

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ФАКУЛТЕТ ОРГАНИЗАЦИОНИХ НАУКА

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији
Кандидата Невене Миленковић

Одлуком 05-01 бр 3/92-4 од 03.09.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидаткиње **Невене Миленковић** под насловом

„Развој алгоритама машинског учења за периодична унутар-секвенцијална правила и динамичку корисност ставки“

и на основу тога подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Невена Миленковић је 2017/18. године уписала докторске академске студије на Факултету организационих наука, Универзитета у Београду (студијски програм: Информациони системи и квантитативни менаџмент, изборно подручје: Софтверско инжењерство).

Након што је положила све предвиђене испите, кандидаткиња је 04.09.2025. године пријавила Приступни рад на докторским студијама. Одлуком 05-01 бр. 3/87-11 од 22.09.2025. године, формирана је Комисија за преглед и одбрану Приступног рада и оцену научне заснованости пријављене докторске дисертације. За потенцијалног ментора именован је др Борис Делибашић, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет организационих наука. Приступни рад под насловом „Развој алгоритама машинског учења за откривање унутар-секвенцијалних периодичних правила и скупова ставки са динамичном променом предзнака корисности“ одбрањен је 14.10.2025. године.

Одлука 05-01 бр. 3/127-8 о усвајању извештаја Комисије о научној заснованости пријављене докторске дисертације донета је на Наставно-научном већу Факултета организационих наука одржаном 27.11.2025. године. Одлуком Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду од 17.12.2025. 02 бр. 61206-4434/2-24 дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације Невене Миленковић под називом „Развој алгоритама машинског учења за периодична унутар-секвенцијална правила и динамичку корисност ставки“. На Наставно-научном већу Факултета организационих наука од 26.12.2025. године одобрена је израда докторске дисертације кандидата Невене Миленковић. За ментора је именован проф. др Борис Делибашић.

Ментор др Борис Делибашић је 10.07.2026. године известио Наставно-научно веће Факултета организационих наука да је Невена Миленковић завршила израду докторске дисертације. Наставно-научно веће Факултета организационих наука је одлуком 05-01 бр 3/92-4 од 03.09.2026. године именовало Комисију за преглед и оцену завршене докторске дисертације у саставу:

1. др Милија Сукновић, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет организационих наука – председник Комисије;
2. др Милош Јовановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет организационих наука;
3. др Дејан Симић, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет организационих наука;
4. др Гордана Савић, редовни професор, Универзитет у Београду - Факултет организационих наука;
5. др Мирослав Марић, редовни професор, Универзитет у Београду – Математички факултет

1.2. Научна област дисертације

У оквиру ове докторске дисертације примарни предмет истраживања представља развој, методолошко утемељење и експериментална евалуација алгоритама машинског учења за откривање образаца у секвенцијалним и трансакционим подацима. Истраживање је усмерено на превазилажење ограничења постојећих метода у погледу моделовања динамичности, структурне сложености и променљивости реалних података.

У првом делу истраживања разматра се проблем откривања секвенцијалних правила, са посебним фокусом на вишеструка појављивања правила унутар појединачних секвенци, њихову периодичност и заступљеност кроз више секвенци. У том циљу развијен је алгоритам PISRuleGrowth за откривање периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци. Други део истраживања односи се на откривање скупова ставки високо-просечне корисности у трансакционим базама података у којима вредности корисности могу динамички мењати предзнак. За решавање овог проблема развијен је алгоритам МЕНАУРМ, који омогућава адекватну обраду мешовитих позитивних и негативних вредности корисности.

Докторска дисертација се може сврстати у научну област „Рачунарске науке – Машинско учење“, а у ужем смислу у научну област „Откривање образаца у подацима“. Поред наведених области, у дисертацији се разматрају и теме из области откривања секвенцијалних правила, откривања секвенцијалних образаца, откривања скупова ставки високе и високо-просечне корисности, као и развоја и експерименталне евалуације алгоритама за анализу сложених и динамичких података.

