

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ

1. Датум и орган који је именовео комисију

29.06.2016. Наставно-научно веће Факултета техничких наука

2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:

- др Драган Урошевић, научни саветник, УНО рачунарство и математика, 26.02.2014, Математички институт САНУ, Београд (ПРЕДСЕДНИК)
- др Наташа Сладоје Матић, ванредни професор, УНО математика, 10.10.2011, Факултет техничких наука, Нови Сад (ЧЛАН)
- др Татјана Давидовић, виши научни сарадник, УНО рачунарство, 27.06.2012, Математички институт САНУ, Београд (ЧЛАН)
- др Тибор Лукић, доцент, УНО математика, 07.06.2012, Факултет техничких наука, Нови Сад (ЧЛАН)
- др Ненад Младеновић, научни саветник, УНО математика, 19.11.1996, Математички институт САНУ, Београд (МЕНТОР)

II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1. Име, име једног родитеља, презиме:

Стефана, Драгослав, Јанићијевић

2. Датум рођења, општина, држава:

10.02.1979, Савски венац, Београд, Србија

3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив

**Математички факултет Универзитета у Београду, Дипломирани математичар – професор математике и рачунарства;
Универзитет уметности, Факултет драмских уметности, Позоришна и радио продукција;
Интердисциплинарне студије, Културна политика и менаџмент у култури, Дипломирани менаџер у култури - Мастер**

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија

2008, Математика у техници

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

МЕТОДЕ ПРОМЕНА ФОРМУЛАЦИЈА И ОКОЛИНА ЗА ПРОБЛЕМ МАКСИМАЛНЕ КЛИКЕ ГРАФА

VARIABLE FORMULATION AND NEIGHBORHOOD SEARCH METHODS FOR THE MAXIMUM CLIQUE PROBLEM IN GRAPH

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација је написана на 109+6 страна, на српском језику. Садржи седам поглавља, у следећем редоследу:

1. Увод
2. Проблеми и методе оптимизације
3. Основе теорије графова и формулације проблема максималне клике
4. Метода променљивих околина и формулација
5. Хеуристике за проблем максималне клике у графу
6. Примене на великим базама података
7. Закључак и будући рад

Дисертација садржи 8 илустрација, 19 табела и 25 псеудокодова (алгоритама). Списак коришћене литературе садржи 225 библиографских јединица, које су наведене у складу са важећим правилима за цитирање. Поред наведеног, дисертација садржи кључне документацијске информације на српском и енглеском језику, захвалницу, списак илустрација, списак табела, списак алгоритама, као и сажетак на српском и енглеском језику.

Наслов предложене докторске дисертације формулисан је јасно и прецизно, одражава тему и садржај истраживања.

У оквиру првог поглавља (Увод) представљен је контекст истраживања које чини садржај докторске дисертације. Наведен је хронолошки преглед развоја математичког моделирања од почетка до данашњих дана са освртом на основне проблеме који се у дисертацији разматрају – примена метахеуристика на решавање проблема максимума клике, проблема поделе графа у клике и примена метахеуристика на проблем кластеризације.

Приказан је кратак опис оригиналних доприноса дисертације, релевантних публикација кандидаткиње, као и структуре дисертације.

У овом поглављу, кандидаткиња представља циљеве и контекст истраживања. Приказани материјал је представљен јасно и концизно, а историјски преглед развоја оптимизације и математичког програмирања има значајну вредност у педагошком контексту.

