

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Милоша Даниловића**.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета организационих наука **3/35-2** од **12.04.2017.** године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Милоша Даниловића** под насловом:

### **„УНАПРЕЂЕЊЕ КОНСТРУКТИВНИХ ХЕУРИСТИКА ЗА ПРОБЛЕМЕ КОМБИНАТОРНЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ У ОПЕРАЦИОНОМ МЕНАЏМЕНТУ“.**

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**

Кандидат Милош (Драгослав) Даниловић је 2011/2012 школске године уписао докторске студије на Факултету организационих наука, студијски програм Информациони системи и менаџмент, изборно подручје Менаџмент. Положио је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија и на тај начин стекао право израде приступног рада.

Наставно-научно веће Факултета организационих наука, Универзитета у Београду је именovalo Комисију за преглед и оцену научне заснованости приступног рада и теме докторске дисертације **18.11.2015.** године, бр. Одлуке **3/147-11**. Кандидат Милош Даниловић је 16. јуна 2016. године одбранио приступни рад под називом: „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“, под менторством др Оливера Илића, редовног професора, Факултета организационих наука, Универзитета у Београду. Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је на Наставно-научном већу **22.06.2016.** године, бр. 3/76-5. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, на седници одржаној **04.07.2016.** године, одлуком бр. **61206-3266/2-16**,

одобрило је израду предложене докторске дисертације под насловом „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“, а за ментора је именован др Оливер Илић, редовни професор Факултета организационих наука, Универзитета у Београду. Наставно-научно веће Факултета организационих наука је на седници одржаној 13.07.2016. године одлуком бр. 3/92-08 одобрило израду докторске дисертације и одобрено је именовање ментора др Оливера Илића.

Ментор др Оливер Илић је 10.04.2017. године известио Веће студијског програма докторских академских студија Факултета организационих наука да је кандидат Милош Даниловић завршио израду докторске дисертације, а Наставно-научно веће Факултета организационих наука је на седници одржаној **12.04.2017.** године (**Одлука бр. 3/35-2** од 12.04.2017. године), именовало Комисију за преглед, оцену и одбрану завршене докторске дисертације, у саставу:

1. **Др Оливер Илић**, редовни професор Факултета организационих наука, Универзитета у Београду, ментор;
2. **Др Мирјана Чангаловић**, редовни професор Факултета организационих наука у пензији, Универзитета у Београду, члан;
3. **Др Мирко Вујошевић**, редовни професор Факултета организационих наука, Универзитета у Београду, члан;
4. **Др Драган Васиљевић**, редовни професор Факултета организационих наука, Универзитета у Београду, члан;
5. **Др Обрад Бабић**, редовни професор Саобраћајног факултета, Универзитета у Београду, спољни члан.

## **1.2. Научна област дисертације**

Докторска дисертација „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“ припада научној области техничких наука, подручју организационих наука, ужој научној области Рачунарски интегрисана производња и логистика. Израдом дисертације је као ментор руководио **др Оливер Илић**, редовни професор и шеф Катедре за рачунарски интегрисану производњу и логистику Факултета организационих наука, Универзитета у Београду.

## **1.3. Биографски подаци о кандидату**

Кандидат **Милош Даниловић** је рођен 22.04.1985. године у Београду, где је завршио основну школу „**Михаило Петровић Алас**“ као носилац дипломе „Вук Караџић“.

### Образовање:

**Математичку гимназију**, смер за обдарене ученике, је завршио 2004. године. Матурски рад под насловом „Основи статистичке анализе временских низова“ одбранио је са одличном оценом.

Прву годину Основних студија уписао је на **Факултету организационих наука**, Универзитета у Београду, школске 2004/2005 године (буџет). Другу годину уписао је

школске 2005/2006 на смеру **Операциони менаџмент (ОМ)** и определио се за начин студирања по болоњској конвенцији. Апсолвирао је у року 2008. године. Просечна оцена на студијама је 8.4. Завршни рад је радио из предмета: “Рачунарски интегрисана производња” и “Флексибилни производни системи” код редовног професора ФОН-а др Оливера Илића под насловом „Проблем квадратне асигнације у рачунарски интегрисаној производњи“ и одбранио га са оценом 10.

Дипломске академске (Мастер) студије из области Инжењерског и операционог менаџмента, програмско подручје Рачунарски интегрисана производња и логистика је уписао школске 2009/2010. године (буџет), где је положио пет програмом предвиђених испита и одбранио приступни рад са просечном оценом 10. Завршни – мастер рад под насловом „Проблем квадратне асигнације у рачунарски интегрисаној производњи“ одбранио је пред комисијом у саставу: проф. др Оливер Илић, проф. др Драган Васиљевић и проф. др Мирко Вујошевић, дана 15.03.2011. године, са оценом 10.

Докторске студије, изборно подручје МЕНАЏМЕНТ, уписао је школске 2011/2012 године. Положио је следеће испите са оценом 10: Наука о менаџменту код проф. др Мирка Вујошевића, Маркетинг логистика код проф. др Драгана Васиљевића, Интегрисани операциони менаџмент код проф. др Оливера Илића, Одлучивање – изабрана поглавља и Теорија одлучивања код проф. др Бориса Делибашића, Методологија код проф. др Добривоја Михајловића, Теорија алгоритама и Нови трендови у операционим истраживањима код проф. др Мирјане Чангаловић. Испит из предмета Управљање ланцима снабдевања код проф. др Мирка Вујошевића положио је са оценом 9. Приступни рад је одбранио 16. јуна 2016. године.

