

Наставно-научном већу
Математичког факултета
Универзитета у Београду

Одлуком Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду донетом на 309. седници одржаној 21. 6. 2013. именовани смо у Комисију за преглед и оцену рукописа

„Метахеуристички приступ решавању једне класе оптимизационих проблема у транспорту“,

који је кандидаткиња **Наташа Ковач** поднела као своју докторску дисертацију. Комисија је предати рукопис пажљиво прочитала и подноси Наставно – научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

Биографија кандидата

Наташа Ковач је рођена 04. децембра 1971. године у Апатину где је завршила основну и средњу школу као ђак генерације. Природно-математички факултет у Новом Саду, смер Дипломирани информатичар, уписала је 1990. године. Дипломирала је 1996. године, са просечном оценом 8.69 из положених испита и оценом 10 на дипломском раду. Исте године је на Природно-математичком факултету у Новом Саду уписала магистарске студије, смер Дискретна математика, и положила је све испите са просечном оценом 10. Магистарски рад на тему "Графови у Delphi-у" одбранила је 14. септембра 1999. године са оценом 10.

За постигнут одличан успех из свих предмета у току основног и средњег школовања додељена јој је Вукова диплома. У току основног, средњег школовања и студија освојила је више награда на такмичењима из области природно-математичких наука. У периоду од септембра 1996. до јуна 1997. године била је запослена на Електротехничком и Машинском факултету Универзитета у Новом Саду као стручни сарадник. Од јануара 2000. до октобра 2002. године била је запослена у Средњој школи Котор, као професор на предметима Рачунарство и информатика и Математика. Од октобра 2002. до јуна 2016. била је ангажована на Поморском факултету у Котору као стручни сарадник а затим и као асистент. На истом факултету, од 2008. до 2011. обављала је функцију руководиоца студијског програма Бродомашинство. Од септембра 2016. до децембра 2016. радила је на Факултету Информационих технологија Универзитета Медитеран у Подгорици. Од јануара 2017. запослена је као предавач на Факултету примењених наука Универзитета Доња Горица у Подгорици на курсевима Геометрија и Аналитичка геометрија.

Предмет дисертације

У рукопису „Метахеуристички приступ решавању једне класе оптимизационих проблема у транспорту“ разматране су две варијанте проблема доделе везова (енгл. *Berth allocation problem* - ВАР): статичка (енгл. *Minimum Cost Hybrid Berth Allocation Problem* - МСНВАР) и динамичка (енгл. *Dynamic Minimum Cost Hybrid Berth Allocation Problem* - ДМСНВАР) варијанта хибридне алокације бродова са минимизацијом укупних трошкова алокације, које су од великог значаја у поморском транспорту.

ДМСНВАР је нова варијанта проблема доделе везова која је предложена и формулисана у овој дисертацији, а до сада није разматрана у литератури. Предложена варијанта варијанта настала је из потребе бољег осликавања реалне ситуације у контејнерским терминалима, узимајући у обзир захтеве везане за време, ресурсе и трошкове. Циљ проблема ДМСНВАР је направити план доделе везова за задати плански период, који задовољава одређени скуп ограничења и минимизује трошкове настале услед чекања у односу на очекивано време доласка, трошкове кашњења у односу на планирано време завршетка обраде брода и додатне трошкове опслуживања који настају услед неадекватних позиција бродова на везу. Проблем ДМСНВАР укључује низ специфичности по којима се разликује од постојећих варијанти проблема доделе везова, те математички модели који су до сада предложени у литератури не описују адекватно разматрани проблем. Из истог разлога, постојеће методе решавања сличних проблема доделе везова не могу бити директно примењене на нови ВАР. Анализирана је сложеност проблема и показано је да је предложени ДМСНВАР НП-тежак проблем у јаком смислу. У дисертацији је доказано да је и статичка варијанта – МСНВАР такође НП-тежак проблем у јаком смислу.

