

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Владисава Јелисавчића

Одлуком бр. 5039/11-3 од 25.04.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Владисава Јелисавчића под насловом

### **„Структурирано учење над великим подацима засновано на вероватносним графовским моделима“**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Владисав Јелисавчић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер Рачунарска техника и информатика, у пролећном семестру 2011/2012 године.

31.8.2016. године кандидат је пријавио тему за израду докторске дисертације.

6.9.2016. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно–научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5039/11-1 од 5.10.2016. године).

Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5039/11-2 од 15.11.2016. године).

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације број одлуке 61206-6301/2-16 од 26.12.2016. године).

4.4.2018. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

10.4.2018. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке 5039/11-3 од 25.4.2016. године).

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 545/2 од 13.3.2012. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2011/2012, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија за два семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Владисава Јелисавчића припада научној области Техничке науке – Електротехника и рачунарство и ужим научним областима машинског учења и анализе података, за које је Електротехнички факултет у Београду матичан.

Ментор докторске дисертације је Вељко Милутиновић, редовни професор у пензији Електротехничког факултета у Београду. Професор Милутиновић је Fellow of the IEEE, члан Academia Europaea и аутор и коаутор више од 50 радова у страним стручним часописима и преко 20 стручних књига.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Владисав Јелисавчић је рођен 17.07.1987. године у Обреновцу. Основне студије је завршио на Електротехничком факултету, смер Рачунарска техника и информатика, са просечном оценом 8.70. Дипломирао 2010. године, успешно одбранивши дипломски рад на тему: *”Визуални симулајор експерименталних система”* код професора Бошка Николића. Мастер студије је завршио на истом смеру 2011., одбранивши мастер рад: *”Евалуација алгоритама за моделовање знања на основу објављених радова”* код професора Вељка Милутиновића. Докторске студије је уписао 2011/2012. године на модулу Рачунарска техника и информатика и положио је све испите предвиђене Наставним планом и програмом модула са просечном оценом 9.80. Од 2012. године је запослен као истраживач у Математичком институту Српске академије наука и уметности. Тренутно је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја *„ИИИ44006: Развој нових информационо-комуникационих технологија коришћењем најпредних математичких метода, са применама у медицини, енергетици, е-Управи, телекомуникацијама и заштити националне баштине”*.

Године 2014. одлази на стручно усавршавање на Temple University, Philadelphia, Pennsylvania, USA. Током боравка учествовао је на пројекту *„Prospective Analysis of Large and Complex Partially Observed Temporal Social Networks, Defense Advanced Projects Agency, DARPA-GRAPHS, AFOSR award number FA 9550-12-1-0406”*, где је стекао искуство из области структурираног учења.

Научно-истраживачко искуство је стекао учествовањем у пројектима Министарства за науку и технолошки развој (МНТР) Републике Србије. Пројекти су реализовани на Математичком институту Српске академије наука и уметности, или у Иновационом центру Електротехничког факултета. Пројекти припадају области машинског учења и дата мининга. Био је ангажован на EU FP7 пројекту „BALCON: Boosting EU-Western Balkan Countries research collaboration in the Monitoring and Control area, GA:288076“. Такође био је ангажован као истраживач на иновационом пројекту МПНТР „Примена метода за проналажење знања над великом количином података“.

Поседује и искуство рада на неколико софтверских пројеката отвореног кода везаних за big data. Тренутно се води као један од активних комитера на Apache Ignite пројекту за дистрибуиране софтверске кеш системе.

Владисав Јелисавчић је аутор једног M21 рада и коаутор три рада објављена на међународним конференцијама. Учествовао је у изради три техничка решења, категорије M82 и M83.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику, садржи 103 стране, 14 слика, 13 табела и 87 референци. Састоји се од насловне стране на српском и енглеском језику, списка слика, списка табела, и шест поглавља:

1. Увод
2. Коришћење структуре за побољшање предикције
3. Учење структуре из података
4. Учење структуре за дискриминативне моделе
5. Условна случајна поља са тешким реповима
6. Закључак

Дисертација такође садржи и списак релевантне литературе и биографију кандидата.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу описан је проблем структурираног учења, преглед доприноса дисертације у решавању овог проблема, као и кратак преглед основних појмова.