#### Педагошко, професионално и истраживачко искуство:

Кандидат **Милош Даниловић** је за време мастер студија, школске 2010/2011, примљен као **Сарадник у настави** на катедри Рачунарски интегрисана производња и логистика. Кандидат учествује у настави на предметима основних студија: **Логистика** (обавезни предмет на III години основних студија студијске групе ОМ), **Рачунарски интегрисана производња** (обавезни предмет на IV години основних студија студијске групе ОМ), на четири изборна предмета студијске групе ОМ: **Управљање одржавањем, Маркетинг логистика, Флексибилни производни системи, Управљање ланцима снабдевања**. Такође учествује у настави на мастер академским студијама на студијском програму Менаџмент и организација на четири предмета изборног модула Рачунарски интегрисана логистика, производња и ланци снабдевања: **Рачунарски интегрисани производни системи, Интегрисани логистички системи, Управљање ланцима снабдевања 2 и Напредна и интелигентна производња**.

Посебне теме интересовања, на којима кандидат активно ради, су:

- примена комбинаторне оптимизације за решавање проблема из области производње и логистике,

- алгоритми за решавање проблема формирања ћелија, редоследа и распореда у производњи,
- алгоритми за решавање локацијских проблема,
- проблем рутирања возила у ланцима снабдевања,
- одређивање најкраћих путања у мрежама,
- анализа сложености алгоритама.

У анонимним анкетама студената за оцену квалитета вежби, кандидат Милош Даниловић је као сарадник у настави имао просечну оцену изнад 4.9. Награђен је новчаном наградом од стране Наставно-научног већа за најбоље постигнуте резултате на анкети у јануару 2012. године.

Школске 2012/2013 године примљен је у звање **Асистента у настави** на Катедри Рачунарски интегрисана производња и логистика. Школске 2015/2016 године кандидат је поновно изабран за Асистента у настави на истој катедри и учествује у настави на истим предметима као и до тада.

У анонимним анкетама студената за оцену квалитета вежби, кандидат Милош Даниловић је као асистент у настави имао просечну оцену изнад 4.8.

Био је члан Техничког одбора VIII Скупа привредника и научника СПИН '11, IX Скупа привредника и научника СПИН '13, и X Скупа привредника и научника СПИН'15, у организацији Центра за Операциони менаџмент.

Редовно учествује у припреми “ОМ *Info day-a*” – прилике за информисање потенцијалних (будућих) студената студијске групе ОМ.

Члан је АЛУМНИ асоцијације студената ФОН-овог одсека за ОМ и редовно учествује у организацији њихових скупова.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Милоша Даниловића, под насловом „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“ написана је на 188 страница, садржи 21-у слику и 41-у табелу. Увидом у попис коришћене литературе, уочава се да је кандидат користио 197 референтних јединица. Дисертација је структурирана на следећи начин:

#### 1. УВОД

##### 1.1. Предмет, проблеми, циљ и хипотезе докторске дисертације

###### 1.1.1 Опште хипотезе

- 1.1.2 Посебне хипотезе
- 1.2. Структура докторске дисертације
- 2. СЛОЖЕНОСТ ПРОБЛЕМА**
  - 2.1. Проблеми, алгоритми и сложеност
  - 2.2. Проблеми одлучивања, језици и шеме енковања
  - 2.3. Детерминистичка машина и класа П
  - 2.4. Недетерминистичка машина и класа НП
  - 2.5. Полиномијалне трансформације и НП-комплетност
  - 2.6. Псеудо-полиномијални алгоритми и јака НП-комплетност
- 3. СТРУКТУРА КОНСТРУКТИВНИХ ХЕУРИСТИКА**
  - 3.1. Дефиниције појмова
  - 3.2. Праве и хибридне конструктивне хеуристике
  - 3.3. Прототип праве конструктивне хеуристике
- 4. СЛОЖЕНОСТ ХЕУРИСТИКА**
  - 4.1. Конструктивне хеуристике
  - 4.2. Хеуристике побољшања
  - 4.3. Хибридне хеуристике
- 5. НЕДОСТАЦИ ПОЗНАТИХ ПРАВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ХЕУРИСТИКА**
  - 5.1. Редундантност
  - 5.2. Непрецизност
  - 5.3. Вишезначност
  - 5.4. Необјективност евалуације временске ефикасности
- 6. ГЕНЕРАЛИЗОВАНИ КОНСТРУКТИВНИ АЛГОРИТАМ**
  - 6.1. Једна секвенца у итерацији
  - 6.2. Више секвенци у итерацији
  - 6.3. Променљив број секвенци у итерацији
  - 6.4. Секвенцијална примена различитих GSA
  - 6.5. Диверсификација и Табу листе
- 7. МЕТОДЕ ЕНУМЕРАЦИЈЕ ПЕРМУТАЦИЈА**
  - 7.1. Познате енумерације пермутација
  - 7.2. Нови поступак за генерисање пермутација
  - 7.3. Нова енумерација
  - 7.4. Веза између нове енумерације пермутација и поступка PERMGEN
- 8. ПРОБЛЕМ ФОРМИРАЊА ПРОИЗВОДНИХ ЋЕЛИЈА**
  - 8.1. Дефиниције појмова
  - 8.2. Сужавање допустивог скупа
    - 8.2.1 Генерисање скупа партиција
    - 8.2.2 Дискретан скуп могућих вредности циљне функције
    - 8.2.3 Праг квалитета и глобална ограничења
    - 8.2.4 Корелација између машина и делова
    - 8.2.5 Идентитети, опозити и ћелијски потомци
    - 8.2.6 Јединичне ћелије, резидуали и екстреми
  - 8.3. Нови алгоритам
  - 8.4. Проширење проблема
  - 8.5. Експериментални резултати