У дисертацији је најпре дат детаљан опис проблема доделе везова (ВАР) и његових варијанти, као и детаљан преглед релевантне литературе. Затим су изложени математички модели МСНВАР-а и ДМСНВАР-а који укључују све карактеристике и ограничења разматраних проблема. Предложени математички модели су упоређени у смислу ефикасности коришћењем егзактног решавача CPLEX 12.3 и егзактног алгоритма заснованог на комбинаторној формулацији. Експериментални резултати су показали да оба егзактна решавача проналазе оптимална или допустива решења проблема МСНВАР и ДМСНВАР само на реалним и генерисаним инстанцама проблема малих и средњих димензија, што је и очекивано, имајући у виду сложеност проблема. Из тог разлога, коришћење метахеуристичких метода, представља адекватан приступ за решавање инстанци већих димензија ових проблема.

У циљу решавања првог проблема (МСНВАР), дизајнирано је пет метахеуристичких метода: Еволутивни алгоритам (енгл. *Evolutionary Algorithm* - EA), Метода оптимизације колонијом пчела (енгл. *Bee Colony Optimization* - BCO), Комбиновани генетски алгоритам (енгл. *combined Genetic Algorithm* - cGA), Метода променљивог спуста (енгл. *Variable Neighborhood Descent* - VND) и Општа метода променљивих околина (енгл. *General Variable Neighborhood Search* - GVNS). За решавање ДМСНВАР-а, дизајнирано је шест метахеуристичких метода: Оптимизација колонијом пчела са побољшањем комплетног решења (енгл. *Improvement Based Bee Colony Optimization* - BCOi), Комбиновани генетски

алгоритам (сGA), Метода променљивог спуста (VND), Вишестартна метода променљивог спуста (енгл. *Multistart Variable Neighborhood Descent* - MS-VND), Општа метода променљивих околина (GVNS) и Адаптивна метода променљивих околина (енгл. *Skewed Variable Neighborhood Search* - SVNS). Елементи сваке од предложених метахеуристичких су прилагођени карактеристикама разматраних проблема.

Метахеуристичке методе развијене за МСНВАР и ДМСНВАР су тестиране на скупу реалних инстанци из литературе и скупу генерисаних инстанци већих димензија које прате структуру реалних инстанци. Серије прелиминарних тестова су извршене на подскупу тест примера у циљу одређивања адекватних вредности параметара метода. Све метахеуристичке методе су затим тестиране на реалним и генерисаним инстанцама, а добијени резултати су упоређени и анализирани.

Анализом и поређењем добијених резултата метахеуристичких метода за проблем МСНВАР, закључено је да све метахеуристичке методе достижу оптимално решење добијено егзактним решавачем на реалним примерима. Притом ЕА, сGA, ВСО и GVNS достижу оптимално решење у сваком извршавању алгоритма. Све метахеуристичке методе су надмашиле егзактни решавач у односу на просечно време извршавања, док су сGA, VND и GVNS имале краће просечно време извршавања у односу на егзактни решавач на свакој тест инстанци. Међу четири предложене метахеуристичке за МСНВАР, најкраће просечно време извршавања на свим реалним тест инстанцама има GVNS. На генерисаним тест инстанцама МСНВАР-а, сGA показује најбоље перформансе у односу на друге метахеуристичке методе у погледу времена потребних за генерисање најбољих решења. Имајући у виду да и остале метахеуристичке методе имају мало просечно процентуално одступање од најбољег добијеног решења, и да су перформансе сGA алгоритма добре на обе класе тест инстанци, закључено је да се сGA може сматрати за најпогоднију методу за решавање МСНВАР-а.

При решавању ДМСНВАР-а, експериментални резултати су показали да све четири VNS метахеуристичке, за сваки тест пример малих димензија, достижу оптимално решење добијено CPLEX решавачем. Најбољу стабилност показује SVNS метода, док је у односу на времена извршавања GVNS метода имала најбоље резултате. Све предложене метахеуристичке су значајно брже у односу на CPLEX решавач и показују добру стабилност са малим одступањима од оптимума. На тест инстанцама већих димензија, сGA је супериоран у односу на остале предложене метахеуристичке методе у смислу квалитета генерисаних решења. Просечна процентуална одступања најбољих решења предложених метахеуристичких од најбољих познатих решења, као и одговарајућа просечна времена извршавања су веома мала. Из тог разлога се све предложене методе могу сматрати погодним за решавање ДМСНВАР-а. Ипак, у погледу квалитета генерисаних решења, на свим класама тест инстанци најбоље перформансе показује сGA. Експериментални резултати показују да ВСО_i, сGA, VND, MS-VND, GVNS и SVNS методе прилагођене за решавање ДМСНВАР-а, остају стабилне и задржавају добре перформансе и при решавању тешких тест инстанци са великим бројем алоцираних бродова. Осим тога, очекивано време извршавања на великим инстанцама остаје у оквиру пожељних, малих вредности.