Друго поглавље се бави проблемом структуриране регресије. Ово поглавље је подељено у три целине. У првом делу је приказан проблем регресије више међузависних променљивих. У другом делу је приказан постојећи пробабилистички приступ регресије више променљивих у случају када је позната структура зависности. У трећем делу је приказана надоградња једне од метода за структурирану регресију, заједно са алгоритмом учења и анализом комплексности. Приказана је и емпиријска евалуација кроз поређење неколико актуалних

метода за решавање овог проблема. Поређење је најпре извршено на симулираним (вештачким) подацима, а затим је приказано и поређење на реалним апликацијама.

У трећем поглављу је приказан проблем учења структуре помоћу континуалних вероватносних графовских модела. Ово поглавље се састоји из пет целина. У првој целини описан је проблем учења структуре помоћу континуалних вероватносних модела и дат кратак преглед поглавља. У другој целини дат је преглед постојећих решења базираних на максимизацији пенализоване максималне веродостојности. У трећој целини предложен је теоријски основ за два модела који су настали као резултат истраживачког рада кандидата и који су приказани у четвртој и петој целини. У четвртој целини приказан је модел који уводи пенал који апроксимира L1 регуларизацију над инверзном коваријансом. Приказани су емпиријски резултати поређења брзине учења структура са постојећим решењима. Приказана је апликације на реалним подацима у домену експресије гена. У петој целини приказан је модел који уводи L1 регуларизацију над новом параметризацијом оптимизације, као и алгоритам за учење заснован на координатном спусту са одабиром активног скупа. Показано је да предложени алгоритам посебно одговара тзв. scale-free проблемима. Представљена је емпиријска евалуација кроз поређење квалитета научене структуре као и брзине учења. Такође је дата анализа комплексности и скалабилности предложеног решења, која је и експериментално потврђена у истом поглављу. На крају овог поглавља дат је доказ конвексности оптимизационе функције.

У четвртом поглављу предложен је проблем истовременог учења структуре и модела регресије. Предложен је један вероватносни модел погодан за решавање овог проблема и дат алгоритам за оптимизацију, као и прелиминарни резултати поређења са другим методама.

У петом поглављу представљен предложен је нови правац за истраживање. Сажето је приказан проблем учења структуре када су подаци настали из дистрибуције са тежим реповима. Предложен је један вероватносни модел за решавање овог проблема, као и алгоритма учења.

У шестом поглављу дат је кратак преглед постигнутих резултата.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Изобиље података проузроковано технолошким напретком током претходних деценија довело је до повећаног интересовања за алгоритме машинског учења.

Проналажење зависности и регуларности на основу вишедимензионих података је предмет активног истраживања. Структурирано учење, као област машинског учења која се бави решавањем овог проблема, има примену у бројним мултидисциплинарним областима као што је обрада природних језика, компјутерска визија, биоинформатика, и др. Вероватносни графовски модели који су уједно и фокус истраживања спроведеног у оквиру дисертације, представљају један од главних правца структурираног учења. Предност оваквих модела се заснива на утемељењу у вероватноћи и статистици, обезбеђујући јасан оквир за моделовање несигурности закључивања, као и експлицитно моделовања шума, модуларност и многе друге пожељне особине. Обим интересовања за побољшања и развој вероватносних графовских модела је значајан о чему сведоче и бројне конференције из области. Са друге стране, повећавање скалабилности алгоритама машинског учења је увек актуелна тема, јер омогућава ефикаснију примену машинског учења као и примену на проблемима на којима то до сада није било могуће.