У другом и трећем поглављу је обрађена материја која се бави теоријским основама битним за дисертацију. У другом поглављу (Проблеми и методе оптимизације) наведена је дефиниција проблема оптимизације у духу математичког програмирања и набројане основне класе проблема оптимизације: проблеми линеарног програмирања, проблеми целобројног линеарног програмирања, 0-1 линеарног програмирања, проблеми квадратног програмирања, итд.. Изложени су основни појмови везани за проблеме оптимизације почев од питања комплексности, проблема одлучивости, класа комплексности и приказ одређених проблема из литературе релевантних за опис комплексности као појма теоријског рачунарства. Дат је преглед најпознатијих егзактних (тачних) и (мета)хеуристичких (приближних) метода за решавање оптимизационих проблема. Треће поглавље (Основе теорије графова и формулације проблема максималне клике) уводи основне термине везане за теорију графова. Након увођења основних појмова дате су дефиниције максималне клике, максимума клике, као и сродних комплементарних проблема из графова (стабилан скуп, чворни покривач). Истакнута је разлика између максималне клике и максимума клике. Након тога дат је преглед најпознатијих теоријских резултата везаних за максимум клике (тј. број елемената у максимуму клике), максимум стабилног скупа и минимум чворног покривача. Показани су релевантни резултати везани за доњу и горњу границе максимума клике. Следи преглед математичких формулација за проблем максимума клике. Формулације су подељене на формулације дискретног типа и формулације континуалног типа. Поглавље се завршава прегледом тачних и (мета)хеуристичких метода (алгоритама) за решавање проблема максимума клике.

Проблем оптимизације, својства и подела проблема оптимизације су представљени јасно. Уводни преглед оптимизационих метода је на задовољавајућем нивоу. Сви појмови су адекватно обрађени. Теоријска основа је методолошки исцрпно приказана и све што је било у вези са темом дисертације је доведено у контекст. Из прегледа се види да је кандидаткиња методолошки коректно пратила ток истраживања у истраживачкој области којом се бави и да је тема истраживања актуелна и адекватно одабрана.

Четврто поглавље (Метода променљивих околина и формулација) је поглавље у коме је дат опис методе променљивих околина (VNS) као и методе промена формулација (FSS). Детаљно су приказане разне варијанте методе променљивих околина. Други део поглавља садржи опис проблема распоређивања задатака на вишепроцесорски систем, методу решавања тог проблема засновану на методи променљивих околина као и поређење методе променљивих околина са методом Монте Карло. У трећем делу поглавља је приказана метода промена формулација као још једна од метода за решавање оптимизационих проблема. Кандидаткиња је приложила комплетан псеудокод методе промена формулација и то се може третирати као оригинална варијанта псеудокода будући да до сада није постојао у литератури.

У овом поглављу кандидаткиња даје опис методе променљивих околина и разних варијација

методе променљивих околина. Поред тога приказује примену методе променљивих околина у решавању проблема распоређивања задатака. На крају даје опис методе промена формулација и приказује псеудокод за методу промена формулација.

Следећа целина дисертације је фокусирана на примену метахеуристика за решавање оптимizacionих проблема везаних углавном за проблем клике (пето поглавље) и примене метахеуристичких метода на проблеме кластеровања (шесто поглавље) У петом поглављу (Хеуристике за проблем максималне клике) приказане су методе за решавање проблема максималне тежинске клике (Maximum Weighted Clique), проблема подела графа на клике (Clique Partitioning Problem) и проблема одређивања клике максималне кардналности (Maximum Clique Problem). За проблем максималне тежинске клике је развијена метода променљивих околина у оквиру које је локално претраживање базирано на: коришћењу симплицијалних врхова, примени додавања врха у постојећу клику и замени врха мање тежине врхом веће тежине (чиме се добија клика са већом тежином). За проблем поделе графа у клике извршено је прилагођавање методе развијене за проблем груписања са максимизирањем различитости (Maximum Diversity Grouping Problem). Развијена метода је базирана на адаптивној методи променљивих околина. У току тазвоја предложена је колекција околина и на њој базирано локално претраживање. Поред тога, предложен је критеријум за прелазак у решење добијено након размрдавања и локалне претраге. Тај критеријум је утицао на интензивирање кретања кроз простор решења, чиме се повећавају шансе за проналажење бољих локалних оптимума.

Трећи део петог поглавља је посвећен решавању проблема максимума клике.