## **9. ПРОБЛЕМ РАСПОРЕДА ПРОИЗВОДНИХ ЋЕЛИЈА**

- 9.1. Сложеност проблема и асимптотско понашање
- 9.2. Математички модели са пермутационим матрицама
- 9.3. Нови алгоритам
- 9.4. Неки експериментални резултати

## **10. ПРОБЛЕМ РЕДОСЛЕДА ПОСЛОВА У ЛИНИЈИ**

- 10.1. Дефиниције основних појмова
- 10.2. Поступци за одређивање укупног времена производње
  - 10.2.1 Графички поступак
  - 10.2.2 Матрични поступак
  - 10.2.3 Поступак са графовима
  - 10.2.4 Дуални поступак
  - 10.2.5 PI / IP поступци
- 10.3. HEX алгоритам за проблем редоследа послова у линији
  - 10.3.1 Тајлардово убрзање
- 10.4. Евалуација алгоритама за проблем редоследа послова у линији
- 10.5. Равноправне ситуације
- 10.6. GSA за проблем редоследа послова у линији
  - 10.6.1 Три побољшања NEH алгорита
  - 10.6.2 Утицај вредности аргумената на квалитет решења
  - 10.6.3 Нови алгоритам

## **11. ЗАКЉУЧАК**

- 11.1. Остварени доприноси
- 11.2. Правци будућих истраживања

## **ЛИТЕРАТУРА**

## **БИОГРАФИЈА**

## **СПИСАК ОБЈАВЉЕНИХ РАДОВА**

## **2.2. Кратак приказ појединачних поглавља**

У **уводном поглављу** докторске дисертације описан је проблем истраживања, као и начин на који ће се анализирати постављени проблем истраживања. Постављен је предмет, циљ и хипотезе, које су касније разматране са аспекта прегледа и анализе постојећих знања и литературе из области релевантних за тему дисертације. Уводни део дисертације у кратким цртама приказује и описује структуру рада, кратким прегледом сваког поглавља.

Класе сложености проблема су разматране у **другом поглављу** дисертације. Ово разматрање има посебан значај, јер генерализација конструктивних алгоритама, предложена у дисертацији, симулира функцију недетерминистичке машине. Такође, псеудо-полиномијални алгоритми, разматрани у овом поглављу, представљају циљни облик хеуристика које се предлажу у дисертацији. Главни алат који усмерава нове хеуристике ка псеудополиномијалним алгоритмима је дефинисање поступака за сузавање допуствог скупа решења.

**Треће поглавље** разматра структуру конструктивних хеуристика и дефинише суштинску разлику између правих и хибридних конструктивних хеуристика. На основу ових разматрања дефинише се прототип правих конструктивних хеуристика (ПКХ). Временска ефикасност представља кључни параметар свих хеуристика. У **четвртном поглављу** се хеуристике пореде по временској ефикасности и погодности да се имплементирају у паралелном програмирању.

Недостаци најпознатијих ПКХ објављених у стручној литератури су разматрани у **петом поглављу** рада, у коме су приказане ПКХ за решавање најразноврснијих проблема операционог менаџмента. Обухваћени су поступци из најновијих радова у најугледнијим светским часописима. И поред чињенице да се ради о радовима најуваженијих аутора разматраних области, могу да се уоче значајни недостаци у формулацијама и евалуацији ових алгоритама. Разматрани су редундантност, непрецизност и вишезначност формулације као и необјективност поређења вредности циљне функције и необјективност евалуације временске ефикасности.

У **шестом поглављу** је представљена генерализација конструктивних хеуристика која је заснована на вишеструкој обради парцијалних решења, док **седмо поглавље** рада уводи нови поступак за енумерацију пермутација и нови поступак за генерисање пермутација, базиран на структури ПКХ.

У циљу верификације постављених хипотеза на конкретним проблемима операционог менаџмента одабрани су проблем формирања производних ћелија, проблем распореда производних ћелија и проблем редоследа послова у линији. Примена новог приступа на ове проблеме је дата, редом у **поглављима 8, 9 и 10**. Треба посебно истаћи да је поступак за дефинисање нових алгоритама за ове проблеме усмераваан ка структурама недетерминистичког алгорита и псеудо-полиномијалног алгорита. Тако, паралелно праћење више парцијалних решења проблема редоследа послова у линији симулира избор који спроводи недетерминистичка машина, док дискретизација решења за проблем формирања производних ћелија усмерава поступак ка псеудо-полиномијалној структури.

Експериментални резултати, представљени у поглављима 8, 9 и 10 су показали да је проблем формирања производних ћелија изузетно погодан за предложени приступ и да нови алгоритам даје значајно боље резултате од најбољих објављених резултата. Затим је показано да пермутациона верзија проблема распореда производних ћелија може ефикасно да се прилагоди за примену генерализованог алгорита. Најзад, проблем редоследа послова у линији је искоришћен да се на њему покажу разноврсне могућности генерализованог алгорита за експериментисање у циљу креирања нових, квалитетнијих алгоритама. Експериментални резултати су показали да предложени алгоритам у полиномијалном времену даје резултате који су у рангу најбољих објављених хеуристика за овај проблем.

**Последње поглавље** дисертације је усмерено на будуће правце истраживања и закључна разматрања. Показано је да је циљ истраживања остварен и да су постављене хипотезе доказане.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### **3.1. Савременост и оригиналност**

Свакодневно се у најпознатијим научним часописима објављују радови у којима се предлажу нови алгоритми за решавање проблема комбинаторне оптимизације. Посебно место међу њима заузимају проблеми из класе НП који припадају области операционог менаџмента. Проблеми груписања, распореда и редоследа спадају у групу најчешће обрађиваних проблема операционог менаџмента. Управо на ове проблеме је усмерен фокус дисертације. У складу са наведеним, тема ове докторске дисертације је изузетно актуелна и у научним истраживањима веома заступљена.