Ментор, проф. др Борис Делибашић, редовни професор Факултета организационих наука Универзитета у Београду, поседује одговарајуће компетенције за вођење докторске дисертације у научној области којој дисертација припада. Одговарајући научни радови ментора којима се документују наведене компетенције наводе се у документацији која прати поступак оцене докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Невена Миленковић рођена је 27.06.1992. године у Јагодини. Завршила је основну школу и гимназију општег смера у Свилајнцу. Основне студије на смеру Информациони системи и технологије на Факултету организационих наука Универзитета у Београду завршила је 2015. године. На истом факултету је 2017. године завршила и мастер студије на смеру Менаџмент и организација. Докторске студије на Факултету организационих наука Универзитета у Београду уписала је 2017. године, на студијском програму Информациони системи и квантитативни менаџмент, модул Софтверско инжењерство.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација, укупног обима 80 страница, садржи 14 слика и графичких приказа, 3 табеле и 72 литературна навода. На почетку дисертације дат је сажетак на српском и енглеском језику, а на крају дисертације се налазе закључак и списак коришћених референци.

Докторска дисертација се састоји из следећих поглавља и потпоглавља:

1. Увод

1.1. Предмет и циљ истраживања

1.2. Полазне хипотезе

1.3. Научне методе истраживања

1.4. Структура и организација рада

2. Теоријски оквир и сродне методе откривања образаца

2.1. Теоријски оквир области откривања секвенцијалних правила и периодичних образаца

2.2. Теоријски оквир области откривања скупова ставки високе корисности

3. Основни појмови и формулисање проблема истраживања

3.1. Дефинисање проблема периодичних унутар-секвенцијалних правила

3.2. Дефинисање проблема скупова ставки високо-просечне корисности са мешовитим вредностима корисности

4. Развој и имплементација предложених алгоритама

4.1. PISRuleGrowth: архитектура и логика алгорита

4.1.1. Скенирање базе података

4.1.2. Главна процедура

4.1.3. ExpandLeft

4.1.4. ExpandRight

4.1.5. Метода get_Single_Item_Rule_Occur

4.1.6. Метода is_PIS_Rule

4.1.7. Метода getNextIC

4.1.8. Метода countIC

4.1.9. Метода getRuleOccur

4.2. МЕНАУРМ: Модификације и обрада мешовитих вредности

5. Експериментална валидација и анализа резултата

5.1. Експериментална евалуација PISRuleGrowth алгорита

5.1.1. Поређење перформанси алгорита PISRuleGrowth са другим алгоритмима за генерисање секвенцијалних правила при истим вредностима параметара

5.1.2. Поређење перформанси PISRuleGrowth и других алгорита за генерисање секвенцијалних правила при генерисању истог броја правила

5.1.3. Поређење перформанси PISRuleGrowth алгорита и његове неоптимизоване верзије при варирању параметра minSup

5.1.4. Поређење перформанси PISRuleGrowth алгорита и његове неоптимизоване верзије при варирању параметра minConf

5.1.5. Поређење перформанси PISRuleGrowth алгорита и његове неоптимизоване верзије при варирању параметра maxStd

5.1.6. Поређење перформанси PISRuleGrowth алгорита и његове неоптимизоване верзије при варирању параметра minRa

5.1.7. Поређење перформанси PISRuleGrowth алгорита и његове неоптимизоване верзије при генерисању истог броја правила

5.2. Експериментална евалуација МЕНАУРМ алгорита

5.2.1. Поређење перформанси алгорита МЕНАУРМ и других алгорита високе корисности који обрађују негативне вредности корисности при истим вредностима параметара корисности

5.2.2. Предности алгорита МЕНАУРМ у односу на друге алгоритме високе корисности који обрађују негативне вредности корисности при истим вредностима параметара корисности

5.2.3. Предности алгорита МЕНАУРМ у односу на стандардне алгоритме за откривање скупова ставки високо-просечне корисности

6. Закључак

Референце

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље, Увод, даје теоријску и истраживачку мотивацију за развој метода откривања образаца у секвенцијалним и трансакционим подацима. Представљени су предмет и циљ истраживања, идентификовани су кључни проблеми постојећих приступа у области откривања секвенцијалних правила и скупова ставки високе корисности, а затим су дефинисане главна и четири посебне истраживачке хипотезе. Приказане су научне методе примењене у истраживању и структура докторске дисертације. Ово поглавље броји четири потпоглавља.

