Conference on Digital Libraries. Радмила Јанковић је била и ко-председавајућа на радионици под називом 1st Workshop on Machine Learning, Intelligent Systems and Statistical Analysis for Pattern Recognition in Real-life Scenarios (ML-ISAPR 2018) која је била одржана у склопу 9th International Conference on Information Intelligence Systems Applications јула 2018, као и члан организационог одбора конференције PaKSom. Члан је уређивачког одбора студентског часописа Engineering Management који издаје Технички факултет у Бору.

Кандидат Радмила Јанковић аутор је и коаутор 34 радова, од чега је 3 рада публиковано у категорији M21, један рад је публикован у категорији M22, 6 радова је публиковано у оквиру категорије M50, 3 рада су публикована у оквиру категорије M10, док је 21 рад публикован у зборницима са међународних научних скупова (M30).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Предмет и циљ дисертације

Адекватно управљање и потрошња природних ресурса од пресудне је важности за постизање одрживости. Као један од индикатора одрживости, еколошки отисак указује на потребе човечанства за природним ресурсима и пружа могућност праћења и формирања стратегије за њихову рационалну потрошњу.

Предмет овог истраживања обухвата предикцију еколошког отиска на основу броја становника у различитим регионима и примарне енергетске потрошње из различитих извора и то: (1) угља, (2) нафте, (3) природног гаса, (4) нуклеарних извора, (5) ветра, (6) соларних извора, (7) хидро извора и (8) других обновљивих извора. Основни циљ истраживања подразумева да се испита да ли се на основу оваквог сета података може

извршити поуздано предвиђање вредности еколошког отиска коришћењем метода машинског учења.

2.2. Истраживачка питања од којих се полазило у истраживању

Полазећи од чињенице да производња и потрошња електричне енергије значајно утиче на квалитет животне средине, те да одређени енергенти попут фосилних горива повећавају еколошки отисак планете смањујући доступни биокапацитет, наметнула се потреба за израдом поузданих модела предвиђања вредности еколошког отиска као једног од показатеља одрживости. У складу са напред наведеним, као и на основу изведених литературних извора, постављена су основна истраживачка питања и то:

ОИ1: Да ли је могуће развити поуздани нумерички модел предвиђања вредности еколошког отиска коришћењем метода машинског учења, а на основу популационих и енергетских параметара?

ОИ2: Да ли је могуће извршити адекватну оптимизацију параметара машинских модела како би тачност предвиђања била висока?

ОИ3: На који начин се могу вештачки генерисати подаци који би били погодни за додану валидацију перформанси модела?

На основу основних истраживачких питања дефинисана су и следећа додатна истраживачка питања:

ДИ1: Да ли постоји статистички значајна корелација између енергетске потрошње из фосилних извора и еколошког отиска потрошње?

ДИ2: Да ли је корелација између енергетске потрошње из фосилних горива и еколошког отиска потрошње позитивна?

ДИ3: Да ли постоји статистички значајна корелација између енергетске потрошње из обновљивих извора енергије и еколошког отиска потрошње?

ДИ4: Да ли је корелација између енергетске потрошње из обновљивих извора и еколошког отиска потрошње негативна?

2.3. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Радмиле Јанковић под насловом: **“РАЗВОЈ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА ЗА ПРЕДИКЦИЈУ ВРЕДНОСТИ ЕКОЛОШКОГ ОТИСКА, ЗАСНОВАНО НА МЕТОДАМА МАШИНСКОГ УЧЕЊА”** написана је на 130 страна и састоји се од 7 поглавља, након чега следе литература и биографија кандидата. На крају дисертације налазе се стандардни прилози (Обрасци 5, 6, 7 из Правилника о докторским студијама на Техничком факултету у Бору).