Када се говори о методологији коришћеној за израду научних радова из ове области, може се закључити да су најчешће коришћени методолошки приступи: методе оптимизације и метода експеримента. У огромном броју најпознатијих радова је методолошки приступ до те мере идентичан, да представља шаблон по коме се структурирају скоро сви радови. Методе оптимизације су у новије време скоро у потпуности сведене на примену неке од познатих метахеуристика, док метода експеримента подразумева тестирање алгоритма на опште прихваћеним тест инстанцама. Тестирање подразумева експериментално поређење резултата са тренутно најбољим резултатима из литературе.

Методолошки приступи примењени у дисертацији прате приступе из савремене литературе, али и уводе две нове методе које нису до сада разматране у литератури. Прво, метода оптимизације се усмерава ка генерализацији ПКХ, којом се отвара могућност ефикасне обраде тих хеуристика применом паралелног програмирања. Ова метода усмерава даљи развој ових хеуристика ка правцима који одговарају недетерминистичкој машини, односно ка правцима који уз даљи развој хардвера међусобно приближавају класе П и НП. Друга метода непосредно произилази из претходне: генерализоване ПКХ омогућују оригиналну методу евалуације временске ефикасности, која представља најслабију тачку у свим актуелним поступцима евалуације хеуристика.

Имајући у виду изнесено, може се закључити да је предмет истраживања дисертације у складу са савременим дешавањима, истраживачким трендовима и трендовима у операционом менаџменту, као и да добијени резултати истраживања представљају оригинални допринос кандидата постојећим знањима из ове области и отварају простор за њен даљи развој.

#### **3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу**

Кандидат је у току израде докторске дисертације „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“ користио 197 референтних јединица.

У дисертацији је коришћена релевантна и савремена литература, књиге и научни радови објављени у домаћим и међународно признатим часописима, као и зборницима радова са конференција из области директно везаних за тему докторске дисертације.

Литература је коришћена у сврху представљања разматраних проблема истраживања и у циљу приказа досадашњих предлога за решавање ових проблема и њиховог поређења. Овиме је утврђено да постоји потреба за развојем новог приступа. Такође, приказане референце у литератури коришћене су и у циљу поређења предложеног новог приступа генерализованог конструктивног алгоритма са постојећим, у сврху истраживања његових могућности примене, резултата и предности, односно доприноса ове дисертације.

Овде је приказан ужи списак литературе, односно референци од посебног значаја за израду и садржај ове докторске дисертације:

1. Burkard, R., Karisch, S., & Rendl, F. (1997). QAPLIB – A Quadratic Assignment Problem Library. *Journal of Global Optimization*, 10, 391-403.
2. Cook, S. A. (1971). The complexity of theorem proving procedures. *Third Annual ACM Symposium on the Theory of Computing* (pp. 151–158). New York: ACM.
3. Danilovic, M., & Ilic, O. (2016). A generalized constructive algorithm using insertion-based heuristics. *Computers and Operations Research*, 66, 29-43.
4. Dong, X., Huang, H., & Chen, P. (2008). An improved NEH-based heuristic for the permutation flow shop problem. *Computers and Operation Research*, 35(12), 3962–8.
5. Fernandez-Vigas, V., & Framinan, J. (2014). On insertion tie-breaking rules in heuristics for the permutation flowshop scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 45, 60-67.
6. Framinan, J., Leisten, R., & Rajendran, C. (2003). Different initial sequences for the heuristic of Nawaz, Ensore and Ham to minimize makespan, idle time or flowtime in the static permutation flowshop sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 41(1), 121–148.
7. Garey, M., & Johnson, D. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. San Francisco, CA, USA: Freeman.
8. Ilić, O. (2014). An e-Learning tool considering similarity measures for manufacturing cell formation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(3), 617-628.
9. Johnson, S. (1954). Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1, 61–68.
10. Johnson, S. (1959). Discussion: Sequencing n jobs on two machines with arbitrary time lags. *Management Science*, 5, 299–303.
11. Kalczynski, P., & Kamburowski, J. (2011). On recent modifications and extensions of the NEH heuristic for flow shop sequencing. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 36(1), 17–34.
12. Knuth, D. E. (2011). *The Art of Computer Programming, Volume 4A Combinatorial Algorithms*. Boston, USA: ADDISON-WESLEY, Pearson Education Inc.
13. Koopmans, T., & Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica*, 25, 53-76.
14. Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24, 1097–100.
15. Nawaz, M., Ensore Jr, E., & Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega: The International Journal of Management Science*, 11(1), 91–95.
16. Paydar, M., & Saidi-Mehrabad, M. (2013). A Hybrid Genetic-Variable Neighborhood cell Formation Problem Based on Group Efficiency. *Computers and Operations Research*, 40, 980-990.
17. Pinedo, M. (2010). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems* (Fourth ed.). New York: Springer.

18. Punnen, A., & Wang, Y. (2016). The bipartite quadratic assignment problem and extensions. *European Journal of Operational Research*, 250(3), 715-725.
19. Punnen, A., Sripratak, P., & Karapetyan, D. (2015). The bipartite unconstrained 0–1 quadratic programming problem: Polynomially solvable cases. *Discrete Applied Mathematics*, 193(1), 1–10.
20. Rad, S., Ruiz, R., & Boroojerdian, N. (2009). New high performing heuristics for minimizing makespan in permutation flowshops. *Omega: The International Journal of Management Science*, 37, 331–345.
21. Ribas, I., Companys, R., & Tort-Martorell, X. (2010). Comparing three-step heuristics for the permutation flow shop problem. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2062–70.
22. Taillard, E. (1990). Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, 47(1), 67–74.
23. Taillard, E. (1993). Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 64, 278–85.
24. Taillard, E. (2004). *Scheduling instances*. Retrieved 07.05.2015. from <http://ina.eivd.ch/collaborateurs/etd/problemes.dir/ordonnancement.dir/ordonnancement.html>
25. Vasiljevic, D., & Danilovic, M. (2015). Handling ties in heuristics for the permutation flow shop scheduling problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 1-9.