У **другом поглављу**, Теоријски оквир и сродне методе откривања образаца, дат је критички преглед постојећих истраживања у две области на које се дисертација односи. У првом делу разматран је развој метода за откривање секвенцијалних правила и периодичних образаца, укључујући алгоритме CMRules, RuleGrowth, ERMiner, TRuleGrowth, TopSeqRules и TNS. Посебно су анализирана ограничења постојећих приступа која се односе на евидентирање само једног појављивања правила по секвенци и одсуство критеријума периодичности и унутар-секвенцијалне учесталости. У другом делу приказан је развој метода за откривање скупова ставки високе и високо-просечне корисности, са посебним освртом на алгоритме који подржавају негативне вредности корисности. Анализирани су недостаци постојећих алгоритама при обради ставки чија корисност динамички мења предзнак, што је послужило као основа за дефинисање другог истраживачког проблема. Ово поглавље броји два потпоглавља.

У **трећем поглављу**, Основни појмови и формулисање проблема истраживања, формално су дефинисани концепти који представљају основу предложених алгоритамских решења. У првом делу уведене су дефиниције секвенцијалног правила унутар секвенце, валидног појављивања правила, подршке и поузданости на нивоу појединачне секвенце, као и периодичности засноване на стандардној девијацији периода. Уведен је и коефицијент периодичности секвенцијалног правила, којим се повезује појављивање правила кроз више секвенци, након чега је формално дефинисан проблем откривања периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци.

У **другом делу трећег поглавља** дефинисани су основни појмови у области откривања скупова ставки високо-просечне корисности, укључујући корисност, просечну корисност, горње границе корисности и структуре које се користе за сужавање простора претраге. Посебно је уведен појам мешовите корисности, којим се описују ставке и скупови ставки чија корисност кроз различите трансакције може попримати и позитивне и негативне вредности. На основу тога формално је дефинисан проблем откривања скупова ставки високо-просечне корисности у базама са динамичком променом предзнака корисности. Ово поглавље броји два потпоглавља.

У **четвртном поглављу**, Развој и имплементација предложених алгоритама, представљена су два нова алгоритамска решења — PISRuleGrowth и МЕНАУРМ. Рад алгоритама формално је приказан помоћу псеудокодова, уз детаљан опис структура података, поступака проширивања образаца и механизма за сужавање простора претраге. PISRuleGrowth је развијен на основу RuleGrowth приступа и прилагођен тако да, за разлику од традиционалних алгоритама, идентификује сва валидна појављивања правила унутар појединачних секвенци, проверава њихову периодичност и издаја правила заступљена у довољном броју секвенци.

У **наставку четвртог поглавља** представљен је МЕНАУРМ, развијен модификацијом алгорита ЕНАУРМ ради коректне обраде мешовитих и негативних вредности корисности. Описане су измене начина израчунавања горњих граница, сортирања и структура података, као и правила одбацивања и проширивања скупова ставки, са циљем спречавања преурањеног елиминисања потенцијално валидних образаца. Укупно је уведено осам кључних измена којима се обезбеђује тачност резултата уз задржавање ефикасности алгоритама. Ово поглавље броји два основна потпоглавља, при чему је архитектура алгоритама PISRuleGrowth додатно разложена на девет потпоглавља у којима су описане његове процедуре и помоћне методе.

У **петом поглављу**, Експериментална валидација и анализа резултата, спроведена је опсежна експериментална евалуација оба предложена алгоритама. Анализирани су време извршавања, потрошња меморије, скалабилност и карактеристике генерисаних образаца, уз поређење са релевантним постојећим алгоритмима. Експерименти у овом поглављу истовремено представљају основу за проверу четири посебне истраживачке хипотезе.