Учење неусмерених вероватносних графовских модела је ограничено димензијом проблема, јер је неопходно научити граф интеракција, што примену ових метода чини веома захтевним на високдимензионим проблемима. Кандидат у је оквиру овог истраживања изоловао једну класу проблема која се често јавља у пракси и предложио скалабилан алгоритам за учење, што је уједно и главни допринос дисертације. Кандидат је такође предложио неколико побољшања постојећих модела, као и поставио два правца за даље истраживање.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У овој докторској дисертацији, је коришћена литература која броји више од 80 библиографских референци из области машинског учења, конвексне оптимизације, и вероватносних графовских модела. Референце коришћене у истраживању су претежно новијег датума, с обзиром да је проблем којим се дисертација бави актуелан. Списак литературе укључује и релевантне радове које је кандидат публиковао као аутор или коаутор.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током истраживања спроведеног у оквиру ове докторске дисертације, примењени су следећи научни методи:

- Методе за претпроцесирање података: нормализација и стандардизација улазних података, као и селекција релевантних обележја
- Методе конвексне оптимизације: за учење параметара модела користе се алгоритми засновани на координатном спусту, као и тзв. приступ активног скупа
- Методе симулације: сви развијени модели и алгоритми за њихово обучавање су поред реалних тестирани и на симулираним (генерисаним) подацима, који имају за циљ да омогуће тестирање одређене хипотезе у контролисаним условима
- Методе регуларизације: како би се научила дискретна структура, коришћене су  $L_1$  регуларизационе норме које индукују реткост параметара
- Статистичке методе: коришћене су методе за испитивање статистичке значајности добијених резултата
- Методе за естимацију генерализационих способности алгоритама машинског учења: Научени модели су примењени на одвојеном тестном скупу података, тј. скупу података који нису употребљени за обучавање модела, коришћењем методе вишеструке крос-валидације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Дисертација се бави моделима за регресију и учење структуре на континуалним високодимензионалним подацима. Предложени алгоритам који је главни допринос тезе је посебно погодан за високодимензионалне проблеме који имају тзв. scale-free структуру. У литератури је познато да многи природни феномени поседују ово својство.

Област потенцијалне примене укључује проналажење графа зависности у областима биоинформатике, анализе социјалних мрежа, финансија и многих других.

Модели представљени у овој дисертацији су такође погодни за проблеме са темпоралном, као и гео-просторном компонентом.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је успешно идентификовао недостатке досадашњих студија и најпре предложио генерализацију једног постојећег приступа. Затим је уочио и успешно издвојио једну класу проблема за коју је могуће направити скалабилније решење од постојећих. Предложено решење је имплементирано и потврђено кроз експерименталну евалуацију, поређењем са најактуелнијим досадашњим алгоритмима. Показано је да резултати дисертације имају потенцијал и за примену у реалним апликацијама. Методе истраживања су релевантне и иновативне. Остварени доприноси су оригинални и потврђују способности кандидата за научно-истраживачки рад. На основу свега наведеног, комисија сматра да је кандидат показао висок степен способности са самосталан научни рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове докторске дисертације су следећи:

- Развијен је математички модел који представља генерализацију једне постојеће GCRF формулације.
- Извршена је експериментална анализа предложене генерализације GCRF модела на неколико синтетичких и неколико скупова реалних података из домена климатологије и здравства.
- Развијен је математички модел који омогућава учење апроксимиране структуре.
- Развијен је математички модел који решава проблем учења структуре на scale-free подацима увођењем додатне претпоставке у виду репараметризације и L1 регуларизационе норме.
- Развијен је скалабни оптимизациони алгоритам за учење параметара модела.
- Предложени алгоритми су експериментално потврђени кроз поређење са најбржим постојећим решењима на неколико многодимензионалних синтетичких проблема као и применом на правим подацима из области експресије гена, ДНК метилације, и EEG сигнала.
- Одрађена је теоријска анализа сложености алгоритама, и експериментално потврђена способност паралелизације.
- Предложена су два додатна правца будућег истраживања, постављен је математички модел и теоријска основа за развијање алгоритма за обучавање.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Главни допринос дисертације је оригиналан вероватносни графовски модел за учење структурних релација високодимензионалних проблема, заснован на Гаусовским Марковљевим случајним пољима. Предност предложене методологије се огледа у повећаној скалабилности учења структуре на високодимензионалним подацима у односу на постојећа решења, нарочито израженој на проблемима са scale-free структуром, што одговара значајној класи проблема структурираног учења. Учење структуре је постигнуто коришћењем функционалних норми за регуларизацију које индукују проређеност параметара модела,