Садржај дисертације:

Поглавље 1. Увод

Поглавље 2. Еколошки отисак – појам, дефиниција и значај

Поглавље 3. Енергија, еколошки отисак и одрживост

Поглавље 4. Преглед претходних истраживања

Поглавље 5. Методологија истраживања

Поглавље 6. Резултати и дискусија

Поглавље 7. Закључак

Литература

Биографија

Прилози:

Прилог 1 – Изјава о ауторству (Образац 5)

Прилог 2 –Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада (Образац 6)

Прилог 3–Изјава о коришћењу (Образац 7)

Дисертација је илустрована са 43 слике и садржи 13 табела, а литературни преглед садржи податке о 214 литературних цитата.

2.4. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу (*Увод*) дата су уводна разматрања о докторској дисертацији, где је укратко представљен концепт еколошког отиска и његова важност за одрживост и заштиту животне средине, са посебним фокусом на везу између еколошког отиска и електричне енергије. У овом делу су дате и основне статистике о примарној енергетској потрошњи из обновљивих и необновљивих извора, као и о порасту глобалних емисија угљен-диоксида које су директно повезане са концептом еколошког отиска. Додатно, представљен је и значај примене метода машинског учења за потребе израде предикционих модела високе тачности. У овом поглављу су такође дефинисани циљеви докторске дисертације и постављена су истраживачка питања.

У другом поглављу (*Еколошки отисак – појам, дефинисање и значај*) детаљно је представљен појам еколошког отиска, као и његов значај са аспекта климатских промена и одрживости. У склопу овог поглавља, а на основу истражене литературе, представљене су и неке од предности и недостатака еколошког отиска како би овај индикатор могао да се

јасније сагледа и како би његова примена као индикатора одрживости могла бити оправдана.

У трећем поглављу (*Енергија, еколошки отисак и одрживост*) представљена је веза између енергије, еколошког отиска и концепта одрживости. Најпре, представљене су основне врсте извора енергије – енергија из необновљивих извора (укључујући фосилна горива и нуклеарну енергију) и енергија из обновљивих извора која укључује соларну енергију, енергију ветра, хидроенергију и енергију из биомасе. За сваки тип енергента је, најпре, образложен процес производње електричне енергије, а затим су представљене њене предности и недостаци, као и основни статистички подаци о њеној производњи, односно потрошњи. На крају, у оквиру овог поглавља дискутовано је о вези између одрживости и климатских промена, као и о утицају енергетског сектора на климатске промене.

У четвртном поглављу (*Преглед претходних истраживања*) дат је детаљан теоријски приказ истраживања везаних за факторе утицаја на еколошки отисак и њихово моделовање. У том смислу, представљена су истраживања која су користила различите математичке, статистичке и моделе машинског учења за моделовање производње и потрошње електричне енергије, одрживости и еколошког отиска, како би се објективно сагледале могућности за унапређење постојећих модела.

У петом поглављу (*Методологија истраживања*) представљен је концепт машинског учења, врсте и потенцијали примене оваквих метода. У склопу овог поглавља представљени су и подаци који су коришћени за моделовање, а који су прибављени из јавно доступних база. У овом поглављу описане су и методе и алгоритми који су коришћени за моделовање и то: корелациона анализа, регресија коришћењем методе к-најближих суседа, вештачке неуронске мреже, као и алгоритам „Random Forest“. За потребе оптимизације параметара одабраних модела коришћена је метода Бајесове оптимизације (TPE), док је за потребе генерисања вештачког сета података коришћен SMOGN алгоритам. На крају овог поглавља дат је опис метода коришћених за евалуацију модела.

У шестом поглављу (*Резултати и дискусија*) приказани су резултати моделовања. Најпре, дат је опис резултата дескриптивне и корелационе анализе, а затим су представљени оптимални параметри за сваки од развијених – оригиналних модела машинског учења. У склопу овог поглавља даље су дати резултати моделовања применом метода машинског учења, након чега су на основу оптимизованих параметара састављена четири модела и то: регресиони модел к-најближих суседа, „Random forest“ модел, модел вештачке неуронске мреже са ReLU активационом функцијом и модел вештачке неуронске мреже са SPOCU активационом функцијом. Додатна валидација најбољег модела извршена је на сету података који је вештачки генерисан. У циљу олакшане калкулације, модел са најбољим

перформансама (што је у овом случају модел к-најближих суседа) је имплементиран у склопу графичког корисничког интерфејса, развијеног у програмском језику Пајтон (енгл. Python). На крају овог поглавља дата је дискусија резултата и поређење са резултатима из литературе.