У **првом делу петог поглавља** извршена је евалуација алгоритама PISRuleGrowth на базама MSNBC, WeeklySales и OnlineRetail, које поседују различите структурне карактеристике. Алгоритам је поређен са алгоритмима RuleGrowth и ERMiner, а због специфичности нове класе

образаца развијена је и неоптимизована верзија NonOptPISRuleGrowth, која је коришћена за анализу ефеката предложених оптимизација. Испитан је утицај параметара minSup, minConf, maxStd и minRa на време извршавања и потрошњу меморије, као и понашање алгоритама при генерисању истог или приближно истог броја правила.

У другом делу петог поглавља експериментално је оцењен алгоритам МЕНАУРМ на трансакционим базама са негативним и мешовитим вредностима корисности. Његове перформансе упоређене су са алгоритмима који подржавају негативне вредности корисности, а посебно су анализиране предности примене високо-просечне уместо укупне корисности. Испитани су број и дужина генерисаних скупова ставки, њихова просечна корисност, укупна корисност, као и ефекти коректне обраде мешовитих вредности. Ово поглавље броји два основна потпоглавља, са укупно десет потпоглавља нижег нивоа у којима су приказане појединачне експерименталне анализе.

Шесто поглавље, Закључак, садржи синтезу резултата спроведеног истраживања и разматрање научних доприноса дисертације. На основу формализације проблема, развоја алгоритама и експерименталних резултата утврђено је да су потврђене све четири посебне хипотезе. Истакнуто је да PISRuleGrowth проширује област откривања секвенцијалних правила увођењем унутар-секвенцијалне периодичности и анализе кроз више секвенци, док МЕНАУРМ унапређује откривање скупова ставки високо-просечне корисности омогућавајући коректну обраду мешовитих и негативних вредности корисности. Заједнички допринос оба решења огледа се у прилагођавању алгоритама сложеним, динамичким и реалним подацима. Након закључка дат је преглед коришћених референци.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Савремени информациони системи генеришу велике количине сложених, хетерогених и динамичких података, због чега постоји потреба за развојем алгоритама који могу да открију значајне, интерпретабилне и практично употребљиве обрасце. У том контексту, области откривања секвенцијалних правила и скупова ставки високе корисности представљају актуелне правце истраживања у оквиру машинског учења и откривања образаца у подацима.

Оригиналност докторске дисертације огледа се у решавању два методолошки различита, али концептуално повезана проблема. У области откривања секвенцијалних правила уводи се нова класа образаца — периодична унутар-секвенцијална правила заједничка за више секвенци. За разлику од постојећих алгоритама, код којих се појављивање правила углавном посматра само једном на нивоу целе секвенце, предложени приступ узима у обзир сва валидна појављивања правила унутар појединачне секвенце, њихову периодичност и заступљеност кроз више различитих секвенци. За решавање овог проблема развијен је алгоритам PISRuleGrowth, заснован на приступу раста образаца и специјализованим структурама података.

Други оригинални допринос односи се на област откривања скупова ставки високо-просечне корисности. У дисертацији је формализован концепт мешовите корисности, који обухвата ставке и скупове ставки чија корисност у различитим трансакцијама динамички мења предзнак, од позитивног ка негативном и обрнуто. Показано је да постојећи алгоритми у таквим условима могу преурађено елиминисати валидне обрасце и тиме нарушити тачност резултата. У циљу превазилажења наведених ограничења развијен је алгоритам МЕНАУРМ, који омогућава коректну обраду мешовитих и негативних вредности корисности и откривање скупова ставки високо-просечне корисности у динамичким трансакционим подацима.

Савременост предложених решења додатно се огледа у настојању да се постигне равнотежа између тачности, интерпретабилности и рачунарске ефикасности. Предложени алгоритми не представљају само теоријска проширења постојећих модела, већ су експериментално валидирани на реалним скуповима података и упоређени са релевантним постојећим алгоритмима у погледу времена извршавања, потрошње меморије, скалабилности и квалитета генерисаних образаца.