Приказ дисертације

Рукопис има 187 страна и обухвата 7 поглавља основног текста, списак коришћене литературе од 199 референце и 17 табела. Структура рукописа је следећа.

У првом, уводном, поглављу дефинисани су проблеми оптимизације и дат преглед основних карактеристика проблема оптимизације у контејнерском терминалу. Изложени су концепти метода оптимизације, њихова подела и дат је кратак преглед сложености алгоритама.

У другом поглављу изложени су основни принципи и карактеристике метахеуристичких метода. Детаљно су описани еволутивни алгоритми, оптимизација колонијом пчела, метода променљивих околина, а затим је дат и кратак преглед још неких најчешће коришћених метахеуристичких метода.

У трећем поглављу је дат кратак опис структуре контејнерског терминала као и детаљан преглед најзначајнијих проблема оптимизације у контејнерском терминалу. Посебна пажња је посвећена опису проблема доделе везова и његовој класификацији. Наведени су и примери успешне примене метахеуристичких метода на варијанте проблема доделе везова и сродне проблеме из литературе.

Четврто поглавље садржи детаљан опис статичког проблема доделе везова (MCHVP) и уводи нов динамички проблем доделе везова (DMCHVP). Проблеми разматрани у дисертацији се састоје у одређивању оптималног плана доделе везова за скуп бродова. За сваки брод, неопходно је одредити референтне тачке, односно, индекс веза и временски тренутак почетка обраде брода. Циљ проблема је минимизовати трошкове доделе веза који није омиљен, трошкове убрзавања или чекања у односу на очекивано време доласка и трошкове кашњења у односу на планирано време завршетка обраде брода. Притом је неопходно да план доделе везова задовољи низ ограничења која произилазе из праксе, а која се односе на међусобну конфликтност бродова као и на просторна и временска ограничења.

У четвртом поглављу је уведена и адекватна нотација а затим су изложени нови адекватни математички модели који обухватају све карактеристике разматраних проблема. Прецизније, MCHVP и DMCHVP су формулисани у виду мешовитих целобројних линеарних програма (енгл. *Mixed Integer Linear Program - MILP*). За разлику од статичке варијанте, DMCHVP укључује строжа ограничења на време везивања брода. DMCHVP формулација је добијена модификацијом модела статичког MCHVP-а и његовим прилагођавањем динамичким карактеристикама DMCHVP-а.

Четврто поглавље садржи анализу сложености MCHVP-а и као и предложеног DMCHVP-а, при чему је доказано да оба припадају класи НП-тежких проблема оптимизације. Релаксација разматраних проблема доделе везова поређена је са проблемом распоређивања идентичних машина са временом појављивања послова и минимизацијом укупног тежинског кашњења (енгл. *identical machine scheduling problem with release dates and minimization of total weighted tardiness*). Познато је да је проблем распоређивања идентичних машина НП-тежак. У дисертацији је доказана аналогија између релаксације разматраног проблема MCHVP и проблема распоређивања идентичних машина и закључено је да је предложени проблем MCHVP такође НП-тежак, а затим је уочена аналогија између MCHVP-а и DMCHVP-а, на основу које је закључено да је и проблем DMCHVP такође НП-тежак.