чиме је знатно смањен број активних параметара научног модела. Смањењем броја активних (не-нултих) параметара, и применом координатног спуста са методом активног скупа омогућено је ефикасно и скалабилно учење. Експерименталном евалуацијом потврђене су полазне претпоставке модела, и поређењем са најактуелнијим решењима из литературе показане су предности предложеног алгорита учења. Додатно својство предложене методологије је могућност паралелизације, која је и експериментално потврђена. Ово својство чини предложену методологију додатно интересантном, јер омогућава примену над високодимензионалним проблемима који не могу да стану у меморију рачунара.

Предложена методологија може се користити за учење структурних односа из високодимензионалних континуалних података. Такође, може се користити и за структурирану регресију, што је предложено у самој дисертацији. Предложено решење се заснива на Гаусовској претпоставци, тј претпоставци да су променљиве у случајном пољу Гаусовски расподељене, што омогућава примену на широком скупу проблема. У дисертацији је такође представљено једно унапређење које омогућава примену и на проблемима код којих дата претпоставка не важи.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси верификовани су следећим радовима:

##### Категорија M21:

1. **Jelisavcic, V.**, Stojkovic, I., Milutinovic, V., Obradovic, Z.: Fast learning of scale-free networks based on Cholesky factorization, - *International Journal of Intelligent Systems*, 2018, Article ID: INT21984, Internal Article ID: 15132430, DOI: 10.1002/int.21984 ISSN:1098-111X (online) 2016 (IF=2.929)

##### Категорија M33:

1. Stojkovic I., **Jelisavcic V.**, Milutinovic V., Obradovic Z.: Fast sparse Gaussian Markov Random Fields learning based on Cholesky factorization, - *Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-2017*, pp. 2758-2764, Melbourne, Australia, August 2017
2. Stojkovic I., **Jelisavcic V.**, Milutinovic V., Obradovic Z.: Distance Based Modeling of Interactions in Structured Regression, - *Proceedings of the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-16*, pp. 2032-2038, New York City, NY, USA, July 2016
3. **Jelisavcic V.**, Furlan B., Protic J., Milutinovic V.: Topic Models and Advanced Algorithms for Profiling of Knowledge in Scientific Papers, - *Proceedings of the 35th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO 2012*, pp. 1030-1035, Opatija, Croatia, May 2012

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Дисертација се бави скалабилним алгоритмима за структурирано учење заснованим на вероватносним графовским моделима. Главни допринос ове дисертације је развој и имплементација скалабилног алгоритма за учење Гаусовског Марковљевог случајног поља из високодимензионалних континуалних података. Поред тога развијена је и имплементирана једна генерализација Гаусовских условних случајних поља. Развијени модели и алгоритми за њихово обучавање су евалуирани над синтетичким подацима као и на реалним апликацијама из области генетске информатике, биомедицине и климатологије.

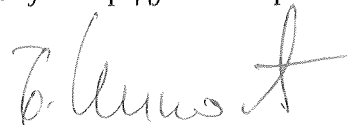
Узимајући у обзир наведене научне доприносе Комисија сматра да докторска дисертација кандидата Владисава Јелисавчића садржи оригиналне научне доприносе који имају доказану практичну применљивост у области машинског учења.

Имајући у виду наведено, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Структурирано учење над великим подацима засновано на вероватносним графовским моделима” кандидата Владисава Јелисавчића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

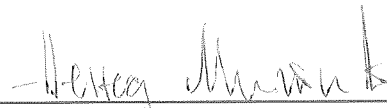
### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Вељко Милутиновић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Бошко Николић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ненад Митић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Математички факултет