Проблем максимума клике кандидаткиња је разматрала на нетежинском неусмереном графу.

Крајњи циљ је био да се примене методе променљивих околина, променљивих формулација или њихове комбинације уз помоћ додатних техника из оптимизације. Кандидаткиња је у овом делу на почетку приказала непрекидну (континуалну) формулацију клике на основу које су развијане методе за одређивање максимума клике. На основу те формулације развијене су четири методе за решавање проблема: метода заснована на примени еволутивног (1+1) алгоритма, метода добијена применом пакета GLOB за глобалну оптимизацију (који је такође заснован на методи променљивих околина), метода заснована на уопштеној методи променљивих околина, и метода добијена применом методе промена формулација где се простор формулација добија варирањем параметра у функцији која моделира ограничења. Кандидаткиња је тестирали развијене методе на малим случајним графовима, које је сама генерисала. Тестирања су показала да метода заснована на промени формулација и метода добијена применом пакета GLOB дају значајно боље резултате. На жалост, ниједна од горњих метода није применљива на велике графове.

Ради тога је предложила комбиновање методе гранања и ограђивања и методе промена формулација. Као један од кључних доприноса у овом делу истичемо нову методу селекције чвора у фази гранања: она се састоји у примени степена чвора вишег реда на селекцију кандидата за клику. Из овог истраживања су произишле три методе: егзактна метода гранања и ограђивања уз коришћење степена чвора вишег реда, хеуристичка метода гранања и ограђивања са применом степена чвора вишег реда и хеуристичка метода гранања и ограђивања са применом степена чвора вишег реда у комбинацији са скупом континуалних формулација клике. Развијене методе су посебно погодне за решавање проблема максимума клике на великим ретким графовима. Детаљна тестирања показују да проналазе боља решења за велики број инстанци.

Шеста глава је посвећена проблемима везаним за велике скупове података. Приказани су концизно и прегледно различити објекти (предмети истраживања) који се могу моделирати помоћу графова: молекули, телекомуникационе мреже, интернет мреже, итд. Након тога кандидаткиња се бавила кластеровањем великих количина податак коришћењем методе за решавање p median проблема базираној на методи променљивих околина. Извршила је поређење квалитета добијене поделе у кластере са поделом која је добијена коришћењем комерцијалног пакета (SAS). Показала је да се коришћењем методе променљивих околина добија подела која има боље карактеристике од поделе добијене применом SAS-а.

Седмо поглавље је закључно где је дата анализа остварених резултата, наведени су будући правци истраживања и показане везе између решених и нерешених питања.

Описи алгоритама су у складу са методологијом сличних истраживања и прате циљ истраживања предвиђених у пријави докторске дисертације. Осим нових идеја, код

кандидаткиње се види да коректно користи постојеће методе и да их уклапа и комбинује на оригиналан начин. Посебно истичемо развој метода за решавање проблема максимума клике заснован на континулавној формулацији клике. Треба напоменути да је таква неконвексна функција до сада у литератури ретко решавана применом метахеуристика. Метода променљивих формулација коришћена је по први пут за решавање проблема клике. У оквиру ова два поглавља кандидаткиња приказује резултате примене оптимизационих метода на истраживане проблеме. Резултати су приказани јасно и детаљно без сувишних објашњавања. Резултати су поређени међусобно и са постојећим у новијој литератури. Показано је да је метода променљивих околина упоредива са state of the art методама за решавање проблема максималне тежинске клике. Развијена метода за партиционисања графа је state of the art метода. На новим графовима генерисаним током истраживања показано је да је та метода посебно погодна за партиционисање великих графова. На крају, напомињемо и развој метода за одређивање максимума клике у ретким великим графовима. Тестирања показују да те методе проналазе за одређен број графова решења боља од најбољих публикованих у литератури.

Добијени резултати су корисни, актуелни и оригинални. Дисертација представља синтезу резултата из области математике и рачунарства.