У петом поглављу представљена је структура и детаљно изложени елементи метахеуристичких метода развијених за решавање проблема MCHBAP и DMCHBAP: еволутивни алгоритам (EA), комбиновани генетски алгоритам (cGA), оптимизација колонијом пчела (BCO), верзија оптимизације колонијом пчела са поправком комплетног решења (BCOi), метода променљивог спуста (VND), вишестартна метода променљивог спуста (MS-VND), општа метода променљивих околина (GVNS) и адаптивна метода променљивих околина (SVNS). Све метахеуристичке методе предложене у овој дисертацији засноване су на комбинаторној формулацији MCHBAP-а и DMCHBAP-а. Осим тога, предложене методе користе исте софистициране структуре података засноване на листама и обухватају исту фазу иницијализације (предпроцесирања).

Предложени EA користи целобројно кодирање јединки, рулетску и турнирску селекцију, као и четири типа оператора мутације. Након примене мутације, у свакој генерацији су над неколико одабраних јединки примењене две процедуре оптимизације, које имају за циљ побољшање квалитета одабраних јединки. Свака итерација cGA се састоји од фазе селекције, фазе мутације са два типа оператора мутације, и фазе оптимизације у којој алгоритам позива две процедуре поправке решења и формира статистичку јединку која има улогу преношења знања формираног прикупљањем информација у претходним генерацијама cGA алгоритма.

У циљу побољшања квалитета формираног решења, стандардни BCO алгоритам је проширен фазом поправке комплетног решења која садржи три технике поправке комплетног решења. На крају сваке BCO итерације, алгоритам примењује прву процедуру поправке на свако комплетно решење. У циљу смањења укупног времена извршавања алгоритма, друга поправка решења се примењује након NC итерација. Трећа техника поправке решења примењује се на најбоље решење, при сваком побољшању глобално најбољег решења. У овом поглављу је доказано да се предложеним BCO алгоритмом може достићи оптимално решење у коначном броју BCO корака. Прецизије, по први пут у литератури дат је доказ да BCO метода може да формира оптимално решење за проблем доделе везова са вероватноћом строго већом од нуле.

Концепт пара секвенци, употребљен је за репрезентацију решења MCHBAP-а и DMCHBAP-а код свих предложених метода заснованих на локалном претраживању. Осим тога, VNS методе користе концепт најдужега заједничког подниза (енгл. *longest common subsequence* - LCS) који обезбеђује декодирање пара секвенци у допустиво BAP решење. Користећи запажања формирана на основу упоређивања парова секвенци додељених иницијалном и најбољем решењу различитих тест инстанци дефинисана су три типа околина у VND алгоритму. Овај алгоритам је послужио као основа за VND алгоритам са вишеструким покретањем (MS-VND). Предложени GVNS садржи фазу размрдавања и користи шест околина у VND-у. Процедура размрдавања је базирана на стохастичким трансформацијама тренутно најбољег решења у циљу диверсификације претраге простора решења. У фази локалне претраге, уместо уобичајене процедуре локалне претраге, имплементиран је VND који на систематичан начин претажује шест околина формираног решења. SVNS је предложен са циљем побољшања перформанси алгоритма при решавању инстанци проблема које имају неколико раздвојених и удаљених околина са решењима блиским оптимуму.

У шестом поглављу изложени су експериментални резултати добијени на скупу реалних инстанци мањих димензија и скупу генерисаних инстанци средњих и већих димензија. За решавање MCHBAP-а и DMCHBAP-а коришћена је MILP формулација у

оквиру егзактног CPLEX решавача, при чему су добијена оптимална решења само на скупу реалних инстанци мањих димензија за ограничено време извршавања од 1 сата. Коришћен је и егзактни алгоритам, заснован на комбинаторној формулацији MCHBAP-а и DMCHBAP-а, који је успео да реши генерисане инстанце са мање од 50 бродова у времену које се мери сатима.

За предложене метахеуристичке методе најпре је извршен низ прелиминарних тестова на репрезентативном подскупу инстанци у циљу одређивања вредности параметара које обезбеђују најбоље перформансе дизајнираних метахеуристичких метода. Анализиран је и утицај техника поправке решења у BCO алгоритму. Након одређивања адекватних вредности параметара, предложене метахеуристичке су тестиране на скупу реалних и генерисаних инстанци. Добијени резултати су анализирани и поређени у погледу просечног квалитета решења, времена извршавања и стабилности алгоритама.