У седмом поглављу (*Закључак*) изведени су закључци истраживања, образложен је научни допринос, као и ограничења истраживања.

У склопу *литературе* приказан је списак литературних и интернет извора који су коришћени приликом израде докторске дисертације.

На крају, дата је *биографија* кандидата.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Моделовање еколошког отиска као индикатора одрживости претходних година постало је предмет већег научног интересовања, с обзиром да су климатске промене горући проблем у целом свету, те да је неопходна брза и рационална реакција и праћење свих фактора који би могли довести до ублажавања ефеката климатских промена. Најчешће се у литератури срећу статистички модели који испитују повезаност одређених еколошких, економских и демографских фактора и одрживости. Са развојем метода машинског учења јавља се могућност развоја прецизнијих модела који омогућавају једноставнију али и тачнију предикцију и калкулацију жељених вредности.

Истраживање у овој дисертацији проистекло је на основу претходне темељне анализе литературе. Резултати овог истраживања обухватају развијене моделе машинског учења за предикцију вредности еколошког отиска на основу енергетских и популационих фактора. Енергетски и популациони фактори значајно утичу на одрживост, а самим тим и на еколошки отисак, јер се у свету енергетска потрошња и даље већински заснива на фосилним горивима која емитују високе концентрације штетних гасова. Додатно, број становника битно утиче на одрживост јер се са повећањем популације повећава и потрошња природних ресурса. Значај и оригиналност резултата добијених у склопу ове дисертације је вишеструк. Најпре, показано је да модели машинског учења могу адекватно предвидети вредности стохастичке и детерминистичке природе, као што су вредности које се користе у еколошким моделовањима. Даље, параметри модела оптимизовани су применом Бајесове оптимизације, те је на тај начин обезбеђено да модели постигну максималне могуће перформансе, у складу са подацима који су коришћени за моделовање. Како је код еколошких моделовања често присутан проблем непотпуних и/или недовољно великих сетова података, у овом истраживању извршено је и генерисање синтетичких

података како би се испитале могућности за примену таквих података у циљу додатне валидације развијених модела. Последње, ради олакшане калкулације еколошког отиска, развијени модел са најбољим перформансама интегрисан је у графички кориснички интерфејс. Развој предикционих модела и израда графичког интерфејса спроведена је коришћењем програмског језика Пајтон.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде ове докторске дисертације коришћено је 214 литературних извора, са посебним фокусом на истраживања из истакнутих часописа са импакт фактором новијег датума. Како би се прецизније објаснили одређени појмови повезани са еколошким отиском и моделовањем применом машинског учења, коришћена је и литература старијег датума.

Референце које су суштински најважније и најзначајније за истраживање у овој дисертацији су:

- H. Altıntaş and Y. Kassouri, “Is the environmental Kuznets Curve in Europe related to the per-capita ecological footprint or CO₂ emissions?,” *Ecological Indicators*, vol. 113, p. 106187, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106187.
- A. A. Aşici and S. Acar, “Does income growth relocate ecological footprint?,” *Ecological Indicators*, vol. 61, pp. 707–714, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.022.
- M. O. Bello, S. A. Solarin, and Y. Y. Yen, “The impact of electricity consumption on CO₂ emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: The role of hydropower in an emerging economy,” *Journal of Environmental Management*, vol. 219, pp. 218–230, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.04.101.
- J. Bergstra, R. Bardenet, Y. Bengio, and B. Kégl, “Algorithms for Hyper-Parameter Optimization,” in *25th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2011)*, 2011, vol. 24.
- M. Borucke *et al.*, “Accounting for demand and supply of the biosphere’s regenerative capacity: The National Footprint Accounts’ underlying methodology and framework,” *Ecological Indicators*, vol. 24. Elsevier B.V., pp. 518–533, 01-Jan-2013, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.08.005.
- Danish, S. T. Hassan, M. A. Baloch, N. Mahmood, and J. W. Zhang, “Linking economic growth and ecological footprint through human capital and biocapacity,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 47, p. 101516, May 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101516.
- M. A. Destek and A. Sinha, “Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic Co-operation and development countries,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, p. 118537, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118537.