Треба истаћи да је кандидат користио и пет аутоцитата, од чега су два из врхунских међународних часописа.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Кандидат је у току израде ове дисертације користио већи број научних метода истраживања.

Рад на дисертацији је отпочео сагледавањем постојећих научних резултата у области проблема комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту применом научних метода систематизације и класификације научних сазнања. У тој фази коришћене су и методе прикупљања, дедукције, анализе и упоређивања. Област истраживања је огромна, јер се свакодневно објављују нови радови у којима се предлажу алгоритми за решавање проблема комбинаторне оптимизације. На основу критичке анализе постојећих резултата кандидат је дошао до уочавања кључних проблема које је класификовао у четири групе: редундантност, непрецизност, вишезначност и необјективност евалуације временске ефикасности.

У следећој фази истраживања учињен је покушај да се уочени проблем формализује и да се препознају методе које се могу прилагодити за решавање тако дефинисаног проблема. Прво су, анализом комплексности алгоритама, уочене кључне разлике у начинима функционисања ПКХ и хеуристика побољшања. Уочена је могућност прилагођења ПКХ начину функционисања недетерминистичке Тјурингове машине применом паралелног програмирања. Такође је уочена значајна предност псеудо полиномских алгоритама у односу на алгоритме за тврде НП проблеме. Дефинисана је стратегија која усмерава генерализацију конструктивних хеуристика ка паралелизацији обраде.

У трећој фази истраживања развијен је генерализовани конструктивни алгоритам и дефинисан начин еnumerације пермутација који одговара овој генерализацији. Дефинисана је веза између нове еnumerације и корака у генерализованом конструктивном алгоритму. Одређен је поступак за једнозначну објективну евалуацију временске ефикасности генерализованог алгоритма. Примењене су методе теорије алгоритама и теорије сложености.

У четвртој фази су разматрана три изузетно важна проблема операционог менаџмента: проблем формирања производних ћелија, проблем распореда производних ћелија и проблем редоследа послова у линији. Како за ове проблеме постоји огроман број алгоритама објављених у литератури, кандидат је, применом научних метода систематизације и класификације научних сазнања и методама дедукције, анализе и упоређивања, установио најважније резултате остварене у овим областима.

У петој фази је за сваку од три одабране области операционог менаџмента моделовао генерализовани конструктивни алгоритам са циљем да се постојећи алгоритми за те проблеме унапреде.

Коначно, у завршној фази истраживања, извршена је експериментална провера предложеног приступа на опште прихваћеним тест инстанцама.

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

### **3.4. Применљивост остварених резултата**

У дисертацији је спроведена опширна анализа ПКХ. Главна идеја која је усмеравала цео ток истраживања је покушај да се обједине три суштинске карактеристике хеуристика: прецизна полиномијална временска сложеност ПКХ, јасно дефинисан део допустивог скупа који се обрађује са ПКХ и изузетно висок ниво квалитета решења добијених применама хеуристика побољшања. Остварење овако дефинисаног циља је тражено у аналогiji са два кључна појма теорије сложености: недетерминистичком Тјуринговом машином и структуром псеудо-полиномијалних алгоритама. Аналогно недетерминистичкој машини, којом се у сваком кораку доноси исправан избор од више могућих одлука, у приступу ове дисертације се предлаже паралелно праћење више таквих одлука. Како недетерминистичка машина има суперрачунарске способности да тренутно направи прави избор од огромног броја опција, истраживања у дисертацији су усмеравана ка дефинисању услова који ће омогућити да се тај избор сузи на допустиву величину. На тај начин се, усавршавањем хардвера који би омогућавао паралелну обраду све већег броја различитих одлука, проблеми из класе НП нападају из два различита правца. Ово даље омогућава да се сви механизми, који се користе у хеуристикама побољшања, примене и на ПКХ уз значајне предности, а то су једнозначно дефинисана област допустивог скупа која се претражује алгоритмом и прецизно дефинисана полиномијална ефикасност поступка.

Сужавање допустивог скупа на основу специфичности посматране инстанце у многим случајевима омогућује да се унапред значајно смањи кардиналност дискретног скупа могућих вредности циљне функције. Ово даље омогућује конструисање псеудо-

полиномијалне хибридне хеуристике, којом би ПКХ у полиномијалном времену дала оптимално решење.

Резултати, потврђени експерименталном евалуацијом показују да нови приступ може да се примени у свим сегментима огромног скупа комбинаторних проблема операционог менаџмента.

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

Током израде докторске дисертације, кандидат Милош Даниловић показао је способност да самостално обавља научни рад и решава научне проблеме. Кандидат поседује потребна стручна, теоријска и практична знања за самосталан научни рад, што је, осим у процесу израде ове докторске дисертације, доказао квалитетом и бројем објављених научних публикација, као и другим наведеним облицима ангажовања. Кандидат је у досадашњем научно-истраживачком раду показао да поседује темељитост и озбиљност у приступу проблему, креативност у његовом решавању, као и способност сагледавања примене постојећих научних резултата на примерима из праксе.