На крају дисертације је наведена обимна коришћена литература (225 јединица), која указује да је кандидаткиња упозната са хронолошким и методолошким развојем, као и тренутно актуелним стањем у областима којима се дисертација бави.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

1. Jack Brimberg, Stefana Janićijević, Nenad Mladenović, Dragan Urošević. *Solving the Clique Partitioning Problem as a Maximally Diverse Grouping Problem*. Optimization Letters, 1-13, 2015. (M22)
2. Stefana Janićijević, Dragan Urošević, Nenad Mladenović. *Comparison of SAS/STAT procedure and Variable Neighbourhood Search based clustering applied on Telecom Serbia data*. Symposium on Operational Research, Divčibare, Serbia 2014 (M63)
3. Stefana Janićijević, Dragan Urošević, Nenad Mladenović. *Comparison of SAS/STAT procedure and Variable Neighbourhood Search based clustering applied on Telecom Serbia data*. ITIS Conference, 2014. (M63)
4. Stefana Janićijević, Zorana Lužanin, S. Pereverzyev, I. Stojkowska, Andreja Tepavčević. *Credit score card for corporate clients based on industries*. Working Group ESGI99, Novi Sad, 2014. (M33)
5. Stefana Janićijević, Nenad Mladenović, Radovan Obradović, Dragan Urošević. *VNS for Maximum vertex weighted Clique Problem Approximation*. International Symposium on Operational Research, Silver Lake, Serbia, 2015. (M63)

Осим већ публикованих, кандидаткиња има неколико радова у процесу рецензије у међународним часописима:

6. Stefana Janićijević, Nenad Mladenović, Radovan Obradović. *Fast Exact Higher Order Algorithm for Maximum Clique Problem*.
7. Stefana Janićijević, Nenad Mladenović, Radovan Obradović. *Fast Heuristic Higher Order Algorithm for Maximum Clique Problem*.
8. Stefana Janićijević, Nenad Mladenović, Radovan Obradović. *Formulation Space Search Algorithm Higher Order for Maximum Clique Problem*.

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Основни резултати истраживања приказани у докторској дисертацији су:

1. Решавање тежинске клике (тежине су додељене чворовима) путем VNS методе је показало резултате у складу са очекиваним и резултате нешто боље од до тада објављених у литератури посебно за групе графова који су веће густине. Тестирање је обављено на DIMACS тестним примерима и у свим примерима је пронађен тренутно познати максимум клике. Кандидаткиња је представила комбинацију избора симплицијалних чворова графа као и примену подалгоритама пенала уз мерење значајности задржавања сваког чвора у тренутној апроксимацији максималне клике.
2. Решавање проблема партиционисања графа у клике је дало изузетне резултате који су упоређивани на случајно генерисаним графовима из литературе, али и новим (већим) графовима генерисаним током развоја нове методе (у циљу показивања надмоћности нове методе у односу на постојеће). Проблем је решаван VNS методом, односно њеним екстензијама, GVNS и SVNS, које су на крају произвеле нову методу SGVNS. Кључни делови у тој методи су: добар избор околина за локално претраживање (захваљујући чему је добијено ефикасно и брзо локално претраживање), процедура размрдавања и ново правило за прелаз из једног у друго решење. То правило је базирано на комбинацији вредности функције циља и растојања између решења. Напомињемо да је предложена нова формула за рачунање растојања.
3. Решавање проблема максимума нетежинске клике на неусмереном графу је кандидаткињу подстакло да примени колекцију алгоритама – еволутивна стратегија, генерална метода променљивих околина, GLOB пакет, претрага кроз простор формулација, метода гранања са ограђивањем побољшана селекцијом степена чвора вишег реда, као и комбинација гранања са ограђивањем и претраге простора формулација. У овом делу, који уједно представља и тему истраживања уочавају се вишеструки резултати: нова метода за решавање максимума клике, примена методе претраге простора формулација и решавање неконвексних континуалних функција. У овом делу посебно истичемо да су се методе базиране на степенима вишег реда показале посебно добрим при одређивању максимума клике у ретким графовима.
4. У поглављу шест, кандидаткиња се бавила кластеровањем велике колекције података (подаци о претплатницима). Проблем који се решавао је кластеризација корисника на основу износа допуна и броја дана између допуна. Кандидаткиња је применила са једне стране VNS методу а са друге SAS библиотеку кластера. Кандидаткиња је извела детаљан закључак и применила је једну од кластер евалуација која је подржана у литератури као метода евалуације кластера.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