- J. Drechsler and J. P. Reiter, “An empirical evaluation of easily implemented, nonparametric methods for generating synthetic datasets,” *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 55, no. 12, pp. 3232–3243, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.csda.2011.06.006.
- O. Fernández-Amador, J. F. Francois, D. A. Oberdabernig, and P. Tomberger, “The methane footprint of nations: Stylized facts from a global panel dataset,” *Ecological Economics*, vol. 170, p. 106528, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.106528.
- I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep learning*. 2016.
- L. Huimin, “The impact of human behavior on ecological threshold: Positive or negative?-Grey relational analysis of ecological footprint, energy consumption and environmental protection,” *Energy Policy*, vol. 56, pp. 711–719, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.044.
- R. B. Jackson *et al.*, “Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 7, p. 071002, Jul. 2020, doi: 10.1088/1748-9326/ab9ed2.
- B. Jozefat, “Climate Change and All Evidences of Global Warming,” in *Climate Change*, Momentum Press, 2015.
- V. Kulkarni and B. Garbinato, “Generating synthetic mobility traffic using RNNs,” in *Proceedings of the 1st Workshop on GeoAI: AI and Deep Learning for Geographic Knowledge Discovery, GeoAI 2017*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1145/3149808.3149809.
- P. Moriarty and D. Honnery, “Can renewable energy power the future?,” *Energy Policy*, vol. 93, pp. 3–7, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.051.
- M. Moyer and C. Storrs, “How Much Is Left? The Limits of Earth’s Resources,” *Scientific American*, Sep. 2010.
- K. P. Murphy, *Machine Learning: A probabilistic Perspective*. The MIT Press.
- W. E. Rees, “Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out,” *Environment and Urbanization*, vol. 4, no. 2, pp. 121–130, Sep. 1992, doi: 10.1177/095624789200400212.
- W. Rees and M. Wackernagel, “Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable - and why they are a key to sustainability,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 16, no. 4–6, pp. 223–248, Sep. 1996, doi: 10.1016/S0195-9255(96)00022-4.
- W. Rosa, Ed., “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development,” in *A New Era in Global Health*, New York, NY: Springer Publishing Company, 2018.
- M. Stehlík, J. Dušek, and J. Kiseľák, “Missing chaos in global climate change data interpreting?,” *Ecological Complexity*, vol. 25, pp. 53–59, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.ecocom.2015.12.003.
- M. Wackernagel and C. Monfreda, “Ecological Footprints and Energy,” *Encyclopedia of Energy*, vol. 2, 2004.

- WWF, “Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss,” Gland, Switzerland, 2020.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Како би се реализовали постављени циљеви истраживања и како би се одговорило на истраживачка питања, истраживачки процес спроведен је у неколико фаза. Најпре, прикупљени су подаци који су затим обрађени и анализирани употребом дескриптивне статистичке анализе и корелационе анализе. На овај начин добијени су прелиминарни резултати и стекао се увид у природу података и веза између посматраних променљивих. Даље, приступљено је изради хибридних модела машинског учења у склопу којих је интегрисана оптимизација параметара модела како би се обезбедиле максималне могуће перформансе модела. У том смислу коришћени су алгоритми к-најближих суседа, Random forest, као и вештачке неуронске мреже, док је оптимизација урађена коришћењем Tree Parzen Estimator методе која се заснива на Бајесовој оптимизацији. Изабрани алгоритми машинског учења у пракси често достижу високу тачност и применљиви су на широк дијапазон проблема.