На основу изложеног, може се закључити да докторска дисертација доноси оригиналне научне доприносе у две комплементарне области откривања образаца у подацима, кроз формализацију нових истраживачких проблема и развој алгоритама PISRuleGrowth и МЕНАУРМ. Предложена решења проширују могућности постојећих метода и отварају простор за даља истраживања у области анализе сложених, динамичких и реалних секвенцијалних и трансакционих података.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Докторска дисертација садржи укупно 72 литературна навода. За израду дисертације коришћена је релевантна домаћа и, пре свега, међународна научна литература из области машинског учења, откривања образаца у подацима, откривања секвенцијалних образаца и правила, као и откривања скупова ставки високе и високо-просечне корисности. Коришћени су радови објављени код водећих међународних издавача и у часописима и зборницима издавача као што су IEEE, Springer, Elsevier, ACM и Wiley, као и релевантни скупови података и репозиторијуми намењени експерименталној евалуацији алгоритама.

Теоријска основа истраживања у области секвенцијалних података ослања се на фундаментални рад Agrawal и Srikant (1995), којим је постављен један од основних оквира за откривање секвенцијалних образаца. Даљи развој ове области обухватао је методе усмерене на смањивање броја генерисаних образаца и увођење додатних ограничења, као што су затворени, максимални, top-k и периодични обрасци. Посебан значај за истраживање имају радови Fournier-Viger-a и коаутора, у којима су развијени алгоритми и концепти за откривање периодичних образаца у једној и више секвенци, као и приступи за откривање стабилних и ретких корелисаних периодичних образаца.

За развој првог алгоритамског доприноса дисертације нарочито је значајна литература из области откривања секвенцијалних правила. CMRules алгоритам Fournier-Viger-a и коаутора представља један од раних приступа за откривање делимично уређених секвенцијалних правила заједничких за више секвенци. RuleGrowth је увео ефикаснији приступ заснован на расту образаца, док је ERMiner развијен као бржа варијанта која користи класе еквиваленције и специјализоване структуре података. Разматрани су и алгоритми TRuleGrowth, TopSeqRules и TNS, којима су у област секвенцијалних правила уведена ограничења временског прозора, top-k приступ и критеријуми нередундантности. Анализа ових радова показала је да постојећи приступи, иако ефикасни у откривању правила заједничких за више секвенци, углавном посматрају само једно појављивање правила по секвенци и не обрађују њихову периодичност унутар појединачне секвенце.

Значајан део литературе односи се и на развој концепта периодичности. У радовима Tanbeer-a и коаутора периодичност је примењена на честе обрасце, док су Fournier-Viger и коаутори развили више алгоритама за идентификовање периодичних образаца применом различитих мера периодичности и ограничења. Посебно су значајни радови који се баве периодичним обрасцима у више секвенци, јер су концепти из тих истраживања послужили као теоријска основа за увођење периодичности у домен делимично уређених секвенцијалних правила. У дисертацији је, на основу ових приступа, стандардна девијација периода усвојена као мера стабилности периодичности правила.

Други истраживачки правац дисертације заснован је на литератури из области откривања скупова ставки високе корисности. Један од основних радова у овој области представља Two-Phase алгоритам Liu-а и коаутора (2005), након чега је развијен велики број ефикаснијих приступа за идентификовање скупова ставки чији значај није условљен искључиво фреквенцијом, већ и вредностима као што су количина, профит или други типови корисности. Значајан преглед развоја ове области представљен је и у истраживањима Gan-а и коаутора и Fournier-Viger-а и коаутора.

Посебна пажња у дисертацији посвећена је проблему фаворизовања дужих скупова ставки код класичних алгоритама високе корисности. Као одговор на овај недостатак развијена је област откривања скупова ставки високо-просечне корисности. Радови Lin-а и коаутора представљају важну основу овог правца, од HUI-Tree и HUI-Miner приступа до EHAUPM алгоритма, који користи ефикасније горње границе и специјализоване структуре података ради сужавања простора претраге. EHAUPM представља непосредну алгоритамску основу за развој MEHAUPM алгоритма предложеног у дисертацији.