Експерименти који се односе на MCHBAP извршени су на два скупа инстанци: реалним инстанцама мањих димензија и генерисаним инстанцама средњих димензија, које егзактни алгоритам не може да реши до оптималности. На реалним инстанцама, све предложене метахеуристичке методе достижу оптимално решење добијено егзактним решавачем. Све метахеуристичке методе су надмашиле егзактни решавач у односу на просечно време извршавања, док су cGA, VND и GVNS показали боље перформансе од егзактног решавача на свакој тест инстанци. Најкраће просечно време извршавања на свим реалним тест инстанцама има GVNS. На генерисаним тест инстанцама, EA, cGA и GVNS достижу најбоља позната решења за све тест инстанце. BCO метода није успела да генерише најбоље познато решење само у случају једне тест инстанце. VND има највеће просечно процентуално одступање генерисаног решења у односу на најбоље познато решење док cGA показује најбоље резултате у односу на просечне трошкове и у односу на просечно процентуално одступање формираних решења. Општи закључак је да у односу на времена потребна за генерисање најбољих решења cGA показује најбоље перформансе у односу на остале предложене метахеуристичке методе за MCHBAP на генерисаним тест инстанцама. Имајући у виду да све предложене метахеуристичке методе имају мало просечно процентуално одступање од најбољег формираног решења, и да су перформансе cGA алгоритма добре на обе класе тест инстанци, закључак је да се cGA може сматрати за најпогоднију методу за решавање статичког MCHBAP-а.

Метахеуристичке методе развијене за динамичку варијанту алокације бродова, DMCHBAP су тестиране на четири класе генерисаних тест инстанци. Све четири метахеуристичке засноване на локалном претраживању, за сваки тест пример малих димензија, генеришу оптимално решење добијено CPLEX решавачем који користи предложену MILP формулацију проблема. Најбољу стабилност показује SVNS метода, јер достиже оптимално решење у свим извршавањима алгоритма за сваку тест инстанцу. У односу на времена извршавања, GVNS метода је најбрже генерисала најбоља решења. За инстанце малих димензија за које CPLEX није генерисао оптимално решење у дефинисаном временском интервалу, VNS метахеуристичке су побољшале горње границе добијене CPLEX-ом, осим у случају једне инстанце када се најбоље решење четири VNS метахеуристичке поклапа са горњом границом оптималног решења коју је вратио CPLEX. На овом скупу инстанци, VND се показао као најбржи метод, док VND и SVNS показују најбољу стабилност. На тест инстанцама средњих димензија, уочава се да су просечна процентуална одступања од најбољег решења као и времена извршавања предложених алгоритама врло мала за све имплементирание методе, и због тога се све предложене

методе могу сматрати погодним за решавање DMCHBAP-а. Међутим, у односу на квалитет генерисаних решења, на овим тест инстанцама најбоље перформансе показује cGA, док MS-VND генерише квалитетна решења у кратком времену извршавања. На тест инстанцама великих димензија, најбржи метод је VND, међутим, ова метахеуристика има највеће просечно процентуално одступање од најбољег решења у односу на остале методе. Предложене популационе методе, cGA и VCOi, показују најбоље перформансе у погледу стабилности. Општи закључак је да све предложене методе за решавање DMCHBAP-а, остају стабилне и показују добре перформансе кад се примене на тешке тест инстанце са великим бројем алоцираних бродова. Ови резултати потврђују да све предложене метахеуристике представљају погодне методе оптимизације за решавање DMCHBAP-а. Све методе дају решења са малим одступањем од најбољих вредности, док очекивано време извршавања на великим инстанцама остаје у оквиру пожељних, малих вредности.

У последњем, седмом поглављу, дат је закључак, наведени су научни доприноси дисертације, као и правци будућих истраживања.