Кандидаткиња је планирано истраживање дато пријавом теме дисертације оправдала у потпуности. Садржај дисертације је свеобухватан, теоријска основа за истраживање је коректно приказана и методолошки оправдана на разумљив начин сходно нивоу студија. Кандидаткиња је упозната са процесом научног рада као и са најновијим достигнућима и трендовима у оквиру области којом се бави. С обзиром на комплексност теме, одабир комбинаторног проблема, одабир методе као и одабир специфичне формулације проблема, кандидаткиња исправно увиђа потребу за интердисциплинарним посматрањем области и целовитим решавањем проблема. Добијени резултати су коректни, очекивани и у већини прате или су бољи од објављених у литератури с обзиром да је кандидаткиња извршила упоређивање са достигнућима из литературе. Код методе променљивих формулација примењене на континуалну неконвексну функцију, резултати су вредни пажње и сматрају се основом за даље научно унапређење, с обзиром да метода примењена на континуалан

неконвексан проблем није била разматрана у научним истраживањима до сада на овај начин. Кандидаткиња је извела адекватне закључке на основу свог истраживања. Комисија констатује да је кандидаткиња коректно извршила анализу и обраду задатка којим се бавила и да начин приказа дисертације у потпуности одговара захтевима истраживања.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

Докторска дисертација јесте написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

Дисертација садржи све битне елементе, почев од поставке проблема, коректног осврта на све елементе истраживања, детаљног приказа постојећих резултата, детаљног и адекватног објашњења нових, оригиналних резултата, као и веома исцрпан списак референци, чиме се закључује да је кандидаткиња анализирала неопходну методологију. Дисертација је добро организована, прегледна и јасно написана на основу смерница које је кандидаткиња добила током рада на дисертацији.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Дисертација садржи више оригиналних научних доприноса из области оптимизације, метахеуристика и дискретне математике. Допринос постоји и у смислу примењеног рачунарства (Data Mining). Развијена је метода променљивих околина за проблем максималне тежинске клике. Развијена је нова метода за проблем партиционисања графа на клике заснована на адаптивној методи променљивих околина. За проблем нетежинске клике развијена је метода базирана на промени формулација. Резултати приказани у овој дисертацији су објављени у међународном научном часопису и представљени су на међународним скуповима, чиме се потврђује да ова докторска дисертација представља оригиналан допринос науци. Поред тога на основу резултата истраживања везаних за максимум клике у ретким графовима припремљена су три рада која се тренутно налазе у процесу рецензије у међународним часописима.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања.

Класа метода заснованих на континуалној формулацији је примењена на врло мале графове (не више од 10 чворова). Са становишта данашњих рачунара то су графови скромних димензија. Због тога би требало одређену пажњу посветити анализи мањкавости тих метода и проналажењу могућности да се оне унапреде како би могле бити примењене на веће графове.

X ПРЕДЛОГ КОМИСИЈЕ:

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже да се докторска дисертација кандидаткиње Стефане Јанићијевић, под називом *Методе промена формулација и околина за проблем максималне клике графа*, прихвати, а кандидаткињи одобри јавна одбрана.

Др Драган Урошевић, научни саветник, председник

Др Наташа Сладоје Матић, ванредни професор, члан

Др Татјана Давидовић, виши научни сарадник, члан

Др Тибор Лукић, доцент, члан

Др Ненад Младеновић, научни саветник, ментор