У циљу верификације добијених резултата, састављен је вештачки сет података применом SMOGN алгоритма који је првенствено развијен за потребе балансирања података за регресију. С обзиром да је најбоље перформансе постигао модел к-најближих суседа, његове перформансе додатно су валидиране на вештачком сету, чиме је потврђена адекватност модела за потребе предикције вредности еколошког отиска.

3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати у оквиру ове докторске дисертације имају значајан научни и друштвени допринос. Значај еколошког отиска из перспективе одрживости проистиче из његове широке применљивости и могућности комбинације различитих фактора за његову процену и анализу. У складу са тим, резултати истраживања из овог рада могу користити доносиоцима одлука на различитим нивоима и у различитим индустријама у циљу процене потрошње природних ресурса, као и за доношење одлука везаних за расподелу ресурса. Додатно, уз помоћ развијених модела могуће је извршити прорачун еколошког отиска, односно потреба организација, сектора, градова, држава и региона за природним ресурсима, а на основу енергетске потрошње. Треба напоменути и да овакав начин прорачуна омогућава и планирање енергетске потрошње у складу са потребама за смањењем еколошког отиска. На крају, резултати добијени у овом истраживању олакшавају развој стратегије за прелазак на обновљиве изворе енергије у циљу очувања природних ресурса и постизања одрживости.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Урађена докторска дисертација, анализа добијених резултата, њихово тумачење, те проистекли и објављени научни радови указују на способност кандидата Радмиле Јанковић, мастер инжењер менаџмента, за самостални научни рад као и за активно учешће у тимском раду.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове дисертације, кандидат је остварио следеће научне доприносе:

- По први пут у литератури примењени су регресиони алгоритми к-најближих суседа и Random forest за предикцију еколошког отиска на основу енергетских параметара и популације.
- Развијена су два оригинална модела вештачких неуронских мрежа. Један модел користи ReLU активациону функцију, док други користи SPOCU активациону функцију која је по први пут у литератури примењена за моделовање реалних проблема.
- У овом истраживању формиран је јединствен скуп података који удружује енергетску потрошњу и популациони фактор као једне од основних фактора утицаја на одрживост.
- Хиперпараметри сваког од развијених модела оптимизовани су применом *Tree-structured Parzen estimator* методе Бајесове оптимизације чиме су обезбеђене максималне перформансе модела.
- Перформансе најбољег модела валидиране су на синтетичком сету података који је генерисан применом SMOGN алгоритма.
Модел са најбољим перформансама имплементиран је у склопу графичког корисничког интерфејса како би се олакшао прорачун вредности еколошког отиска потрошње.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Моделовање еколошког отиска и фактора његовог утицаја представља значајно поље истраживања. Са порастом значаја смањења климатских промена намеће се потреба за прецизном анализом различитих друштвених, економских и еколошких фактора који могу допринети очувању одрживости, те је ова област истраживања у центру интересовања многих истраживача.

Циљеви истраживања у оквиру ове дисертације остварени су у потпуности, док је на основна и допунска истраживачка питања одговорено у целости. Због тога резултати овог истраживања унапређују доступна сазнања о начину прорачуна будућих вредности еколошког отиска са посебним освртом на енергетску потрошњу. Са друге стране, ово истраживање има и одређена ограничења и то:

- Приликом анализе везе између потрошње енергије и еколошког отиска није узета у обзир каузалност између ових параметара, па се не може закључити да ли постоји узрочно-последична веза између њих.
- Моделовање наведених фактора не узима у обзир временски фактор, међутим овакав однос може бити предмет будућих истраживања.
- Како се еколошки отисак састоји од неколико различитих типова земљишта, може се претпоставити да сваки тип доприноси климатским променама различитим интензитетом. У овом истраживању је, пак, еколошки отисак потрошње посматран као кумулатив свих типова земљишта.
- Иако сет података чине подаци за 41 државу света, они нису анализирани појединачно по земљама, те се не могу износити закључци за сваку од држава појединачно.