Главни научни доприноси дисертације

Резултати приказани у дисертацији представљају научни допринос са теоријског и практичног аспекта областима комбинаторне оптимизације, операционих истраживања, метахеуристичких метода и изучавању проблема доделе везова у контејнерским терминалима. Допринос областима оптимизације и математичког моделирања се огледа у дефинисању новог проблема доделе везова и развоју нових адекватних математичких модела. Дизајн и имплементација неколико метахеуристичких метода прилагођених разматраном проблему представљају допринос области метахеуристичких метода. Развијени софтвери се могу применити у реалним системима приликом организације поморског транспорта, што представља допринос области операционих истраживања.

Прецизније, научни доприноси истраживања приказаних у рукопису су следећи:

- систематичан преглед научне литературе која се бави проблемом доделе везова у контејнерским терминалима;
- увођење нове варијанте проблема динамичке хибридне доделе везова у контејнерском терминалу, која за циљ има минимизацију укупних трошкова насталих због смештања брода на вез који није означен као омиљен, чекања брода у односу на очекивано време доласка и кашњења у односу на планирано време завршетка обраде;
- формулисање новог математичког модела мешовитог целобројног линеарног програмирања за динамичку хибридну варијанту доделе везова у контејнерском терминалу са минимизацијом укупних трошкова;
- анализа сложености статичке и динамичке варијанте проблема и докази да су обе варијанте доделе везова НП-тешки проблеми у јаком смислу, чак и у случају потпроблема добијених игнорисањем захтева за омиљеним локацијама веза и функције циља која минимизира само укупно тежинско кашњење бродова;
- доказ да VCO метода може да формира оптимално решење за проблем доделе везова са вероватноћом строго већом од нуле;

- дизајнирање и имплементација метахеуристичких алгоритама из класе еволутивних алгоритама, интелигенције роја и променљивих околина за решавање статичке и динамичке варијанте проблема доделе везова. Предложени алгоритми су прилагођени специфичним карактеристикама разматраних ДМСНВАР и МСНВАР варијанти, али се истовремено лако могу даље трансформисати и применити као метахеуристичке технике за решавање сличних проблема оптимизације у контејнерском терминалу;
- имплементирана софтверска решења могу бити примењена као независни алати у лучким терминалима у циљу формирања планова доделе везова или могу бити интегрисана у комплекснији систем за подршку доношењу одлука који ће давати свеобухватне информације о контејнерском терминалу у реалном времену одзива.

Научни радови кандидата

Оригинални резултати кандидата који се односе на проблематику докторске дисертације публиковани су у радовима:

- [1] S. Kordić, T. Davidović, **N. Kovač**, B. Dragović. Combinatorial approach to exactly solving discrete and hybrid berth allocation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21-22):8952-8973, ISSN: 0307-904X, 2016. (M21, IF2016 2.350)
- [2] **N. Kovač**, T. Davidović, Z. Stanimirović. Variable neighborhood search methods for the dynamic minimum cost hybrid berth allocation problem. *Information Technology and Control*, ISSN: 1392-124X, 2018 (прихваћен за публикување, потврда у прилогу). (M23, IF2017 0.800)
- [3] **N. Kovač**. Metaheuristic approaches for the berth allocation problem. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 27(3):265-289, 2017. (M51)
- [4] [4] **N. Kovač**, Z. Stanimirović, T. Davidović. Metaheuristic approaches for the minimum cost hybrid berth allocation problem. In C. Konstantopoulos and G. Pantziou, Eds Konstantopoulos, C. i Pantziou, G., *Modelling, Computing and Data Handling Methodologies for Maritime Transport*, pages 1-47. Springer, New York Dordrecht, Heidelberg London, 2017. (M14)
- [5] **N. Kovač**, T. Davidović, Z. Stanimirović. Evolutionary Algorithm for the Minimum Cost Hybrid Berth Allocation Problem, The 6th International Conference on. Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA 2015), July 06 – 08, 2015, Corfu, Greece, IEEE Conference publications, pp. 1 - 6, DOI: 10.1109/IISA.2015.7388042 (M33)
- [6] S. Kordić, **N. Kovač**, T. Davidović. Divide and conquer approach to discrete berth allocation problem. In *Proceedings of the XIII Balkan Conference on Operational Research*, pages 307-316, BALCOR 2015, Constanca, Romania, 2015. (M33)
- [7] T. Davidović, **N. Kovač**, Z. Stanimirović. VNS-based approach to minimum cost hybrid berth allocation problem. In *Proceedings of the XLII International Symposium on Operations Research*, SYMOPIS 2015, pages 237-240, Silver Lake, Serbia, 2015. (M33)
- [8] **N. Kovač**. Bee colony optimization algorithm for the minimum cost berth allocation problem. In *Proceedings of the XI Balkan Conference on Operational Research*, pages 245-254, BALCOR 2013, Beograd-Zlatibor, 2013. (M33)