Важан део анализиране литературе односи се на проблем негативних вредности корисности. HUIV-Mine, који су предложили Chu и коаутори, представља један од првих алгоритама који омогућава обраду негативних вредности корисности. Након њега развијени су FHN, EHIN, TopHUI, TKN и PHMN, који различитим структурама података и стратегијама пресецања простора претраге настоје да повећају ефикасност алгоритама у присуству негативних профита.

Критичком анализом наведене литературе утврђено је да постојећи алгоритми имају ограничења када једна иста ставка током различитих трансакција може имати и позитивну и негативну корисност. Нарочито су анализирани FHN, HUIV-Mine, EHIN и сродни приступи, код којих одређене стратегије пресецања могу довести до преурањеног одбацивања ставки или скупова ставки који би у неким комбинацијама могли остварити позитивну и довољно високу корисност. У дисертацији је управо овај недостатак идентификован као један од кључних методолошких проблема постојеће литературе.

Поред теоријских и алгоритамских радова, коришћена је и литература која показује практичну примену откривања образаца и скупова ставки високе корисности. У литератури су наведене примене у анализи потрошачке корпе, оптимизацији распореда производа, веб-анализи, препоручивању, анализи инвестиционих образаца, регулацији гена и другим областима. На тај начин је показано да истраживачки проблеми обрађени у дисертацији имају не само теоријски већ и значајан практични аспект.

За експерименталну валидацију коришћени су и релевантни јавни извори података и репозиторијуми, укључујући SPMF, UCI Machine Learning Repository, Tableau, Data Mining Cup и друге изворе реалних трансакционих и секвенцијалних података. У експериментима PISRuleGrowth алгоритма коришћене су базе MSNBC, WeeklySales и OnlineRetail, док су за евалуацију MEHAUPM алгоритма коришћене базе DiscountSales, Superstore и RetailNegative. Избор база омогућио је испитивање алгоритама на скуповима података различитих величина и структурних карактеристика.

На основу анализе коришћене литературе може се закључити да су у докторској дисертацији обухваћени фундаментални радови који су поставили теоријске основе области, савремени алгоритми који представљају релевантна референтна решења, као и новија истраживања која указују на актуелне правце развоја. Литература је непосредно повезана са предметом истраживања и коришћена је не само за теоријско позиционирање дисертације, већ и за идентификовање истраживачког јазга, формулисање нових концепата, избор референтних алгоритама и спровођење експерименталне евалуације предложених решења.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У изведеном истраживању коришћене су аналитичко-дедуктивне методе, метода развоја софтвера, експериментална метода, компаративна анализа и статистичке методе.

Додатно, у изради дисертације коришћене су следеће научне методе:

- У првом и другом поглављу коришћене су методе прикупљања, анализе и критичког разматрања постојећих научних резултата и достигнућа из области откривања образаца у подацима.
- У трећем поглављу примењене су методе формализације и дедукције за дефинисање проблема периодичних унутар-секвенцијалних правила и скупова ставки високо-просечне корисности са мешовитим вредностима корисности.
- У четвртном поглављу примењена је метода развоја софтвера за развој и имплементацију алгоритама **PISRuleGrowth** и **МЕНАUPM**, уз њихово формално представљање псеудокодovima.
- У петом поглављу примењене су експериментална и компаративна метода за евалуацију предложених алгоритама и њихово поређење са релевантним постојећим решењима. Анализирани су време извршавања, потрошња меморије и карактеристике генерисаних образаца.
- У шестом поглављу дати су закључци истраживања и извршена провера постављених хипотеза.

Резултати истраживања презентовани су текстуално, математичким формулацијама, псеудокодovima, табелама и графичким приказима.

На основу анализе докторске дисертације може се закључити да примењене научне методе и технике, по свом значају и структури, одговарају теми дисертације и спроведеном истраживању.