4.3. Верификација научних доприноса

Верификација докторске дисертације је у складу са позитивним законским одредбама у Републици Србији и критеријумима Универзитета у Београду, међу којима се предвиђа и објављивање најмање једног рада из дисертације у часописима са импакт фактором (IF) где би кандидат требало да буде први аутор. Кандидат Радмила Јанковић, мастер инжењер менаџмента, је до тренутка предавања дисертације за јавну одбрану објавила један рад у часопису са IF са JCR листе, а који припада врхунском међународном часопису категорије M21.

Из ове дисертације, односно из њених делова, проистекли су следећи радови:

а) Категорија **M21** (Рад у врхунском међународном часопису):

1. **Janković, R.,** Mihajlović, I., Štrbac, N., & Amelio, A. (2020). Machine learning models for ecological footprint prediction based on energy parameters. *Neural Computing & Applications*. 33, (pp. 7073-7087). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05476-4>; часопис је на SCI листи са IF(2019)=4.774, ранг часописа M21 - 23/137 за 2019. годину.

б) Категорија **M33** (Саопштење са међународног скупа штампано у целини):

1. **Janković, R.,** Mihajlović, I., Amelio, A., & Draganov, I. (2021). Predicting the Ecological Footprint: A Case Study for Italy, Pakistan and China (Invited paper). In 56th International Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies – ICEST, June 16-18, 2021, Sozopol, Bulgaria.
2. **Janković, R.,** Mihajlović, I., & Amelio, A. (2019). Time Series Vector Autoregression Prediction of the Ecological Footprint based on Energy Parameters. In Proceedings of the 5th Jubilee Virtual International Conference on Science Tecnology and Management in Energy, Niš, October 28-29, 2019 (pp. 55-62).
3. **Janković, R.,** & Mihajlović, I. (2018). Development and implementation of the numerical model for predicting the values of ecological footprint, based on the Monte Carlo methodology. In Proceedings of FIKUSZ Symposium for Young Researchers (pp. 189-200). Óbuda University Keleti Károly Faculty of Economics.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У дисертацији кандидата Радмиле Јанковић добијени су бројни оригинални резултати који омогућавају надоградњу досадашњих резултата представљених у литератури. Резултати који представљају оригиналност ове дисертације односе се на дефинисање оригиналних модела машинског учења за предикцију вредности еколошког отиска на основу енергетских и популационих фактора. Формирани модели се могу користити за потребе праћења еколошког отиска као фактора одрживости, и применљиви су за податке стохастичке и детерминистичке природе, као и за предвиђања у условима хаоса. Објављени рад у једном од водећих светских научних часописа (M-21) са JCR листе, као и три рада која су саопштена на међународним скуповима, од чега један рад саопштен по позиву, на најбољи начин потврђују ниво остварених резултата кандидата у овом раду.

На основу напред наведених чињеница Комисија са задовољством закључује да је докторска дисертација урађена према свим стандардима о научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Стандардима за акредитацију докторских студија, Статутом Техничког факултета у Бору и критеријума које је прописао Универзитет у Београду.

Стога, Комисија предлаже Наставно-научном већу Техничког факултета у Бору да прихвати позитиван Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Радмиле Јанковић под називом: **“РАЗВОЈ И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА ЗА ПРЕДИКЦИЈУ ВРЕДНОСТИ ЕКОЛОШКОГ ОТИСКА, ЗАСНОВАНО НА МЕТОДАМА МАШИНСКОГ УЧЕЊА”**, да исту изложи на увид јавности и упути на

коначно усвајање Већу научних области Техничких наука Универзитета у Београду, а да након тога позове кандидата на јавну одбрану.

У Бору, јуна 2021. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Проф. др Ђорђе Николић, редовни професор
Технички факултет у Бору, Универзитет у Београду

Проф. др Предраг Ђорђевић, ванредни професор
Технички факултет у Бору, Универзитет у Београду

др Лазар Велимировић, виши научни сарадник
Математички институт САНУ