- [9] S. Kordić, B. Dragović, T. Davidović, **N. Kovač**. A combinatorial algorithm for berth allocation problem in container port. In *Proceedings of the 2012 International Association of Maritime Economists Conference, IAME 2012*, Taipei, 2012. (M33)
- [10] S. Kordić, **N. Kovač**, Ž. Pekić. An analysis of estimation and rearrange heuristic for sedimentation algorithm for solving berth allocation problem in container port. In *Proceedings of the 4th International Maritime Science Conference, IMSC 2012*, pages 71-79, Split, Croatia, 2012. (M33)
- [11] T. Davidović, J. Lazić, N. Mladenović, S. Kordić, **N. Kovač**, B. Dragović. MIP-heuristics for minimum cost berth allocation problem. In *Proceedings of the International Conference on Traffic and Transport Engineering, ICTTE 2012*, pages 21-28, Belgrade, Serbia, 2012. (M33)
- [12] B. Dragović, **N. Kovač**, M. Škurić. Container port planning and advanced modeling techniques. In *Proceedings of the Third International Forum of Shipping, Port and Airport, IFSPA 2010*, pages 375-387, China, Chengdu, Sichuan, 2010. (M33)
- [13] B. Dragović, D.K. Ryoo, **N. Kovač**, M. Škurić. Literature review of advanced modelling techniques for container terminal planning. In *Proceedings of the 10th International Conference Research and Development in Mechanical Industry, RaDMI 2010*, pages 489-497, Donji Milanovac, Serbia, 2010. (M33)
- [14] **N. Kovač**, B. Dragović, S. Kordić. Short literature survey of berth allocation problem. In *Proceedings of the XIX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics, MHCL 2009*, pages 339-342, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2009. (M33)

Остале публикације кандидата:

- [15] Š. Ivošević, R. Meštrović, **N. Kovač**. An approach to the probabilistic corrosion rate estimation model for inner bottom plates of bulk carriers. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 68(4), pp.57-70, 2017. (M23)
- [16] Š. Ivošević, R. Meštrović, **N. Kovač**. Probabilistic estimates of corrosion rate of fuel tank structures of aging bulk carriers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018. (M22)
- [17] S. Bauk, **N. Kovač**. Modeling ship's route by the adaptation of Hopfield-Tank TSP neural algorithm. *Journal of Maritime Research*, 1(3), pp.45-64, 2004. (M51)
- [18] **N. Kovač**, S. Bauk. The Anfis based route preference estimation in sea navigation. *Journal of Maritime Research*, 3(3), pp.69-86, 2006. (M51)
- [19] S. Bauk, **N. Kovač**. The Comparative Analysis of two Neural Networks Models in The Function of The Linear Ship's Route Costs Minimization. *Montenegrin Journal of Economics*, Vol. 2, No. 3, pp. 89-97, 2006. (M51)
- [20] M. Lopez-Sanchez, S. Bauk, **N. Kovač**, J.A. Rodriguez-Aguilar. Punishment Policy Adaptation in a Road Junction Regulation System. In *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications* Eds Cecilio A. i Lluís G., IOS Press, pp.112-119, 2007. (M14)
- [21] S. Bauk, R. Danilović, **N. Kovač**, S. Pejović. The Central Electronic Maritime Catalogue—A Segment of Montenegrin Cultural Inheritance Digitalization. *Review of the National Center for Digitalization*, (14), pp.43-52, 2009. (M54)