3.4. Применљивост остварених резултата

Предложени алгоритми **PISRuleGrowth** и **МЕНАUPM** могу се применити у системима за анализу секвенцијалних и трансакционих података, посебно у областима у којима је потребно откривање понављајућих временских образаца и вредносно значајних скупова ставки.

Области примене обухватају:

- анализу потрошачког понашања и продаје;
- анализу веб и корисничких активности;
- системе препоруке;
- анализу трансакционих база података;
- пословне и аналитичке информационе системе.

Из тог разлога може се сматрати да су остварени резултати релевантни и практично применљиви у различитим доменима анализе реалних, динамичких и сложених података.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У току израде докторске дисертације Невена Миленковић је показала способност да самостално идентификује недостатке постојећих алгоритамских решења, формулише истраживачке проблеме, развије нова алгоритамска решења и изврши њихову експерименталну евалуацију.

У досадашњем научноистраживачком раду објавила је радове у међународним научним часописима из области откривања образаца у подацима:

Milenković, N., Delibašić, B. (2025). *PISRuleGrowth: mining periodic intra-sequential rules common to multiple sequences*. Knowledge and Information Systems, 67, 6071–6114. DOI: 10.1007/s10115-025-02401-w. (M21).

Milenković, N. (2026). *Benchmarking Pattern Mining Algorithms for Service Non-Adherence: From Algorithms to Driver Insights*. Acta Universitatis Sapientiae, Informatica, 18:26. DOI: 10.1007/s44427-026-00042-7. (M23).

На основу наведеног, сматрамо да кандидаткиња **Невена Миленковић** поседује потребно знање и способности за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕН НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Током спроведеног истраживања у области развоја алгоритама машинског учења за откривање образаца у секвенцијалним и трансакционим подацима остварено је више научних и стручних доприноса.

Најзначајнији допринос дисертације огледа се у развоју два алгоритамска решења, **PISRuleGrowth** и **МЕНАУРМ**, којима се превазилазе ограничења постојећих метода при анализи сложених и динамичких података. **PISRuleGrowth** омогућава откривање периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци, док **МЕНАУРМ** омогућава откривање скупова ставки високо-просечне корисности у условима динамичке промене позитивних и негативних вредности корисности.

Као најважнији **научни доприноси** докторске дисертације могу се издвојити:

- систематизација и критичка анализа постојећих метода за откривање секвенцијалних правила, периодичних образаца и скупова ставки високе и високо-просечне корисности;
- формално дефинисање новог проблема откривања периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци и одговарајућих мера за њихово идентификовање;
- развој алгорита **PISRuleGrowth**, заснованог на приступу раста образаца и ефикасној структури података, за откривање свих валидних појављивања периодичних правила унутар и кроз више секвенци;
- дефинисање концепта **мешовите корисности**, којим се обухвата динамичка промена предзнака корисности ставки у различитим трансакцијама;
- развој алгорита **МЕНАУРМ** за прецизно откривање скупова ставки високо-просечне корисности у присуству мешовитих и негативних вредности корисности, уз измене механизма израчунавања и пресецања простора претраге;
- експериментална валидација предложених алгоритама на реалним скуповима података и утврђивање њихових предности у погледу времена извршавања, потрошње меморије, тачности и квалитета генерисаних образаца.

Стручни допринос дисертације огледа се у развоју алгоритамских решења која се могу применити у анализи реалних секвенцијалних и трансакционих података. Предложени алгоритми омогућавају прецизније откривање периодичних образаца понашања и вредносно значајних комбинација ставки, што је применљиво у анализи продаје, потрошачких корпи, корисничког понашања и системима за подршку одлучивању.

Као најважнији **стручни доприноси** могу се издвојити:

- развој и имплементација алгоритама **PISRuleGrowth** и **МЕНАУРМ** за анализу реалних података;

- могућност откривања периодичних образаца понашања на нивоу појединачних и више секвенци;
- могућност коректне анализе трансакционих података са променљивим позитивним и негативним вредностима корисности;
- примена резултата у анализи продаје, потрошачког понашања и подршци пословном одлучивању.