Свеобухватни и систематизовани преглед литературе из области истраживања, показује способност кандидата за самостално откривање и сагледавање отворених проблема истраживања, као и критичку анализу постојећих сазнања. Милош Даниловић је развио оригиналан приступ за генерализацију конструктивних хеуристика који отвара велике могућности за унапређење постојећих хеуристика за решавање проблема комбинаторне оптимизације и креирање нових. Као потврда овога, предложена генерализација је примењена на најзначајније проблеме операционог менаџмента и дала резултате који у неким сегментима надмашују најбоље објављене резултате.

Током рада на дисертацији кандидат је објавио, као аутор или коаутор, радове у међународним часописима, као и у зборницима са домаћих и међународних конференција. Као истраживач, учествовао је на пројекатима, где је имао прилику да решава реалне истраживачке проблеме.

Узевши у обзир целокупни ток истраживања и остварене резултате у досадашњем научно-истраживачком раду, закључујемо да је кандидат Милош Даниловић способан да се у потпуности самостално бави научно-истраживачким радом.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Свеобухватна анализа постојећих ПКХ је показала да постоје значајни проблеми у формулацијама ових хеуристика који као последицу имају редундантност, непрецизност, вишезначност и необјективну евалуацију. У складу са овим, прва група доприноса које доноси примена генерализованог конструктивног алгоритма (GCA) је управо везана за отклањање ових недостатака:

1. Прототип ПКХ, представљен у поглављу 2, омогућује систематску и свеобухватну репрезентацију ПКХ. Показано је да три функције,  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , представљају суштину ПКХ и да се хеуристике међусобно разликују само по начинима одређивања ове три функције.
2. Формулације хеуристика GREEDY и SCHED1, приказане у поглављу 5 су примери редундантне презентације хеуристика. Понављање делова алгоритма који су заједнички за све ПКХ одвлачи фокус са делова алгоритма који су јединствени за презентовани алгоритам и по којима се тај алгоритам разликује од осталих. С друге стране, формулација GCA усмерава фокус управо на дефинисање функција  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ .
3. Опште усвојена формулација HEX алгоритма, представљена у потпоглављу 10.3, је један од многих примера непрецизне формулације хеуристика. У истом поглављу је дата GCA формулација HEX алгоритма, а фокус усмерен на две суштински битне ствари у алгоритму: приоритетно уређење и поступак за програмирање HEX алгоритма са Тајлардовим убрзањем. Показано је како двосмисленост формулације поразно утиче на објављене резултате.
4. Недвосмислена формулација алгоритама ограничава двосмисленост експерименталних резултата. У дисертацији је посебно разматран опсег непрецизности експерименталних резултата услед непрецизности формулације HEX поступка.
5. Како је основна структура ПКХ дефинисана преко GCA, ово омогућује да се усвоји одређени GCA кођ као јединица мере у експерименталном тестирању временске ефикасности ПКХ. То редукује експерименталну евалуацију ефикасности алгоритама на мерење ефикасности примењених функција. Ово даље значајно редукује некохерентност која је евидентна у скоро свим експерименталним тестирањима хеуристика. Према томе, у дисертацији се показало како примена GCA повећава објективност процеса евалуације ПКХ.
6. Такође, у дисертацији је показано како нова енумерација скупа допустивих решења ПКХ омогућује ефикасно кодирање GCA. Дефинисана веза између уведене енумерације и GCA корака омогућује такође истраживачки рад на поправљању постојећих хеуристика. Наиме, за познате оптималне секвенце тест инстанци може да се утврди шта се дешавало са пермутацијом кроз кораке алгоритма на основу предложене ознаке. Ово може да усмери правац даљих побољшања алгоритама.

Друга, можда и важнија група предности GCA се односи на могућности проширења дефиниције ПКХ увођењем проширеног скупа аргумената. Тако се отварају огромне могућности побољшања постојећих алгоритама и формирање нових. У дисертацији су ове могућности посебно анализиране, при чему је фокус усмерен на посебну врсту проширења: могућност вишеструке примене истог алгоритма са измењеним вредностима аргумената. Ово је важно због једне суштинске чињенице: вишеструка примена истог алгоритма задржава временску ефикасност алгоритма непромењеном. На овај начин, резултати могу значајно да се побољшају уз задржавање свих побројаних предности ПКХ. Ово је значајна алтернатива алгоритмима побољшања.

Експериментална евалуација предложеног приступа је спроведена на три кључна проблема операционог менаџмента: проблем формирања производних ћелија, проблем распореда производних ћелија и проблем редоследа послова у линији. Она је недвосмислено показала предности овог приступа:

1. Нови приступ решавању проблема формирања производних ћелија је показао изузетну супериорност над свим познатим хеуристикама, како у квалитету решења, тако и у временској ефикасности поступка. Дискретизација допустивог скупа је омогућила да предложени хибридни алгоритам буде псеудо-полиномијални алгоритам на свим тестираним инстанцама, што је као последицу имало добијање оптималних решења на свим инстанцама уз полиномијалну временску зависност поступка. Ако се узме у обзир да је у протеклих тридесет година у међународним часописима објављено преко 100 радова са разноврсним алгоритмима за овај проблем и да ни у једном од ових радова нису сви резултати оптимални и да је утрошено време алгоритма у дисертацији за два реда величине краће од најефикаснијих објављених алгоритама, може да се закључи да је у дисертацији остварен суштински допринос решавању проблема формирања производних ћелија.
2. Показано је да је једноставна имплементација GCA на проблем распореда производних ћелија потпуно равноправна на тестираним инстанцама са најпознатијим солвером за овај проблем.
3. Проблем редоследа послова у линији је искоришћен да се покажу све могућности експериментисања са аргументима и њиховим вредностима. Несумњиви допринос је формирање алата који омогућује да се оптимизују алгоритми и креирају нови. Сваки аргумент GCA има прецизно дефинисану везу са током извршавања алгоритма.
4. Резултат дисертације који анализира утицај вредности аргумената на квалитет решења је нови алгоритам који на свим Тајлардовим инстанцама надмашује чувену HEX хеуристику уз непромењену временску сложеност алгоритма. Треба напоменути да је HEX хеуристика једна од најпроучаванијих хеуристика и да постоји велики број покушаја побољшања ове хеуристике. Нови алгоритам даје најбоље резултате од свих објављених ПКХ којима се предлажу побољшања HEX хеуристике.
5. Сви приказани резултати су добијени на једнопроцесорским рачунарима. Предложени приступ може тренутно да се имплементира на вишепроцесорским рачунарима, јер су праћене секвенце потпуно једнозначно дефинисане и независне једна од друге.