- [22] S. Bauk, **N. Kovač**. Implementacija heuristike umetanja kod Hopfield-Tank-ovog TSP neuralnog algoritma. In *Proceedings of the XXXII International Symposium on Operations Research, SYMOPIS 2005*, pp 349-353, Vrnjačka Banja, Serbia, 2005. (M63)
- [23] **N. Kovač**, S. Bauk. ANFIS metod podrške navigaciji. In *Proceedings of the XXXII International Symposium on Operations Research, SYMOPIS 2005*, pages 543-547, Vrnjačka Banja, Serbia, 2005. (M63)
- [24] **N. Kovač**, S. Bauk. The Heuristic Strategy Implementation to the Hopfield-Tank TSP Neural Algorithm. *Modelling, Measurement and Control (Series D: Production, Engineering and Management, Organization, Human and Social)*, ISSN: 1240-4551, Vol. 27, No. 2, pp. 1-21, 2006. (M51)
- [25] S. Bauk, **N. Kovač**, Z. Avramović, M. Lopez-Sanchez, Information Support to the Multi-agent System based upon the Neuro-fuzzy Model, *INFO-TEH, 6th International Symposium on Information Technologies*, Jahorina, Bosnia and Herzegovina (CD issue; ISBN: 99938-624-2-8, vol. 6, ref. E-I-4), pp. 274-279, 2007. (M33)
- [26] S. Bauk, **N. Kovač**. The Two Approaches to the TSP Neural Algorithm Realization and Its Implementation into Linear Ship Route Modeling, In *Proceedings of the 3rd Maritime Transportation Conference*, pp. 429-439, Barcelona, 2006. (M33)

Закључак

У рукопису „Метахеуристички приступ решавању једне класе оптимизационих проблема у транспорту“, кандидаткиња Наташа Ковач је показала систематично знање из области оптимизације, математичког моделирања и метахеуристичких метода. Увела је нов проблем доделе везова који је значајан са теоријског и практичног аспекта и развила је адекватне математичке моделе за разматране проблеме. Овладала је техникама математичког моделирања и имплементирала је неколико метахеуристичких метода чији су елементи прилагођени разматраним проблемима. Експериментални резултати добијени на реалним и генерисаним тест примерима су показали да све предложене метахеуристичке методе представљају адекватан приступ решавању разматраних проблема. Развијене имплементације се могу применити у реалним лучким системима.

Кандидаткиња је кроз рад на дисертацији дала теоријски и практични допринос решавању проблема доделе везова. Резултати истраживања приказани у овом раду отварају пут ка формулисању нових проблема доделе везова и њиховом решавању применом метахеуристичких метода. Стога предлажемо Наставно-научном већу Математичког факултета Универзитета у Београду, да рукопис „Метахеуристички приступ решавању једне класе оптимизационих проблема у транспорту“, кандидаткиње Наташе Ковач, прихвати као докторску дисертацију и одреди комисију за јавну одбрану.

У Београду,

14. 8. 2018. године

(др Зорица Станимировић, ванредни професор - ментор)

(др Татјана Давидовић, научни саветник
Математичког института САНУ)

(др Миодраг Живковић, редовни професор)

(др Милан Дражић, ванредни професор)

ПОТВРДА О ПРИХВАЋЕНОМ РАДУ



**KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF INFORMATICS**

Public Institution, K. Donelaičio str. 73, 44029 Kaunas.
Data accumulated and stored in the Register of Legal Entities, code 111950581.
Data of the Faculty: Studentų str. 50, 51368 Kaunas, phone (+370) 37 30 03 50,
Fax (+370) 37 30 03 52, if@ktu.lt, e-mail if@ktu.lt

To Natasa Kovac

14 08 2018

A LETTER OF ACCEPTANCE

This letter confirms that your paper entitled “Variable neighborhood search methods for the dynamic minimum cost hybrid berth allocation problem” (co-authored by Tatjana Davidovic and Zorica Stanimirovic) submitted to the scientific journal *Information Technology and Control* will be accepted and is scheduled for printing in Vol. 47, No. 3 (2018), ISSN 1392-124X (print), ISSN 2335-884X (online).

Editor-in-Chief

Robertas Damaševičius

Vilma Sukackė, e-mail vilma.mikasyte@ktu.lt