На основу изложеног, може се закључити да добијени резултати докторске дисертације представљају **оригинални научни допринос у областима откривања секвенцијалних правила и скупова ставки високо-просечне корисности**, као и основу за даља истраживања алгоритама намењених анализи динамичких и сложених података.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у дисертацију, полазне хипотезе и циљеве истраживања, остварене резултате, научне и стручне доприносе, Комисија констатује да је кандидаткиња успешно анализирала и систематизовала постојећа научна сазнања из области откривања секвенцијалних правила и скупова ставки високе корисности и идентификовала ограничења постојећих приступа.

Кандидаткиња је успешно реализовала истраживање које је обухватило формално дефинисање истраживачких проблема, развој и имплементацију алгоритама **PISRuleGrowth** и **МЕНАУРМ**, као и њихову експерименталну евалуацију и поређење са релевантним постојећим алгоритмима. Остварени резултати истраживања испуњавају постављене циљеве докторске дисертације и потврђују оправданост предложених алгоритамских решења. Поред оствареног научног доприноса, резултати имају и практични значај за анализу сложених, динамичких секвенцијалних и трансакционих података. Све постављене посебне хипотезе верификоване су теоријским разматрањима и експерименталном анализом.

На основу добијених резултата може се закључити да је остварен значајан допринос корпусу знања у области машинског учења и откривања образаца у подацима, као и да предложена решења представљају основу за даља истраживања у овој области.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси докторске дисертације верификовани су објављивањем резултата истраживања у међународном научном часопису:

Рад у међународном часопису (M21)

Milenković, N., Delibašić, B. (2025). *PISRuleGrowth: mining periodic intra-sequential rules common to multiple sequences*. Knowledge and Information Systems, 67, 6071–6114. DOI: 10.1007/s10115-025-02401-w.

Овим радом верификован је научни допринос који се односи на формализацију проблема и развој алгоритма **PISRuleGrowth** за откривање периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци.

Поред тога, кандидаткиња је у области откривања образаца у подацима објавила и:

Рад у међународном часопису (M23)

Milenković, N. (2026). *Benchmarking Pattern Mining Algorithms for Service Non-Adherence: From Algorithms to Driver Insights*. Acta Universitatis Sapientiae, Informatica, 18:26. DOI: 10.1007/s44427-026-00042-7.

Објављени радови потврђују научну релевантност спроведеног истраживања и способност кандидаткиње за самосталан научноистраживачки рад.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа докторске дисертације под називом „Развој алгоритама машинског учења за периодична унутар-секвенцијална правила и динамичку корисност ставки“, кандидаткиње **Невене З. Миленковић**, Комисија констатује да је докторска дисертација написана у складу са захтевима научноистраживачког рада, као и да испуњава услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима, правилницима и Статутом Факултета организационих наука Универзитета у Београду. Резултати истраживања из докторске дисертације верификовани су објављивањем научног рада у међународном часопису категорије **M21**.

На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидаткиња Невена Миленковић успешно завршила докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. У дисертацији су развијена два алгоритамска решења, **PISRuleGrowth** за откривање периодичних унутар-секвенцијалних правила заједничких за више секвенци и **МЕНАУРМ** за откривање скупова ставки високо-просечне корисности у условима динамичке промене позитивних и негативних вредности корисности. С обзиром на научну актуелност дисертације, оригиналност приказаних резултата и методолошку и тематску адекватност, докторска дисертација задовољава потребне критеријуме и квалификује кандидаткињу за самосталан научноистраживачки рад. Ценећи наведене научне и стручне доприносе докторске дисертације, Комисија констатује да су остварени постављени циљеви истраживања и позитивно оцењује дисертацију.

На основу свега наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета организационих наука да се докторска дисертација под називом „Развој алгоритама машинског учења за периодична унутар-секвенцијална правила и динамичку корисност ставки“, кандидаткиње **Невене З. Миленковић**, прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 7. 9. 2026. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

др Милош Јовановић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

др Дејан Симић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

др Гордана Савић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

др Мирослав Марић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Математички факултет