## **4.2. Критичка анализа резултата истраживања**

Увидом у дисертацију, полазне хипотезе и циљеве истраживања, остварене резултате, научне и стручне доприносе, Комисија констатује да је кандидат успешно анализирао и систематизовао постојећа научна сазнања истраживањем обимне литературе и да је реализовао веома комплексно истраживање везано за унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту. Остварени резултати истраживања оправдавају почетна очекивања и испуњавају захтеве за квалитет докторске дисертације. Поред оствареног научног доприноса, дисертација садржи и резултате који су веома значајни за практичну примену предложеног решења. Све постављене хипотезе су верификоване кроз теоријска разматрања и проверене експериментално, те је тиме остварен значајан допринос и добијена су сазнања која су релевантна за научну и стручну заједницу у овој области.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Из докторске дисертације кандидата Милоша Даниловића проистекло је више научних радова објављених у часописима међународног и националног значаја, као и у зборницима са домаћих и међународних конференција (категоризација извршена према препорукама Министарства просвете, науке и технолошког развоја Србије):

#### Категорија M21:

1. **Danilovic, M.**, Ilic, O. (2016). A generalized constructive algorithm using insertion-based heuristics. *Computers and Operations Research*, **66**, 29-43, ISSN: 0305-0548 (IF2015: 1.988), DOI: 10.1016/j.cor.2015.07.009  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054815001768>
2. Vasiljevic, D., **Danilovic, M.** (2015). Handling ties in heuristics for the permutation flow shop scheduling problem. *Journal of Manufacturing Systems*, **35**, 1-9, ISSN: 0278-6125 (IF2015: 2.240), DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.11.011  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027861251400140X>

#### Категорија M23:

1. Vasiljevic, D., **Danilovic, M.** (2013). A Novel Linear Algorithm for Shortest Paths in Networks. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, **30**(2), 1250054-1–1250054-25, ISSN: 0217-5959 (IF2014: 0.346), DOI: 10.1142/S0217595912500546  
<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217595912500546>

#### Категорија M33:

1. **Danilovic, M.**, Ilic, O. (2012). Mathematical Models and Techniques for Quadratic Assignment Problem, *XIII International Symposium SymOrg 2012, "Innovative management and business performance"*, Symposium proceedings, 1320-1327, ISBN 978-86-7680-295-1, Book of Abstracts, Faculty of Organizational Sciences, University of Belgrade, Zlatibor, Serbia.  
[http://www.symorg.fon.bg.ac.rs/download/Program\\_SymOrg2012.pdf](http://www.symorg.fon.bg.ac.rs/download/Program_SymOrg2012.pdf)
2. **Danilovic, M.**, Ilic, O. (2016). A novel algorithm for combinatorial problem in manufacturing cell formation, *XV International Symposium SymOrg 2016, „Reshaping the future through sustainable business development and entrepreneurship “*, Symposium proceedings, 954-961, ISBN 978-86-7680-326-2, Book of Abstracts, Faculty of Organizational Sciences, University of Belgrade, COBISS.SR-ID 223988236, Zlatibor, Serbia.  
<http://symorg.fon.bg.ac.rs/proceedings/2016/papers/OPERATIONS%20MANAGEMENT.pdf>

### Категорија М63:

1. **Даниловић, М., Илић, О.,** (2011). Алгоритми за решавање проблема квадратне асигнације, *YU INFO 2011, Конференција о рачунарским наукама и информационим технологијама*, Копаоник, 06.-09.03.2011. године, Зборник радова, стр. 1-6, ISBN: 978-86-85525-08-7.  
<http://www.yuinfo.org/zbornici/2011/html/pdf/024.pdf>
2. **Даниловић, М.,** (2011). Примена алгоритама за најкраће путање у мрежама у проблемима вишеетапног процеса управљања, *SYM-OP-IS 2011, XXXVIII Симпозијум о операционим истраживањима*, Златибор, 04.-07.10.2011. године, Зборник радова, стр. 238-241, ISBN: 978-86-403-1168-7
3. **Даниловић, М., Илић, О.,** (2011). Генетски алгоритми за решавање проблема квадратне асигнације, *SPIN 2011, VIII Скуп привредника и научника*, Привредна комора Србије у Београду, 01.-02.11.2011. године, Зборник радова, стр. 539-546, ISBN: 978-86-7680-244-9  
[http://www.spin.fon.bg.ac.rs/doc/ret/SPIN%202011/Sekcije/12kvantitativne%20metode%20i%20modeli%20u%20menadzmpdf/1201\\_GENETSKI%20ALGORITMI%20ZA%20RE%C5%A0AVANJE%20PROBLEMA%20KVADRATNE%20ASIGNACIJE.pdf](http://www.spin.fon.bg.ac.rs/doc/ret/SPIN%202011/Sekcije/12kvantitativne%20metode%20i%20modeli%20u%20menadzmpdf/1201_GENETSKI%20ALGORITMI%20ZA%20RE%C5%A0AVANJE%20PROBLEMA%20KVADRATNE%20ASIGNACIJE.pdf)
4. **Даниловић, М., Илић, О.,** (2012). Алгоритам прорачуна временског размака производње за проблем редоследа у проточној радионици, *YU INFO 2012, , XVIII Конференција о рачунарским наукама и информационим технологијама*, 29.02.-03.03.2012. године, Копаоник, Зборник радова, стр. 173-178, ISBN: 978-86-85525-09-4  
<http://www.yuinfo.org/zbornici/2012/html/pdf/376.pdf>
5. **Даниловић, М.,** (2012). Генерализација HEX хеуристике у пермутационим flowshop проблемима, *SYM-OP-IS 2012, XXXIX Симпозијум о операционим истраживањима*, Тара, 25.-28.09.2012. године, Зборник радова, стр. 311-314, ISBN: 978-86-7488-086-9  
[http://symopis.vggs.rs/files/PROGRAM\\_RADA\\_SYMOPIS\\_2012.pdf](http://symopis.vggs.rs/files/PROGRAM_RADA_SYMOPIS_2012.pdf)
6. **Даниловић, М., Илић, О.,** (2013). Нова формализација и проширење фазе уметања у HEX хеуристици, *YU INFO 2013, XIX Конференција о рачунарским наукама и информационим технологијама*, 03-06. 03. 2013. године, Копаоник, Зборник радова – ЦД, стр. 304-309, ISBN: 978-86-85525-11-7  
<http://www.yuinfo.org/zbornici/2013/html/pdf/686.pdf>
7. **Даниловић, М., Илић, О.,** (2014). Примена генерализоване конструктивне хеуристике на пермутациони flowshop проблем, *YU INFO 2014, XX научно-стручна и бизнис конференција*, 09-13.03.2014. године, Копаоник, Зборник радова, стр. 195-199, ISBN: 978-86-85525-13-1  
<http://www.yuinfo.org/YUINFO%202014%20zbornik.pdf>

8. **Даниловић, М.**, Илић, О., (2015). Нови приступ решавању пермутационог flowshop проблема, *YU INFO 2015, XXI научно-стручна и бизнис конференција*, 08.-11.03.2015. године, Копаоник, Зборник радова, стр. 290-295, ISBN: 978-86-85525-15-5  
<http://www.yuinfo.org/YUINFO%202015%20zbornik.pdf>
9. **Даниловић, М.**, Илић, О., (2016). Генерализовани конструктивни алгоритам за формирање производних ћелија, *YU INFO 2016, XXII научно-стручна и бизнис конференција*, 28.02.-02.03.2016. године, Копаоник, Зборник радова, стр. 169-174, ISBN: 978-86-85525-17-9, Друштво за информационе системе и рачунарске мреже, Београд.  
<http://yuinfo.artkey.rs/zbornici/2016/YUINFO2016.pdf>

Наведени радови су до сада цитирани укупно 6 пута у часописима са SCiE листе са импакт фактором.

#### Рецензије и цитираност

Милош Даниловић је успешно обавио рецензије у следећим научним часописима међународног значаја (M20):

- Computers and Operations Research – успешно обављене четири рецензије и добијен сертификат (Recognized Reviewer) у септембру 2015,
- International Journal of Production Research – успешно обављене три рецензије,
- Expert Systems with Applications - успешно обављене три рецензије.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

На основу прегледа и анализе докторске дисертације, Комисија сматра да је докторска дисертација под називом „Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“ кандидата Милоша Даниловића написана према стандардима научно-истраживачког рада. Такође, ова докторска дисертација испуњава све услове прописане Законом о високом образовању, стандардима, правилницима и Статутом Факултета организационих наука и Универзитета у Београду. На основу актуелности теме, резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат Милош Даниловић успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања.

Докторска дисертација приказује нови приступ за унапређење хеуристика за решавање пермутационих проблема операционог менаџмента. У ту сврху су успешно решени следећи постављени проблеми истраживања:

- дефинисање релација које постоје између поступака за генерисање пермутација и корака ПКХ;
- генерализација ПКХ са циљем формализације паралелне обраде;
- примена GSA за решавање одабраних проблема операционог менаџмента;

- примена ПКХ у новом хибридном алгоритму за проблем формирања производних ћелија који по резултатима надмашује све познате хеуристике за решавање овог проблема;
- креирање нове ПКХ за решавање пермутационог *flowshop* проблема, која је боља од најбољих постојећих конструктивних хеуристика за тај проблем.

Кандидат Милош Даниловић је у докторској дисертацији дошао до нових и оригиналних научних закључака, што је потврђено објављивањем три рада у научним часописима међународног значаја М(20), као и објављивањем више радова у зборницима међународних научних скупова М(30) и зборницима скупова националног значаја М(60). С обзиром на научну актуелност дисертације, оригиналност приказаних резултата и методолошку и тематску адекватност, ова докторска дисертација задовољава највише критеријуме и квалификује кандидата, Милоша Даниловића, за самосталан научно-истраживачки рад. Ценећи научне и стручне доприносе, који су израдом докторске дисертације остварени, Комисија констатује да су остварени постављени циљеви истраживања и дисертацију позитивно оцењује.

На основу свега претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Факултета организационих наука да се докторска дисертација под насловом **„Унапређење конструктивних хеуристика за проблеме комбинаторне оптимизације у операционом менаџменту“**, кандидата **Милоша Даниловића**, прихвати као успешно завршена, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 26.04.2017. године,

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

**Др Оливер Илић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

---

**Др Мирјана Чангаловић**, редовни професор у пензији,  
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

---

**Др Мирко Вујошевић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

---

**Др Драган Васиљевић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука

---

**Др Обрад Бабић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет