



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Славиша Думнић

**МОДЕЛ ОПТИМИЗАЦИЈЕ
ДОСТАВЕ ПОШИЉАКА У
СИСТЕМИМА СА ХЕТЕРОГЕНИМ
ДОСТАВНИМ ВОЗИЛИМА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2019.

*Родитељима Ковиљки и Предрагу за све што су ме научили у животу,
брату Борису и сестрама Слађи и Оливери на подршци која никада није изостала.*

Супрузи Оливери и ћерки Сари на мотивацији, љубави и разумевању.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

| | |
|--|---|
| Редни број, РБР: | |
| Идентификациони број, ИБР: | |
| Тип документације, ТД: | Монографска документација |
| Тип записа, ТЗ: | Текстуални штампани материјал |
| Врста рада, ВР: | Докторска дисертација |
| Аутор, АУ: | Славиша Думнић |
| Ментор, МН: | др Драгана Шарац, ванредни професор |
| Наслов рада, НР: | Модел оптимизације доставе пошиљака у системима са хетерогеним доставним возилима |
| Језик публикације, ЈП: | Српски (ћирилица) |
| Језик извода, ЈИ: | Српски/Енглески |
| Земља публикавања, ЗП: | Република Србија |
| Уже географско подручје, УГП: | Војводина |
| Година, ГО: | 2019. |
| Издавач, ИЗ: | Ауторски репринт |
| Место и адреса, МА: | Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад |
| Физички опис рада, ФО: (поглавља/страница/ | 5/106/121/2/37/0/1 |
| Научна област, НО: | Саобраћајно инжењерство |
| Научна дисциплина, НД: | Поштански саобраћај и комуникације |
| Предметна одредница/Кључне речи, ПО: | проблем трговачког путника, проблем рутирања возила, достава пошиљака, аутономни дронови |
| УДК | |
| Чува се, ЧУ: | Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду |
| Важна напомена, ВН: | |
| Извод, ИЗ: | Машинско учење и неуронске мреже су алати који налазе све већу примену у решавању практичних проблема. За креирање неуронске мреже потребан је скуп података, који може бити прикупљен на различите начине. У овој тези је показано да се подаци за тренинг неуронске мреже могу успешно прикупити креирањем веб игре. Сакупљени скуп података садржи стратегије решавања проблема трговачког путника и проблема рутирања возила. |
| Датум прихватања теме, ДП: | 22.2.2018. |
| Датум одбране, ДО: | |
| Чланови комисије, КО: | Председник: др Славица Медић, доцент |
| | Члан: др Милан Мирковић, ванредни професор |
| | Члан: др Владимир Божовић, ванредни професор |
| | Члан: др Никола Трубинт, доцент |
| | Члан: др Предраг Атанасковић, редовни професор |
| | Члан, ментор: др Драгана Шарац, ванредни професор |
| | Потпис ментора |



KEY WORDS DOCUMENTATION

| | |
|---|--|
| Accession number, ANO : | |
| Identification number, INO : | |
| Document type, DT : | Monographic publication |
| Type of record, TR : | Printed textual material |
| Contents code, CC : | PhD thesis |
| Author, AU : | Slaviša Dumnić |
| Mentor, MN : | Dragana Šarac, PhD, Associate Professor |
| Title, TI : | The optimisation model for parcele delivery in systems with heterogeneous vehicles |
| Language of text, LT : | Serbian (cyrilic) |
| Language of abstract, LA : | Serbian/English |
| Country of publication, CP : | Republic of Serbia |
| Locality of publication, LP : | Vojvodina |
| Publication year, PY : | 2019 |
| Publisher, PB : | Author's reprint |
| Publication place, PP : | Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad |
| Physical description, PD : (chapters/pages) | 5/106/121/2/37/0/1 |
| Scientific field, SF : | Traffic engineering |
| Scientific discipline, SD : | Postal traffic and communication |
| Subject/Key words, S/KW : | Traveling salesman problem, vehicle routing problem, delivery shipments, autonomous drones |
| UC | |
| Holding data, HD : | Library of the Faculty of Technical Sciences |
| Note, N : | |
| Abstract, AB : | Machine learning and neural networks are the tools that are finding more and more fields of application in solving practical problems. For the creation of the neural networks, data can be successfully collected by creating a web game. The data collected in this manner has strategic solutions for the problems of Travel salesperson problem and vehicle routing problem. |
| Accepted by the Scientific Board on, ASB : | February 22nd, 2018 |
| Defended on, DE : | |
| Defended Board, DB : | |
| President: | Slavica Medić, PhD, Assistant Professor |
| Member: | Milan Mirković, PhD, Associate Professor |
| Member: | Vladimir Božović, PhD, Associate Professor |
| Member: | Nikola Trubint, PhD, Assistant professor |
| Member: | Predrag Atanasković, PhD, Full Professor |
| Member, Mentor: | Dragana Šarac, PhD, Associate Professor |

Menthor's sign

СПИСАК СЛИКА

| | |
|---|----|
| Слика 1.1 Различити системи доставе | 2 |
| Слика 2.1 Пример решења проблема рутирања са два доставна возила | 14 |
| Слика 2.2 Путања коју је пронашла група која је тражила визуелно лепо решење | 30 |
| Слика 2.3 Конвексни скуп за задати број тачака | 31 |
| Слика 2.4 Конвексна обвојница за пример од 14 тачака | 31 |
| Слика 2.5 Оптимална путања на основу конвексне обвојнице на примеру од 14 тачака | 31 |
| Слика 2.6 Пример процеса машинског учења | 34 |
| Слика 2.7 Креирање модела употребом алгорита машинског учења | 36 |
| Слика 2.8 Вишеслојни перцептрон | 39 |
| Слика 3.1 . Заступљеност услуга на тржишту | 44 |
| Слика 3.2 Одржива будућност | 47 |
| Слика 3.3 Приказ просторне емисије CO ₂ | 48 |
| Слика 3.4 Достава дроном | 50 |
| Слика 3.5 Аутономна доставна возила (Јоерс) | 52 |
| Слика 3.6 Главни мени апликације | 54 |
| Слика 3.7 Опција пошиљалац | 55 |
| Слика 3.8 Опција достављач | 55 |
| Слика 3.9 Дроид у достави | 58 |
| Слика 3.10 Возило за доставу са дроидима | 59 |
| Слика 3.11 Достава помоћу робот-комбија | 59 |
| Слика 4.1 Почетни изглед игре | 63 |
| Слика 4.2 Креирање путање у мрежи | 64 |
| Слика 4.3 Завршетак нивоа | 64 |
| Слика 4.4 Регистрација играча | 67 |
| Слика 4.5 Обавештење о сврси истраживања | 67 |
| Слика 4.6 Пријављивање играча | 68 |
| Слика 4.7 Најбоље рангирани играчи | 68 |
| Слика 4.8 Хистограм броја решења проблема трговачког путника у односу на број одредишних тачака | 69 |
| Слика 4.9 Изглед поља игре са задатим одредиштима | 70 |
| Слика 4.10 Кутијасте дијаграми расподела за дужину путања за различит број одредишних тачака | 71 |
| Слика 4.11 Неки примери у којима су учесници у експерименту успешније решили проблем трговачког путника од алгорита најближег комшије | 73 |
| Слика 4.12 Линеарна регресија за време потребно за решавање проблема различите сложености | 73 |
| Слика 4.13 Примери решења проблема са великим број одредишних тачака | 74 |
| Слика 4.14 Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака | 75 |
| Слика 4.15 Полигон броја решења играча који су победили хеуристику симулираног каљења и најближег комшије | 76 |
| Слика 4.16 Линеарна регресија за време потребно за решавање проблема различите сложености када је време играча боље од времена најближег комшије и симулираног каљења | 77 |
| Слика 4.17 Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака решења бољих од решења симулираног каљења и најближег комшије ... | 78 |

СПИСАК ТАБЕЛА

| | |
|--|----|
| Табела 4.1 ANOVA за дужину путање учесника у истраживању, алгорита симулираног каљења и метод најближег суседа | 72 |
| Табела 4.2 Регресиони модели времена у зависности од броја одредишних тачака | 75 |

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

| | |
|-------|---|
| AA | енг. autonomy agents |
| ACO | енг. ant colony optimization algorithm |
| AGV | енг. autonomous ground vehicles |
| AI | енг. artificial intelligence |
| ANN | енг. artificial neural network |
| CNN | енг. convolutional neural network |
| CVRP | енг. capacitated vehicle routing problem |
| FSTSP | енг. flying sidekick travelling salesman problem |
| GPS | енг. global positioning system |
| GRASP | енг. greedy randomized adaptive search procedure |
| IDC | енг. international data corporation |
| MLP | енг. multilayer perceptron |
| P | енг. polynomial time problems |
| SGD | енг. stochastic gradient descent |
| SPSS | енг. software platform offers advanced statistical analysis |
| SVM | енг. support vector machines |
| TSP | енг. traveling salesman problem |
| VRP | енг. vehicle routing problem |
| TWVRP | енг. time window vehicle routing problem |

Сажетак

Превоз робе је кључни елемент у процесу снабдевања, јер се роба ретко производи и користи на истом месту. Данас, транспорт робе постаје све сложенији, а компаније и људи који се баве транспортом сучавају са све већим изазовима. Од њих се захтева да обезбеде сигуран, ефикасан и поуздан транспорт, уз минимизирање утицаја на животну средину и животну заједницу у целини.

Интеграција савремених технологија у домену аутономних возила има потенцијал да доведе до револуције у системима доставе и значајно повећа њихову ефикасност. Овакви системи ће се или у потпуности заснивати на аутономним возилима или на хетерогеној флоти возила, у коме класично возило полази из депоа и превози робу у близину корисника, а поједине кориснике опслужује аутономно возило. Како би се реализовали овакви системи доставе, неопходно је развити ефикасне методе за аутоматско одређивање најбоље руте, који ће бити погодни за рад у оквиру ограничених рачунских ресурса доступних у аутономним возилима.

Проблем рутирања је један од проблема за који не постоје егзактне методе за нумеричко решавање које су применљиве у пракси, односно када рута садржи број дестинација од интереса у савременим системима доставе. Стога је у оквиру истраживања за потребе ове тезе размотрена могућност развоја система за аутоматско рутирање базираног на савременим технологијама машинског учења и вештачке интелигенције. Ове технологије су искоришћене за креирање рачунарског модела који емулира начин на који људи решавају проблеме рутирања. Фокус истраживања је стављен на овај проблем у оквиру система доставе друмским аутономним возилима у урбаним срединама, као технологије која има потенцијал за најскорију реализацију у региону.

За потребе истраживања било је потребно прикупити велику количину података о начину на који људи решавају проблем рутирања, те је у оквиру истраживања описаног у овој тези прикупљен до сада највећи и најкомплекснији скуп људских решења за проблем рутирања. Како би се омогућило прикупљање оваквог скупа података, развијена је игра којој се може приступити путем интернета, у којој корисници решавају случајно генерисане проблеме рутирања растуће комплексности.

Прикупљени подаци су детаљно анализирани и искоришћени за развој система за аутоматско рутирање аутономног друмског возила, погодног за рутирање у урбаним срединама.

Abstract

Transportation of goods is a key element in the process of supply because the goods are rarely produced and used in the same place. Today, the transport of goods is becoming more and more complex, and companies and transporters are facing increasing challenges. They are required to provide safe, efficient and reliable transport while minimizing the environmental impact and the environmental community as a whole.

The integration of new technologies in the field of autonomous vehicle has the potential to lead to a revolution in the delivery systems and considerably increase their efficiency. Such systems will either entirely based on autonomous vehicles or heterogeneous fleet of vehicles, in which the classic vehicle departs from the depot and transport goods in the vicinity of the user and the individual serving autonomously vehicle. In order to implement such delivery systems, it is necessary to develop efficient methods for automatically determining the best route, which will be suitable for work within the limited computational resources available in autonomous vehicles.

The problem of routing is one of the problems for which there are no exact methods for the numerical resolution that is applicable in practice, or when the route contains a number of destinations of interest in modern delivery systems. Therefore, in the context of the research for this thesis discussed the possibility of developing a system for automatic routing based on modern technologies, machine learning and artificial intelligence. These technologies have been used to create a computer model that emulates the way people solve problems routing. The focus of the research was placed on this problem within the system of delivery by road autonomous vehicles in urban areas, as a technology that has the potential for succumbing to the realization in the region.

For the research needs it was necessary to collect a large amount of data on how people solve the problem of routing, and in the research described in this thesis, the largest and most complex set of human solutions for the problem of routing has been collected so far. In order to enable the collection of such data set, developed a game that can be accessed via the Internet, where users solve randomly generated problems routing the growing complexity.

The collected data are analyzed and used to develop a system for automatically routing autonomous road vehicles suitable for routing in urban areas.

САДРЖАЈ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | УВОД | 1 |
| 1.1 | ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА | 2 |
| 1.2 | ПОТРЕБА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕМ | 4 |
| 1.2.1 | Урбанизација | 5 |
| 1.2.2 | Електронска трговина | 5 |
| 1.2.3 | Паметни градови | 7 |
| 1.2.4 | Градска логистика | 7 |
| 1.2.5 | Достава у последњој миљи | 9 |
| 1.2.6 | Вештачка интелигенција | 9 |
| 1.3 | ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА | 11 |
| 1.4 | СТРУКТУРА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ | 11 |
| 2 | ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ | 13 |
| 2.1 | ПРОБЛЕМ РУТИРАЊА ВОЗИЛА | 13 |
| 2.1.1 | Пристапи решавању проблема | 15 |
| 2.1.2 | Хеуристичке и метахеуристичке технике решавања проблема | 17 |
| 2.2 | ПРОБЛЕМ ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА | 21 |
| 2.3 | ПРОБЛЕМ ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА У ДОСТАВИ ПОШИЉАКА АУТОНОМНИМ ВОЗИЛОМ .. | 22 |
| 2.4 | РАЗЛИЧИТИ НАЧИНИ РЕШАВАЊА ПРОБЛЕМА ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА | 29 |
| 2.5 | МАШИНСКО УЧЕЊЕ | 32 |
| 2.5.1 | НАДГЛЕДАНО УЧЕЊЕ | 34 |
| 2.5.2 | НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ | 38 |
| 3 | ПРОБЛЕМ ДОСТАВЕ И АНАЛИЗА МОГУЋИХ РЕШЕЊА | 42 |
| 3.1 | ПРОБЛЕМИ У ДОСТАВИ | 43 |
| 3.1.1 | Раст популације и урбанизација | 43 |
| 3.1.2 | Раст е-трговине | 43 |
| 3.1.3 | Потреба за све већом брзином доставе | 44 |
| 3.1.4 | Подела тржишта | 44 |
| 3.1.5 | Климатске промене и одрживи развој | 45 |
| 3.2 | БУДУЋНОСТ ДОСТАВЕ ПАКЕТА | 48 |
| 3.3 | РЕГУЛАТОРНИ ОКВИРИ ЗА РОБОТЕ У ДОСТАВИ | 56 |
| 3.4 | СТУДИЈА СЛУЧАЈА ЗА ХЕТЕРОГЕНУ РОБОТ-КОМБИ ДОСТАВУ | 57 |
| 4 | ИСТРАЖИВАЊЕ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА | 61 |
| 4.1 | ДИЗАЈН ИГРЕ | 62 |
| 4.2 | УЧЕСНИЦИ ЕКСПЕРИМЕНТА | 66 |
| 4.3 | ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИГРЕ | 66 |
| 4.4 | ПРОЦЕДУРА ПОКРЕТАЊА ИГРЕ | 66 |
| 4.5 | РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТА | 69 |
| 4.6 | РАЗВОЈ АУТОМАТСКОГ РЕШЕЊА ЗА РУТИРАЊЕ | 78 |
| 5 | ЗАКЉУЧАК И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА | 80 |
| | ПРИЛОГ | 83 |
| | ЛИТЕРАТУРА | 86 |

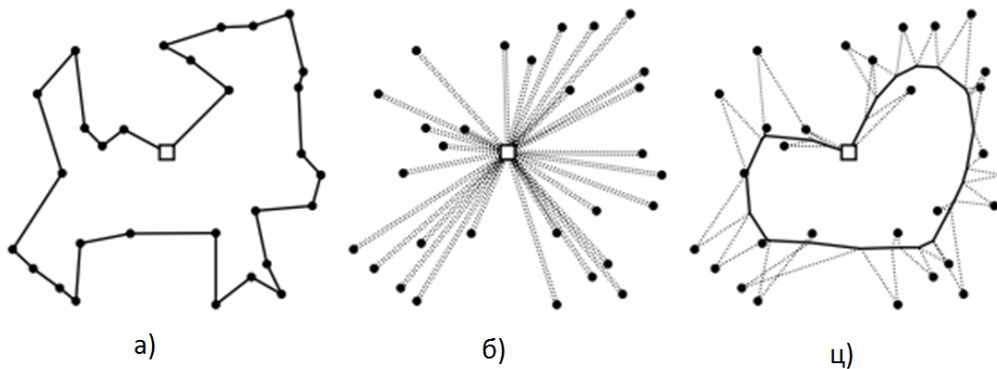
1 УВОД

Превоз робе је кључни елемент у процесу снабдевања, јер се роба ретко производи и користи на истом месту. Неки од највећих изазова са којима се суочавају транспортне компаније укључују проблеме са капацитетом, лошу безбедносну евиденцију, непоузданост, загађење животне средине, брзину доставе и неефикасан транспорт у енергетском смислу. Транспортни системи су природно сложени системи који укључују велики број компоненти и различитих захтева, где свака страна има различите и често супротстављене циљеве.

Данас, транспорт постаје све сложенији, а компаније и људи који се баве транспортом суочавају се са многоструко већим изазовима него што је то био случај у прошлости. У акту [1] који је усвојен на конгресу Светског Поштанског Савеза 2018. године према коме су усвојене промене у категоријама пошиљака па се превоз писама и писмоносних пошиљака дефинишу као превоз документа, а превоз пакета као превоз робе. Од компанија које се баве транспортом робе се захтева да обезбеде сигуран, ефикасан и поуздан транспорт, уз минимизирање утицаја на животну средину и животну заједницу у целини. Достизање наведених циљева испоставило се прилично тешким у оквирима тренутно преовлађујућег начина доставе пошиљака, заснованог на класичним доставним возилима, с обзиром на константно увећање обима и потражње за транспортом, које је производ економског развоја, као и све захтевнијим корисницима и њиховим очекивањима. На слици 1.а) илустрована је достава класичним доставним возилом.

Интеграција савремених технологија доставе аутономним возилима има потенцијал да доведе до револуције у системима доставе и значајно повећа њихову ефикасност. Овакви системи ће се или у потпуности заснивати на аутономним возилима (видети слику 1. б)) или на хетерогеној флоти возила, у коме класично возило полази из депоа и превози робу у близину корисника, а поједине кориснике опслужује аутономни дрон (видети слику 1. ц)). Аутономни и системи доставе хетерогеним возилима додатно наглашавају потребу за ефикасним рутирањем за свако возило и развојем система који аутономно одређују најбољу руту, ослањајући се на ограничене рачунске ресурсе доступне у оквиру аутономних возила.

Проблем рутирања возила (енг. vehicle routing problem - VRP) и проблем трговачког путника (енг. travelling salesman problem - TSP) су два основна проблема у саобраћају и транспорту. У оквиру докторске дисертације проблем рутирања возила и проблем трговачког путника, као сложене проблеме неполиномијалне комплексности, посматрани су у оквиру будућих система за хетерогену доставу.



Слика 1.1 Различити системи доставе

У литератури постоји велики број до сада предложених алгоритама и модела који решавају проблем рутирања возила и проблем трговачког путника, у великој мери инспирисаних начином на који људи решавају ове проблеме. Последњих година посебно је повећан интерес за проблеме транспорта у истраживању изводљивости примене вештачке интелигенције (енг. artificial intelligence - AI) како би се решили неки од поменутих проблема и како би се побољшала ефикасност, сигурност и еколошка компатибилност транспортних система. Развој вештачке интелигенције у последњих неколико година довео је до револуције у многим гранама науке и индустрије, али је за потребе примене најефикаснијих савремених метода вештачке интелигенције (учење под надзором) потребно прикупити велику количину података о адекватном решењу проблема. Примена савремених метода вештачке интелигенције у саобраћају је још увек ограничена, у великој мери због ограниченог приступа великим количинама података за тренирање и тестирање система вештачке интелигенције.

У докторској дисертацији овај проблем је превазиђен прикупљањем великог и комплексног скупа решења проблема трговачког путника помоћу у ту сврху развијене веб игре. Помоћу ње је на ефикасан начин прикупљен велик број података о начинима решавања проблема трговачког путника и проблема рутирања возила. Прикупљени подаци су детаљно анализирани и применом техника вештачке интелигенције и машинског учења искоришћени су за развој аутономних система за рутирање аутономног дрона.

1.1 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Рутирање хетерогених возила (класичних доставних возила и дрона) је предмет истраживања ове докторске дисертације. Проблем рутирања возила представља проналазак оптималних рута за сакупљање или доставу робе из складишта (депоа) на места која захтевају корисници. Са овим проблемом суочавају се многа предузећа, а он је посебно изражен у системима који се баве доставом пошиљака. Комбинаторни оптимизациони проблеми укључују тражење оптималног решења и сакупљање могућих решења. Број могућих решења експоненцијално се повећава са бројем елемената у проблему, тако да опција „скенирај све објекте један по један и одабери оптималну руту“ није добра опција [2].

Менаџмент фирме *Proctor and Gamble* је 1962. године поставио проблем проналажења најкраће руте путовања по 33 града у Сједињеним Америчким Државама [3]. Почетак и крај руте је био планиран у Чикагу, награда која је била понуђена износила је 10000 долара за најбоље решење и додатне 54 награде од по 1000 долара. Један од добитника награде био је један од зачетника истраживања у пољу проблема трговачког путника Џералд Томпсон, који је своје решење са сарадницима представио у раду [4]. Укупна награда имала је еквивалентну куповну моћ од око пола милиона долара данас. Очигледна једноставност изазова је у оштром контрасту са релативном величином награде. Иако га је једноставно навести и разумети, проблем који поставља *Proctor and Gamble* је пример добро познатог комбинаторног оптимизационог проблема трговачког путника. Број могућих рута за проблем трговачког путника једнак је $\frac{(n-1)!}{2}$, где је n број градова. За пример *Proctor and Gamble* проблема, број могућих рута износи око 1.32×10^{35} или 132 милијарде билиона трилиона могућих рута. Ако би неко покушао да пронађе сваку поједину руту и изабере оптимално (најкраћи) пут, требало би око 417 милијарди година (под претпоставком да рачунар пронађе 10000 рута у секунди).

Многи комбинаторни оптимизациони проблеми са већим бројем захтева нису решиви у реалном времену због експоненцијалног пораста броја могућих решења са порастом величине проблема. Уместо тога, пожељно је да се пронађу алгоритми који могу да пронађу решење у прихватљивом временском оквиру. За неке комбинаторне оптимизационе проблеме показано је да постоје алгоритми помоћу којих се они могу решити у полиномијалном времену. Дакле, ови алгоритми се извршавају у полиномијалном времену (енг. *polynomial problems*), а за проблем се каже да је решив. За примену су значајни они алгоритми чије време извршавања је изражено полиномом малог степена (другог или трећег). Проблем одлучивања припада полиномијалној класи сложености ако за њега постоји алгоритам који се решава у полиномијалном времену. Поред проблема за чије решење постоје алгоритми полиномијалне сложености у пракси се често сусрећу и проблеми за које није познат ниједан алгоритам полиномијалне сложености. Дакле, поред полиномијалне класе сложености постоји и неполиномијална класа сложености. Да би проблем припадао неполиномијалној класи за једно његово потенцијално решење у полиномијалном времену се може утврдити да је решење постављеног проблема. Неполиномијална класа не захтева постојање алгоритама за проналазак свих решења већ само могућност да се за једно потенцијално решење може утврдити да заиста јесте решење (помоћу алгорита који га решава у полиномијалном времену). Проблем трговачког путника је један пример неполиномијално тешког проблема.

Проблем који се јавља код неполиномијално тешких проблема је проналажење алгорита који за претпостављено решење може да утврди да ли је решиво у полиномијалном времену. Након тога, уколико алгоритам даје решење у полиномијалном времену потребно је проверити да ли је то решење и оптимално. Дакле, могу се уочити два велика изазова, егзистенција алгорита која потврђује да је претпостављено решење стварно решење и провера да ли је то решење и оптимално.

У последњих неколико деценија постигнут је напредак у овој области. У мају 2004. године решен је проблем трговачког путника који захтева обилажење свих 24978 градова Шведске. Пронађена је рута приближне дужине 72500 километара за коју је доказано да је и најкраћа. Резултати су приказани у раду [4]. У то време ово је био пример решења проблема трговачког путника највеће комплексности. Садашњи тренутни рекорд представља руту између 85900 градова.

У раду [5] аутори су показали да у случају 10 и 20 задатих тачака, учесници у експерименту једноставно решавају еуклидски проблем трговачког путника. Они који нису претходно решавали проблем трговачког путника, када су упућени, једноставно цртају најбољу путању „по очима“ и у највећем броју случајева долазе до решења која за мање од 1% одступају од оптималног.

Аутори су у раду [5] показали да је учинак учесника у експерименту изузетно добар и при сучељавању са комплекснијим проблемима. У истраживању је кориштен насумично генерисан проблем трговачког путника са бројем чворова који се креће од 10 до 120 чворова. У раду је показано да код полиномијалних модела веза између очекиваног времена решења и броја чворова је врло често линеарна или приближно линеарна. Наравно да очекивано време услуге зависи од броја чворова, као и од просторне расподеле чворова.

Квалитет учинка људских перформанси у решавању проблема трговачког путника занимљив је са аспекта рачунарских наука, операционих истраживања као и са психолошке стране.

Значај унапређења квалитета доставе поштиљака од депоа до крајњег корисника, као и повећање захтева корисника услуга доводи до пораста броја истраживача који изучавају проблем трговачког путника и проблем рутирања возила. Развијају се нови алати који припадају области вештачких неуронских мрежа (енг. *artificial neural network* - ANN) и који су засновани на принципу рада људског мозга.

Током последњих неколико година дубоке неуронске мреже (енг. *deep neural networks* - DNN) су поље истраживања у науци о подацима које се интензивно развија и напредује. Сваке године научници широм света представљају нове мрежне архитектуре и побољшања постојећих система. Велике компаније као што су на пример *Google*, *Facebook*, *BMW* или *Tesla* улажу милијарде долара у истраживање дубоког учења, у циљу подизања сопственог развоја на виши ниво. Аутомобилска индустрија је заинтересована за развој ових савремених технологија пошто се дубоке неуронске мреже примењују у развоју аутономних возила.

1.2 ПОТРЕБА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕМ

Градови су места са највећом концентрацијом људи, привредних и друштвених делатности, а логистика доставе робе и поштанских поштиљака је изузетно важна за њихово функционисање. Достава робе и поштиљака је предуслов урбаног живота, а од ефикасности доставних система зависе пословне активности које утичу на развој градских средина. Тренд глобалне урбанизације, уз економски раст градова, за собом

повлачи све већу потражњу за транспортом како робе тако и људи. Број људи који путује и количина робе која се превози су у порасту широм света. Ефикасно планирање и управљање транспортом је кључно за обезбеђење брзе и правовремене доставе пошиљака и умањење негативних утицаја на животну средину.

Организације заступљене у саобраћају и транспорту заснивају своје пословање на брзом одлучивању, ефикасној комуникацији и ефикасном спровођењу одлука са минималним грешкама у координацији. Развој нових технологија, пре свега информacionих технологија (енг. *Information technology* – ИТ) и њихова примена у домену електронске трговине проузрокује значајан пораст броја пакета за које се захтева брз пренос у кратким роковима доставе. Системи преноса у ланцу електронске трговине могу бити поштански оператери, курирски сервиси или самосталне компаније за превоз, који обављају доставу робе купљене електронским путем. Услед потребе за тржишним надметањем, тежи се обављању пословних активности доставе на најбољи могући начин. Најзначајнији трендови који утичу на доставу су урбанизација, електронска трговина, паметни градови, градска логистика и вештачка интелигенција.

1.2.1 Урбанизација

Данашњи живот у мањим удаљеним срединама постаје све непривлачнији за становнике због лоше, застареле инфраструктуре. Услуге снабдевања су углавном сконцентрисане у урбаним подручјима, пре свега због профитабилности. Већина радних места се налази у великим градовима. Људи не желе да троше време на превоз и траже станове у близини свог радног места [6]. Предности модерног технолошког друштва су приметне у подручјима великих градова, док су рурални делови мање-више занемарени у смислу напретка. На основу развоја, живот у градовима суочен је са великим бројем изазова и проблема који се морају решити. Један од основних проблем је то што се ограничења капацитета достижу веома брзо и често. Овај проблем може имати много различитих аспеката као што су загушења саобраћаја до тачке блокаде, недостатак стамбеног простора, недовољно одлагање отпада и граничне вредности за емисију CO₂. Може се уочити чињеница да инфраструктура у градовима није дизајнирана да одговори модерном, брзом темпу живота, што резултира великом саобраћајном неефикасношћу.

Тренд настанка мегаградова, са преко 10 милиона становника, још увек расте несмањеном брзином и претпоставља се да ће расти и даље. У 2015. години на Земљи је било 26 мегаградова, од којих је већина у мање развијеним земљама [7]. Ове агломерације настају ширењем постојећих градова и спајањем више градова који се налазе на релативно блиској удаљености. Увећавање наведених агломерација без адекватних урбанистичких планова доводи до стварања хаотичних, нефункционалних градова [8].

1.2.2 Електронска трговина

Продаја, куповина, дистрибуција производа и вршење услуга путем интернета су основни елементи електронске трговине (у ужем смислу). Код електронске трговине производа треба истаћи њену разноврсност у смислу различитог начина продаје и

куповине производа, доставе купљеног производа и његовог плаћања. Са ширег становишта, електронска трговина може да обухвата и размену информација, пословних трансакција применом савремених информационих технологија. Од 2010. до 2017. године продаја путем електронске трговине расла је за 23,6% у просеку на годишњем нивоу [9]. Повећање се добрим делом приписује растућем броју канала дистрибуције. Тренутно, 75% онлајн продаје генеришу компаније које су имплементирале више од једног канала дистрибуције са тенденцијом раста [10].

Електронска трговина се може сматрати „трговином на сваком месту и у сваком тренутку“, јер данашњи корисник има приступ роби и услугама са сваког места у сваком моменту. Као резултат наведеног, малопродајни ланци све више нестају и замењују их трговине интернетом. Стандардне продавнице, односно изложбене просторије, допуњене су разноврсним, комплексним каналима продаје који одражавају концепт вишеканалне продаје [11]. Електронске продавнице и електронска трговина су резултати нових технолошких могућности који су проистекли из захтева корисника.

Жеље корисника улазе у перцепцију повезаних потрошача који међусобно комуницирају на различитим каналима, а да то не примете. Корисници упоређују понуде и цене на различитим платформама, размењују ставове о квалитету производа путем објављивања рецензије и бирају начин доставе који задовољава њихове потребе. Осим тога, цели свет је кроз трговину повезан у контексту глобализације и дигиталног напретка који доводи до повећања продуктивности и светске размене робе. Електронска трговина подразумева да сам корисник бира начин доставе, њено време и место. Географске и временске димензије су значајни фактори који утичу на доставу пакета (робе). Најсавременији начини доставе подразумевају да се пакети могу доставити на дестинацију на којој се корисник налази у произвољном тренутку, при чему адреса доставе није унапред дефинисана [12].

Напредак електронске трговине резултира новим концептима примања и враћања робе. На пример, корисник наручује у онлајн трговини и преузима своју робу у продавници. Корисник може да плати за свој производ и само га преузме, или може прво да га проба и ако му одговара да га купи у продавници. Такође, постоји опција да роба купљена путем интернета буде достављена на адресу корисника са могућношћу враћања у продавницу (иако је купљена путем интернета). Самим тим може се очекивати тренд раста електронске трговине. Као резултат тога, ланац снабдевања постаје све сложенији и вишеслојнији због великог броја достава [13]. Брзина доставе и њена релативно ниска цена поспешују развој електронске трговине. Нови трендови доставе су представљени у трећем поглављу.

Електронска трговина изазива специфичан сукоб циљева. Компаније које се баве логистиком доставе морају наћи компромис између смањења трошкова и повећања квалитета услуга, односно испуњавања потреба све захтевнијих потрошача. Овај циљни конфликт представља главни изазов данашње економске конкуренције.

1.2.3 Паметни градови

Паметни градови користе уређаје као што су сензори, бројачи за прикупљање података и слично (такозване паметне ствари, енг. *Internet of things* уређаје, краће IoT уређаје) у циљу прикупљања података за побољшање целокупне инфраструктуре градова. Велику примену су пронашли у области саобраћаја, енергетике као и заштити животне средине. Паметни градови припадају класи великих система, тј. састоје се од више подсистема. Веома је захтевно описати концепт паметног града. Аутори у студији [14] дефинишу паметан град као град који настоји да реши јавна питања путем решења која се базирају на информацијским и комуникационим технологијама на бази партнерског односа више заинтересованих страна.

Међутим, паметни градови су знатно више од традиционалне метрополе са модерном комуникацијском мрежом. Концепт паметног града карактеришу три димензије одрживости, екологија, економија и друштво [15]. Највећи напредак у развоју паметних градова је у Европи, и то у Амстердаму, Паризу, Лондону и Копенхагену. Што се тиче Сједињених Америчких Држава, треба истаћи Њујорк и Сан Дијего.

Паметни градови су засновани на развоју информационих и комуникационих технологија. Као што је речено, основни задатак који се поставља пред паметне градове је прикупљање и анализа података који за циљ имају обезбеђивање паметне инфраструктуре која треба да обезбеди квалитетнији начин живота становницима града. У циљу побољшања квалитета живота становника неопходне су инвестиције у путеве, инфраструктуру и технике за уштеду енергије [16]. Улагања су неопходна ради обезбеђивања једноставнијег и лагоднијег живота становништва. У циљу искориштавања пуног потенцијала паметних система који су имплементирани у паметне градове неопходно је укључивање свих субјеката.

Као још једна предност, концепт паметних градова омогућава да се консолидују мреже ланца снабдевања уколико се повећа интензитет интеракција између субјеката [16]. Развој IoT уређаја и паметних градова може да помогне да се оптимизују процеси логистике градске доставе.

1.2.4 Градска логистика

Главни аспект и сврха градске логистике је несумњиво урбани транспорт робе од складишта (логистичко дистрибутивног центра, продавнице, поште...) до примаоца. Фокус је на оптимизацији логистичких активности компанија и ефикаснијем начину доставе поштиљака у градовима. У раду [17] дефинише се градска логистика као „процес за потпуно оптимизовање логистичких и транспортних активности од стране приватних компанија уз подршку напредних информационих система у урбаним срединама – с обзиром на саобраћајну околину, саобраћајне гужве, сигурност у саобраћају и уштеде енергије у оквиру тржишне економије“. Мора се узети у обзир да је градска логистика неконзистентан концепт, те треба да буде флексибилан и прилагодљив локалним условима. Због наведеног, у обзир се морају узети величина и

положај складишта, начин транспорта робе од складишта до корисника, ограничења у градском саобраћају као и сама локација предузећа.

Упркос разноврсности разрађених пројеката, градска логистика се може окарактерисати са три основне компоненте. У почетку се примењују иновативне технологије за прикупљање прецизних података о возилима за доставу у градским путним мрежама ради оптимизације рута. На основу прикупљених података трошкови транспорта и емисије издувних гасова могу се смањити и загушења у саобраћају се могу избећи. Друго, долази до промена у ставу логистичких менаџера који препознају значење зелене логистике на тржишту, развијају зелене логистичке системе и едукују запослене о значају заштите животне средине. Треће, треба успоставити јавно-приватна партнерства која би укључила сваког актера у развој система градског саобраћаја.

Градска логистика захтева висок ниво планирања и координације свих фактора са циљем смањења загађења животне средине и смањења трошкова због изгубљеног времена услед блокираних или загушених путева. Када говоримо о еколошким аспектима треба напоменути да је превоз робе посебно одговоран за емисије штетних гасова и буку у градским срединама. Због тога је Европска унија објавила препоруку која има за циљ достизање логистике без емисије CO₂ у главним урбаним центрима до 2030. године [18].

У основи, главни фокус савремене логистике је на повезивању достава у зависности од њихових одредишних подручја како би се максимизовао фактор оптерећења возила. Ова координација и сарадња различитих превозника може се постићи употребом такозваних урбаних консолидационих центара који се најчешће налазе у рубним деловима града. У консолидационим центрима, прикупљају се пакети од различитих добављача, прави се пресек стања, тј. посматра се колико пошиљака по локацијама имају појединачни достављачи. Доставу на једну локацију врши један достављач за све достављаче који користе консолидациони центар. На тај начин се смањује укупан број доставних возила. Овај начин доставе је сложенији од доставе коју обавља један достављач те се логистички менаџери морају суочити са новим креативним изазовима [7].

Још један начин доставе је да се пошиљке смештају у мање логистичке центре одакле купци могу да преузму своје пошиљке. Општи циљ транспорта робе је брз и поуздан начин доставе, узимајући у обзир ефикасност доставе и заштиту животне средине. Ако је кретање робе некоординисано и индивидуално, основни циљеви зелене логистике су угрожени.

У литератури може да се уочи надолazeћи тренд који произилази из карактера зелене логистике [19]. Зелена логистика наглашава еколошку свест. Зелена логистика се може посматрати као елемент градске логистике, јер заговорници ових тенденција теже сличним циљевима. Међутим, мотиви за постизање циљева су сасвим различити. На пример, градска логистика жели да повећа учинак кроз смањење трошкова, а зелена логистика је дизајнирана за очување природних ресурса и заштиту животне средине. То не мора нужно да значи да се користи мање ресурса [20]. На пример, добављачи би

могли да замене конвенционални гас алтернативним горивима као што је природни гас.

1.2.5 Достава у последњој миљи

Достава у последњој миљи је термин који се у логистици користи за последњи корак у ланцу снабдевања између предузећа и корисника. Захтева посебну пажњу како би се што ефикасније и економичније обавила достава поштанских пошиљака и робе [21].

Последња миља је најскупљи, најспорији и најнеефикаснији део ланца снабдевања, и приликом планирања електронске трговине менаџери предузећа морају да имају на уму њену комплексност. У зависности од модела доставе, трошкови последње миље износе од 13% до 75% укупних трошкова у ланцу снабдевања [22].

Трошкови доставе у последњој миљи доставе зависе од различитих фактора, као што су густина насељености, тип производа, величина пакета и његова тежина. Пред компаније које постављен је изазов да се достава робе обави на логистички најефикаснији могући начин. У планирању доставе робе мора се истаћи побољшање свих перформанси система доставе у циљу давања ефикаснијих и јефтених модела доставе у односу на конкуренцију [23]. Општи задатак је руковање наруџбинама због захтева корисника који очекује индивидуалну и брзу доставу. Услед наведеног, јасно је да се предузећа која се баве логистиком доставе суочавају са специфичним изазовима.

Модерно друштво вреднује индивидуалност, а то се односи и на систем доставе. Ово се огледа у неспремности физичких лица да обрате пажњу на радно време поштанских јединица или да буду на адреси за преузимање пошиљака како би се избегла неуспела достава [24].

У контексту интернета ствари, диспечер или достављач доносе одлуке о рути транспорта, односно о рути којом ће пошиљка бити достављена. Дакле, рута одређеног пакета није фиксна од самог почетка. Када процес доставе пошиљке отпочне, на основу података који се прикупљају диспечер или достављач може да донесе одлуку о промени руте. Купци добара често имају специфичне захтеве по питању доставе робе. Из наведеног разлога доставна возила врло често не могу бити употребљена у пуном капацитету.

У данашњој пракси могу се посматрати различити приступи достави. У трећем поглављу дисертације представљени су иновативни начини доставе као решење проблема доставе у последњој миљи у урбаним срединама. Да би се смањио број неуручених пакета, добављачи могу направити доставна места на којима су остављени пакети који нису достављени кориснику. Након тога, корисник долази до доставног места и преузима своју пошиљку. Доставна места су дизајнирана за размену робе између достављача и корисника. Овај начин доставе је економски исплативији [22].

1.2.6 Вештачка интелигенција

Најважнији научни изазови у нашој ери су декодирање људске интелигенције и развијање вештачких система, који су способних да имитирају људску интелигенцију, а посебно један од њених најупечатљивијих аспеката - способност стицања вештина, без потребе експлицитног програмирања.

Машинско учење је део вештачке интелигенције који омогућава рачунарским системима да аутоматски уче из искуства, без или са малим експлицитним људским уплитањем. У складу са усвојеним начином учења, методе машинског учења (machine learning - ML) се обично категоризирају као надзирано учење, ненадзирано учење и учење уз подстицаје.

Машинско учење бави се изградњом алгоритама и прилагодљивих рачунарских система који могу учити и побољшавати своје перформансе користећи искуство формирано на основу прикупљених скупова података, тако да је фокус у овоме раду на развоју рачунарских програма који прикупљају податке о начину решавања проблема трговачког путника, проблема рутирања возила и изради модела који би доносио што боље одлуке у складу са прикупљеним подацима.

Велики број истраживања спроводи се у правцу изградње интелигентних агената који су способни да стекну вештине на аутономан начин, у суштини да симулирају људско понашање. У вештачкој интелигенцији [25], интелигентни агент је типичан аутономни ентитет, који посматра и делује на непознато окружење, усмеравајући своју активност на остваривање задатих циљева. Већина постојећих вештачких агента су дизајнирани и засновани на истом концепту. Прихватају учење из искуства и делују у складу са подацима на основу којих су направљени и обучени. Интелигентни агенти су већ нашли примену у пољима као што су роботика, рачунарске игре, навигација, итд.

Агент делује интелигентно ако:

- оно што ради је одговарајуће за задате циљеве;
- је флексибилан да модификује окружења и циљеве;
- учи из добијених искустава;
- даје оптималне изборе с обзиром на рачунска ограничења.

Агент има само ограничено сећање и ограничено време за поступање.

Основни задатак вештачке интелигенције је разумевање принципа интелигентног понашања из природе и њихова примена у системима вештачке интелигенције. У ту сврху потребно је

- анализирати понашање субјеката из природе;
- сакупити информације (о понашању субјеката из природе) и на основу њих донети одлуке о подацима које је потребно узети у разматрање приликом конструкције интелигентних агената;
- дизајнирати и направити рачунарске системе који ће на основу прикупљених података обавити постављене задатке по принципима интелигентног понашања.

Паметне градове, градску логистику, вештачку интелигенцију и транспорт треба схватити као главне факторе који произилазе из све веће урбанизације и раста и развоја е-трговине. Стога, неопходно је да се препозна значај и обим свих наведених области како би имали могућност да размишљамо о ефикасним, алтернативним начинима доставе пакета на кућну адресу.

1.3 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ истраживања у оквиру ове дисертације је анализа, развој и имплементација нових модела за стратешко планирање и оптимизацију транспорта у системима са хетерогеним доставним возилима (системима доставе комбинацијом аутономних и класичних доставних возила). Очекивани резултати истраживања у оквиру докторске дисертације су да се прикупи велики број корисних података о проблему трговачког путника и да се прикупљени подаци искористе за тренирање модела који ће бити у стању да успешно самостално решава проблем трговачког путника.

У оквиру истраживања ће бити анализирани до сада предложени системи за решавање проблема планирања транспорта у оваквим системима и дефинисан нови приступ, са задатком унапређења рутирања и доделе пакета аутономним и класичним доставним возилима.

Способност решавања сложених проблема је једно од обележја људске интелигенције. Приликом решавања проблема људи су у стању да решавају проблеме веће сложености од до тада решених проблема, користећи интуицију, искуства и познате стратегије за решавање једноставнијих проблема. Не само да су људи способни да решавају проблеме веће сложености, већ су у стању да за њихово решавање користе различите стратегије. На основу стечених искустава и интуиције, код људи се развијала и развија способност за решавање све комплекснијих проблема. У циљу решавања проблема рутирања возила и проблема трговачког путника, подаци су прикупљани на тај начин што су испитаници проналажење рута вршили на основу својих искустава и уверења, а не на основу познатих решења која су базирана на математичким принципима.

У оквиру дисертације је развијен алгоритам који је заснован на сакупљеним стратегијама и њиховим комбинацијама. Дакле, добијени алгоритам је базиран на људским запажањима и системима вештачке интелигенције.

1.4 СТРУКТУРА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

У првом поглављу дат је предмет истраживања, објашњена је потреба за истраживањем, дати су циљеви истраживања и дефинисана два радна задатка.

У другом поглављу дата је анализа стања у области истраживања. Изложен је проблем рутирања возила и дати су различити приступи његовом решавању са посебним акцентом на хеуристичке и метахеуристичке технике. Затим је представљен проблем трговачког путника и различити начини његовог решавања. Учење са надзором,

дубоко учење са надзором, као два најчешћа и најосновнија облика машинског учења су такође представљени у другом поглављу дисертације.

Треће поглавље представља анализу начина кућне доставе робе и трендове који су тренутно актуелни. Такође дат је и регулаторни оквир за хетерогену доставу возилом и дроидом.

У четвртом поглављу дисертације формиран је модел и представљена његова имплементација. Приказана је и игра на основу које су прикупљени подаци за формирану модел, као и експериментални резултати и њихова анализа.

Пето поглавље садржи основне закључке истраживања и даје смернице будућих истраживања.

У прилогу је приказан код који је коришћен за проналажење решења проблема трговачког путника за задати број тачака, употребом методе симулираног каљења.

На крају је дат преглед литературе коришћене при изради дисертације.

2 ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ

У овом поглављу је дат преглед резултата за проблем рутирања возила, проблем трговачког путника и методе њихових решавања. Дат је и преглед термина и појмова из машинског учења и дубоких неуронских мрежа на којима је засновано истраживање спроведено у оквиру дисертације.

2.1 ПРОБЛЕМ РУТИРАЊА ВОЗИЛА

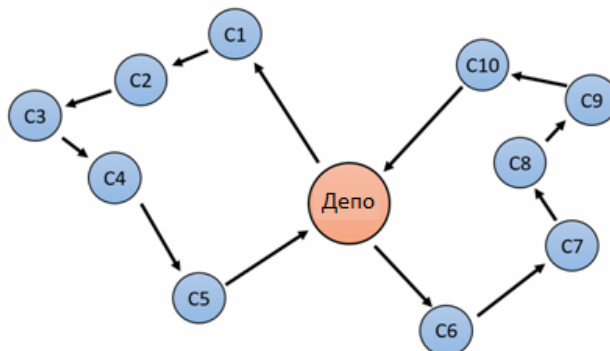
Проблем трговачког путника спада у проблеме који се решавају применом комбинаторне оптимизације. Први пут је формулисан и изучаван у раду [26], аутора Данцига и Рамсера. Основни мотив за изучавања проблема трговачког путника је његова велика практична примена у многим областима, а његови основни циљеви су минимизирање броја превозних средстава и минимизирање пређеног пута. Проблем рутирања возила је првобитно посматран као проблем отпремања возила, а касније је генерализован на различите начине. Дакле, у односу на прве резултате, данас се изучава широка класа ових проблема.

Многи проблеми рутирања и распореда возила са којима се сусрећемо у саобраћају, достави пошиљака, али и приликом личног путовања, зависе од различитих ограничења. Густина саобраћаја на путу, радови на путу, чак и временске прилике могу да утичу на избор путање (руте) и трошкове путовања (било да трошкове процењујемо по утрошеном времену или пређеној раздаљини). Поред проблема рутирања, у транспорту се појављују и други проблеми, као што су ограничења у трајању смене код возача, унапред одређен временски период у ком достава мора да буде обављена или промена места доставе пакета.

Проблем рутирања возила може бити веома захтеван, из разлога што се приликом његовог решења јављају многа ограничења. Проблеми рутирања возила изучавани у оквиру ове дисертације спадају у једноставније примере, односно у примере где број ограничења није велик. И поред релативно малог броја ограничења, проналажење оптималног решења је врло често захтевно, а понекад и није могуће доћи до егзактног решења. У наставку дисертације дат је приказ неколико варијанти проблема рутирања возила са фокусом на варијанте које се најчешће спомињу у системима доставе пакета, а које су везане за временска ограничења у достави и капацитет доставних возила.

Проблем рутирања возила се може посматрати и као генерализација проблема трговачког путника. Решење проблема трговачког путника започиње у складишту (депоу), одакле креће једно или више возила. Познат је скуп локација на којима се налазе корисници којима је потребно доставити неку робу. Проблем рутирања може бити посматран са становишта употребе минималног броја возила, минимизације времена за доставу свих пошиљки, минимизације пређеног пута. Треба напоменути да свака локација на којој се налазе корисници услуга треба да буде посећена тачно једном. Након извршене доставе возила завршавају у истом складишту, тј. у складишту из којег су кренули [27]. У неким варијантама проблем рутирања возила ће користити

неколико складишта [28]. Један пример решења проблема рутирања са два доставна возила приказан је на слици 2.1.



Слика 2.1 Пример решења проблема рутирања са два доставна возила

Може се видети да је проблем трговачког путника специјалан случај проблема рутирања возила где возило има једну путању, а складиште може бити у било ком граду који се налази на путањи. Као што је речено, циљеви који се постављају код проблема рутирања возила могу бити разноврсни, али два најчешће постављана циља су:

- смањење укупног броја коришћених возила,
- што краћа пређена раздаљина на свим путањама.

Неке од уобичајених мера квалитета описане у раду [29] су искоришћеност возила која учествују у расподели пошиљки и задовољство корисника којима су пошиљке достављене. Постоје и многе друге варијанте проблема рутирања возила које обухватају пријем пошиљке и проблеме доставе. Проблем рутирања возила има широку примену и данас се изучавају разне његове модификације. Због великог значаја, проблем рутирања возила је широко заступљен у литератури, и развијају се три начина за његово решавање: конструкција алгоритама, развој хеуристичких метода и развој нехеуристичких метода.

Још једна генерализација проблема рутирања возила је када уместо једног складишта постоји више складишта. У таквој ситуацији након завршеног обиласка локација на којима се налазе корисници доставно возило може да се врати у складиште из којег је кренуло, складиште које је најближе локацији на коју је извршена последња достава или према упутству диспечера. Такође, посебно интересантан, али и захтеван задатак је изучавање проблема рутирања возила са могућношћу повратне пошиљке.

Детаљан опис различитих типова проблема рутирања возила је дат у раду [30]. Две варијанте овог проблема које су интересантне за примену су изучаване у [31] и [27]. У првом случају проблем рутирања возила је посматран са становишта капацитета возила (енг. *capacitated vehicle routing problem* - CVRP), док је у другом случају проблем решаван са становишта временског ограничења (енг. *time window vehicle routing problem* – VRPTW).

Као што је речено, проблем рутирања возила може се посматрати и са становишта капацитета возила. Ово ограничење се односи на максималну количину пошиљака које возило може да достави. Збир свих потреба корисника на истој путањи не може прелазити унапред одређен максимални капацитет возила. Капацитет возила је фактор који је наравно увек присутан и увек га треба имати у виду. Када се рутирање посматра са ове тачке гледишта, фокус је на капацитету возила, а не на захтевима корисника. Такође, врло често се настоји да се приликом доставе употреби што мањи број возила (што наравно повлачи максималну искоришћеност капацитета доставног возила).

Ограничење капацитета присутно је и у случају проблема рутирања возила у индустријској примени где су сва возила исте величине (носивости) и према томе је ограничена количина добара која се могу транспортовати. Додатак овом ограничењу скреће фокус од корисника ка возилима. Проблем доставе и проблем паковања пошиљака је детаљно проучаван у радовима [32] и [33]. Како аутори наводе, велики део проблема може бити решен употребом минималних ресурса.

Проблем рутирања возила у ограниченом временском интервалу додаје још комплексности капацитетном проблему рутирања возила. У случају проблема рутирања возила са временским ограничењем, за сваког корисника везана су два временска термина. Пошиљка треба да буде достављена не пре првог термина и не након другог термина. Корисник (клијент) је у овом случају онај који одређује временски интервал у оквиру кога жели да му пошиљка буде достављена [34].

Међутим, и поред временског ограничења, могуће је да возило неће стићи у задатом временском интервалу. Могуће је да возило стигне пре почетног времена корисника и да буде неактивно одређени временски период (период чекања) пре него што крене у извршење задатка. За сваког корисника, тј. сваки задатак, потребан је одређени временски период да се изврши услуга опслуживања тако да она не може увек бити завршена у задатом временском интервалу али мора у том интервалу да буде започета [35]. Проблем рутирања возила припада класи неполиномијално тешких проблема и комплексан је за решавање.

2.1.1 Приступ решавању проблема

Као најчешћи приступ решавању проблема трговачког путника и проблема рутирања возила у литератури се наводи конструктивна хеуристика. Конструктивна хеуристика је хеуристика која одабере (креира) почетно решење, па га побољшава кроз низ итерација. То су решења која се обично граде корак по корак (један корисник/град). Иако конструктивне хеуристике обично могу да добију скоро оптимално решење у разумном времену, квалитет тог решења није задовољавајући и оно се углавном користи да би се временом надограђивало и побољшавало од стране других класа хеуристике [36]. Хеуристички приступи су флексибилнији у случајевима у којима се јављају сложена ограничења.

Једна од првих и најпознатијих конструктивних хеуристика је хеуристика штедње Кларка и Рајта. Ова хеуристика је први пут предложена 1964. годинеу [37] за основни

тип проблема рутирања возила. Прва фаза је да се за сваког корисника одреди засебна путања а затим се бирају путање које могу бити спојене. Путање се бирају по критеријуму који ће донети највише уштеде. Уштеда S_{ij} која се добија спајањем два корисника који се налазе на две различите путање исказана је формулом

$$S_{ij} = dist_{io} + dist_{oj} - dist_{ij} , \quad (2.1)$$

где је O ознака за складиште из ког возило креће, $dist$ је ознака за еуклидско растојање, при чему је $dist_{io}$ растојање између складишта O и i -тог одредишта, $dist_{oj}$ растојање између складишта O и j -тог одредишта, а $dist_{ij}$ растојање између i -тог одредишта и j -тог одредишта.

У раду [38] аутор приказује истраживање о начинима уштеде приликом решавања проблема рутирања возила и предлаже побољшања која се односе на смањење потреба за складиштењем података као и на смањење процесорског времена потребног за рачунање. Упркос популарности методе резултати хеуристике штедне су обично слаби, као што је показано у анализи у раду [39]. Предност методе је у брзини којом се добија решење.

Аутор је у раду [40] разматрао дизајн и анализу алгоритама за рутирање и распоређивање возила код доставе са временским ограничењима. Након описа различитих конструктивних хеуристика, аутор је спровео опсежну рачунску студију о њиховим перформансама. Показало се да методе апроксимације највише погодују решавању практичних проблема. Посматрани су проблеми рутирања и распоређивања возила у зависности од броја корисника с временским ограничењима, њихове међусобне раздаљине и положаја. Закључак је био да се неколико хеуристика добро показало у различитим проблемима, а нарочито хеуристика уметања даје веома добре резултате. Један случај који је разматран у раду је хеуристика временски најближег комшије. Хеуристика временски најближег комшије функционише тако што у сваком следећем кораку достављач бира локацију која је временски најближа његовој тренутној локацији, а која до тада није посећена.

Још један прилаз проблему рутирања возила састоји се у томе да се процес доставе подели у два дела – груписање чворова (локација) и рутирање.

Једна могућност је да се прво изврши груписање података (кластеровање), а затим се за сваки кластер проналази путања. Првобитни концепт разматрали су аутори у [41]. Они су посматрали проблем распоређивања возила за доставу купцима из више складишта по ограничењима носивости и удаљености и временским ограничењима. Представили су нови алгоритам који омогућава истовремену конструкцију рута из неколико депоа, узимајући у обзир ограничен број возила у појединим депоима. Тамо где је превише корисника тражило услугу, на основу флексибилног правила приоритета бирани су они који ће први бити услужени.

Аутори у раду [42] користе *Sweep* алгоритам, заснован на поларном координатном систему. Депо се сматра изходиштем, тј. полом у координатном систему. Зрак који повезује депо са произвољно изабраним корисником се помера (ротира) у смеру

кретања казальке на сату (или у смеру супротном смеру кретања казальке на сату) и корисници се додају на путању оним редом како се на њих наилази. Када је потребно (када је возило пуно), започиње се нова рута. Свака од добијених рута се затим оптимизује решавањем проблема трговачког путника за кориснике на свакој од рута. Уобичајено је да се алгоритам покрене онолико пута колико има корисника (узимајући сваки пут другог корисника као почетног), па да се од свих добијених решења изабере најбоље.

Друга могућност је да се прво направи путања, а затим на основу ње изврши подела чворова у кластере. Један од првих примера овог алгоритма је дат у раду [43]. Аутор прво формира руту са свим градовима на истој путањи. Ову првобитну руту могуће је формирати на више различитих начина. Кључно код овог приступа је што је након рутирања, тј. одређивања редоследа по ком ће корисници бити посећени доста лако направити оптималну партиципу корисника на скупове на којима је могуће одрадити појединачне путање. Аутор у ту сврху користи алгоритам груписања података који је представљен у раду [44] и закључује да се на овај начин проблем решава релативно брзо. Како је процедура партиционисања брза, а и остали делови методе такође не захтевају много времена, може се почети од неколико различитих почетних рута и на основу сваке од њих доћи до по једног изводљивог скупа појединачних рута.

2.1.2 Хеуристичке и метахеуристичке технике решавања проблема

Најчешће хеуристичке технике за решавање проблема рутирања возила имају две главне фазе.

Прво ће једна од већ наведених метода бити употребљена да се створи почетно решење које ће се затим користити (побољшавати) у разради. Треба нагласити да врло често оптимално решење није могуће пронаћи, скупо је или је време његовог проналаска дуго. Зато се применом хеуристичких и метахеуристичких метода проналазе добра решења у релативно кратком временском интервалу. Наравно, та добра решења су подскуп скупа допустивих решења. Применом ових метода могуће је пронаћи и оптимално решење проблема, али није могуће доказати да добијено решење јесте оптимално.

Значајна примена хеуристике се огледа у одређивању почетног решења посматраног оптимизационог проблема. Након формираног почетног решења применом различитих метода се настоји да се оно побољша и да цео поступак буде урађен у прихватљивом временском оквиру. Основна разлика између хеуристичког и метахеуристичког решавања проблема је у томе што је хеуристички метод окренут на решавање једног, конкретног проблема, за разлику од метахеуристичког који дефинише правила који се могу применити на решавање већег броја различитих проблема. Метахеуристичке методе (технике) су нашле велику примену у различитим оптимизационим проблемима и спадају у успешније технике за њихово решавање.

У овом делу дисертације разматрана је метахеуристичка метода код које се почетно решење конструише на случајан начин, а затим се оно итеративно поправља, док критеријум заустављања не буде задовољен. Две основне класе ових метода су са

памћењем претходног решења и без његовог памћења. Поправка решења може да се одвија у два правца, у правцу побољшања у циљу смањења пређеног пута и у правцу побољшања у циљу смањења времена потребног за спровођење рутирања. Метода симулираног каљења је једна од ових метода и она је примењивана у овој дисертацији. У проблемима рутирања код којих временска ограничења нису присутна посматра се једна путања, као код проблема трговачког путника и побољшање се ради у смеру смањења укупно пређеног пута.

Најпознатији и најуспешнији метод је k -опт (енг. k -opt) или алгоритам размене k грана (енг. k -exchange algorithm). k -размена је метод у ком се се бира k -путања у добијеном решењу и замењују се новим путањама. Ново решење се користи у сврху проналаска доброг решења једино ако је новодобијена путања краћа од претходне. Поступак се понавља до момента када даља скраћења путање нису могућа. Овај приступ је прво предложен од стране Лина у раду [45] где је фокус стављен на 2-опт и 3-опт алгоритме, иако први опис 2-опт алгоритма можемо видети у раду [46]. Код 2-опт алгоритма, укидају се две путање и ново повезивање је могуће урадити на само један начин. Нова путања може бити боља, или не. Ако се укину три постојеће везе, тј. ако се посматрају 3-опт алгоритми постоје два нова могућа повезивања и потребно је сваки посебно разматрати. Дакле, у поновном отклањању три везе јављају се још два нова начина повезивања, те је применом правила производа јасно да је за решавање проблема потребно више времена. Код 2-опт алгоритма број различитих рута је $O(n^2)$, где је n број чворова, а код 3-опт алгоритма број различитих рута је $O(n^3)$. Лин је остварио добре резултате у малим проблемима трговачког путника. Употреба k -опт методе за веће вредности параметра k , као што су 4 или 5 може се пронаћи у раду Еилона [47], где су постигнути солидни резултати у случајевима код којих је број градова које трговачки путник треба да обиђе мањи од 500.

Проблем који се може јавити код поменутих метода је како изабрати вредност k , а да се при томе нађе компромис између налажења прихватљивог решења и налажења решења у разумном временском року. Лин пружа решење за овај проблем у [48] где је дата уопштена верзија раније предложеног алгоритма. Ту се предлаже да вредности k буду различите за различите фазе процеса решавања проблема. Овај метод успева да пружи оптималне резултате за проблем трговачког путника на путањама са до 110 градова по прихватљивој цени за утрошено време. Неколико побољшања методе представио је аутор у раду [49]. Због захтевног рачунања, у применама се најчешће сусрећу они кораци који су добијени као низ 2-опт корака. Ова побољшања дозвољавају уштеду времена и уштеду у укупној цени развијања самог решења. Имплементацијом нових побољшања добијени су оптимални резултати решења проблема трговачког путника на путањи са до 13509 градова.

Још једна могућност је да се прво раде 2-опт замене, док се не постигне оптимално решење, а затим се наставља са 3-опт заменама. 4-опт алгоритми су бољи од 3-опт алгоритма, иако је њихово време израчунавања дуже [50].

Све поменуте технике баве се побољшањем појединачних путања, било да се то побољшање тиче пређене раздаљине или времена које је утрошено да се та раздаљина пређе. Многе од ових техника су проистекле из покушаја решавања

проблема трговачког путника. Још један начин на који решења проблема рутирања возила могу бити побољшана је прављење модификација које укључују и разматрају неколико различитих путања.

Један од успешних хеуристичких приступа који спада у ову категорију је 2-опт* метод који су користили аутори у [51]. Упркос томе што деле сличан назив, већ споменути хеуристички метод 2-опт и метод 2-опт* заправо имају веома мало сличности. 2-опт* приступ се огледа у замени крајева две путање при чему се редослед чворова не мења. Осим што има потенцијал да смањи пређену удаљеност и утрошено време, овај метод такође може да смањи број путања у специфичним случајевима - када је крај једне путање складиште, а крај друге путање потпуно нова путања.

Аутори су у раду [52] предложили процедуру коју су назвали GENI (енг. *Generalized Insertion procedure* - GENI), у оквиру које се нови чвор умеће у постојећу путању при чему то не мора бити између два суседна чвора у већ постојећој путањи. Предлажу два начина да се то уради. Као додаток, развијен је и постоптимизациони алгоритам који врши локалну реоптимизацију која се састоји од уклањања чвора из добијене путање и његовог поновног враћања на њу (енг. *Unstringing and Stringing* - US). Показано је да је комбинација ове две методе, названа GENIUS, у предности у односу на најпознатије хеуристичке приступе проблему трговачког путника, у смислу квалитета решења и времена израчунавања.

Термин метахеуристика (енг. *Metaheuristic*) се користи да би се описао широк опсег поступака којим се бирају алгоритми претраге који имају за циљ да пронађу оптимално решење посматраног оптимизационог проблема или да бар побољшају постојеће решење. Њена основна карактеристика је да се не посматра појединачни проблем, већ класа проблема. Решење до којег се долази зависи од случајно генерисаног почетног решења.

За многе комбинаторне проблеме оптимизације, метахеуристика може бити веома корисна јер пружа флексибилност која је одсутна код многих математички прецизних метода, тако да може бити нарочито ефикасна код варијанти проблема рутирања возила код којих постоји временско ограничење, а где је простор претраге уско ограничен. Многе метахеуристичке методе могу такође бити лако објашњене на концептуалном нивоу. Многе методе су сличне појавама које постоје у природи па су и имена добијале на основу појава које су биле мотив за њихов настанак.

2.1.2.1 Концепт колоније мрава

Концепт колоније мрава (енг. *Ant Colony Optimization Algorithm* - ACO) је метод који су прво предложили аутори у раду [53]. У радовима [54] и [55] представљен је концепт колоније мрава и његова примена на многе познате проблеме комбинаторне оптимизације. Алгоритам је инспирисан понашањем колонија мрава, са посебним фокусом на начин на који мрави у колонији одређују најкраћу путању до извора хране. Ово се постиже употребом феромона који се задржавају на путањи којом су прошли мрави. Виши ниво феромона ће охрабрити већи број мрава да се крећу том путањом. Краће путање имају виши ниво концентрације ових феромона, с обзиром да треба

мање времена да се таква путања пређе, што за резултат има да мрав може да пређе целу путању, у оба смера, за краће време. Према томе, најкраћа путања ће имати највиши ниво концентрације феромона.

Први пример у ком се концепт колоније мрава примењује на примеру проблема рутирања возила може да се пронађе у раду [56]. Конструисани метод даје решења тако што бира градове један за другим, користећи релативну снагу феромона пре него што побољша ова решења кроз употребу 2-опт алгоритма. Солидни резултати су добијени у поређењу са другим метахеуристичким методама. Овај метод Булнхајмер је побољшао, тако што је смањило листу кандидата за избор потенцијалних градова, што је дало незнатна побољшања по питању утрошеног времена и квалитета самог решења.

Аутор у раду [56] користи метод колоније мрава са већим бројем колонија да би решио проблем рутирања возила са временским ограничењем. Конкурентни резултати су постигнути на примерима проблема рутирања возила са временским ограничењем са новим добро познатим решењима у неким примерима.

У раду [57] аутори такође користе више мрављих колонија да би решили проблем рутирања возила. Користећи овај приступ, добри резултати су добијени у примерима рутирања са мањим бројем возила. Међутим, резултати су слабији код примера са већим бројем возила. Аутори у раду [58] представљају методу названу k -концепт колоније мрава. Проблем је поједностављен тако што се дели у подскупе мањих проблема који се могу лакше решити.

2.1.2.2 Генетски алгоритми

Генетски алгоритам (енг. *Genetic Algorithm* - GA) је базиран на популацији (становништву), а осмишљен је тако да бар делом рефлектује природни процес еволуције. Кључне фазе у овим алгоритмима су често комбинација и мутација већ постојећих решења. Идеја за репродукцију ове природне методе у вештачким системима је прво разматрана у раду [59].

Већина генетских алгоритама за решавање проблема рутирања возила је дизајнирана за примере проблема рутирања возила са временским ограничењем као подскуп скупа проблема рутирања возила. Постоје и примери примене генетског алгоритма за решавање капацитетног проблема рутирања возила. Један такав пример може да се пронађе у раду [60], где се као потенцијална решења предлажу две варијанте употребе генетског алгоритма. Прва варијанта генетског алгоритма је основна, новотестирана у контексту примера капацитетног проблема рутирања возила. Друга је хибрид прве генетске методе са методом претраге најближег комшије. Резултате добијене коришћењем друге методе могуће је поредити са резултатима који су добијени користећи друге метахеуристичке алгоритме.

Аутори у раду [61] предлажу хибридни генетски алгоритам за решавање капацитетног проблема рутирања возила. Основна шема се састоји од истовременог развоја две популације решења како би се смањила укупна пређена раздаљина.

Оквир истраживања у раду [62] је развој ефикасних метахеуристика за тешке комбинаторне оптимизационе проблеме који се сусрећу у рутирању возила. За разлику од ранијих покушаја базираних на хромозомима где је била неопходна процедура поправке након сваког укрштања (а познато је да такве процедуре слабе генетски пренос информација од родитеља према деци) у овом раду предложен је генетски алгоритам чији избор дизајна не захтева процедуру поправљања. Добијени алгоритам је флексибилан, релативно једноставан и веома ефикасан када се примењује на два скупа стандардних инстанци у распону од 50 до 483 корисника.

2.2 ПРОБЛЕМ ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА

Проблем трговачког путника један је од најстаријих и најпознатијих проблема рутирања. Једна од првих формулација проблема трговачког путника нађена је у приручнику [2] из 1832. године. Једна од првих академских студија о проблему трговачког путника је у раду [26].

Проблем трговачког путника је оптимизациони проблем у коме трговачки путник треба да обиђе n градова, да сваки град посети тачно једном и да редослед обиласка градова буде оптималан, у смислу минималног пута који прелази (често то повлачи и минимално време обиласка) што доводи до минималних трошкова. Проблем трговачког путника припада класи неполиномијално тешких проблема [63].

Проблем рутирања возила је уопштење проблема трговачког путника, тако да ће бити дат опис проблема трговачког путника са посебним акцентом на његово решење које се може успешно применити на проблем рутирања возила. Проблем трговачког путника је заснован на теорији графова, тако да је прво потребно дефинисати неке основне појмове ове математичке дисциплине.

Граф је појам из математике који има широку примену у многим областима. Граф се често поистовећује са скупом тачака (у истраживању спроведеном у овој тези то је коначан скуп тачака) које су повезане линијама. Тачке се називају чворовима графа, линије које спајају чворове графа су гране графа. Ако је чвор повезан сам са собом, онда се таква грана назива петља. Формално говорећи, граф је уређен пар (X, ρ) где је X коначан, непразан скуп и ρ бинарна релација на њему. Елементи скупа X су чворови графа, а елементи скупа ρ су гране графа. Број чворова графа може бити и бесконачан, али такви графови превазилазе оквире ове дисертације. Ако су A и B два чвора графа, и ако је грана AB графа исто што и грана BA графа, каже се да је граф неоријентисан. Неоријентисан граф се назива и симетричан граф и код његовог геометријског представљања стрелице се не цртају. Са друге стране, ако за бар један пар чворова A и B , грана AB графа није исто што и грана BA графа, каже се да је граф оријентисан или асиметричан. Приликом геометријског представљања оријентисаног графа обавезно је цртање стрелица.

Шетња у графу је произвољан низ чворова и грана, при чему се чворови и гране могу понављати. Стаза је шетња у којој се гране не понављају. Ако су почетни и крајњи чвор графа једнаки и гране се не понављају, стаза је затворена. Пут је шетња у којој нема

понављања чворова и грана. Очигледно је да је у путу први чвор различит од последњег чвора. Контура је затворена шетња у којој се чворови и гране не понављају. Хамилтонов пут је пут у графу који садржи све чворове графа. Хамилтонова контура у графу је контура која садржи све чворове графа, а граф је Хамилонов ако садржи Хамилтонову контуру. Када разматрамо проблем трговачког путника у контексту теорије графова то можемо посматрати кроз проблем Хамилтонове контуре где за сваки град треба пронаћи најнижу цену. Проблем трговачког путника је неусмерени граф. У зависности од тога да ли је у питању случај симетричног или асиметричног графа, вредност гране можемо израчунати помоћу формуле за еуклидско растојање између две тачке. За израчунавање удаљености градова користи се следећа формула

$$dist(i, j) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (2.2)$$

Применом неједнакости троугла $dist(i, k) \leq dist(i, j) + dist(j, k)$ следи да је увек, у смислу мањих трошкова, боље користити директну путању између два чвора графа.

Менхетн (енг. *Manhattan*) удаљеност се још назива удаљеност градских блокова. Она израчунава колика ће удаљеност бити пређена уколико се крећемо од једне до друге тачке путањом која изгледа попут дела правоугаоне мреже. Менхетн удаљеност се назива и L_1 удаљеност. Менхетн удаљеност, тј. Менхетн растојање између тачке $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и тачке $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ дато је формулом

$$MD(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (2.3)$$

То је још једна метрика која се користи за рачунање удаљености између две тачке и коришћена је у раду [64]. Менхетн удаљеност представља суму хоризонталних и вертикалних удаљености између две тачке мреже.

2.3 ПРОБЛЕМ ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА У ДОСТАВИ ПОШИЉАКА АУТОНОМНИМ ВОЗИЛОМ

У протеклих неколико година дефинисано је неколико модела и алгоритама за употребу дрона у достави. Истраживања су фокусирана на примену дрона за доставу пакета на кућну адресу.

Аутори у раду [65] анализирају варијанту проблема трговачког путника са једним возилом и једним дроном који дефинишу као летећи повратни проблем трговачког путника (енг. *flying sidekick TSP - FSTSP*). Дрон и возило почињу и завршавају вожњу у депоу. Свака пошиљка коју доставља дрон захтева једно заустављање возила. Циљ је минимизирати укупно време потребно да се возило и дрон врате у депо, рачунајући и време које је потребно за лансирање, опремање и време повратка дрона у возило. Аутори такође разматрају паралелну верзију проблема, где возило и дрон врше доставу различитим корисницима истовремено, дрон у тој варијанти ради доставу из депоа до корисника, док возило ради доставу другим корисницима. За ове варијанте

летећег повратног проблема трговачког путника аутори су дали и математички опис посматраног проблема.

У циљу показивања сложености решавања комбиноване доставе дроном и возилом, биће представљен математички опис проблема трговачког путника са једним возилом и једним дроном из рада [65].

Нека је:

- $C = \{1, 2, \dots, c\}$ скуп свих корисника,
- $C^D \subseteq C$ скуп корисника који се могу опслужити дроном,
- $N = \{0, 1, \dots, c+1\}$ скуп свих чворова (чворови 0 и $c+1$ су ознаке за депо; иако постоји само један депо, сматраће се у смислу ознаке да возила одлазе из депоа 0, а враћају се у депо $c+1$),
- $N_0 = \{0, 1, \dots, c\}$ скуп одлазних чворова за возила,
- $N_+ = \{1, 2, \dots, c+1\}$ скуп чворова које возило може да посети током доставе,
- $\tau_{i,j}$ време путовања из чвора $i \in N$ до чвора $j \in N_+$ за возило,
- $\tau_{i,j}^D$ време путовања из чвора $i \in N$ до чвора $j \in N_+$ за дрон,
- S_L сервисно време за лансирање дрона,
- S_R сервисно време за повратак дрона,
- e параметар трајања батерије дрона, тј. време које дрон може да проведе у лету без пуњења,
- P скуп свих уређених тројки (i, j, k) између којих може да лети дрон.

Како возило не може два пута да посети исти чвор, $\tau_{i,i}$ није дефинисано за једно $i \in N$.

Слично, како дрон не може два пута да посети исти чвор, $\tau_{i,i}^D$ није дефинисано ни за једно $i \in N$. Због комплетности, узима се да је $\tau_{0,c+1} \equiv 0$, због тривијалног случаја када постоји само један корисник и опслужује га дрон директно из депоа. Уређена тројка (i, j, k) припадаће скупу P уколико су задовољени следећи услови:

- чвор i из кога се лансира дрон не сме припадати скупу чворова у које он долеће током доставе, тј. $i \in N_0$,
- чвор j за слетање мора припадати скупу корисника који се могу опслужити дроном и не сме бити исти као чвор из ког је дрон лансиран, тј. $j \in \{C^D : j \neq i\}$,
- чвор повратка k мора да буде или неки од корисника или крајњи депо, не сме да се поклапа ни са лансирним чвором i , нити са чвором j у који дрон слеће и укупно трајање лета не може да премаши време трајања батерије дрона, тј. $k \in \{N_+ : k \neq j, k \neq i, \tau_{i,j}^D + \tau_{j,k}^D \leq e\}$.

Сада је могуће дефинисати променљиве за одлуке:

- $x_{i,j} \in \{0,1\}$ биће једнако 1 ако и само ако возило путује из чвора $i \in N_0$ у чвор $j \in N_+$, где је $i \neq j$,
- $y_{i,j,k} \in \{0,1\}$ биће једнако 1 ако и само ако дрон лансиран из чвора $i \in N_0$ слеће у чвор $j \in C^D$ и враћа се у возило или депо у чвору $k \in \{N_+ : (i,j,k) \in P\}$.

Нека је $t_j \geq 0$ време када возило стиже у чвор $j \in N_+$. Слично, нека је $t_j^D \geq 0$ време када дрон стиже у чвор $j \in N_+$. $t_0 = t_0^D = 0$ се дефинише као најраније време када возило (возило или дрон) може да напусти депо, заједно или независно један од другог.

Потребно је дефинисати још две помоћне променљиве. Прва је помоћна променљива $p_{i,j} \in \{0,1\}$ која ће бити једнака 1 ако и само ако је чвор $i \in C$ возило посетио у неком временском тренутку пре него што је посетио чвор $j \in \{C : i \neq j\}$. Дефинише се да је $p_{0,i} = 1$ за свако $j \in C$ да би се указало да депо (са ознаком 0) мора да буде почетни чвор у путањи возила. Коначно, стандардно за проблем трговачког путника, $1 \leq u_i \leq c + 2$ одређује позицију чвора $i \in N_+$ у путањи возила.

Проблем се дефинише функцијом циља

$$\min t_{c+1}, \quad (2.4)$$

и низом ограничења:

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{i,j} + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k} = 1, \quad \forall j \in C, \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in N_+} x_{0,j} = 1, \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,c+1} = 1, \quad (2.7)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c + 2)(1 - x_{i,j}), \quad \forall i \in C, \forall j \in \{N_+ : j \neq i\}, \quad (2.8)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{i,j} = \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j}} x_{j,k}, \quad \forall j \in C, \quad (2.9)$$

$$\sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall i \in N_0, \quad (2.10)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall k \in N_+, \quad (2.11)$$

$$2y_{i,j,k} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq i}} x_{h,i} + \sum_{\substack{l \in C \\ l \neq k}} x_{l,k}, \quad \forall i \in C, \forall j \in \{C : j \neq i\}, \forall k \in \{N_+ : (i,j,k) \in P\}, \quad (2.12)$$

$$y_{0,j,k} \leq \sum_{\substack{h \in N_0 \\ h \neq k}} x_{h,k}, \quad \forall j \in C, \forall k \in \{N_+ : (0,j,k) \in P\}, \quad (2.13)$$

$$u_k - u_i \geq 1 - (c+2) \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall i \in C, \forall j \in \{N_+ : k \neq i\}, \quad (2.14)$$

$$t_i^D \geq t_i - M \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall i \in C, \quad (2.15)$$

$$t_i^D \leq t_i + M \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall i \in C, \quad (2.16)$$

$$t_k^D \geq t_k - M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall k \in N_+, \quad (2.17)$$

$$t_k^D \leq t_k + M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in F}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall k \in N_+, \quad (2.18)$$

$$t_k \geq t_h + t_{h,k} + S_L \left(\sum_{\substack{l \in C \\ l \neq h}} \sum_{\substack{m \in N_+ \\ (k,l,m) \in P}} y_{k,l,m} \right) + S_R \left(\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k} \right) - M(1 - x_{h,k}),$$

$$\forall h \in N_0, \forall k \in \{N_+ : k \neq h\}, \quad (2.19)$$

$$t_j^D \geq t_i^D + \tau_{i,j}^D - M \left(1 - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k}\right), \quad \forall j \in C^D, \forall i \in \{N_0 : i \neq j\}, \quad (2.20)$$

$$t_k^D \geq t_j^D + \tau_{j,k}^D + S_R - M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ (i,j,k) \in P}} y_{i,j,k} \right), \quad \forall j \in C^D, \forall k \in \{N_+ : k \neq j\}, \quad (2.21)$$

$$t_k^D - (t_j^D - \tau_{i,j}^D) \leq e + M(1 - y_{i,j,k}), \quad \forall k \in N_+, \forall j \in \{C : j \neq k\}, \forall i \in \{N_0 : (i,j,k) \in P\}, \quad (2.22)$$

$$u_i - u_j \geq 1 - (c+2)p_{i,j}, \quad \forall i \in C, \forall j \in \{C : j \neq i\}, \quad (2.23)$$

$$u_i - u_j \leq -1 + (c+2)(1 - p_{i,j}), \quad \forall i \in C, \forall j \in \{C : j \neq i\}, \quad (2.24)$$

$$p_{i,j} + p_{j,i} = 1, \quad \forall i \in C, \forall j \in \{C : j \neq i\}, \quad (2.25)$$

$$t_l^D \geq t_k^D - M \left(3 - \sum_{\substack{j \in C \\ (i,j,k) \in P \\ j \neq l}} y_{i,j,k} - \sum_{\substack{m \in C \\ m \neq i \\ m \neq k \\ m \neq l}} \sum_{\substack{n \in N_+ \\ n \neq i \\ n \neq k \\ (l,m,n) \in P}} y_{l,m,n} - p_{i,l} \right), \quad (2.26)$$

$$\forall i \in N_0, \forall k \in \{N_+ : k \neq i\}, \forall l \in \{C : l \neq i, l \neq k\},$$

$$t_0 = 0, \quad (2.27)$$

$$t_0^D = 0, \quad (2.28)$$

$$p_{0,j} = 1, \quad \forall j \in C, \quad (2.29)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in \{N_+ : j \neq i\}, \quad (2.30)$$

$$y_{i,j,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in \{C : j \neq i\}, \forall k \in \{N_+ : (i,j,k) \in P\}, \quad (2.31)$$

$$1 \leq u_i \leq c+2, \quad \forall i \in N_+, \quad (2.32)$$

$$t_i^T \geq 0, \quad \forall i \in N, \quad (2.33)$$

$$t_i^D \geq 0, \quad \forall i \in N, \quad (2.34)$$

$$p_{i,j} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in \{C : j \neq i\}. \quad (2.35)$$

Функција циља (2.4) минимизира последње време повратка у депо за дрон или за возило. Иако t_{c+1} описује повратак возила у депо, ограничења (2.16) и (2.17) служе да повежу време повратка дрона и време повратка возила у депо. Због тога, функција циља је еквивалентна са $\min\{\max\{t_{c+1}, t_{c+1}^D\}\}$.

Ограничење (2.5) обезбеђује да сваки корисник буде посећен тачно једном, уз помоћ дрона или возила. Ограничења (2.6) и (2.7) обезбеђују редом да возило креће из депоа и одлази у депо само једном.

Ограничење (2.8) обезбеђује елиминацију подтура за возило, где су ограничења за непрекидну променљиву u_i одређена условом (2.31). Ограничење (2.9) указује на то да возило које је посетило чвор j такође мора и да оде из чвора j .

Ограничења (2.10) и (2.11) омогућавају да се дрон може лансирати и вратити, респективно, у сваки појединачни чвор највише једном.

Ограничење (2.12), указује на то да ако дрон лети од чвора i до чвора k , онда и возило мора да посети и чвор i (да би дрон ту био лансиран) и чвор k (да би ту дрон био покупљен). Слично, ограничење (2.13) осигурава да, уколико је дрон лансиран из почетног депоа 0 и покупљен у чвору k , тада и возило мора да посети чвор k . Слично, ограничење (2.14) обезбеђује да ако је дрон лансиран из чвора i и покупљен у чвору k , тада возило мора да посети чвор i пре чвора k .

Ограничења (2.15) и (2.16) обезбеђују временску координацију између возила и дрона у тренутку лансирања дрона из чвора i . Треба приметити да дрон и возило могу да напусте депо у различито време. Ова ограничења примораће возило и дрон да стигну у чвор i у исто време.

Ограничења (2.17) и (2.18) обезбеђују временску координацију возила и дрона при повратку дрона у чвор k . Дакле, последња два ограничења обезбедиће да и возило стигне у чвор k у тренутку када се у њега врати дрон. Претпоставке ограничења (2.15)-(2.18) су да ако је дрон лансиран из чвора i он не може у исти тај чвор и да се врати (слети), као и да дрон не може више пута да буде лансиран из истог чвора.

Да би се објаснило ограничење (2.19), претпоставимо да возило путује из чвора $h \in N_0$ у чвор $k \in N_+$. Ефективно време доласка возила у чвор k укључује време потребно за долазак возила у чвор h као и време потребно за путовање из чвора h у чвор k . Ако је дрон лансиран из чвора k , потребно је урачунати и време S_L опремања дрона за полетање. Уколико пре лансирања из чвора k дрон слеће у чвор k , у укупно време неопходно је урачунати и време S_R потребно за сервисирање дрона након повратка. Ово ограничење није обавезујуће у случају да возило не путује из чвора h у чвор k .

Ограничење (2.20) каже да уколико је дрон лансиран из чвора i , време његовог доласка у неки чвор j мора да укључи и време потребно за путовање из чвора i у чвор j . Време S_L за опремање дрона овде није укључено јер ограничења (2.15) и (2.16) обезбеђују да је $t_i^D = t_i$ у случају лансирања дрона из чвора i , а (2.17) и (2.18) укључују S_L у време доласка у чвор j . Ова ограничења захтевају да t_0^D буде дефинисано са $t_0^D = 0$ што је учињено у (2.28.). Слично, у ограничењу (2.21) ако је возило купио дрон у чвору k , време доласка у чвор k мора да укључује време

потребно за прелазак пута од чвора j до чвора k , као и време S_L сервисирања дрона након слетања. Параметар S_R мора бити укључен у решавање оних ситуација када возило није у могућности да стигне у чвор k пре дрона.

Максималним трајањем лета дрона бави се ограничење (2.22), где t_k^D представља време доласка у чвор k , а други израз представља време полетања из чвора i . Ограничења (2.23), (2.24) и (2.25) одређују одговарајуће вредности за $p_{i,j}$. Подсетимо се да u_i и $p_{i,j}$ описују редослед чворова које посећује само возило и да њихове вредности нису од значаја за чворове i и j које посећује само дрон.

Да бисмо објаснили ограничење (2.26), претпоставимо да дрон полеће из чвора i и да се враћа у чвор k . Даље, претпоставимо да дрон касније полеће из чвора l ($p_{i,l} = 1$). Ограничење (2.26) ће спречити да време t_l^D лансирања дрона из чвора l наступи пре времена t_k^D његовог повратка у чвор k . Ако се дрон не врати у чвор k , он не полеће из чвора j , тако да у том случају ово ограничење неће бити обавезујуће. Ово ограничење захтева да се $p_{0,l}$ дефинише као $p_{0,l} = 1$ за свако $l \in C$, што је учињено у (2.29). Коначно, (2.30)-(2.34) представљају дефиниције променљивих за одлучивање.

У ограничењима (2.15)-(2.21) параметар M представља довољно велик број који би требало да буде већи или једнак од последњег времена када су се и дрон и возило вратили у депо.

Аутори у раду [66] посматрају проблем, у ком возило заједно са једним дроном доставља робу корисницима и називају га проблемом трговачког путника са дроном (енг. TSP-D). Они у раду предлажу две хеуристике: прво рутирање па кластеровање и прво кластеровање па рутирање. Нумеричке анализе су показале значајну уштеду у поређењу са доставом која се врши само помоћу возила. Исти аутори у раду [67] разматрају сличну проблематику у циљу смањења трошкова возила и трошкова дрона и наводе два хеуристичка решења заснована на хеуристици најближег комшије са насумичном адаптивном процедуром претраге и модификацијом оптималне путање проблема трговачког путника.

Аутори у раду [68] такође разматрају варијанту проблема доставе возилом и дроном. Проблем решавају тако што развијају неколико брзих хеуристика (прво се врши рутирање, а затим кластеровање), заснованих на локалном претраживању и динамичком програмирању.

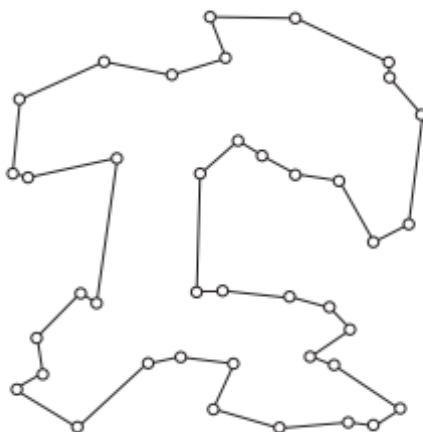
Аутори у раду [69] анализирају време, енергију и трошкове везане за доставу у којој учествују возило и дрон, пореде их са трошковима доставе у којој би учествовали само дрон или само камион, предлажу алгоритам оптимизације за одређивање оптималног броја локација за лансирање дрона, као и оптималног броја дрона по камиону. Развили су математички апарат за рачунање оптималног броја лансирних станица, оптималног укупног времена доставе и свих трошкова система.

2.4 РАЗЛИЧИТИ НАЧИНИ РЕШАВАЊА ПРОБЛЕМА ТРГОВАЧКОГ ПУТНИКА

Проблем трговачког путника је лак за разумевање и омогућава студије широких размера са великим бројем учесника, који решавају задати проблем без употребе рачунарског алгоритма и математичког апарата.

Интересантна је чињеница да је проблем трговачког путника посматран и са психолошке стране. У раду [70] из 1974. године проучавана су решења различитих облика проблема трговачког путника, са посебним нагласком на визуелним аспектима решења. Закључено је да визуелни аспекти могу да доведу до уочавања геометријских односа којих онај који решава проблем није ни свестан. При томе је њихов значај у решавању проблема трговачког путника једнак ономе који при решавању проблема имају аналитички процеси. Поређена је способност људи за решавање проблема трговачког путника са четири до десет градова. Закључак је био да је учинак учесника у експерименту био много бољи када су градови и цене путања били приказани визуелно, него када су били приказани табеларно.

Ово је било веома изражено у истраживању приказаном у раду [71]. Студија у раду састојала се од два експеримента. Први експеримент је извршен да би се испитали ефекти броја чворова који припадају конвексном омотачу оптималног решења, као и испитала могућност коју су раније већ сугерисали други истраживачи да перцепција, тј. опажање оптималне путање јесте природна тенденција људског система опажања. У испитивању је учествовало 36 учесника. Чворови су били распоређени унутар правоугаоника који је подељен на шест области. Две су садржале по 10 чворова, две по 25 и две по 40 чворова. Оптимизациона група учесника је имала задатак да пронађе најкраћу путању за сваки пример, а друга група је за задатак имала да пронађе путању која изгледа најприродније, најпривлачније и естетски најлепше. Резултати су показали велику сличност у одабиру руте код обе групе. На пример, путања од 40 градова која је представљена на слици 2.2., а која је пронађена од стране чланова друге групе, је краћа него све путање које су пронашли чланови прве групе.



Слика 2.2 Путања коју је пронашла група која је тражила визуелно лепо решење

У раду [71] аутори су истакли да је ову путању, у примеру са 40 градова, пронашао модни дизајнер, који је пронашао најкраће путање за четири од пет задатих примера.

Након проналажења свих путања, од учесника је тражено да оцене тежину решеног задатка на линеарној скали, оценом -5 за екстремно тешке задатке, оценом 0 за средње тешке задатке и оценом 5 за изузетно лаке задатке.

Аутори су у раду [72] приказали резултате четири експеримента. У првом од њихових експеримената, учесницима су дати примери путање из скупа проблема трговачког путника са 10 градова и од учесника је затражено да оцене сваку путању, на скали од 1 до 5, где је 1 оцена за визуелно најлепши облик путање, а 5 оцена за визуелно најгори облик путање. Резултати су указали на линеарну везу између оптималности путање и људске перцепције „доброг облика путање“.

Студија спроведена од стране аутора у раду [73] је заснована на експерименту са 20 учесника и 20000 на случајан начин генерисаних путања између 40 чворова. Истраживање је било усмерено на проучавање утицаја геометријског облика путање на то колико је иста та путања привлачна људима. Геометријски облици понуђени у експерименту нису представљали решења проблема трговачког путника. Требало је да учесници оцене „естетску привлачност“ геометријског облика, тј. колико им је облик био привлачан у својој апстрактној конфигурацији. Аутори су дошли до закључка да је мера компактности путање директно повезана са перцепцијом привлачности исте. Дошло се до интересантног закључка, да се група од укупно 40 чланова скоро константно делила у две подгрупе – подгрупу од 30 учесника који су константно бирали компактније облике и мању подгрупу од 10 учесника који су одабирали оне мање компактне облике.

Студије о привлачности путања су уско повезане са истраживањима која су радили психолози о генералним стратегијама које су учесници усвајали када се суоче са проблемом трговачког путника. У многим истраженим примерима показано је да су учесници константно бирали путање доброг квалитета у свим примерима геометријских проблема средње величине. Иако постоје многи математички методи, који лако проналазе боља решења у односу на она која су пронашли учесници, јасно је да су и учесници користили изванредан број калкулација како би добили добре резултате.

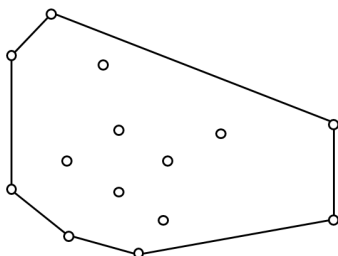
Једна од првих студија везаних за проблем трговачког путника је студија [74]. У раду, истраживачи су се фокусирали на то у којој мери распоред постављених тачака служи као водич у проналажењу оптималне путање. За дати скуп тачака прво се формира најмањи конвексан скуп који их садржи. Могу да наступе два случаја. У првом случају самим повезивањем тачака може да се добије конвексан скуп, а у другом случају повезивањем свих тачака конвексан скуп не може да се добије. Ако скуп добијен повезивањем тачака свих није конвексан скуп, он се смешта у најмањи конвексан скуп који га садржи.



Слика 2.3 Конвексни скуп за задати број тачака

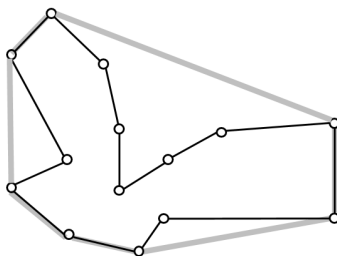
Нека су дате тачке чијим спајањем се добија конвексни скуп. Као што је познато, основна карактеристика конвексног скупа је да се спајањем било које две тачке из конвексног скупа добија дуж која цела лежи у њему, видети слику 2.3.

Дакле, ако се спајањем тачака не добије конвексан скуп, узима се најмањи конвексан скуп који садржи дате тачке. На слици 2.4. приказана је конвексна обвојница за пример скупа од 14 тачака. Конвексна обвојница је тесно повезана са оптималним путањама.



Слика 2.4 Конвексна обвојница за пример од 14 тачака

У овом контексту, Тачке које се налазе унутар руба конвексне обвојнице се називају унутрашњим тачкама.



Слика 2.5 Оптимална путања на основу конвексне обвојнице на примеру од 14 тачака

Неформално говорећи, модел приказан у наведеном раду функционише на следећи начин. У почетку, скицира се почетна путања која се поклапа конвексном обвојницом и на ову скицу ослањају се наредни потези (видети пример приказан на слици 2.5.). Затим се на случајан начин бира једна почетна тачка и одлучује о смеру кретања (смер казаљке на сату или супротан њему). Ако је изабрана почетна тачка унутрашња тачка конвексне обвојнице, она се повезује са најближом тачком са руба конвексне обвојнице у складу са изабраним смером. Даље се одређује која је унутрашња тачка најближа овој дужи. Ако је та тачка ближа било којој дужи са руба конвексне обвојнице (или некој дужи са до тада формиране путање) она се у овом тренутку изоставља из разматрања и путања се наставља ка наредној тачки са конвексне обвојнице у изабраном смеру. Поступак се наставља док се не дође до унутрашње

тачке која није ближа ниједној другој дужи. Тренутни чвор се повезује са њом и понавља се цео описани поступак, сада с обзиром на ову дуж.

Пратећи детаљну анализу резултата који су се односили на примере са 10 или 20 градова, аутори закључују да је за примере проблема трговачког путника који су рађени у оквиру њихове студије сложеност налажења решења директно пропорционална броју унутрашњих тачака.

Резултати које су постигли учесници експеримента који су решавали проблем трговачког путника ослањајући се на Еуклидско растојање и Менхетн растојање испитивали су аутори у раду [75]. У експерименту је учествовало 40 учесника, 16 мушког пола и 24 женског пола, углавном дипломираних студената. Сваки од учесника је имао задатак да реши проблем са 12 области које су садржале по 10 тачака и 6 области са по 40 тачака. Задатак се решавао помоћу оловке на папиру. Резултати су потврдили да човек долази до скоро оптималног решења у оба случаја, ослањајући се на Еуклидско и Менхетн растојање, иако се показало да су резултати ипак били нешто бољи приликом решавања проблема трговачког путника применом Еуклидског растојања.

Упркос очигледним предностима прикупљања података уз помоћ модерних информационих технологија, у литератури није приказано много оваквих случајева. Једна од студија које се баве овим приступом је рад [76] из 2016. године. Циљ ове студије је било учествовање великог броја играча у за ту сврху креираној онлајн игри (при чему се учесници експеримента не би осећали као да су на тестирању) и на тај начин сакупљање великог броја података о различитим варијантама проблема трговачког путника. Игра коју су креирали не изгледа као тест, а служи да прикупи податке о људском умећу решавања проблема, у случају када имају за то неопходан „алат“ и могућност да више пута могу да решавају исти задатак.

2.5 МАШИНСКО УЧЕЊЕ

Машинско учење представља поље у области рачунарских наука, односно вештачке интелигенције, чији је циљ употреба постојећих и/или креирање нових алгоритама за учење из података како би се направили модели или пронашли корисни обрасци који могу бити употребљени у предиктивне сврхе (тј. за предвиђање вредности атрибута од интереса).

Практичне имплементације идеја које су омогућиле развој примењеног машинског учења почињу да се јављају половином двадесетог века, од којих је прва вредна озбиљнијег помена модел функционисања људских неурона који су употребом струјних кола направили МекКалох и Питс [77] 1943. године. Више од петнаест година касније, 1959. године, Артур Семјуел [78] је направио програм који је омогућио ИБМ-овом рачунару да унапређује своју вештину играња игре “даме” (енг. *checkers*) са порастом броја партија које је претходно одиграо. Френк Розенблат [79] је 1958. године дизајнирао прву вештачку неуронску мрежу и назвао је Перцептрон; њен циљ је био препознавање образаца и облика. Алгоритам повратне пропагације у неуронским мрежама је предложен 1986. године [80], што је омогућило креирање

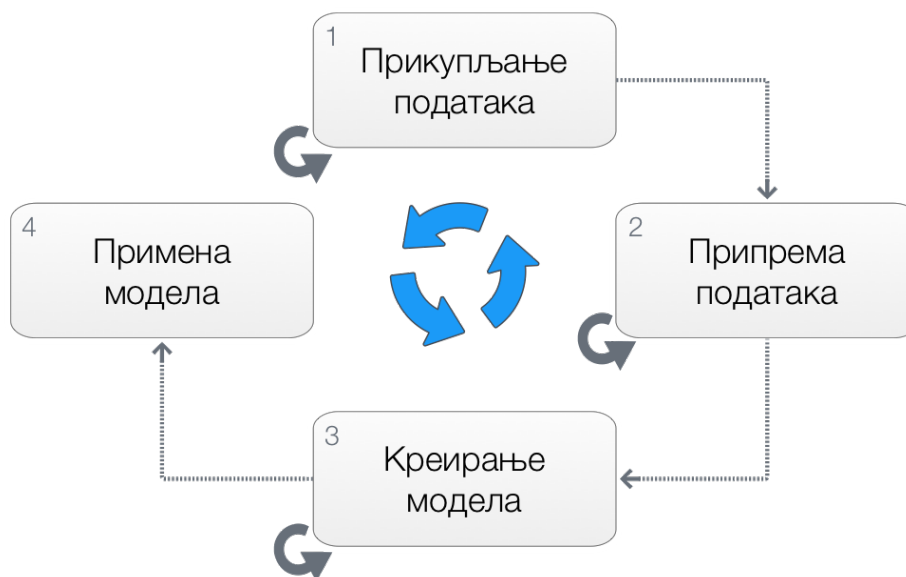
мрежа са већим бројем скривених слојева. 1990-их се појављују прве практичне примене машинског учења које добијају већу медијску пажњу или имају значајан утицај на процесе у пословном свету, као што је ИБМ-ов рачунар Дубоко Плаво (енг. *Deep Blue*) - који је 1997. године победио светског првака у шаху, или успешна примена препознавања руком писаних цифара (систем развијен од стране AT&T Bell Laboratories) која је омогућила аутоматизацију многих претходно мануалних процеса у Пошти Сједињених Америчких Држава. Различита технолошка достигнућа у 21. веку су омогућила драстично снижење цена рачунарских компоненти, уз истовремено значајно побољшање њихових перформанси - што је био неопходан предуслов да се како произвођачи софтвера и хардвера, тако и привредни и приватни субјекти озбиљније заинтересују за могућности практичне примене машинског учења. Ово је довело до праве експлозије у области примењеног машинског учења, које је у данашње време присутно у готово свим сферама живота, било на директан или индиректан начин.

Формална и често цитирана дефиниција машинског учења у контексту рачунарских наука гласи: „За рачунарски програм се каже да учи из искуства E у односу на неку класу задатака T и меру учинка P , ако се његов учинак на задацима T , како је измерен учинак P , побољшава с искуством E “ [81]. Из ове дефиниције може да се наслути да је поље примене машинског учења прилично широко, пошто су типови задатака у којима рачунарски програм може да побољша учинак на основу претходног искуства веома разноврсни. Једна од општеприхваћених класификација типова машинског учења у односу на врсту проблема који се решава - као и облик улазних података односно тип очекиваног излаза - је на надгледано, делимично надгледано и ненадгледано машинско учење.

У домен проблема који се решавају употребом надгледаног машинског учења спадају сви они где је потребно утврдити однос између посматраних атрибута и циљне променљиве, тако да се употребом неке функције вектори улазних атрибута пресликају у вредности циљне променљиве. У овом случају, задатак изабраног алгорита машинског учења је да што боље апроксимира функцију којом ће се извршити пресликавање, како би она могла касније да се користи у предиктивне сврхе (то јест за предвиђање вредности циљне променљиве на основу вредности посматраних атрибута - улазних величина). Када је реч о ненадгледаном машинском учењу, ту је циљ откривање потенцијално корисних образаца у подацима, односно моделовање структура или дистрибуција присутних у подацима како би се они боље разумели. Делимично надгледано учење је комбинација претходна два типа машинског учења и обично се примењује у случајевима када постоји велики скуп инстанци од којих само мали број поседује "лабеле" (које представљају коначан број дискретних вредности циљне променљиве), а које је потребно доделити и осталим инстанцама које су им по посматраним обележјима сличне.

Иако се машинско учење углавном поистовећује само са кораком у којој се изабрани алгорита примењује над доступним подацима како би се реализовао циљ учења (на пример апроксимирање функције пресликавања или моделовање структуре података), у смислу креирања модела који је употребљив у реалном свету то ипак представља само једну од неколико подједнако важних фаза у процесу који је по својој природи

итеративан. Овај процес, релевантан за контекст докторске дисертације, је илустрован на слици 2.6.



Слика 2.6 Пример процеса машинског учења

2.5.1 НАДГЛЕДАНО УЧЕЊЕ

Како се у оквиру истраживања представљеног у дисертацији користе технике надгледаног машинског учења, процес приказан на слици 2.6 ће бити посматран управо кроз призму ове врсте машинског учења.

У првој фази процеса неопходно је прикупити податке који су релевантни за проблем који жели да се реши употребом техника машинског учења. Ово делује наизглед једноставно, али у пракси су највећи изазови некада везани управо за ову фазу: дешава се да прикупљање података изискује много времена, да њихова екстракција из изворних система захтева озбиљан ангажман људских и/или финансијских ресурса, као и да су некада подаци једноставно недоступни услед техничких или регулаторних ограничења, те да не постоје адекватни алати којима би се подаци прикупили. Ово последње је посебно тачно у случају када треба решити проблем који није разматран раније, или када се предложени приступ значајно разликује од тренутно прихваћених. Један од битних доприноса ове дисертације лежи управо у развоју алата за прикупљање података који ће бити обрађивани техникама машинског учења, што је наравно темељ за све наредне кораке у процесу.

У другој фази се прикупљени подаци припремају за обраду изабраним алгоритмом машинског учења. Ова припрема најчешће подразумева више корака и сама представља итеративан процес; примери активности у оквиру ове фазе обухватају:

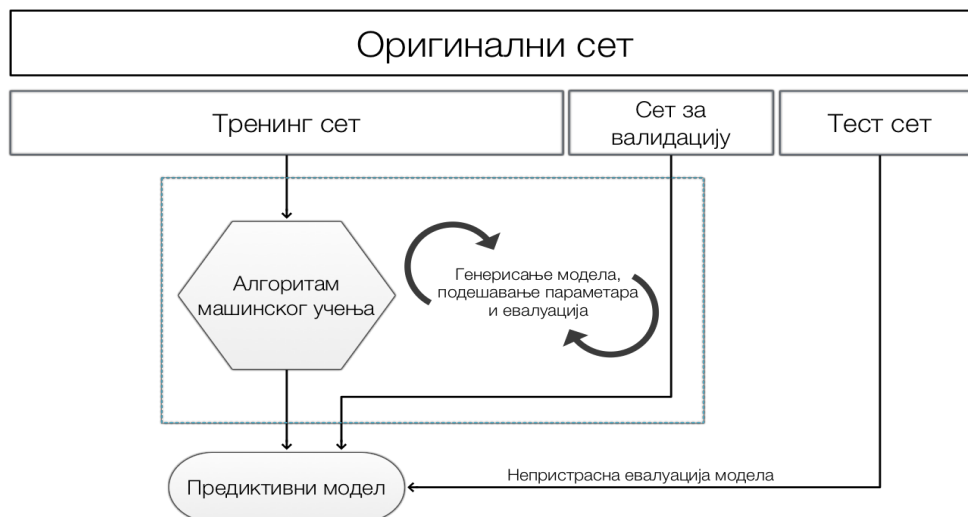
- Визуализацију података и експлоративну анализу - што подразумева графички приказ дистрибуција вредности сваког од атрибута, истраживање корелација како између различитих атрибута тако и између појединачних атрибута и циљне

променљиве, приказ сумарних статистика, мера централне тенденције, опсега вредности и сл.,

- Спајање података из хетерогених извора - на пример спајање демографских података о кориснику добијених из корпоративног система за управљање односима са корисницима, са трансакционим подацима из система за праћење поруџбина путем заједничког обележја које једнозначно одређује корисника у сваком од тих система,
- Третирање недостајућих вредности - где се доноси одлука да ли да се инстанце које садрже недостајуће вредности у неком од посматраних атрибута искључе из сета података или да се примене методе замене недостајућих вредности за те атрибуте (на пример једноставном употребом средње вредности / модуса / медијане или сложенијим приступима као што је метода најближег суседа),
- Идентификација и третирање екстремних вредности (енг. *Outlier detection and treatment*) - у оквиру које треба узети у обзир како ће инстанце које садрже екстремне вредности у неком од атрибута утицати на даљи процес анализе (то јест да ли је алгоритам који ће се користити осетљив на екстремне вредности или не) и у складу са тим их третирати (уклањањем, заменом употребом граничних вредности и сл.),
- Категоризација непрекидних вредности - трансформација атрибута који садрже непрекидне вредности у категоричке, где се употребом различитих опсега непрекидним вредностима додељује дискретна ознака (лабела, класа),
- Трансформација категоричких атрибута у низ бинарних атрибута (енг. *One-hot encoding*) - где се за сваку (или за сваку осим једне, која се назива референтна) вредност посматраног категоричког атрибута креира нови бинарни атрибут који означава постојање или непостојање дате вредности,
- Узорковање - посебно када се ради о великим количинама података који нису погодни за паралелну обраду (или услед ограничености рачунарских ресурса), неопходно је издвојити репрезентативан подскуп инстанци које што приближније рефлектују вредности и дистрибуције присутне у целом скупу података, и сл.

Неретко се дешава да се приликом припреме података установи да расположиви подаци нису адекватни за даљу анализу (на пример, постоји велики број недостајућих вредности, није могуће повезати податке из хетерогених система, грануларност атрибута није на истом нивоу итд.), што може да резултује одлуком да се одустане од даље анализе док се квалитет података не побољша, да се отклоне уочени недостаци или да се проблем који је иницијално био замишљен прформулише и изрази у облику новог који је могуће решити употребом постојећег сета података (примера ради, уколико је циљ унапредити активности превентивног одржавања мотора, можда је коришћењем расположивог сета података немогуће утврдити преостало време до отказа мотора изражено у минутима, али је могуће направити предиктивни модел који ће успешно сигнализирати могућ отказ мотора у наредна три дана).

Трећа фаза обухвата одабир алгоритма (или групе алгоритама) машинског учења који ће се применити над припремљеним сетом података, креирање модела и његову евалуацију. Она је илустрована на слици 2.7.



Слика 2.7 Креирање модела употребом алгорита машинског учења

Избор алгорита, поред обавезне подобности за решавање посматраног типа проблема (примера ради, уколико је потребно пресликати улазне атрибуте у непрекидну вредност, бинарни класификатор који за излаз има дискретне вредности неће бити од велике користи) у значајној мери зависи и од специфичних захтева домена у којем се посматрани проблем налази (могуће је, на пример, да је регулативом прописано да модел мора бити потпуно транспарентан и лак за интерпретацију од стране људи), као и претходног искуства у примени одређене фамилије алгорита на решавање сличних проблема.

Стратегија која се најчешће користи како би евалуација перформанси модела била што је више могуће непристрасна, је да се пре креирања модела припремљени подаци поделе у три партиције (односно дисјунктна подскупа) које садрже насумично изабране инстанце из оригиналног скупа. Ове партиције се у домену машинског учења називају сетови. Први сет, који се користи за генерисање модела, обично садржи највећи број инстанци и назива се тренинг сет. Величина овог сета може да варира, али се у литератури цифре од 70% до 80% инстанци из скупа припремљених података сусрећу као често коришћена пропорција. Други сет, који обично обухвата од 10% до 20% инстанци из скупа припремљених података, се назива сет за валидацију и користи се за иницијалну евалуацију перформанси модела и фино подешавање параметара модела. Последњи сет се назива тест сет - он садржи преостале инстанце (које се не налазе ни у тренинг сету ни у сету за валидацију) и служи за коначну, непристрасну евалуацију модела.

Као што је приказано на слици 2.7, тренинг сет се користи како би се креирао модел употребом изабраног алгорита машинског учења. Како већина алгорита машинског учења поседује параметре чијом се варијацијом могу добити модели различитих перформанси у односу на посматране критеријуме евалуације, обично је неопходно испробати различите вредности расположивих параметара како би се установило која комбинација даје најбоље резултате за посматране сетове података. У ту сврху се користи сет за валидацију, који није коришћен приликом генерисања

модела, те представља добру основу за непристрасну оцену перформанси модела добијеног употребом тренинг сета и специфичних параметара модела.

Уколико величина скупа припремљених података није велика, друга стратегија која се често користи је стратегија угнежђене унакрсне валидације (енг. *k-fold cross validation*). Она подразумева дељење припремљеног скупа података у две партиције - тренинг и тест сет - од којих прва најчешће садржи између 70% и 80% инстанци. Пре примене алгоритма машинског учења, дизајнер експеримента бира вредност параметра k , (10 се обично узима као подразумевана вредност) који диктира број понављања унакрсне валидације. Тренинг сет се онда приликом генерисања модела дели на k партиција једнаке величине, од којих се за учење користе све осим једне од партиција, која се користи за валидацију. Овај процес се понавља k пута, тако да се у свакој наредној итерацији користи различита партиција за валидацију. Након завршетка свих итерација, за вредност која се користи за евалуацију модела (генерисаног за изабране параметре алгоритма) се узима просечна вредност свих корака.

Наравно, да би модели добијени употребом различитих комбинација параметара алгоритма могли да се пореде и рангирају, неопходно је утврдити критеријуме евалуације; у зависности од врсте излазних вредности коју модел пружа и очекиване области примене предвиђања модела, често се користе површина испод ROC криве (енг. *Area Under the Receiver Operating Characteristics*, често скраћено као AUC или AUROC), прецизност (енг. *Precision*), одзив (енг. *Recall*), корен средњеквадратне грешке (енг. *Root Mean Square Error*, или скраћено RMSE) и друге [82]. Када се установи која комбинација параметара модела даје најбоље резултате за расположиве сетове података, тест сет - који није коришћен ни директно ни индиректно приликом генерисања модела односно подешавања параметара модела - се користи за коначно оцењивање перформанси модела што уједно представља и очекивано понашање модела у будућности (за улазне податке који нису виђени раније а упоредиви су са подацима који су коришћени за генерисање модела у смислу типа, опсега и дистрибуција вредности).

Коначно, последња фаза подразумева примену изабраног модела у предиктивне сврхе.

2.5.2 НЕУРОНСКЕ МРЕЖЕ

Неуронске мреже представљају класу алгоритама машинског учења који покушавају да копирају основне принципе функционисања биолошких неурона. У данашње време представљају једну од најпопуларнијих метода машинског учења, која је примену нашла у готово свим областима модерног живота: од аутономних возила и летелица, преко аутоматског превођења људског говора у текст (као и превођења текста са једног језика на други), напредне медицинске дијагностике (препознавање присуства и типа болести на основу ПЕТ, рендгенских и других снимака), паметне пољопривреде (интелигентни системи за наводњавање и препоруку третмана за усеве), па до личних

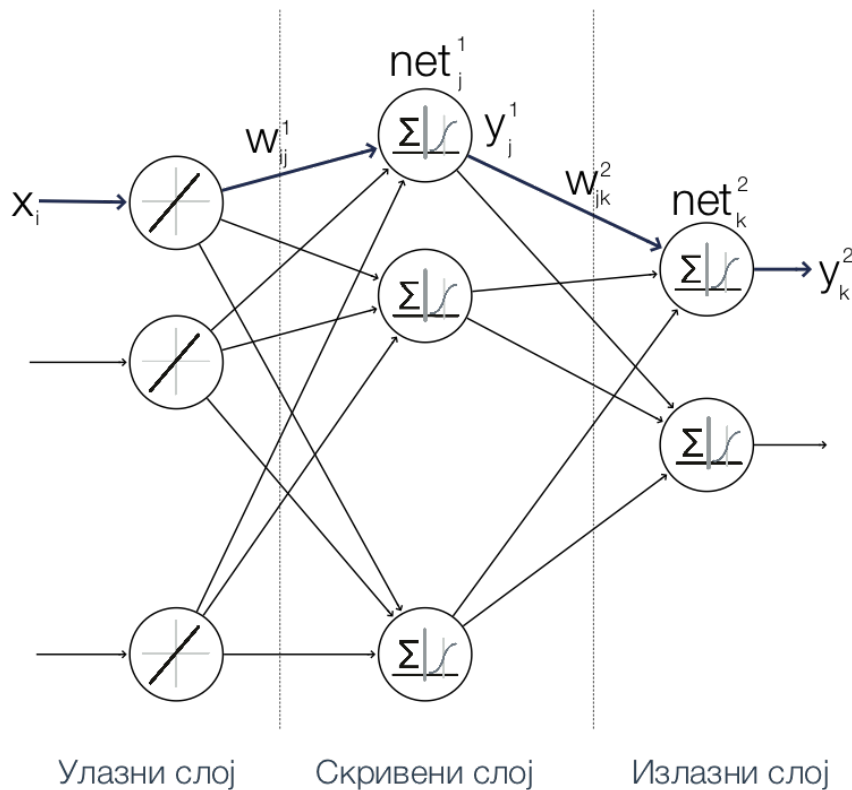
асистената у мобилним уређајима и противника како у електронским тако и у класичним играма (шах, го).

Неуронске мреже се састоје од скупа повезаних чворова, који се називају неурони и који су организовани по слојевима. Први слој се назива улазни слој и он увек има број неурона једнак броју улазних атрибута на основу којих се прави модел. Сваки наредни слој се назива скривени слој, осим последњег који се назива излазни слој. Број неурона у скривеним слојевима, као и сам број слојева, зависи од избора архитектуре који мрежу дизајнира (мада се у скорије време појављују и приступи за аутоматско препоручивање архитектуре за дати скуп података). Постоји много различитих архитектура неуронских мрежа, од којих су неке посебно погодне за решавање одређених врста проблема (као што су препознавање облика на сликама или идентификација емоција на лицима људи). Уколико мрежа поседује више од једног скривеног слоја, тада се она назива дубока неуронска мрежа (енг. *deep neural network*).

У случају потпуно повезаних неуронских мрежа (енг. *fully connected neural networks*), које су данас највише у употреби, сви неурони у једном слоју су повезани са свим неуронима у наредном слоју системом веза које симулирају синапсе између неурона у биолошким системима. Сваки неурон представља једноставну параметризовану функцију која рачуна линеарну комбинацију својих аргумената и над њом рачуна неку нелинеарну трансформацију - познатију као активациона функција (енг. *activation function*) [83], те прослеђује резултат неуронима у наредном слоју. Како би се изразио релативан међусобни утицај два чвора, везама се додељују тежински фактори. У вештачким неуронским везама, ове тежине се уче на основу скупа података (мрежа се обучава), како би се формирали одговарајући модели за нумеричку предикцију или класификацију.

Како би општи принципи функционисања и основни елементи вештачких неуронских мрежа били боље објашњени, као пример ће послужити вишеслојни перцептрон - класична и условно речено једноставна вештачка неуронска мрежа - чија је структура приказана на слици 2.8. На истим принципима почивају и комплексније (у смислу архитектуре) неуронске мреже.

Вишеслојни перцептрон је мрежа са преносом сигнала унапред (енг. *feed-forward network*), што значи да се сигнали преносе само у једном смеру, од улаза ка излазу, без повратне спреге.



Слика 2.8 Вишеслојни перцептрон

На слици је са x_i означен i -ти улаз мреже, који одговара нумеричкој вредности i -тог обележја. Тежине веза између i -тог улазног неурона и j -ог скривеног неурона су означене са w_{ij}^1 . Активација j -ог скривеног неурона је означена са net_j^1 , док је y_j^1 излаз j -ог скривеног неурона. Слично, w_{jk}^2 је тежина везе између j -ог скривеног неурона и k -тог излазног неурона, net_k^2 активација k -тог излазног неурона, а y_k^2 његов излаз. Активација j -тог скривеног неурона се рачуна на основу

$$net_j^1 = \sum_{i=0}^{N_i} w_{ij}^1 x_i, \quad (2.36)$$

где је N_i број улазних неурона. Активација k -тог скривеног неурона је

$$net_k^2 = \sum_{j=0}^{N_h} w_{jk}^2 y_j^1, \quad (2.37)$$

где је N_h број скривених неурона. Скривени неурони у различитим слојевима могу имати различите функције преноса, од којих се често користе исправљачка линеарна јединица, тангенс хиперболички и сигмоидна функција. На примеру са слике 2.8, за излазе неурона из првог скривеног слоја, у зависности од функције преноса која се користи важи

$$y_j^1 = \frac{1}{1 + e^{-net_j^1}} \quad (2.38)$$

за сигмоидну функцију,

$$y_j^1 = \frac{e^{2net_j^1} - 1}{e^{2net_j^1} + 1} \quad (2.39)$$

за тангенс хиперболички и

$$y_j^1 = \max(0, net_j^1) \quad (2.40)$$

за исправљачку линеарну јединицу.

Вишеслојни перцептрони, као и модерне дубоке мреже, се најчешће обучавају применом алгоритма пропагације грешке уназад (енг. *backpropagation*), који итеративно подешава тежине мреже како би се минимизовала следећа функција грешке

$$J(W) = \sum_{n=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{N_0} (t_k^{(n)} - y_k^{2(n)})^2, \quad (2.41)$$

где N_i представља број инстанци у тренинг сету, N_0 је број излазних неурона, $t_k^{(n)}$ стварна вредност циљне променљиве за n -ту инстанцу а $y_k^{2(n)}$ излазна вредност враћена од стране мреже за обележја те инстанце на улазу. Тежине веза у мрежи се итеративно подешавају користећи правило

$$\Delta w(s) = \mu |\Delta w(s-1)| + (1-\mu) \left[\rho \frac{\partial J(W)}{\partial w} \right], \quad (2.42)$$

где $\Delta w(s)$ представља промену тежина у кораку s , μ је моменат а ρ стопа учења. Последња два параметра контролишу динамику учења мреже. Стопа учења контролише брзину учења мреже, док моменат успорава учење уколико се знак корекције мења од корака до корака. Овакве осцилације говоре о присуству шума, па се моменат користи да стабилизује процес учења мреже у оваквим ситуацијама. Када су измене тежина истог знака, моменат ће убрзати учење.

Из претходно наведеног није тешко закључити да вештачке неуронске мреже - поред неспорних квалитета у смислу способности да аутоматски изводе корисне атрибуте употребом нелинеарних трансформација, те да касније уче над таквим репрезентацијама и на тај начин пруже веома квалитетан излаз - имају и одређене недостатке [83]. Они се највише огледају у потребној количини улазних података (уколико у подацима не постоји значајна количина шума и квалитет је константан, генерално важи правило „што више то боље“) и у понекад веома дугом времену

неопходном за оптимизацију (које се неретко мери данима и недељама). За превазилажење првог недостатка је често потребно пронаћи нова и креативна решења за прикупљање података, док се проблем трајања оптимизације може донекле ублажити употребом савремених решења базираних на специјализованом хардверу (обично се користе графичке процесорске јединице, енг. *Graphics Processing Unit*, GPU) и оптимизованих за паралелна израчунавања.

У наставку дисертације ће бити приказано једно иновативно решење за прикупљање велике количине података који ће касније бити употребљени за креирање интелигентног агента базираног на дубоким неуронским мрежама.

3 ПРОБЛЕМ ДОСТАВЕ И АНАЛИЗА МОГУЋИХ РЕШЕЊА

Током последњих деценија, глобализација је довела до прилагођавања сектора транспорта и логистике новим захтевима, како за што већом потражњом за транспортом, тако и за све захтевнијим корисницима. Глобализација утиче на појаву амбициозних корисника којима је хитно потребан производ и који не размишљају пуно о начину превоза, заштити животне средине и уштеди новца. Да би задовољили све захтевније купце логистичке компаније трагају за ефикаснијим и јефтинијим начинима транспорта, односно трага се за бољим начинима доставе који би свеукупно побољшали логистику транспорта. Због наведеног, логистичке компаније захтевају све виши ниво услуге, како би задовољиле захтеве корисника, а у исто време повећале ефикасност и продуктивност транспорта. Можемо закључити да је превоз окосница глобализације.

Данас, можда више него икада, организација транспорта, како у великим тако и у малим градовима, постаје кичмени стуб функционисања и даљег успешног економског и друштвеног развоја. Ефикасан и одржив транспорт постаје све важнији за функционисање свих специфичних градских функција и подстицање економског развоја, као и за економску добробит својих становника. Поред повећане урбанизације, ту су и остали важни фактори који утичу на повећање важности градског превоза робе и потребу за њеним даљим унапређивањем. Повећање куповне моћи урбаног становништва резултира већом количином и различитошћу робе купљене и достављене купцима урбане зоне од стране различитих добављача и њихових дистрибутивних канала, затим на централизацију производње, дистрибуцију робе и пораст е-трговине са повећаном потражњом мањих, али чешћих достава које обично врше логистичке и доставне компаније.

Иако је достава робе од виталног значаја за становнике и индустрију у урбаним подручјима, присуство и рад возила за транспорт робе у урбаним подручјима је непожељно. Саобраћајне гужве и загађење околине су два главна разлога за некоришћење возила у градовима, не само великих у смислу броја становника, већ и малих европских градова са историјским градским језгрима [84]. Превоз робе у урбаним срединама најчешће је оријентисан ка достави, која је саставни елемент целокупног ланца снабдевања.

Свеобухватна категоризација широког спектра доставе робе у градовима, која обухвата и доставу у урбаним условима, дата је у раду [85]. Аутори наводе четири категорије негативних утицаја урбаног теретног саобраћаја:

- негативне утицаје на животну средину коришћењем возила која користе конвенционална горива, загађење ваздуха и разне врсте отпада као што су гуме, возила и други материјали,
- негативне социјалне утицаје који укључују различите аспекте снижавања квалитета живота као и смањење јавног здравља, укључујући смртне болести, повреде у саобраћајним несрећама и различите врсте загађења ваздуха, буке, вибрације и визуелно загађење,

-
- негативне економске утицаје који садрже загушење путева и економски терет свим заинтересованим странама укљученим у урбани теретни саобраћај због његове неефикасности и негативним утицајима на животну средину и друштво,
 - негативне оперативне утицаје, који се односе на различита загушења и саобраћајне поремећаје укључујући услуге у урбаним срединама као што су утовар, паркирање и маневрисање, као и њихов укупан ефекат пружања услуга и опструкције за друге кориснике путева.

3.1 ПРОБЛЕМИ У ДОСТАВИ

Превоз робе у урбаним срединама понекад се сматра сложенијим и тежим за планирање од планирања и организовања транспорта на великим удаљеностима. Поред тога, цена доставе тзв. последње миље може бити скупља за 13% до 75% од висине осталих трошкова транспортног ланца [86].

Да би у потпуности разумели проблеме са којима се сусрећу компаније које се баве доставом, морамо бити свесни трендова на локалном и глобалном нивоу који утичу на пословање, односно саму организацију транспорта. Пре свега мислимо на раст популације и урбанизацију, раст е-трговине, потребу за све већом брзином доставе, поделу тржишта, климатске промене и одрживи развој.

3.1.1 Раст популације и урбанизација

Данас око 54% укупне светске популације живи у урбаним срединама и производи око 80% укупног светског бруто друштвеног производа [87]. Интересантно је да је 1950. године само 30% светске популације живело у урбаним срединама, а да се очекује да 2050. године ова бројка достигне чак 66%. Организација за економску сарадњу и развој (енг. *Organisation for Economic Co-operation and Development* – OECD) има још суморније прогнозе, а то је да ће 2100. године 85% светске популације живети у градовима.

Пројекције оваквог раста очекују се углавном у земљама у развоју, које углавном немају капацитета и жеље да се боре против урбанизације на ефикасан начин, па је због велике социјалне неједнакости становништво у потрази за бољим животом принуђено да одлази у градове, чија инфраструктура није у стању да ефикасно одговори интензивној стопи раста популације.

3.1.2 Раст е-трговине

Пораст интернет продаје, односно е-трговине позитивно је утицао на многе компаније које се баве препродајом различитих типова роба и довела је до развоја нових бизнис модела. Тржиште оваквог начина продаје је 2014. године износило око 1.9 трилиона долара, што је скоро дупло више него 2011. године [88]. Постоје јако велике разлике када се пореде различити региони у свету, због чињенице да многи региони укључујући и Србију, тек почињу са развојем у правцу е-трговине. Поред наведеног, корисници све више имају могућност да бирају начин доставе који им одговара. Избор

начина доставе обично подразумева избор времена доставе, цене, начина (до кућног прага или до радње) и транспортног средства (авион, железница, брод).

3.1.3 Потреба за све већом брзином доставе

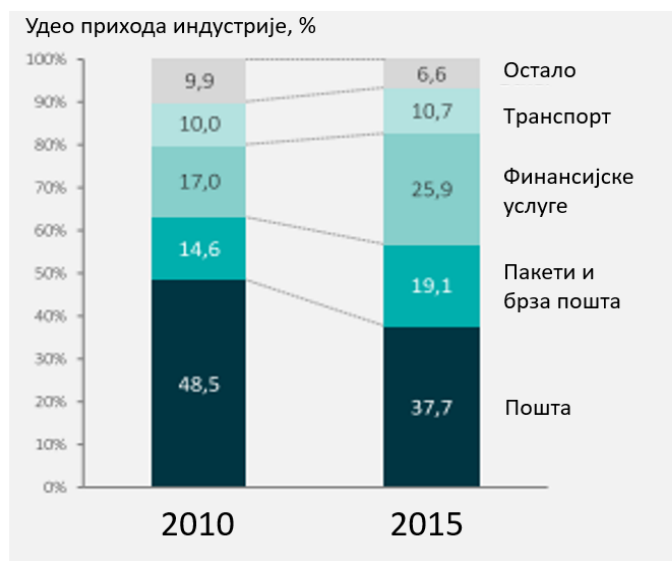
Последњих година многи трговци почели су да корисницима нуде опцију доставе истог дана, понекад и доставе у року од једног до два сата, у појединим градовима. Разлог понуде тако брзих услуга је да би се продавци који немају своје продајне објекте, такмичили са онима који имају, односно који услугу нуде практично тренутно. Штавише, многи корисници нису спремни да плате додатно за наведене услуге, које им се у већини случајева и нуде бесплатно. Са друге стране, многим купцима није потребна услуга доставе истог дана, а понекад су спремни и да сачекају више недеља уколико то подразумева бесплатну доставу са другог континента.

Гледајући из перспективе градске логистике, понуда брзе доставе доводи до повећања кретања доставних возила, односно повећања пређене километраже, цене доставе и све већег загађења животне средине.

3.1.4 Подела тржишта

Поштанска и индустрија доставе пакета доживеле су значајне промене у последњој деценији и те промене се и даље константно дешавају. Достава писама била је основна делатност поштанских компанија, али временом тај удео се смањило, а самим тим и њихов удео у приходима поштанских компанија.

У 2007. години тржиште доставе поштиљака представљало је већину укупних прихода (55%), док је данас испод половине, око 44%. Подстакнута растућом популарношћу електронске трговине, достава пакета бележи нагли успех: обим глобалне доставе је у константном порасту са стопом раста од 5,9% између 2013. и 2015, а одговарајући приходи расту на 4,8%, као што је приказано на слици 3.1.



Слика 3.1 . Заступљеност услуга на тржишту

У 2015. години стопа раста броја достављених пакета у развијеним тржиштима Немачке или Сједињених Америчких Држава кретала се у распону од 7% до 10%, па чак и до 300% на тржиштима у развоју, као што су Индија и Кина. На развијенијим тржиштима то значи да је у року од десет година количина достављених пакета порасла дупло [89].

Утицај глобалних кретања, нове технологије и либерализација тржишта одразили су се и на европске поштанске компаније, које су биле присиљене да модернизују свој начин пословања и пружања услуга. Оне су увеле иновације у производне процесе, побољшале квалитет и разноврсност услуга и прошириле спектар производа [90].

У извештају „*Development of the Abidjan Postal Strategy (2021–2024)*” Светског поштанског савеза из марта 2019. године [1] наводи се да главни утицај на смањење поштанских прихода има интензиван развој дигитализације. Упркос смањењу броја пошиљака, инфраструктура поштанског сектора остаје једна од највећих и најбоље повезаних мрежа у свету. У погледу приступа поштанским услугама, 85.8% светске популације има могућност доставе до куће, 9.4% своје пошиљке преузима у поштанским јединицама а 4.8% нема приступ поштанским услугама. Највећи удео становништва који нема приступ поштанској услузи је у Африци. Улагање у побољшање поштанске инфраструктуре је кључно за развој поштанског сектора у свету.

3.1.5 Климатске промене и одрживи развој

Повећање интензитета саобраћаја у урбаним срединама доводи до загушења саобраћаја, повећања загађења ваздуха и повећања буке, саобраћајних незгода и повећане емисије CO₂, а глобално доводи до стварања ефекта стаклене баште [91]. Када се фокусирамо на наведене ефекте, односно борбу за њихово ублажавање кроз развој алтернативних решења, која би могла представљати социјални, економски и природни одрживи развој урбаних средина, морамо имати на уму да је крајњи циљ таквог развоја да се не дозволи опадање квалитета живота, већ да се он подигне на виши ниво. Такође, потребно је обезбедити услове да повећање урбанизације не утиче негативно на здравље грађана локално и на климатске промене глобално.

Урбани транспорт представља највећи извор загађења ваздуха у Европи. У периоду између 1990. и 2007. године емисија CO₂ у Европи је порасла за 29% [92]. Упркос свим негативним ефектима који се јављају са повећањем броја и интензитета рада доставних возила, потребно је обезбедити услуге које урбани начин живота захтева, као и даљи развој логистичких и доставних компанија, јер захтеви за повећањем урбаног транспорта континуирано расту и наставиће да расту у будућности.

Пажња јавности у европским земљама све више је усмерена на одрживи развој и решења која доводе до смањења загађења. Тај притисак се неминовно одражава на процес трагања за прихватљивим иновацијама које би биле у стању да помире захтеве свих заинтересованих страна.

Путници и купци интернет производа желе поуздане и брзе услуге уз ниске цене, док је циљ шпедитерских и поштанских компанија смањење оперативних трошкова како би се остварила што већа добит, не узимајући у обзир загађење животне средине која

највише брине становнике урбаних подручја. Поред тога, становници густо насељених области желе брз превоз лица и доступност свих садржаја.

Уколико се проблем посматра глобално, може да се увиди да различите културе и локалне економске и географске карактеристике значајно утичу на организацију логистике и начине доставе. Примера ради, у многим земљама у развоју у Азији и Африци, улични продавци заузимају улични простор где продају најразличитију робу, од свежих намирница до електронике и на тај начин чине већ загушене путеве још тежим за пролаз. Мали приватни превозници користе јефтину радну снагу, стар и ниско ефикасан начин транспорта, стварајући тиме велику емисију штетних гасова и буке који значајно утичу на животну средину. У старим европским градовима и у Јапану, доставна возила се тешко крећу уским градским улицама, а због ограниченог простора за паркирање, утовар и истовар робе врши се на улици, када неминовно долази до блокаде саобраћаја [84].

Тренд развоја доставе пакета је истовремено скраћење времена доставе и смањење трошкова, што условљава употребу, односно изградњу најсавременије логистичке мреже. Логистичка мрежа подразумева изградњу савремених логистичких центара различитих карактеристика, које се разликују у зависности од намене. Типични логистички ланац организован је на следећи начин. Сировине се шаљу на место производње произвођача, одакле се готов производ шаље у складиште (било у власништву добављача или логистичког провајдера). Затим се готови производи достављају крајњим потрошачима, било путем традиционалних продавница, као што су малопродајни објекти, односно супермаркети или директно до потрошача. Када се ради о достави до потрошача, проблем доставе представљају ситуације када корисник није код куће или се налази на другој адреси од првобитно назначене, што за последицу има повећан број пређених километара и радних сати добављача. Посебан проблем у тзв. последњој миљи представљају ограничене могућности за ефикасно рутирање и ривалство између компанија.

Аутори у раду [93] описују да градска логистика има за циљ постизање ефикасних и одрживих урбаних транспортних система, кроз три области развоја:

- технолошке иновације,
- ангажовање приватних компанија и
- јавно-приватну координацију.

Ради подизања ефикасности логистичког ланца неопходно је располагање реалним подацима у реалном времену, како би се могло вршити планирање рутирања. Поред тога, неопходан је константан развој информационих система који су врло моћан алат за мапирање градске логистичке мреже.

Ништа мање није важна ни корпоративна друштвена одговорност, као ни локална политика и прописи нити углед међу грађанима и купцима који компаније желе да имају, што све заједно представља факторе који утичу на ангажовање компанија у развоју ефикасније логистике. Битно је разумети да би напредак у развоју био веома отежан без сарадње јавних и приватних компанија.

На крају, потребно је имати у виду и политику Европске уније по питању одрживог развоја урбаних средина. Концепт одрживог развоја подржава три стуба одрживости - економски, животни и социјални и за циљ има повећање економске ефикасности дистрибуције у урбаним срединама, уз минималан утицај на животну средину и екологију.

Наведени концепт је производ разматрања главних изазова урбане мобилности од стране Европске комисије. Изазови подразумевају решавање проблема интензивних загушења многих урбаних подручја, емисије CO₂, квалитета ваздуха и пораста броја саобраћајних незгода.

Постављени изазови захтевају значајан напредак у различитим правцима, као задовољење интереса свих заинтересованих страна, те је стога Европска комисија развила оквир за суочавање са овим изазовима, са циљем да се наредним генерацијама обезбеди одржива будућност. Овај оквир изграђен је на четири основна стуба - декарбонизацији, дигитализацији, инвестицији и људима (Европска комисија, 2017).



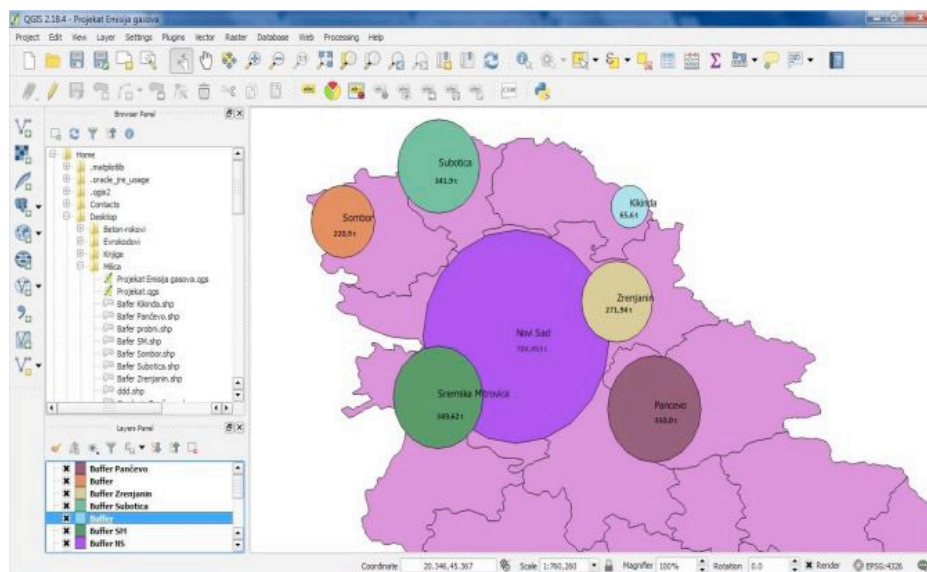
Слика 3.2 Одржива будућност

Декарбонизација подразумева смањење емисије CO₂ из транспорта до 2030. године. Дигитализација предвиђа дигитално повезивање возила на европским путевима, умрежавањем у заједнички интелигентни транспортни систем, као и увођење дрона. Овим документом предвиђене су инвестиције у вредности од 24 милијарде евра, у периоду од 2014. до 2020. године, у инфраструктуру, истраживања и иновације. Кроз рад са људима на повећању безбедности, права путника и креирање нових радних места предвиђено је да се број настрадалих на путевима смањи за 50%.

Поред наведеног, циљ је да се до 2040. године број возила у граду која користе конвенционална горива за погон смање за 50%, а да се до 2050. године потпуно избаце из употребе. Такође, циљ је и да градска логистика у главним градским центрима има нулту емисију гасова до 2030. године.

Саобраћајне активности у градским срединама у циљу брже, ефикасније доставе робе стварају негативне ефекте који се односе на животну средину. Поштански, логистички системи као највећи дистрибутивни системи, треба да препознају негативан утицај

транспорта на животну средину. Аутори су у раду [94] приказали истраживање емисије CO₂ код возила Јавног поштанског оператера Србије на територији Аутономне Покрајине Војводине. Приказ резултата истраживања емисије CO₂ возила Поштанског оператера дат је помоћу географског информационог система QGIS. За прорачун емисије CO₂ коришћен је *My Climate Carbon Footprint Calculator* који је део *My Climate* пројекта чији је циљ повећање ефикасности заштите животне средине. Аутори су представили укупну годишњу емисију CO₂ тренутног возног парка Јавног поштанског оператера за 231 возило различитих произвођача, различите године производње као и различите потрошње горива, на територији Аутономне Покрајине Војводине за градове Нови Сад, Суботица, Зрењанин, Кикинда, Сомбор, Сремска Митровица и Панчево. Као резултат, на слици 3.3 приказана је мапа просторне емисије CO₂.



Слика 3.3 Приказ просторне емисије CO₂

Укупна емисија CO₂ за наведене градове на годишњем нивоу је приближно 2324 тоне. У току године највећа емисија CO₂ је на територији града Новог Сада (724.453 тоне), што је пропорционално броју возила којима се врши достава и броју становника који живе у граду и њиховим потребама за поштанским и логистичким услугама. У Сремској Митровици и Панчеву Јавно поштанско предузеће користи 32 возила која емитују 350 тона CO₂ на годишњем нивоу, док на територији општине Кикинда 12 возила на годишњем нивоу генерише 65.6 тона CO₂. Аутори истичу пример града Панчева, где је остварена мања километража, а већа просечна потрошња горива у односу на остале градове и као могуће разлоге наводе неекономично понашање возача у вожњи, различите путне и географске услове као и старији возни парк. Будућа истраживања су окренута ка прикупљању и анализи података о возила приватних оператера који послују на територији Аутономне Покрајине Војводине.

3.2 БУДУЋНОСТ ДОСТАВЕ ПАКЕТА

Као и већина других индустрија, транспорт, логистика и пошта суочене су са великим променама. Свака промена доноси одређене ризике али и прилике за развој, као што су нове технологије, нови учесници на тржишту, нова очекивања корисника и нови

пословни модели. Постоји много начина на које би се могао унапредити транспортни сектор како би успешно решио постављене изазове. Примена нових технологија је један од начина побољшања доставе робе и пошиљака на кућну адресу. Компаније за доставу су сада фокусиране на нова истраживања и примену аутономних возила која ће у скоријој будућности имати велику примену у решавању проблема доставе робе и пошиљака на кућну адресу.

Концепти доставе пошиљака и робе дроном, аутономним градским возилима, дељена достава и достава дроидима су у фази реализације или у веома скромној комерцијалној примени данас [95].

Данас постоји све већа потреба за беспилотним летелицама са различитим могућностима за цивилне и војне примене. Једна од првих класификација и могућности примене дрона дата је у прегледном раду [96]. У протеклој деценији, доста пажње је посвећено широком спектру примене различитих типова ових беспилотних летелица, различитих величина и тежина. У раду је дата класификација дрона по начину управљања. Изазови дизајна и израде микро дрона су у фокусу истраживања, као и различити приступи проблемима у навигацији и контроли истих.

У раду [97] аутори разматрају коришћење беспилотне летелице *Quadcopter* за потребе транспорта робе у складиштима. Вертикално, хоризонтално полетање и висока прецизност летења су потребе које дронави за рад у унутрашњој логистици морају да задовоље. Главне карактеристике *Quadcopter* дрона су да је малих димензија, има добре управљачке могућности, једноставну механику и велику носивост. Главни недостатак *Quadcopter* дрона је велика потрошња енергије при раду и то је главно ограничење према ком треба моделовати и оптимизовати начин рада. У раду [97] у првом кораку израде модела одређују се локације депоа, кластери и подкластери, дефинишу се радне станице и путање помоћу генетског алгорита за сваки *Quadcopter* у одређеној флоти. У другом кораку одређују се тежине које ће сваки дрон транспортовати. У трећем кораку одређује се количина енергије у батерији сваког дрона према путу који треба да пређе и тежини терета, броју радних станица које треба да посети као и аеродинамична ефикасност дрона. Примена дрона у складиштима и производним погонима на предложени начин довешће до вишег степена ефикасности, ефикасности и продуктивности.

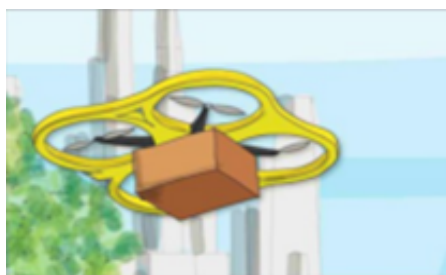
У извештају [98] аутори разликују две врсте дрона према могућности кретања и управљања, аутономне и даљински управљане дроне. Развој дрона је везан за развој војне индустрије, међутим дронави све већу примену проналазе и у другим гранама индустрије. Смањење трошкова доставе, већа брзина доставе за корисника и погодност доставе у руралним деловима су главна мотивација за примену дрона у поштанским и логистичким системима. Као главни недостатак у примени дрона за доставу робе наводи се време трајања батерије које зависи од тежине пакета који се транспортује. Као решење проблема аутори наводе постављање станица за допунско пуњење дрона.

Аутори у раду [99] процењују да ће се 2025. године 80% свих достава у свету вршити аутономним возилима. Све захтевнији корисници врше притисак на е-трговину и

доставне службе да брже достављају, уз задржавање постојећих трошкова. С обзиром на то да индустрија е-трговине расте све више сваке године, достава на кућну адресу постала је занимљива тема и за научну заједницу и за инвеститоре.

Кућна достава је најквалитетнији облик доставе пакета, и са становишта потрошача функционише исто као достава поште, с том разликом да особа која доставља пакет, исти не оставља у поштанском сандучету већ звони на врата и покушава да уручи пакет директно примаоцу. Дакле, лице за доставу запослено од стране пружаоца услуге преузима пакете у депоу и доставља их директно примаоцима. Услуга кућне доставе је једини начин тзв. присутне доставе, односно доставе која захтева физичко присуство примаоца.

Примена беспилотних летелица (дронов) има велики значај у побољшању ефикасности решавања проблема последње миље у достави. Дронови су аутономне летелице, који се подижу вертикално као хеликоптери, преносећи пакете до одредишта релативно великом брзином и најкраћом рутом (видети слику 3.4). Њихов рад и летови морају бити надгледани [89]. С обзиром на то да су дронов нова превозна средства, њихова примена подразумева и нове методе и начине доставе. Пакети се и даље достављају до куће потрошача или на посебна места дефинисана за доставу, а која су опремљена одговарајућом платформом за слетање и узлетање дрона.



Слика 3.4 Достава дроном

Достава дроном има два велика недостатка. Први недостатак је величина дрона, посебно оних који носе пошиљке веће масе и који морају да лете на дуже релације. Други недостатак представља то што је у урбаним срединама доста тешко наћи локације за слетање величине $2m^2$, што је процењена величина за безбедно обављање операције слетања. Недостатак локација за слетање онемогућава доставу дронима широм града. Дронови тренутно достављају пакете тежине до 5 килограма. Иако постоје дронов који могу да достављају пакете тежине до 15 килограма, ипак ће и даље постојати потреба за достављањем пакета путем традиционалних модела доставе возилима.

Са друге стране, наведени недостаци могу бити превазиђени ко се достава дроном ограничи на мање пакете и рурална подручја с обзиром на то да је достава до удаљених дестинација данас веома скупа. Дронови су се показали као веома конкурентни у руралним подручјима јер је достава дроном само 10% скупља у односу на постојеће моделе доставе. Истовремено, беспилотне летелице су једино решење за достављање пакета у истом дану у руралним подручјима. У оваквим случајевима

додатна наплата брзе услуге може надокнадити благи већи износ трошкова доставе дрoновима [89]. Додатне предности коришћења дрoнова укључују рад на неприступачним теренима, као и смањење загађења животне средине јер ће бити потребно мање возила за доставу [100] [101].

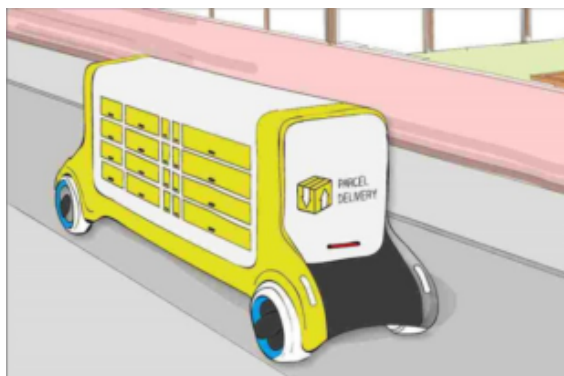
Аутори у раду [102] анализирају доставу медицинских средстава и услуга у областима где су путеви лоши или су саобраћајнице уништене неком елементарном непогодом. У раду је урађено поређење трошкова постојећег система доставе у удаљеним срединама и новог модела доставе дрoном. Сврха истраживања је била да се упореде трошкови доставе дрoном са трошковима доставе класичним возилом да би утврдили да ли су беспилотне летилице ефикасне не само у ванредним ситуацијама већ и да ли могу ефикасније вршити и редовну доставу.

Потрошачи су веома отворени за употребу аутономних возила укључујући и дрoнове у достави пакета. Истраживања су показала да се 60% потрошача изјаснило у корист доставе дрoновима [89]. Такође, 51% потрошача је спремно да прихвати доставу путем беспилотне летилице у будућности. Основа за доставу дрoновима су правни оквир и регулисање сигурности и одговорности, адекватна информационо-технолошка подршка, као и обука контролора и техничара за полетање и слетање дрoнова. Процењује се да један запослен човек за надзор може даљински надгледати осам дрoнова за доставу.

Овакви захтеви чине неопходним изградњу капацитета и улагање у иновације од стране традиционалних доставних служби. Пре него што почну са великим капиталним инвестицијама, компаније експериментишу са доставама путем дрoнова. Међу компанијама које тестирају доставе са беспилотним летилицама су: *UPS*, *Amazon Prime Air*, *Google* и *Hermes*. Тржишни потенцијал се процењује као висок, узимајући у обзир и наведена ограничења беспилотних летилица. Један од пет налога у компанији *Amazon* испуњава критеријуме у домену величине и удаљености да би могао да буде достављен дрoном. Директор *Amazon*-а Џеф Безос тврди: „Једнога дана беспилотне летилице биће уобичајене као и камиони за пошту.“ [100].

Могућности коришћења аутономних возила (дрoнова) у области поштанског саобраћаја и логистике проучаване су у раду [103]. Као главне предности транспорта аутономним возилима аутори наводе олакшавање процеса транспорта у руралним деловима, то што трошкови рада не постоје или су веома ниски, аутоматизацију целог процеса доставе, ниже оперативне трошкове након улагања у софтвер, мање штетних утицаја на животну средину и могућност рада 24/7. Као главне недостатке примене аутономних дрoнова за доставу наводе велика улагања у софтвер, свакодневна одржавања и провере како би се избегли кварови, регулативна и законска ограничења која су различита од државе до државе, могућност софтверских грешака и прихватање од стране корисника. За примену у транспорту пошиљака у системима доставе пошиљака наводе рурална подручја, где није исплативо да возило ради доставу. Примена аутономних дрoнова би се могла остварити за доставу у неприступачним подручјима где нема саобраћајне инфраструктуре или је лоша [103].

Доставне и логистичке компаније суочене су са променама које су настале увођењем електричних возила и аутономних технологија у возила па константо трагају за ефикаснијим доставним и превозним средствима. Аутономна градска возила (енг. *autonomous ground vehicles* - AGV) су самоуправљајућа доставна возила која користе улицу као и стандардна возила. Када су опремљена пакетима, аутономна градска возила су замена за тренутну доставу пакета и робе возилом (слика 3.4). Аутономна градска возила могу достављати пакете без било какве асистенције човека. У случају да је потребно надгледање оваквих возила, један оператер може управљати са 10 аутономних возила. Корисници услуга се обавештавају унапред о тачном времену доставе пошиљке. Оног момента када аутономно градско возило стигне на адресу примаоца пошиљке, примаоца буде обавештен да преузме пакет од возила.



Слика 3.5 Аутономна доставна возила (Јоерс)

У рад [89] се наводи предвиђање да ће аутономна градска возила заменити постојеће форме стандардне доставе пакета због предности у трошковима у односу на данашњу конвенционалну доставу на кућну адресу. У раду је израчуната уштеда трошкова од преко 40%, узимајући у обзир трошкове човековог рада од око 20 евра по сату. Нарочито се исплативост употребе аутономног градског возила може видети у урбаним подручјима. Аутономна градска возила могу радити дуже и стога пружају већу флексибилност у времену доставе и повећавају ефикасност пословања.

Технологија захтева да примаоца пошиљке буде присутан у тренутку доставе, како би откључао одељак где се налази пошиљка и исту преузео. Са аспекта потрошача, достава пошиљки преко аутономног градског возила се не разликује значајно од традиционалне кућне доставе. Аутономна градска возила су само различито превозно средство, без возача. Проблем који и даље није превазиђен оваквим видом доставе јесте ситуација када примаоца пошиљке није на адреси у моменту доставе. С друге стране, аутономна градска возила би могла обезбедити доставу пошиљки недељом, чак и у оним земљама где је рад недељом законом о раду забрањен за већину занимања. Купци изузетно вреднују флексибилност доставних компанија, 70% потрошача верује да курири треба да достављају пошиљке недељом, што није изненађујуће с обзиром на то да људи преферирају доставу на кућну адресу, али најчешће нису у кући током радних дана [37]. Аутономна градска возила су у великој мери прихваћена од стране потрошача, а 40% потрошача тврди да би дефинитивно или вероватно користило аутономна градска возила за доставу пакета [89].

За разлику од аутономних градских возила, дроиди су мала аутономна возила која достављају пошиљке до кућног прага. Њихова величина је тек нешто већа од саме пошиљке. Дроиди возе веома малом брзином од 5-10 km/h и користе тротоаре и бицикличке стазе да би стигли до задате дестинације. Програмирани су да путују заједно са пешацима, бицикличима и аутомобилима. Дроиди нису намењени да покривају велике раздаљине, као што је на пример достава у рурална подручја. Тренутни модели имају опсег од око 5 километара. Њихово подручје примене би могла бити урбана подручја, кампуси или затворене заједнице. Дроиди прелазе кратка растојања од депоа или малопродајног објекта до корисника у року од 5-30 минута. По доласку на задато одредиште, корисник се обавештава путем телефона и може отворити ормарић на дроиду помоћу апликације и преузети пошиљку. Дроиди су заштићени од крађе, а само прималац има једнократни приступни код за преузимање пошиљке. Дроиди током времена доставе морају бити надгледани. Међутим, с обзиром на њихову величину и малу брзину, један оператер би могао централно да управља са 50 до 100 дроида [89].

Између осталог, компаније *Hermes* и *DHL* покренули су пилот пројекат са дроидима за доставу. *DHL* прати програм под називом *SideWalk*. Од 2016. године ово тестирање је покренуто у Хамбургу, Немачка. Испитивања показују да су дроиди добро прихваћени од стране корисника, као и од стране пешака који деле тротоар са роботима.

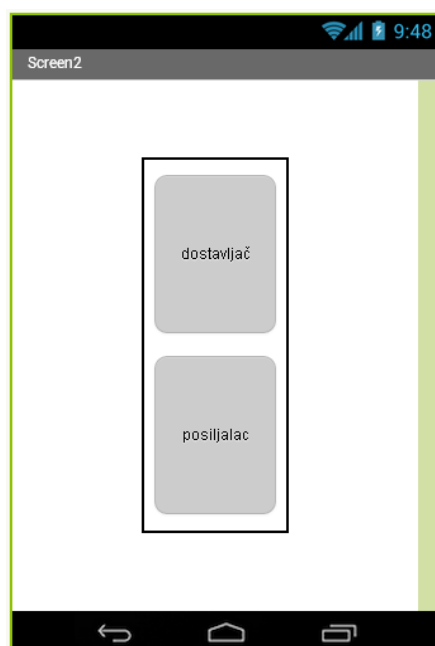
Аутономна возила, која укључују дроиде, аутономна градска возила и дроне, у будућности ће достављати скоро 100% пакета. Развијене земље ће бити међу првима који ће усвојити ове нове, аутономне моделе доставе, јер су трошкови рада довољно високи да инвестиције имају позитиван финансијски повраћај. У земљама у развоју трошкови рада вероватно остају довољно мали да спрече велике технолошке промене које утичу на доставу у наредних пет до десет година [89].

Паметни телефони, алати и апликације за друштвено умрежавање омогућавају прикупљање података о мобилности и навикама људи. Путовања су постала незамењив аспект наших живота. Људи путују чешће и на веће удаљености него у прошлости било да путују између куће и посла, одлазе у куповину или путују за празнике. Међутим, слобода личне мобилности је одговорна за 26% емисије CO₂. У Европи, мобилност има најбрже растуће енергетске потребе од свих сектора, и упркос међународним споразумима и акцијама стално се повећава [104]. Као ефикасно решење наводе се аутономни аутомобили, међутим прикупљени подаци о кретању могу подржати напредне облике дељења, координације и сарадње. Један од иновативних начина који би успешно могао да се имплементира у логистичке и доставне системе је дељена достава.

Циљ примене нових технологија у поштанским и логистичким системима је унапређење квалитета услуге транспорта као и процеса доставе робе и пошиљака до крајњег корисника. У раду [105] аутори дају преглед примене нових технологија у системима доставе и предаје робе и пошиљака. Аутори наводе концепт *Internet of Postal things* који се у пошти односи на комплетну инфраструктуру, објекте и транспортна средства у оквиру поште. На тај начин се добијају информације које се користе за унапређење квалитета у области саобраћаја путем различитих

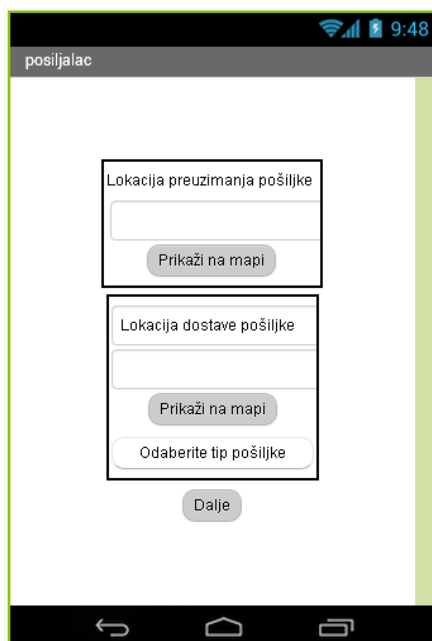
оптимизација. Као иновацију у достави наводе дељену економију (енг. *crowdsourcing*) као јефтин и флексибилан модел који је базиран на развоју апликација за доставу робе. За кориснике који путују или имају слободног времена дељена достава би значила и додатан приход [105].

Поштанске и логистичке компаније настоје да кроз примену нових технологија побољшају своје пословање, кроз пружање квалитетних начина доставе. Постоји велики број апликација које се користе у логистичким компанијама, а користе се за праћење курира, возила или пошиљке. Аутори у раду [106] су приказали развој мобилне апликације у функцији унапређења пословања курирских система. Основна функција апликације је да повеже кориснике којима је потребна достава пакета са корисницима који већ имају у плану да путују у том правцу. Креирана апликација представља јефтин сервис за спајање оних који шаљу одређени пакет са оним корисницима који су спремни да им помогну и том услугом покрију део трошкова свог путовања. Коришћењем апликације избегавају се посредници, није неопходан диспечер кога морате да позовете како би организовао долазак/доставу курира. Апликација је развијена применом *MIT App Inventor* технологије, која представља графички развој апликација за *Android* оперативни систем. Оно што је занимљиво за ову студију је да за развој апликације није коришћена подршка експерата из домена информационих технологија, као и да је апликација развијена без иједне написане линије програмског кода. Апликација се састоји од неколико прозора. Пре свега, неопходно је урадити пријаву корисника и регистрацију. Након регистрације корисник приступа прозору *профил* где корисник уноси неопходне податке који се похрањују у заједничку базу података. Након завршеног процеса регистрације, корисник приступа главном менију апликације. У овом делу апликације, приказаном на слици 3.6, корисник бира да ли жели да буде достављач или пошиљалац, да ли шаље пошиљку или путује у правцу кретања пошиљке.



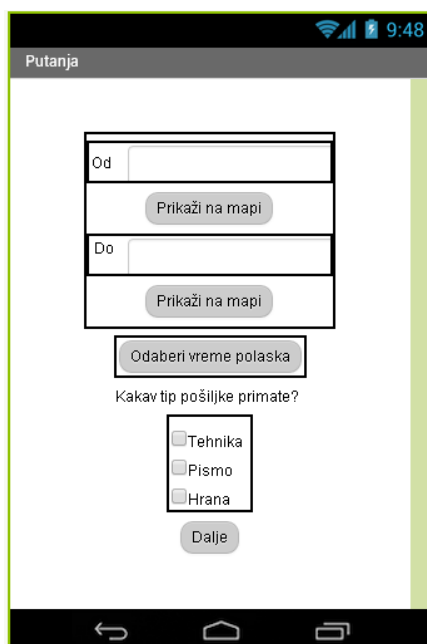
Слика 3.6 Главни мени апликације

У случају да корисник изабере икону *пошиљалац*, у прозору приказаном на слици 3.7 потребно је да унесе податке о локацији где се пошиљка налази, локацију доставе као и тип или врсту пошиљке коју шаље.



Слика 3.7 Опција пошиљалац

Ако корисник изабере икону *достављач*, у прозору приказаном на слици 3.8 потребно је да унесе почетну и крајњу локацију путовања, оквирно време поласка и доласка на адресу као и тип пошиљке који може да прихвати за превоз (пакет до 5 килограма, писмоносна пошиљку или нешто друго).



Слика 3.8 Опција достављач

Сви корисници апликације могу у сваком моменту да провере које су пошиљке пријављене за превоз, њихову полазну тачку и тачку доставе, и у случају да се планирано кретање корисника поклапа са предатим захтевом могу да потврде преузимање пошиљке за доставу. Након сваке доставе пошиљалац оцењује достављача/курира, тако да сваки корисник може унапред да види све позитивне и негативне коментаре за достављача као и његове оцене [106].

3.3 РЕГУЛАТОРНИ ОКВИРИ ЗА РОБОТЕ У ДОСТАВИ

Компаније које се баве доставом су традиционалне службе попут националних поштанских оператера, DHL и UPS и других, али ту је и велики број стартап компанија које се базирају на развоју робота доставе и као такве компаније се појављују свуда по свету.

После иницијалног узбуђења око дрoнова који лете и врше доставу у скорије време у фокус долазе работи доставе који се крећу по тлу [107]. С обзиром да ови работи морају да деле простор кретања са другим облицима транспортних возила као и са људима у покрету, њихова преферирана места деловања су предграђа и области где је интензитет саобраћаја низак. У овим подручјима аутономни (независни) работи доставе имају предност у поређењу са другим облицима доставе. Основни пословни модел истиче предност цене код доставе за коју је процењено да је нижа од једног евра по достави/јединици, која зависи од одређене локације – примаоца доставе што је 15 пута мање од тренутне цене [108]. За корисника је додатна погодност и то што је достава сведена на временски период од 15 – 20 минута код доставе роботима, што је много мањи временски оквир него код традиционалних облика доставе која је до сада могла да пружи само одређени дан као рок доставе.

Највећи део посла у овом сектору за сада представља транспорт робе попут хране и цвећа, међутим постоји и простор за примену у текстилној индустрији, индустрији доставе поштанских пошиљака као и концепт аутоматског складиштења у сектору пословања магацина. Дубље разматрање финансирања стартап компанија открива да 50% свих инвестиција одлази на финансирање индустријских робота (који би вршили аутоматизацију производње и тешке индустрије) и финансирање роботе доставе [109].

Према студији коју је спровела Интернационална корпорација података (енг. *International data corporation* - IDC) индустријски сектор ће наставити да буде највећи улагач и корисник робота и сличних услуга. Глобална потрошња средстава везаних за роботикку је износила преко 100 милијарди евра, а 2017. године је предвиђено да ће се та средства до 2021. године удвостручити. Такође, предвиђања у овој студији су да ће улагања у сектор роботике везана за доставу до 2021. године имати стопу раста од 60%. Дубљи увид у сцену роботике, а нарочито робота доставе који су предвиђени за доставу копном, показује да су компаније у стању да обезбеде улагања од неколико милиона евра [110].

Дискусије везане за регулаторне оквире у државама у којима се изводе пилот пројекти робот доставе су још у току. Рад на регулаторним оквирима модела за аутоматску вожњу обухвата политичке, легалне, социјалне као и димензије самоодржања

проблема покретности. Аутори у истраживањима приказаним у [111] наглашавају иновације, безбедност, компететивност, координацију и хармонизацију ових модела. Њихово истраживање је базирано на емпиријским подацима прикупљеним из неколико различитих земаља као и конвенције саобраћаја Уједињених Нација (енг. *United Nations* - UN). Аутори су се у раду [112] бавили легалним оквирима за употребу малих аутономних агрокултурних робота, такозваних агрибота. Агриботи се обично користе на земљи која је приватно власништво, тако да импликације нерешених саобраћајних закона нису обухваћене у овом раду.

Аутори извештаја [98] за Сједињене Америчке Државе наводе да дозволе за комерцијалну доставу дроновима одобрава Савезна управа авијације. Предузећа која желе да развијају и користе дроне морају добити одобрење од Савезне управе авијације. Поред тога, држава може имати и додатне законе и услове.

Већина држава у Европи, па тако и Србија, регулисале су правилницима коришћење и употребу дронева. На основу члана 10. став 3, члана 138. став 2. и члана 239. Закона о ваздушном саобраћају („Службени гласник РС”, бр. 73/10, 57/11, 93/12, 45/15 и 66/15 – др. закон), директор Директората цивилног ваздухопловства Републике Србије донео је Правилник о беспилотним ваздухопловима [113] који прописује услове за безбедно коришћење дронева, наводи њихово разврставање по моделу, мере одржавања као и услове које мора да испуни лице које жели да управља дроном.

3.4 СТУДИЈА СЛУЧАЈА ЗА ХЕТЕРОГЕНУ РОБОТ-КОМБИ ДОСТАВУ

Компанија *Starship Technologies* основана је 2014. године у Талину, Естонија са циљем да се баве проблематиком доставе пакета на кућну адресу и развијањем аутономних робота за доставу. Данас је *Starship Technologies* европска технолошка стартап компанија са пословницама у Естонији, Великој Британији и Сједињеним Америчким Државама, која је конструисала првог комерцијално доступног робота у циљу револуције локалне индустрије система доставе [114].

Аутори тврде да су њихови роботи пријатељски настројени ка заштити животне средине јер не испуштају CO₂ (јер се покрећу на електричну енергију), такође тврде да њихови роботи доприносе смањењу друмског саобраћаја и тиме закључују да њихова компанија нуди решење за саобраћајну индустрију као и логистичке фирме тиме што повећавају ефикасност набавке, а смањују трошкове доставе. У пракси роботи доставе су тестирани на мрежним сервисима за доставу хране у градовима као и у достави брзе хране који их користе као персоналне уређаје за доставу [114]. Један такав робот приказан је на слици 3.9.

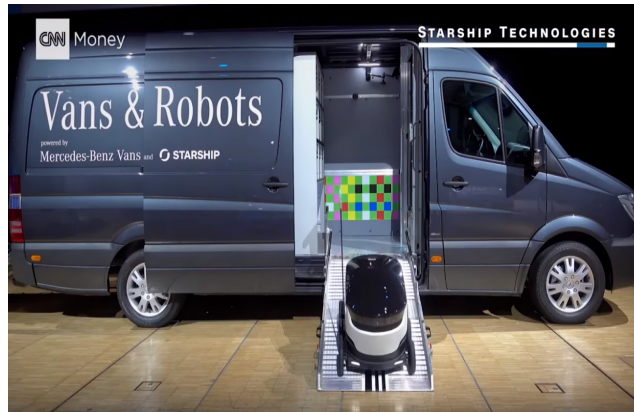


Слика 3.9 Дроид у достави

Ради заштите и безбедног функционисања и кретања, роботи су опремљени са неколико сензора и система за праћење који се састоје од девет камера, GPS-а и мерне јединице за инерцију за специјалну оријентацију. Такође су опремљени микрофонима и звучницима што им омогућава комуникацију са људима. Иако се роботи називају аутономним возилима, они су тренутно независни само 90% времена. Остатак времена на комплексним раскрсницама до корисника робот ће бити даљински контролисан из командног центра који је преко интернет везе повезан са роботом.

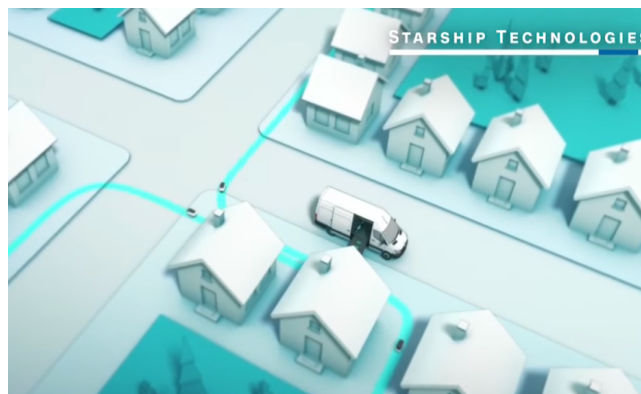
Током целокупног свог путовања роботи су контролисани (надгледани) од стране одговорне особе. Дакле, контакт са командним центром се не успоставља тек у случају да аутономна покретност робота закаже. За даљинско управљање роботом доставе неопходна је стална размена података као што је видео размена уживо између робота и контролног центра преко јавне мреже за телекомуникацију. Основна инжињерска стратегија се базира на употреби традиционалног хардвера са циљем да роботи буду јефтине за производњу и да захтевају само основно одржавање. Компанија се трудила да смањи цену на тај начин што је њен фокус на хибридном аутономном роботу, који би био функционалан у ближој будућности и који би био способан да се креће скоро потпуно самостално већину времена. У овој потпуно развијеној верзији супервизор у командном центру би морао бити укључен у само неке преносе током видео линка, мали део времена, а то би умањило операциону цену робота.

У покушају да се створи паметно решење за доставе на већу удаљеност, компанија је започела сарадњу са *Daimler* да би развили робот-комби (енг. *RoboVan*), мини комби који би служио као покретна станица за роботе доставе смештене у њега, што би значајно допринело домету самих робота доставе. Овај концепт доставе се реализује као *hub and spoke* концепт, који је добро познат као стандардни модел у логистици [115]. Један такав робот-комби, који је у том циљу опремљен системом за складиштење 54 кутије за доставу и осам робота, приказан је на слици 3.10.



Слика 3.10 Возило за доставу са дроидима

Возило у овом случају служи за пренос робота на веће удаљености и служи као покретни центар који преноси роботе и врши доставе у подручје где већина достава треба да буде обављена. Са ове тачке роботи напуштају робот-комби, центар и слободно прелазе последњу миљу до корисника да би извршили доставу, а затим се враћају до возила. Достава помоћу робот-комбија илустрована је на слици 3.11.



Слика 3.11 Достава помоћу робот-комбија

Овај приступ реализује *hub and spoke* концепт са роботима доставе по моделу доставе на кућну адресу. Аутори сматрају своје роботе доставе додатним обликом доставе, а не њеном заменом. Логистички модели који укључују роботе су другачији од свих других модела базираних на традиционалним облицима доставе.

Курири на бициклима, у густо насељеним урбаним срединама су способни да заобиђу колапсе у саобраћају као и саобраћајне гужве. Насупрот њих, независна самовозећа возила намењена су доставама у предграђима где је саобраћај ниског интензитета.

Приступ пакету у роботима је могућ преко апликације за паметни телефон која омогућава кориснику да откључа преградак робота и на тај начин приступи роби која му је достављена. Уколико неко покуша да украде робота камере ће усликати лопова и огласиће се аларм. Уз то више уређаја за праћење ће означити локацију робота помоћу GPS-а, а оператер даљинског управљања ће се обратити лопову. Робот ће наравно престати да ради и неће отворити преградак свог складишта.

У 2017. години *Starship Technologies* је најавио 17.2 милиона евра улагања која ће омогућити изградњу аутономних робота, који су намењени локалној достави пакета. Рунда улагања је покренута од стране компаније *Daimler*, а укључени су и многи други инвеститори. Ова количина улагања чини *Starship Technologies* водећом компанијом у производњи робота доставе за модел кућне доставе робе. Роботи доставе су изгледа карика која недостаје између великопродајне логистике и потрошача, а очекивања да ће они допринети решењу проблема последње миље, су веома добро утемељена у овом начину доставе [114].

Тренутна технолошка решења остварују само део концепта индустрије паметних градова, али бољи поглед на улагања и индикаторе раста показује да је читав сектор роботике веома динамичан и да представља брзо растуће тржиште за године које долазе. Нарочито када се узме у обзир позадина развоја еколошке логистике и комбинација робота доставе и вештачке интелигенције [112] , [116].

4 ИСТРАЖИВАЊЕ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Поред употребе игара у циљу забаве или едукације, све већи значај има примена игара у научним истраживањима, а пре свега могућност употребе игара за прикупљање података за решавање оптимizacionих проблема.

У овом делу дисертације описан је један модел за оптимизацију процеса доставе пошиљака у системима са хетерогеним доставним возилима чиме је испуњен основни циљ дисертације. Приликом прављења модела за оптимизацију проблема доставе пошиљака, почетни корак представља прикупљање скупа података који је искориштен како за прављење модела тако и за његово тренирање и тестирање. Прикупљање скупа података за потребе истраживања је урађено креирањем онлајн игре која је описана у овом делу дисертације. На овај начин је још једном илустрована употреба онлајн игре у научне сврхе.

Архитектура игре која се користи у истраживању је флексибилна и омогућава играчима да на ефикасан начин дођу до решења проблема трговачког путника, тј. проблема рутирања возила, и на тај начин се прикупљају подаци који ће се искористити у циљу истраживања. На основу одиграних игара прикупља се скуп података који се користи за обуку модела који се формира применом дубоких неуронских мрежа. Приликом креирања игре мора да се води рачуна и о њеном дизајну.

Графика игре треба да омогући играчу видљивост и једноставних и сложених решења, да би прикупљена решења могла да се искористе за конструкцију модела. Дизајн игре мора реално да прикаже проблем који се решава, све његове недостатке и комплексности. Дакле, игра мора бити дизајнирана тако да покрије што је могуће већи број реалних ситуација да би на основу прикупљеног скупа података (решења проблема) моделовање било спроведено на задовољавајућем нивоу. Да би играчи били стимулисани да играју игру, приликом њеног дизајна мора се узети у обзир и систем награђивања. Такође, игре морају да имају нивое различите тежине јер су и проблеми рутирања возила у стварном животу различите комплексности.

Употреба онлајн игара у научне сврхе омогућава да се решавање класе рачунарских тешких проблема претвори у забаву, учесник у експерименту помаже у решавању озбиљних проблема као што је проблем трговачког путника и проблем рутирања возила решавајући загонетке, тј. користећи механизам игре. Овај изазов утиче на све аспекте дизајна игре које морамо узети у обзир. Прво, визуализација и графика требају да стимулишу способност људи да виде сложена решења. Друго, дизајн интеракције мора се оптимизовати за природне интеракције погодне за процес истраживања, поштујући научна ограничења. Коначно, механизам бодовања мора бити довољно информисан да промовише вишеструке људске стратегије, док остаје веран најновијим моделима основног научног феномена.

Главна карактеристика и највећа потешкоћа у дизајну ове врсте игре је то што је решење проблема трговачког путника, а самим тим и решење одговарајућих загонетки, непознато. С обзиром да не решавамо а приори, не можемо дизајнирати игру са посебним решењима. Да би овај простор био истражен, фокус је на

способности људи да размишљају о решењу проблема трговачког путника путем визуелне игре.

Упркос можда очигледним предностима које се могу добити путем употребе информационих технологија за креирање видео игара за прикупљање велике количине података, у научној литератури је јако мало таквих приступа.

Заправо, једина студија која говори о овом проблему, а коју можемо идентификовати, представљена је у раду [76] из 2017. године, где су аутори створили онлајн игру. Главни циљеви студије били су адресирати велики број учесника, прикупљање података о различитим варијантама проблема, прављење игре која прикупља податке о поступцима решавања проблема када су играчи опремљени алатима и могућностима да понављају задатак. Прва три циља која се баве прикупљањем података од великог броја учесника, података за различите варијанте проблема и стварање игре која се не осећа као тест, поклапа се са циљевима истраживања представљеном у тези. Међутим, истраживања у оквиру ове дисертације заснована су на неевклидском растојању, тако да је дизајн игре направљен сходно томе.

Ако се жели сакупити велика количина података, онлајн игра довољно занимљива за учеснике је добро решење. Истраживање приказано у раду [76] показало је да решења која се прикупљају путем онлајн играња добро одговарају резултатима који су претходно објављени у литератури и валидност оваквог приступа прикупљању података. Рад [76] је онај који је највише повезан са радом представљеним у овом докторату. Оба приступа заснована су на онлајн игри која се може играти на уређајима који користе модерни претраживач и захтевају миш или екран осетљив на додир као улазни уређај. Међутим, између два приступа постоје значајне разлике.

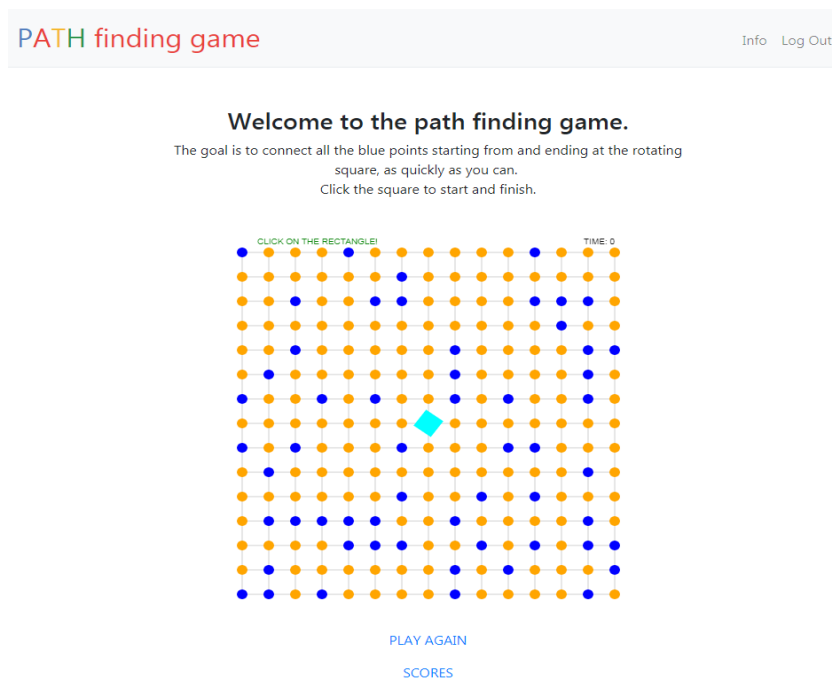
4.1 ДИЗАЈН ИГРЕ

Дизајн игре је инспирисан главним циљевима истраживања који су формулисани на следећи начин.

1. Креирати игру која би омогућила прикупљање великог броја решења неевклидске затворене форме проблема трговачког путника направљених од стране човека.
2. Прикупити податке који ће омогућити накнадну обуку интелигентног агената за доставу.

Усредсређеност на затворену форму неевклидског проблема трговачког путника засновано је на практичним разматрањима. Предвиђена могућност примене интелигентног агента је оптимизација проблема доставе пошиљака друмским возилима у урбаном окружењу. Према томе, агент би требало да пронађе оптималну путању, изврши одређен број достава у урбаном окружењу, почевши од унапред дефинисаног депоа и враћајући се у депо након што се посао доставе заврши. Менхетн растојање даје бољу апроксимацију уз ограничења кретања друмског возила кроз урбано окружење него Еуклидско растојање.

Да би се подстакло неееуклидско размишљање код играча и графички представио простор, креирана је онлајн игра са фиксираним пољем за игру (тереном) који се састоји од правоугаоне мреже од $N \times N$ тачака. Димензија мреже N је параметар у коду који се може лако мењати, а у овом истраживању узето да је $N=15$. У конструисаној и представљеној игри се број одредишних тачака које се на случајан начин распоређују на мрежи од 15×15 тачака креће од 10 до 196. Одредишне тачке и тачка која представља депо су унапред дефинисане. У оквиру ове фиксне мреже тачака, одредишта су обојена плавом бојом, док су остале тачке наранџасте боје. Полазна тачка (депо) налази се у средини поља за игру и означена је правоугаоником који се врти (као што је приказано на слици 4.1).

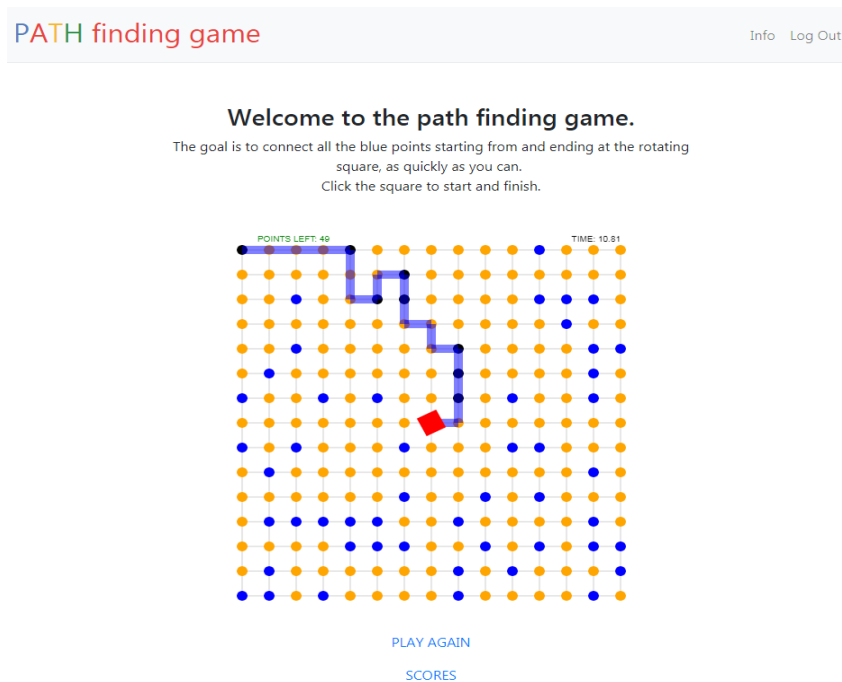


Слика 4.1 Почетни изглед игре

На правоугаоник који представља депо треба кликнути да би започели игру. Након тога, правоугаоник промени боју (постаје црвене боје), а текст изнад поља за игру, у горњем левом углу, са инструкцијом кориснику „кликните на правоугаоник!“, замењује се бројачем који приказује број одредишних тачака које су кориснику преостале да посети, а у горњем десном углу је приказано време које је протекло од почетка игре. Тачке одредишта су посећене, тј. додате на путању, када се показивач миша повуче преко њих. Када се ово деси, оне постају црне.

Да би се додатно унапредио неееуклидски карактер игре, путања се формира по принципу *snar-to-grid*. Како корисник помера миша током играња игре, потенцијална путања се генерише са последњег посећеног одредишта (или депоа ако је корисник тек почео игру) на показивач миша. Ново одредиште ће бити додато на путању само када корисник покреће показивач миша преко нове одредишне тачке. Стога се путања гради, чвор по чвор, све док се не посете све одредишне тачке. Уколико се уместо посете одредишне тачке, корисник помера према почетку путање, путања ће бити

скраћена, дозвољавајући кориснику да промени путању као што је приказано на слици 4.2.



Слика 4.2 Креирање путање у мрежи

Када корисник посети све одредишне тачке, бројач одредишних тачака се замењује текстом „кликните на правоугаоник“, упућујући корисника да посети депо. Када корисник кликне на депо, текст „LEVEL DONE“ трепери преко поља за играње, што показује да је ниво у игри завршен као што је приказано на слици 4.3.



Слика 4.3 Завршетак нивоа

Приликом дизајнирања игре предност је дата једноставном решењу, где сваки ниво одговара једној одиграној игри.

За обуку интелигентног агента, идеја је била да се путања формира на основу инстинктивног понашања учесника у експерименту, а не као резултат његовог дужег размишљања. Играчи су добили упутство да је циљ да се повежу све плаве тачке почињући и завршавајући игру на ротирајућем квадрату што је брже могуће.

Тачке одредишта се утврђују на случајан начин пре почетка сваког нивоа. Ниво корисника једнак је броју игре коју корисник игра у том тренутку. Вероватноћа да једна тачка мреже, у ознаци $prob$, буде одредишна тачка дата је формулом

$$prob = \begin{cases} \alpha * level + prob_0, & level \leq \theta \\ \alpha * \theta + \beta * (level - \theta) + prob_0, & level > \theta \end{cases} \quad (4.1)$$

где је са $prob_0$ означена вероватноћа да једна тачка мреже буде одредишна тачка. Вероватноћа $prob_0$ се назива почетна вероватноћа. Почетна вероватноћа $prob_0$ зависи од нивоа игре. Уколико за ниво игре, у ознаци $level$ важи да је $level \leq \theta$, где је θ унапред дефинисан праг, вероватноћа да тачка мреже буде одредишна тачка дата је линеарном везом нивоа игре и почетне вероватноће (видети (4.1) за случај $level \leq \theta$), при чему промена нивоа игре за један доводи до повећања вероватноће да тачка буде одредишна тачка за α , тако да се α назива фактор повећања вероватноће са нивоом. Уколико је $level > \theta$ вероватноћа да тачка мреже буде одредишна тачка дата је линеарном везом параметра θ , параметра $level - \theta$ и почетне вероватноће (видети једначину (4.1) за случај $level > \theta$). Повећавањем новоа повећава се и $level - \theta$ и промена нивоа за један доводи до повећања вероватноће за β , тако да се β назива и фактор повећања вероватноће након дефинисаног прага θ . На овај начин дефинисана вероватноћа да тачка мреже буде одредишна тачка мотивисана је жељом да се добије већа разноврсност скупљених података у односу на играче и да се број одредишних тачака по нивоима игре полако повећава. Овакав приступ спречава да се поље за игру (мрежа) засити одредишним тачкама и омогућава да игра остане забавна за упорније играче.

Да би играчи били мотивисани, након сваке игре, тј. пређеног нивоа, израчунат је број бодова који је играч освојио. Број освојених бодова рачунат је помоћу формуле

$$score = (C_1 + C_2 * D - \frac{l}{D} - t) \quad (4.2)$$

Број освојених бодова зависи од дужине путање и времена потребног за њено проналажење, као и од две константе C_1 и C_2 које су одређене тако да омогуће да број бодова увек буде позитиван. У формули (4.2) са l је означена дужина путање, D је број одредишних тачака у проблему који се решава, а t је време за које је играч решио задатак. Број бодова који играч освоји за решење неког нивоа је наравно већи што је мање време решавања и што је мања дужина путање која ју је играч пронашао. Дужина путање је мерена у пикселима, а време у милисекундама. Постизање великог броја бодова је отежано због начина одређивања вероватноће да тачка мреже буде одредишна тачка (видети једначину (4.1)).

4.2 УЧЕСНИЦИ ЕКСПЕРИМЕНТА

Учесници експеримента су били углавном студенти и запослени на Факултету техничких наука, Универзитета у Новом Саду и Природно-математичког факултета, Универзитета у Подгорици, у Црној Гори. Студенти су углавном били са основних академских студија, са студијских програма Индустријског инжењерства и менаџмента, Информационих технологија, Саобраћајног инжењерства и Математике. Етичка комисија Факултета техничких наука је одобрила истраживање.

Учесће је било добровољно и за већину играча нису биле предвиђене награде. Мала награда у погледу одређеног броја поена у оквиру курса из једног наставног предмета (која одговара 5% укупних поена) обезбеђена је за студенте који су ранжирани међу првих 10 играча у унапред одређеном времену.

Учесницима је при регистрацији дата могућност да дају податке везане за пол и старост и сви учесници су се одлучили за то. Укупан број учесника који су учествовали у експерименту износио је 164, од чега је 59 (36%) учесника било женског пола, а 101 (64%) учесник је био мушког пола. Од 10 најбоље ранжираних играча на коначној ранг листи, 5 је женског пола и 5 мушког пола. Најстарији учесник имао је 49 година а најмлађи 19 година. Било је 82% учесника старости између 19 и 24 године, 11% учесника старости између 25 и 29 година, док је само 7% учесника било старије од 30 година.

4.3 ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИГРЕ

Pathgame игра је имплементирана у Python and JavaScript помоћу Paper.js and Flask. Paper.js је скриптни оквир отвореног кода за векторску графику који ради у оквиру HTML5 Canvas [117]. Flask је веб-развијни микро оквир за Python [118]. Експериментална платформа је тестирана за рад у интернет претраживачима Firefox and Google Chrome. Сви подаци су чувани у бази података. Касније су ти подаци конвертовани у CSV формат и кориштени у даљим анализама.

4.4 ПРОЦЕДУРА ПОКРЕТАЊА ИГРЕ

Креирана игра је постављена на Heroiku платформи [119], која је омогућила да се игра репродукује на било ком уређају са веб претраживачем. Подршка за уређаје са екраном осетљивим на додир није обезбеђена, пошто би требало узети у обзир величину екрана уређаја осетљивих на додир, а поље за играње би требало скалирати како би се омогућило угодно играње. Међутим, корисницима је обезбеђен прилагођени интерфејс за мобилне уређаје, који омогућава и проверу стања на табели најбољих играча.

Веб адреса апликације за играње подељена је међу играчима путем е-поште и платформе за е-учење Факултета техничких наука. Веб игра је захтевала од корисника да се региструју и пријаве пре него што започну игру, видети слику 4.4.

Secure | https://pathgamefts.herokuapp.com/register

PATH finding game Info Register Log In

Username

Password

Password (again)

Are you male or female? ▾

Your age

Please check this box to indicate that you allow the data collected to be used for research, while preserving your anonymity at all times.

Register

Слика 4.4 Регистрација играча

Понуђено је и кратко објашњење сврхе истраживања и подаци о дизајнерима игре, а од корисника је затражено да дају сагласност за коришћење података сакупљених током играња у сврхе истраживања, уз обезбеђивање њихове анонимности у сваком тренутку, као што је објашњено и приказано сликом 4.5.

PATH finding game Info Log Out

The path finding game

The path finding game has been designed by scientists of the [KOI@FTS](#), as a means of collecting the data we need to advance our research in the domain of machine learning and transportation. Specifically, we aim to use the data collected to teach computers to solve the [Travelling Salesman Problem](#) in a human like way.

We will maintain the anonymity of our players at all times and never share the contact details provided to us with anyone.

Thank you for taking the time to help us out! We hope you will enjoy our little game.

[Back to the path finding game](#)

Слика 4.5 Обавештење о сврси истраживања

Једном када се корисник пријави (видети слику 4.6), био је у могућности да игра игру, али није имао могућност да више пута игра исти ниво.

Welcome!

Please log in using an existing account or [register](#) to continue.

Слика 4.6 Пријављивање играча

Рок за пласирање у првих десет играча био је постављен на 10 дана од момента када је веб адреса игре подељена. Већина података прикупљена је у том временском интервалу. 10 играча најбоље ранжираних у овом периоду приказано је на слици 4.7.

TOP SCORES!

| Place | User | Level | Distance | Time | Score |
|-------|----------------|-------|----------|-------|-------|
| 1 | AleksandraK | 747 | 6024.85 | 9.63 | 4920 |
| 2 | vallar | 616 | 6059.72 | 9.28 | 4920 |
| 3 | KaticCar | 807 | 6024.85 | 9.54 | 4920 |
| 4 | IT1_2016 | 445 | 7279.38 | 5.11 | 4918 |
| 5 | Pathfinder | 756 | 6900.00 | 7.42 | 4917 |
| 6 | sunshine | 1084 | 6060.00 | 13.53 | 4916 |
| 7 | saki | 1047 | 7016.98 | 9.03 | 4915 |
| 8 | mladendjukelic | 1023 | 6402.43 | 13.73 | 4914 |
| 9 | sydney | 1201 | 6660.00 | 12.93 | 4913 |
| 10 | nadjajovanovic | 986 | 6942.43 | 12.58 | 4912 |

[Back to the path finding game](#)

Слика 4.7 Најбоље ранжирани играчи

4.5 РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТА

Учесници експеримента су укупно решили 16058 проблема трговачког путника. Анализа добијених података изведена је уз помоћ функција софтверског програма MS Excell и статистичког пакета за анализу података (енг. *software platform offers advanced statistical analysis - SPSS*).

Хистограм броја решења проблема трговачког путника у односу на број одредишних тачака је приказан на слици 4.8. Сложеност проблема креће се од 10 до 196 одредишних тачака.

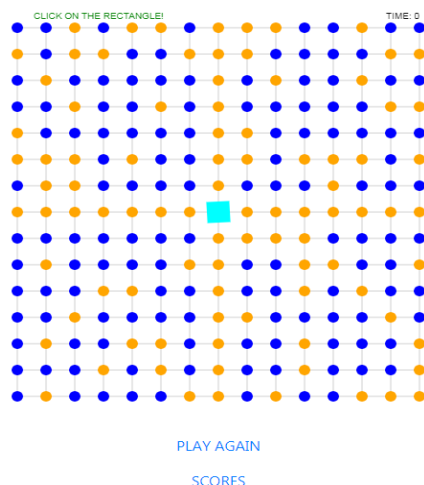


Слика 4.8 Хистограм броја решења проблема трговачког путника у односу на број одредишних тачака

Одредишне тачке су у пољу игре распоређиване у оквиру допустивог скупа чворова мреже - није било дозвољено да се одредишне тачке поклапају са депоом, или да се нађу у реду или колони у којој се депо налази. Ово ограничење узрокује да се одредишне тачке распоређују у четири квадранта, као што је приказано на слици 4.9.

Welcome to the path finding game.

The goal is to connect all the blue points starting from and ending at the rotating square, as quickly as you can.
Click the square to start and finish.



Слика 4.9 Изглед поља игре са задатим одредишtima

Код највећег броја прикупљених решења број одредишних тачака кретао се између 150 и 160. Дакле, сложеност већине проблема чија су решења прикупљена путем игре знатно је већа него код проблема трговачког путника разматраних у класичним студијама, које се ограничавају на проблеме сложености до 120 одредишних тачака. У онлајн игри *Perlentaucher*, представљеној у раду [76], посматрани су проблеми трговачког путника сложености до 20 дестинација. Путање које су прикупљене у оквиру овог истраживања садрже преко 22,5 милиона дестинација. Помоћу *Perlentaucher* игре прикупљено је 38465 путања, што је више него у овом истраживању. Укупан број дестинација у том скупу података њихове студије је мањи од 770000. Посматрано са аспекта укупног броја дестинација база података прикупљених у овом истраживању је већа.

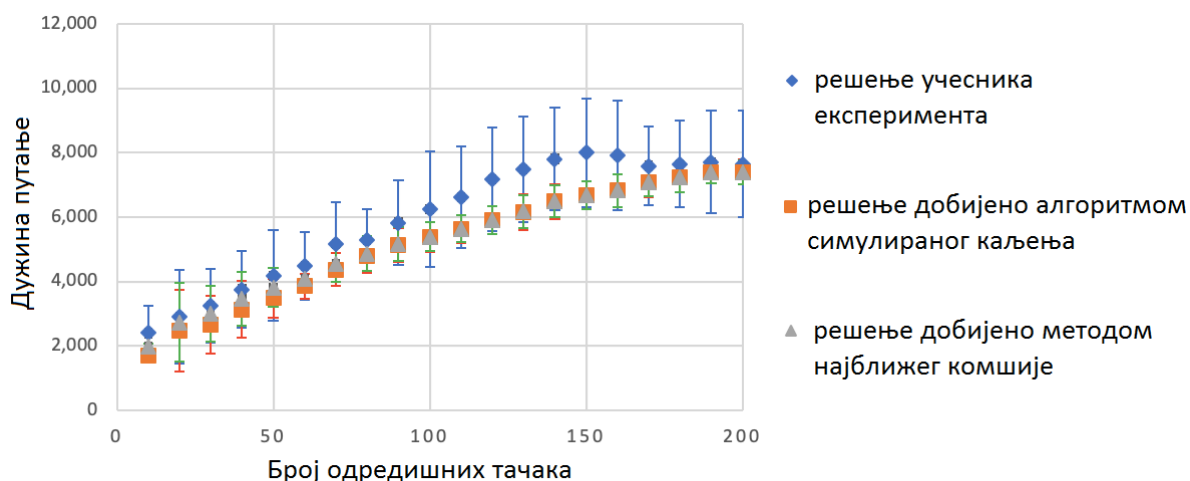
За сваку пронађену путању израчуната је њена дужина користећи Менхетн растојање. Дужина путање је изражена у пикселима, будући да је величина поља за игру фиксна (500 × 500 пиксела).

Оптimalно решење се не може увек одредити за проблеме са више од неколико десетина одредишних тачака, па су у овој студији решења учесника у истраживању поређена са решењима добијеним алгоритмом најближи комшија (енг. *nearest neighbor* - NN) и алгоритмом симулираног каљења (енг. *simulated annealing* - SA).

За поређење са решењима добијеним алгоритмом симулираног каљења коришћена је имплементација отвореног кода доступна на [120], модификована како би подржала Менхетн растојање. Коришћени су подразумевани параметри за алгоритам симулираног каљења, са почетном температуром постављеном на 25000 K и крајњом температуром од 2.5 K, док је број корака постављен на 100000. Пошто се решења која даје алгоритам симулираног каљења добијена приликом сваког покретања кода

разликују, код је покренут десет пута за сваки проблем из скупа података. За решење којим је иницијализован алгоритам симулираног каљења узето је решење добијено алгоритмом најближег комшије, у циљу да новодобијена решења буду што је могуће ближе оптималном. Најбоље решење које је добијено у свих десет покретања кода коришћено је у свим спроведеним анализама. Алгоритму симулираног каљења, на хардверу коришћеном у истраживању, било је потребно до десет секунди да дође до решења проблема.

Правоугаони (кутијасти) дијаграми (енг. *Box Plot*) расподеле за дужину путање у решењима која су постигли учесници експеримента, хеуристика најближег комшије и алгоритам симулираног каљења су приказани на слици 4.10. Интервал свих могућих вредности за број одредишних тачака дељен је на подинтервале ширине 10, слично као код слике 4.8. Као што може да се види са слике 4.10, решења учесника у експерименту су, у просеку, лошија од решења добијених помоћу обе хеуристике. Решења генерисана од стране човека имају највећу варијансу. За мали број одредишта, решења учесника у експерименту су блиска рачунарски генерисаним решењима. Са порастом броја одредишних тачака приметно је и све значајније одступање решења учесника у експерименту од рачунарски генерисаних решења, да би након што број одредишних тачака премаши 160, одступање решења учесника у експерименту од рачунарски генерисаних решења бивало све мање. Решења добијена алгоритмом симулираног каљења боља су него решења добијена хеуристиком најближег комшије код проблема са мањим бројем одредишних тачака, док у случају проблема са већим бројем одредишних тачака алгоритам симулираног каљења није успео да доведе до побољшања почетног решења добијеног методом најближег комшије.



Слика 4.10 Кутијасти дијаграми расподела за дужину путања за различит број одредишних тачака

Следећи задатак је био да се испита да ли постоје статистички значајне разлике између просечне дужине путање креиране од стране учесника у истраживању и просечне дужине путање рачунарски генерисаних решења. Тестирање је извршено на три групе података - корисници, алгоритам симулираног каљења и најближи комшија и за све

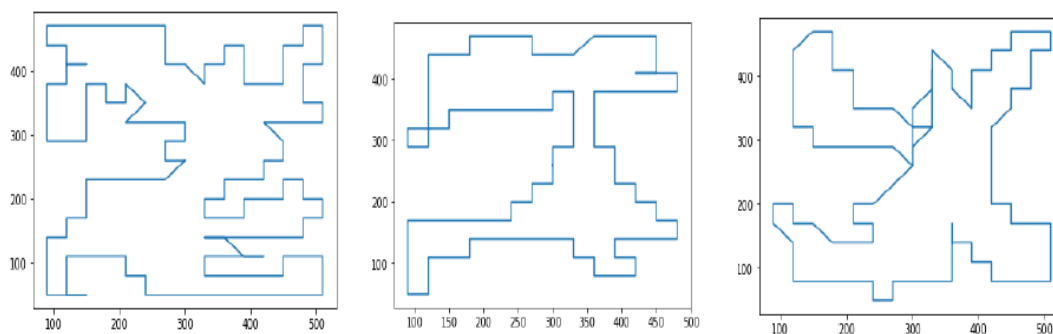
три групе величина узорка је била једнака и износила је 16058. Тестирање је урађено применом анализе варијансе (ANOVA). Применом анализе варијанси добија се F - вредност која је статистички значајна јер за p - вредност је $p < 0.05$ те се закључује да између посматраних група постоји статистички значајна разлика (видети табелу 4.1). Средња дужина пута у решењима формираним од стране учесника у експерименту је 7095 пиксела, са стандардном девијацијом од 2108 пиксела. Алгоритам најближег комшије даје путеве средње дужине од 6350 пиксела, са стандардном девијацијом од 1394 пиксела, а средња дужина путања у решењима добијеним симулираним каљењем је 6303 пиксела, са стандардном девијацијом од 1490.

Табела 4.1 ANOVA за дужине путања учесника у истраживању, алгоритма симулираног каљења и метод најближег суседа

| Извор варијације | Збир квадрата | Број степени слободе | Средина збира квадрата | F - вредност | P - вредност | $F_{0.05}$ |
|------------------|---------------|----------------------|------------------------|----------------|----------------|------------|
| између група | 6331000127 | 2 | 3165500064 | 1103,061194 | 0 | 2,996 |
| унутар група | 1,38066E+11 | 48111 | 2869741,117 | | | |
| укупно | 1,44397E+11 | 48113 | | | | |

Од посебног интереса за разумевање решавања проблема трговачког путника од стране човека и стварање интелигентног агента инспирисаног начином на који човек решава проблем трговачког путника су случајеви у којима су се решења учесника експеримента показала бољим од рачунарски генерисаних решења. Ови случајеви обухватају 26.72% целокупног скупа података (4286 путања од 16058).

На слици 4.11 приказане су неке путање, генерисане од стране три различита играча, у којима су играчи успешније решили проблем трговачког путника од алгоритма најближег комшије. Иако су учесници у експерименту у неким случајевима користили способност да прате кратке директне стазе, уместо да се придржавају принципа *spare-to-grid*, то није утицало на дужину путање, која се и у том случају израчунава помоћу Менхетн растојања, а самим тим ни на број освојених поена у игри.

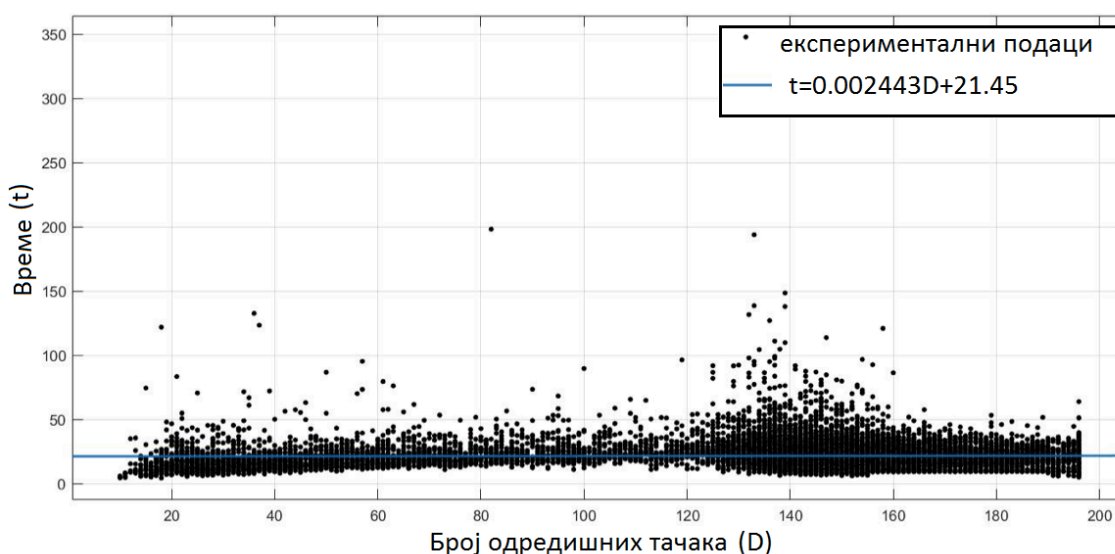


Слика 4.11 Неки примери у којима су учесници у експерименту успешније решили проблем трговачког путника од алгоритма најближег комшије

У истраживању фокус је био на путањама које учесници у експерименту креирају када имају упутство да то учине у што краћем времену, како би путања била формирана на основу инстинктивног понашања учесника у експерименту, а не као резултат дужег размишљања.

Последице овог захтева биле су помало неочекиване. Иако се у почетку (код проблема трговачког путника са до 30 одредишних тачака) чини да учесници у истраживању решавају проблем у времену које линеарно зависи од сложености проблема, овај тренд се не наставља за проблеме трговачког путника са више од 30 одредишних тачака.

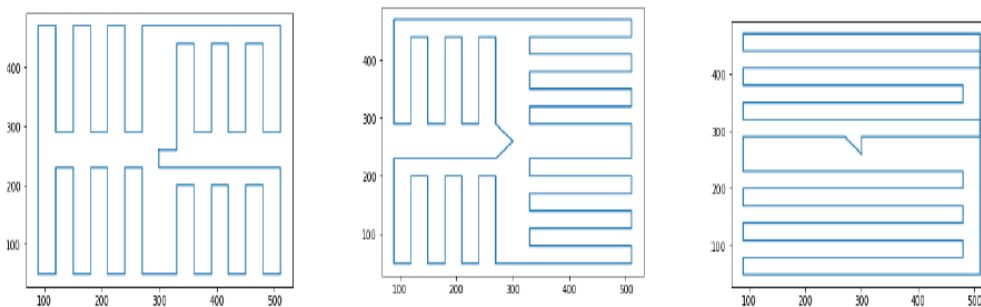
Чинило се да након што учесници у истраживању достигну одређено време потребно за решавање проблема (креирање путање), време потребно за решавање проблема не наставља да расте са порастом сложености проблема, тј. порастом броја одредишних тачака у проблему трговачког путника.



Слика 4.12 Линеарна регресија за време потребно за решавање проблема различите сложености

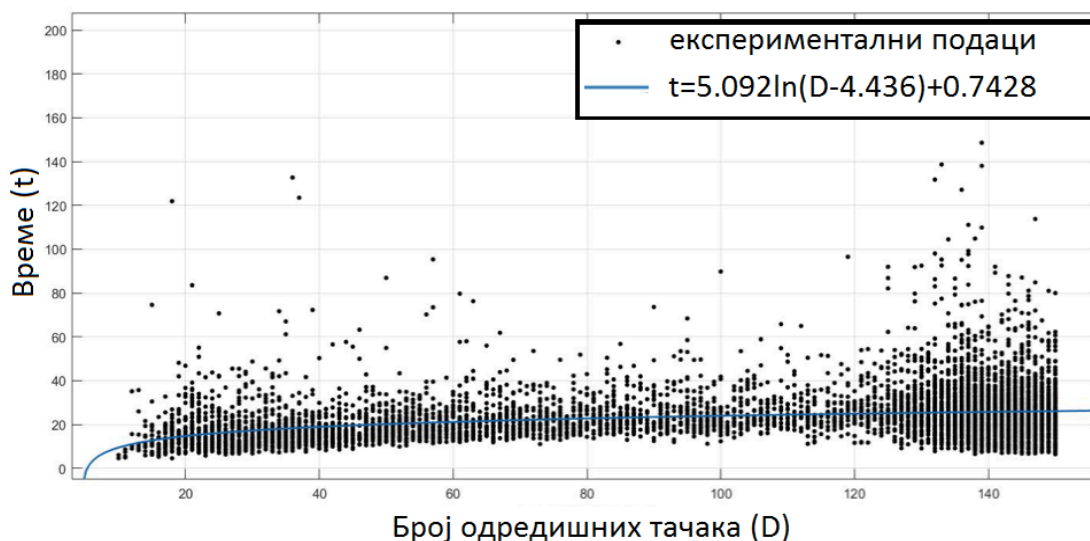
За фитовање експерименталних података направљен је линеарни модел, приказан на слици 4.12, помоћу алата Matlab-а [15]. Добијена средња квадратна грешка (енг. *Root Mean Square Error* - RMSE) је 10.783, а једначина линеарне регресије је имала нагиб $a = 0.002443$ чији је 95% интервал поверења $(-0.0008836, 0.005769)$. Уколико се број одредишних тачака повећа за 1, очекивано повећање времена потребног за решавање проблема је 0.002443 милисекунди. Пресек једначине линеарне регресије са временском осом је 21.45, а његов 95% интервал поверења је $(20.95, 21.95)$.

На дијаграму приказаном на слици 4.12 може се уочити повећана варијанса у времену решавања проблема, за број чворова између 120 и 160, што се могло и очекивати јер већина података одговара проблемима ове сложености. Код проблема са бројем чворова већим од 160, варијанса времена потребног за решавање проблема се смањује. Иако се то у почетку чинило неинтуитивним, пажљивија анализа решења открива да је за проблеме ове величине распоред одредишних тачака толико густ да су играчи решили проблем користећи унапред замишљену геометријску путању, без покушаја оптимизације. Нека таква решења приказана су на слици 4.13.



Слика 4.13 Примери решења проблема са великим број одредишних тачака

Решења попут оних приказаних на слици 4.13 се појављују у случајевима када је број одредишних тачака велик, 150 и више. Пошто је природа решења добијених у овом случају квалитативно различита од решења проблема са мање од 150 одредишних тачака, спроведена је засебна анализа за проблеме са 150 дестинација или мање. Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака, којих је у узорку било 8146, приказана је на слици 4.14. Анализа другог случаја заслужује посебну студију и сада није извршена.



Слика 4.14 Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака

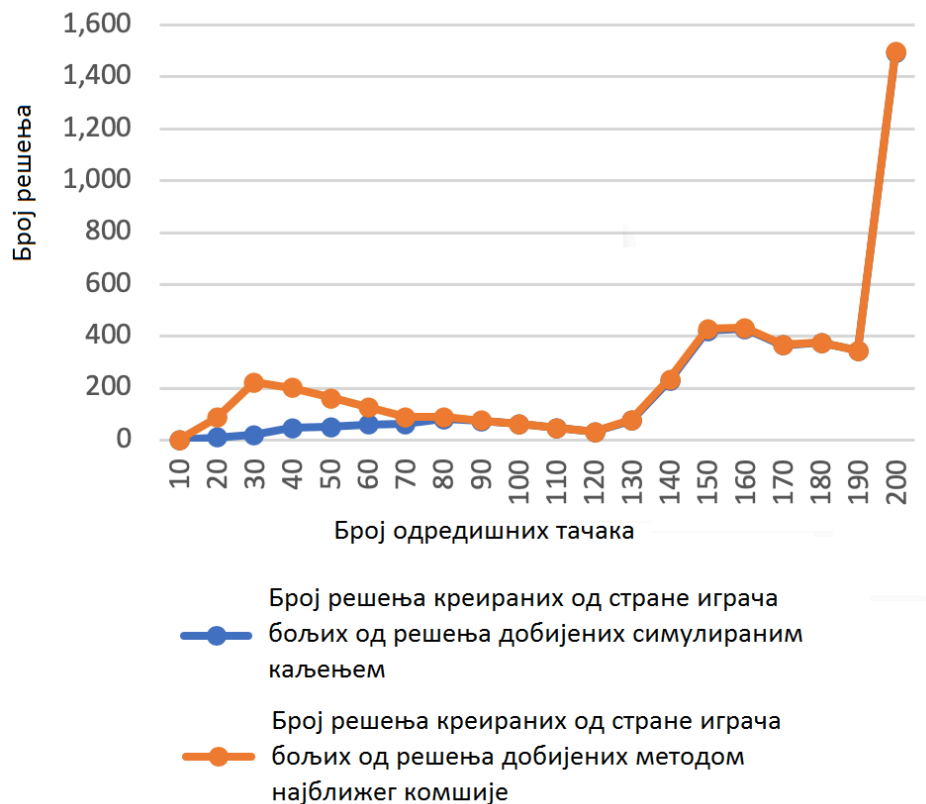
Поред логаритамске регресије, за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака, која има рачунску сложеност $O(\ln n)$, посматрани су и други облици регресије различитих рачунских сложености, као што је приказано у табели 4.2. Мотив је проистекао из рада [5].

Статистички показатељи који се користе да би се проценило у којој мери дати регресиони модел одговара експерименталним подацима, приказани су у табели 4.2. Од свих регресионих модела посматраних у раду најбољи је први, што инсинуира да постоји логаритамски однос између броја одредишних тачака и времена потребног за решавање проблема.

Табела 4.2 Регресиони модели времена у зависности од броја одредишних тачака

| Преглед модела | | | Параметри и критеријуми прилагођености | | | | |
|----------------|----------------|---------------------------------|--|----------------------|------------------------|--------|--------|
| Бр. | Сложеност | Регресиона једначина | RMSE | SSE | a | b | c |
| 1 | $O(\ln n)$ | $t = a \ln(D + c) + b$ | 11.6571 | 1.1065×10^6 | 5.092 | 0.7428 | -4.436 |
| 2 | $O(n)$ | $t = aD + b$ | 11.7223 | 1.1191×10^6 | 0.07247 | 15.67 | |
| 3 | $O(n \ln n)$ | $t = aD \ln(D + c) + b$ | 11.7232 | 1.1191×10^6 | 0.007796 | -237.3 | 3922 |
| 4 | $O(n^2)$ | $t = a(D + c)^2 + b$ | 11.7286 | 1.1201×10^6 | 2.844×10^{-5} | -23.45 | 1176 |
| 5 | $O(n^3 \ln n)$ | $t = a(D + c)^3 \ln(D + c) + b$ | 11.7673 | 1.121×10^6 | 2.889×10^{-8} | 13.3 | 275.5 |
| 6 | $O(n^2 \ln n)$ | $t = a(D + c)^2 \ln(D + c) + b$ | 11.7332 | 1.1276×10^6 | 6.339×10^{-6} | -4.276 | 699.5 |
| 7 | $O(n^3)$ | $t = a(D + c)^3 + b$ | 11.7473 | 1.1237×10^6 | 6.791×10^{-8} | 7.856 | 501.6 |

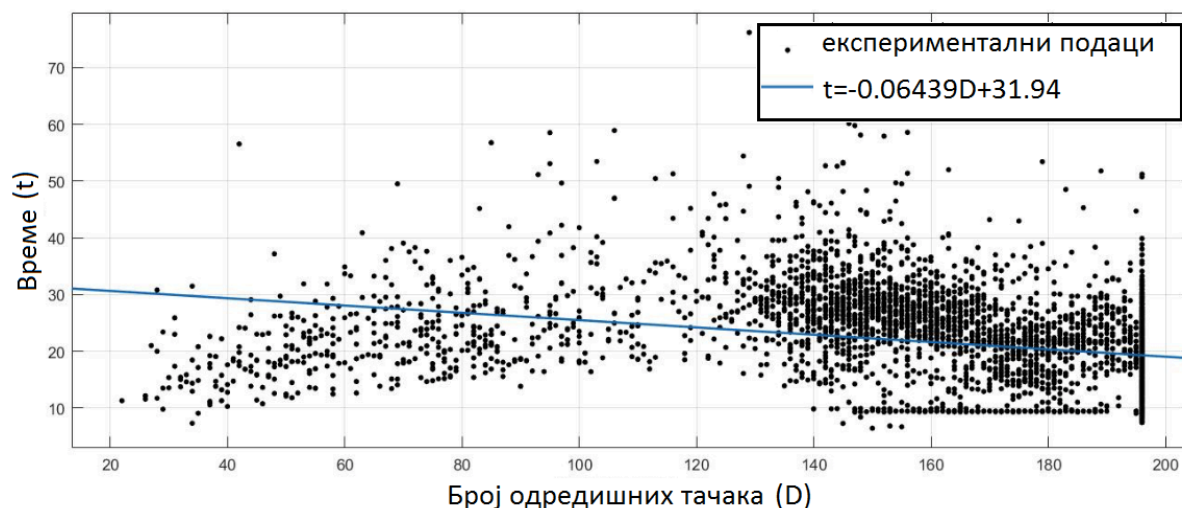
Случајеви у којима играчи долазе до решења брже и боље од рачунара су од посебног интереса за обучавање интелигентног агента. Расподела броја решења конструисаних од стране играча, која су боља од рачунарски конструисаних решења добијених применом две посматране хеуристике приказана је на слици 4.15. За проблеме са малим бројем одредишних тачака играчи ретко побеђују рачунар, али се број играча који побеђују рачунар значајно повећава када број одредишних тачака достигне или премаши 150.



Слика 4.15 Полигон броја решења играча који су победили хеуристику симулираног каљења и најближег комшије

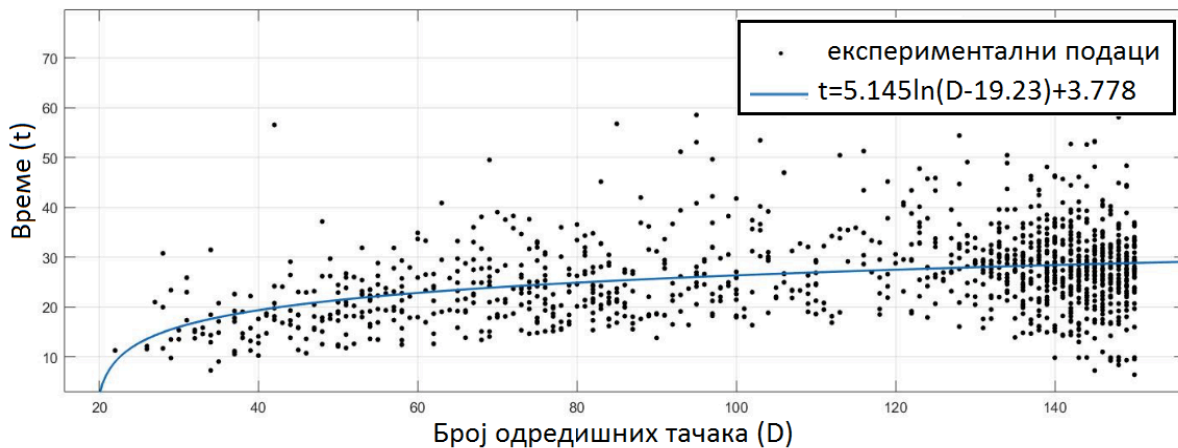
Даље, посматрана су решења креирана од стране играча, а која су боља и од решења добијених симулираним каљењем и од решења добијених методом најближег комшије (у зависности од броја одредишних тачака). Пронађена је једначина линеарне регресије времена потребног за решавање наведеног проблема у зависности од броја одредишних тачака. Линеарна регресија приказана је плавом линијом на слици 4.16. Њен нагиб је -0.06439 и 95% интервал поверења за нагиб је $(-0.07058, -0.05821)$. Уколико се број одредишних тачака повећа за 1, очекивано смањење времена потребног за решавање проблема је 0.06439 милисекунди. Када је број одредишних тачака 150 и више, може се на слици 4.16 видети да се подаци групишу око праве којом је представљена линеарна регресија. Као што је већ речено, тада је број одредишних тачака велик и решења изгледају попут решења са слике 4.13. Из

наведеног разлога, даље са прави једначина логаритамске регресије где се опет у разматрање узимају само они проблеми са бројем одредишних тачака мањим од 150, које представљају 67% укупног броја одредишних тачака. Према томе, приликом обуке интелигентног агента мора се водити рачуна о односу броја одредишних тачака и укупног броја тачака.



Слика 4.16 Линеарна регресија за време потребно за решавање проблема различите сложености када је време играча боље од времена најближег комшије и симулираног каљења

Даље се истраживање свело на проблеме са бројем одредишних тачака мањим или једнаким од 150. Од свих регресионих модела из табеле 4.2 најбоља апроксимација је добијена помоћу логаритамског регресионог модела. Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака када је време играча боље од времена најближег комшије и симулираног каљења приказана је на слици 4.17 као крива плаве боје. За добијени модел RMSE је износио 7.9286, а SSE је износио 77,383. За линеарни регресиони модел RMSE износи 8.0194, а SSE износи 79,232. 95% интервали поверења за параметре логаритамске регресије су $a \in (3.752, 6.538)$, $b \in (2.988, 10.54)$ и $c \in (-28.06, -10.4)$.



Слика 4.17 Логаритамска регресија за време потребно за решавање проблема са мање од 150 одредишних тачака решења бољих од решења симулираног кађења и најближег комшије

Између просечног времена играња по одредишној тачки и броја одиграних игара израчунат је коефицијент корелације који износи -0.421 , и статистички је значајн на нивоу 0.01 , што указује на постојање умерене негативне корелације између ове две променљиве, што сугерише да корисници са стеченим искуством заиста користе у просеку мање времена по одредишној тачки при креирању путање.

4.6. РАЗВОЈ АУТОМАТСКОГ РЕШЕЊА ЗА РУТИРАЊЕ

Подаци прикупљени у истраживању послужили су за развој неуронске мреже која решава проблем трговачког путника. За неуронску мрежу која проблем решава „потез по потез“ улазни податак је тренутна позиција, а излазни податак је информација о томе у ком правцу треба наставити кретање.

Решења учесника у истраживању су представљена квадратним матрицама реда 15 које описују стање поља игре након сваког потеза. За матрицу стања битна је позиција депоа, која је увек фиксирана, правац и смер кретања као и распоред одредишних тачака које играч треба да обиђе.

Потези играча су кодирани са 8 дискретних вредности које представљају кретање ка суседним чворовима који се налазе изнад, испод, са леве и десне стране или под углом од 45 степени у односу на осе које се поклапају са решетком поља.

Потези играча кодирани су на следећи начин:

- покрет играча ка доле је означен са 1;
- покрет играча ка горе је означен са 2;
- покрет играча лево је означен са 3;
- покрет играча десно је означен са 4;
- покрет играча доле десно под углом од 45 степени је означен са 5;
- покрет играча доле лево под углом од 45 степени је означен са 6;

- покрет играча горе десно под углом од 45 степени је означен са 7;
- покрет играча горе лево под углом од 45 степени је означен са 8.

Поред тога, са 9 је означен депо. Илустровано примером у матрици реда 5 (због једноставности записа) кретање играча можемо приказати на следећи начин:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \dots$$

Како су од посебног значаја решења у којима су играчи конструисали путање краће од оних постигнутих применом алгоритама најближег комшије и симулираног каљења, то је 1600 таквих решења коришћено за обуку интелигентног агента. Свако од ових решења се може преточити у онолико парова улазно-излазних података колико је потеза у датом решењу. Тако формиран скуп података, искориштен за тренирање и тестирање неуронске мреже, је садржао 469392 инстанци. Једна трећина инстанци је издвојена за тестирање, док је преосталих 332407 коришћено за тренинг.

За обуку и тестирање обучене мреже искоришћена је програмска библиотека PyTorch [121] која представља један од најчешће коришћених алата за развој модела дубоког учења. За потребе обуке коришћене су NVIDIA Тесла K40 графичке картице. Тренинг једног модела, током 10 епоха је трајао око 60 сати.

Будући да су улазни подаци већ представљени на високом нивоу апстракције, евалуиране су мреже које садрже само потпуно повезане слојеве. Сви евалуирани модели садржали су два скривена слоја. Неурони у скривеном слоју користе исправљену линеарну активациону функцију (енг. *Rectified Linear Unit - ReLu*). За обуку је коришћен метод опадајућег градијента (енг. *Gradient Descent Method*). Као мера квалитета модела коришћен је губитак унакрсне ентропије (енг. *cross-entropy loss*).

Најбољи резултат у нашим експериментима постигнут је мрежом која има по 1024 неурона у оба скривена слоја. Након 10 епоха тренирања са стопом учења 0.01, моментом 0.5 и минисеријом која је садржала 64 инстанце, модел постиже тачност од 36%, што је значајан напредак у односу на перформансу случајног избора (12.5%). Иницијални експеримент дакле показује да је неуронска мрежа у стању да искористи податке да унапреди своје понашање, али су даљи експерименти потребни да би се унапредила тачност.

5 ЗАКЉУЧАК И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

Проблем транспорта подразумева распоређивање одређене количине робе од складишта (депоа) до локација одређеног броја корисника, узимајући у обзир све трошкове транспорта по појединим релацијама са циљем добијања решења које обезбеђује минималне укупне трошкове. Ефикасно планирање и управљање транспортом је кључно за обезбеђивање брзе и правовремене доставе пошиљака и смањење негативних утицаја на животну средину. Компаније које се баве преносом пошиљака желе да на што економичнији и ефикаснији начин ураде доставу пошиљака на жељену адресу, по унапред дефинисаном редоследу доставе и у што је могуће краћем времену, по цени која је унапред договорена. С обзиром на специфичности оваквог начина доставе, компаније константо унапређују начине доставе и трагају за новим видовима кућне доставе пошиљака. Савремени пословни системи доставе фокусирају своје активности и ресурсе на развој нових технологија за доставу.

У уводном делу докторске дисертације превоз робе је представљен као кључни елемент у процесу снабдевања корисника. Повећана потреба за доставом робе на жељену дестинацију јавља се услед развоја електронске трговине чији корисници желе да купљени производ добију што пре, што условљава компаније које се баве транспортом, дистрибуцијом и доставом робе да проналазе што ефикасније начине транспорта.

Тренутни начин доставе робе захтева класично возило које креће из депоа и планираним редоследом обилази локације корисника. Развој информационог технологија и напредак аутомобилске индустрије за последицу има примену аутономних возила у достави пошиљака. Иновације у аутомобилској индустрији су фокусиране на безбедност у саобраћају, смањење загађења животне средине и удобност самих возача. Доставне и логистичке компаније увелико разматрају начине за увођење аутономних возила у своје системе. Аутономна возила, како она која лете тако и она која се крећу путевима или пешачким стазама су иновације које у последњих пар година налазе примену у процесу доставе робе. Логистичке компаније које се баве доставом пошиљака увелико уводе дроне за доставу робе до корисника. Хетерогена флота возила као један од начина да се побољша доставни процес робе је предмет истраживања у докторској дисертацији.

Све већи број људи живи у градским срединама, што ствара потребу за све обимнијим транспортом робе и главни је разлог за истраживањем ефикаснијих и јефтинијих начина транспорта уз спречавање или бар смањење негативних утицаја на животну средину.

Информационе технологије су главни извор раста продуктивности и конкурентности у доставним и логистичким компанијама. Аутоматизовани транспорт и логистички процеси могу пружити предности у виду смањења трошкова путем оптимизације транспортних и логистичких услуга, гаранцијом доставе наручене робе и пошиљака у право време и осигурањем високог нивоа пружених услуга.

Проблем рутирања возила и проблем трговачког путника су два главна проблема која су посматрана у дисертацији. Дефиниција проблема трговачког путника и проблема рутирања возила за доставу робе или пошиљака подразумева одређена ограничења. Проблем је наизглед једноставно представити. У задатом времену, достављач треба да посети задати скуп корисника. Циљ је проналазак најкраће руте. Полазак је увек из депоа (складишта), а након обиласка свих корисника достављач се враћа у депо. Могући приступи решавању проблема су трагање за егзактним решењима, хеуристички и метахеуристички приступи. Егзактне методе дају оптимално решење али само за мали број одредишних тачака, тј. корисника па је њихова практична примена врло ограничена. Хеуристички приступ решавању базиран је на искуству. Неке хеуристичке методе које се најчешће користе су метода најближег комшије, као и *Swear* алгоритам. Метахеуристичке методе су уопштење хеуристичких метода настале у циљу ефикаснијег и ефективнијег налажења решења. Метахеуристичке методе које се користе за решавање проблема транспорта су симулирано каљење, генетски алгоритам и друге.

Интензиван развој вештачке интелигенције омогућио је различите алате и технике за решавање транспортног проблема који спада у класу оптимизационих проблема. Машинско учење и неуронске мреже су широко распрострањени алати који се свакодневно усавршавају и развијају. Вештачка интелигенција се све више примењује у пракси, а научна заједница константно ради на отклањању недостатака и усавршавању методологије вештачке интелигенције. Постоји велики број различитих подела и врста неуронских мрежа. У овој докторској дисертацији акценат је на моделима дубоког учења који се најчешће користе за решавање инжењерских проблема и темеље се на учењу са надзором.

Предмет истраживања ове докторске дисертације је развој, имплементација и евалуација техника машинског учења за доставу пошиљака аутономним дроновима. С обзиром на то да су транспортни проблеми у достави пошиљака доста компликовани, и да транспорт класичним возилом има низ недостатака (као што су нпр. неки негативни утицаји на животну средину), у докторској дисертацији посматран је хетерогени доставни систем. Хетерогени доставни систем представља начин доставе комбинацијом класичног и аутономног возила.

Да би се практично илустровала могућност примене техника машинског учења у решавању оптимизационих проблема трговачког путника, пре свега је требало прикупити довољно велики скуп улазних података. Као средство за прикупљање података креирана је игра доступна на интернету, постављена на бесплатну платформу. Учествовање у експерименту је било на добровољној бази. Поље за играње чини мрежа тачака димензије 15x15. Депо се увек налази на позицији која одговара чвору мреже у осмој врсти и осмој колони. Број одредишних тачака, тј. дестинација у пољу игре се креће од 10 до 196 и оне су равномерно распоређене на допустивом скупу чворова мреже (одредишне тачке нису могле да се нађу у истој врсти нити колони у којој се налази депо и наравно нису могле да се поклопе са депоом). Предност овог начина прикупљања података (путем игре доступне на интернету) је што се лако и у релативно кратком времену може сакупити велики број података. Потенцијалним недостатком прикупљања података путем игре доступне на

интернету може да се сматра ниво мотивације играча који може да утиче на брзину решавања проблема и сакупљене податке.

У оквиру истраживања у дисертацији, наредни корак је било коришћење сакупљених података за тренирање модела машинског учења који ће бити у стању да решава проблем трговачког путника. Креирана неуронска мреже је прво тренирана на целокупном скупу сакупљених података и постигнута је тачност од 12.5%. Затим је неуронска мрежа тренирана на скупу само оних прикупљених решења играча која су била боља од решења које је креирао рачунар помоћу обе посматране хеуристике. Постигнуто је побољшање, јер она тада постиже тачност од 36%. Имплементација неуронских мрежа представља практични део рада. Конструисана је неуронска мрежа са четири слоја – једним улазним, два скривена и једним излазним слојем. Даљим развојем и тестирањем архитектуре могло би се доћи и до бољих резултата. Међутим, колико год била добра архитектура неуронске мреже, њена успешност зависи од података за обуку.

Истраживачки задаци који су били постављени приликом дефинисања теме истраживања су у потпуности испуњени. Направљена је веб игра која је јавно доступна и помоћу које је прикупљен велики број података о решењу рутирања возила. Добијени подаци су успешно употребљени за тренирање неуронске мреже која самостално решава проблем рутирања возила.

Будућа истраживања могла би да буду усмерена на проширење поља за игру, у циљу прикупљања већег скупа података и нову обуку неуронске мреже у циљу повећања њене тачности. Наиме, уместо посматране мреже (поља за игру) чија димензија је 15x15, могу се посматрати и комплекснији проблеми, тј. поља за игру већих димензија. Игра која је кориштена у истраживању је креирана на тај начин да се у сваком наредном нивоу број одредишних тачака полако повећава, да не би дошло до засићења поља одредишним тачкама и да игра у том смислу остане интересантна и упорнијим играчима. Један од могућих праваца унапређења игре је да играч не зна да ће на наредном нивоу број одредишних тачака бити већи или једнак броју одредишних тачака са нивоа који тренутно игра, већ да се број одредишних тачака за унапред дефинисану величину поља случајно одређује. Такође, треба радити истраживање где је најбоље позиционирати депо који је у случају посматраном у тези класично возило. Положај депоа је значајан јер класично возило превози робу из складишта и затим се позиционира и из њега се помоћу аутономног возила роба доставља до крајњег одредишта.

ПРИЛОГ

simulated_annealing_greedy.py

```
# coding: utf-8
from __future__ import print_function
import math
import csv
from pprint import pprint
import pickle
import random
from simanneal import Annealer

def distance(a, b):
    """Calculates Manhattan distance between two coordinates."""
    return abs(a[0] - b[0]) + abs(a[1] - b[1])

def init_NN(init_state, cities):
    """
    Initialize the initial solution with a simple heuristic: always
    go to the nearest city.
    Even if this algorithm is extremely simple, it works pretty well
    giving a solution only about 25% longer than the optimal one (cit. Wikipedia),
    and runs very fast in  $O(N^2)$  time complexity.
    """
    start = init_state[0] # we expect the depot to be at the start of the list
    must_visit = init_state
    path = [start]
    must_visit.remove(start)
    dbg_path = [cities[start]]
    while must_visit:
        nearest = min(must_visit, key=lambda x: distance(cities[path[-1]], cities[x]))
        path.append(nearest)
        dbg_path.append(cities[nearest])
        must_visit.remove(nearest)

    return path

class TravellingSalesmanProblem(Annealer):
    """Test annealer with a travelling salesman problem.
    """
    # pass extra data (the distance matrix) into the constructor
    def __init__(self, state, distance_matrix):
        self.distance_matrix = distance_matrix
        super(TravellingSalesmanProblem, self).__init__(state) # important!

    def move(self):
        """Swaps two cities in the route."""
        """But we do not touch the start"""

        a = random.randint(1, len(self.state) - 1)
```

```

        b = random.randint(1, len(self.state) - 1)
        self.state[a], self.state[b] = self.state[b], self.state[a]

def energy(self):
    """Calculates the length of the route."""

    e = 0

    for i in range(len(self.state)):
        e += self.distance_matrix[self.state[i - 1]][self.state[i]]

    return e

if __name__ == '__main__':

    # we'll store the results in the dictionary indexed by the order of the problems in
    # the original 'game_16103.csv' file
    # so the format is { rowno : { 'energy' : ?, 'order' : final_state, 'greedye' : ? }}
    results = {}
    rowno = 0
    with open('game_16103.csv', mode='r') as csv_file:
        csv_reader = csv.DictReader(csv_file)
        for row in csv_reader:
            if rowno < 64:
                rowno = rowno + 1
                continue; #skip the first rows that were not taken into account, as these
                # were debugging runs missing data
            dp = eval(row['destinationpoints'])
            # create a new dictionary for the destinations
            cities = {'0': (300, 260)}

            i = 1;
            for element in dp:
                cities[str(i)] = (element['x'], element['y'])
                i = i + 1

            # initial state, a randomly-ordered itinerary
            init_state = list(cities.keys())

            while init_state[0] != '0':
                init_state = init_state[1:] + init_state[:1] # rotate depo to start

            init_state = init_NN(init_state, cities) #initialize with Nearest Neighbor
            # create a distance matrix
            distance_matrix = {}

            for ka, va in cities.items():
                distance_matrix[ka] = {}
                for kb, vb in cities.items():
                    if kb == ka:
                        distance_matrix[ka][kb] = 0.0
                    else:
                        distance_matrix[ka][kb] = distance(va, vb)

            tsp = TravellingSalesmanProblem(init_state, distance_matrix)
            tsp.steps = 100000

```

```
# since our state is just a list, slice is the fastest way to copy
tsp.copy_strategy = "slice"
#get the initial energy
initial_energy = tsp.energy()
state, e = tsp.anneal()
results[rowno-64] = {'energy': e, 'order': state, 'greedye': initial_energy}
rowno = rowno + 1

pickle_out = open("annealing_greedy_results.pickle", "wb")
pickle.dump(results, pickle_out)
pickle_out.close()
```

ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Universal Postal Union." [Online]. Available: <http://news.upu.int/>. [Accessed: 03-Jun-2019].
- [2] A. Schrijver, *Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency*, vol. B. 2003.
- [3] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvatal, and W. J. Cook, *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study (Princeton Series in Applied Mathematics)*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2007.
- [4] R. L. Karg and G. L. Thompson, "A Heuristic Approach to Solving Travelling Salesman Problems," *Manage. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 225–248, 1964.
- [5] M. Dry, M. D. Lee, D. Vickers, and P. Hughes, "Human Performance on Visually Presented Traveling Salesperson Problems with Varying Numbers of Nodes," *J. Probl. Solving*, vol. 1, no. 1, Dec. 2006.
- [6] H. Jones, C. Cummings, and H. Nixon, "Services in the city Governance and political economy in urban service delivery," 2014.
- [7] W.-R. Bretzke, "Global urbanization: a major challenge for logistics," *Logist. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 57–62, Jun. 2013.
- [8] H. Chourabi *et al.*, "Understanding Smart Cities: An Integrative Framework," in *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2012, pp. 2289–2297.
- [9] S. Iwan, K. Kijewska, and J. Lemke, "Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland," *Transp. Res. Procedia*, vol. 12, pp. 644–655, Jan. 2016.
- [10] S. Mahar and P. D. Wright, "The value of postponing online fulfillment decisions in multi-channel retail/e-tail organizations," *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, no. 11, pp. 3061–3072, Nov. 2009.
- [11] P. C. Verhoef, P. K. Kannan, and J. J. Inman, "From Multi-Channel Retailing to Omni-Channel Retailing: Introduction to the Special Issue on Multi-Channel Retailing," *J. Retail.*, vol. 91, no. 2, pp. 174–181, Jun. 2015.
- [12] L. Ranieri, S. Digiesi, B. Silvestri, and M. Roccotelli, "A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision," *Sustainability*, vol. 10, p. 782, 2018.
- [13] A. Hübner, J. Wollenburg, and A. Holzapfel, "Retail logistics in the transition from multi-channel to omni-channel," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 46, no. 6/7, pp. 562–583, 2016.
- [14] B. K. Manville, C., G. Cochrane, J. Cave, J. Millard, J. Pederson, R. Thaarup, "Mapping smart cities in the EU. Brussels: European Parliament, Directorate-General for Internal Policies, Policy Department A: Economic and Scientific Policy," 2014.
- [15] R. Hansmann, H. A. Mieg, and P. Frischknecht, "Principal sustainability components: Empirical analysis of synergies between the three pillars of sustainability," *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 19, no. 5, pp. 451–459, 2012.
- [16] E. M. Tachizawa, M. J. Alvarez-Gil, and M. J. Montes-Sancho, "How 'smart cities' will change supply chain management," *Supply Chain Manag. An Int. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 237–248, 2015.
- [17] E. Taniguchi, "Concepts of City Logistics for Sustainable and Liveable Cities," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 151, pp. 310–317, 2014.
- [18] V. Ehrler and P. Hebes, "Electromobility for City Logistics—The Solution to Urban Transport Collapse? An Analysis Beyond Theory," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 48,

-
- pp. 786–795, 2012.
- [19] R. Dekker, J. Bloemhof, and I. Mallidis, “Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 219, no. 3, pp. 671–679, Jun. 2012.
- [20] O. Seroka-Stolka, “The Development of Green Logistics for Implementation Sustainable Development Strategy in Companies,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 151, pp. 302–309, Oct. 2014.
- [21] T. Aized and J. Srai, “Hierarchical modelling of Last Mile logistic distribution system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, 2014.
- [22] T. Aized and J. S. Srai, “Hierarchical modelling of Last Mile logistic distribution system,” pp. 1053–1061, 2014.
- [23] J. R. Brown and A. L. Guiffrida, “Carbon emissions comparison of last mile delivery versus customer pickup,” *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 17, no. 6, pp. 503–521, 2014.
- [24] X. Wang, K. F. Yuen, Y. D. Wong, and C.-C. Teo, “Consumer participation in last-mile logistics service: an investigation on cognitions and affects,” *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 49, no. 2, pp. 217–238, 2019.
- [25] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence A Modern Approach*. 2013.
- [26] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, “The Truck Dispatching Problem,” *Manage. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
- [27] B. Kallehauge, J. Larsen, O. B. G. Madsen, and M. M. Solomon, “Vehicle Routing Problem with Time Windows,” in *Column Generation*, G. Desaulniers, J. Desrosiers, and M. M. Solomon, Eds. Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 67–98.
- [28] P. Sombuntham and V. Kachitvichyanukul, “Multi-depot Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery Requests,” 2010.
- [29] A. Rodríguez and R. Ruiz, “The effect of the asymmetry of road transportation networks on the traveling salesman problem,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 7, pp. 1566–1576, Jul. 2012.
- [30] P. Toth and D. Vigo, *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [31] P. Lal, L. Ganapathy, and N. Sambandam, “Heuristic Methods for Capacitated Vehicle Routing Problem,” in *Proc. of ThaiVCML2009*, 2009, pp. 343–352.
- [32] A. Lodi, S. Martello, and M. Monaci, “Two-dimensional packing problems: A survey,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 141, no. 2, pp. 241–252, Sep. 2002.
- [33] S. Martello and P. Toth, *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [34] B. Afshar-Nadjafi and A. Afshar-Nadjafi, “A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 29–34, 2017.
- [35] J.-F. Cordeau, G. Laporte, M. W. P. Savelsbergh, and D. Vigo, “Chapter 6 Vehicle Routing,” in *Transportation*, vol. 14, C. Barnhart and G. Laporte, Eds. Elsevier, 2007, pp. 367–428.
- [36] D. Pisinger and S. Ropke, “A general heuristic for vehicle routing problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, pp. 2403–2435, 2005.
- [37] G. Clarke and J. W. Wright, “Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points,” *Oper. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964.
- [38] H. Paessens, “The savings algorithm for the vehicle routing problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 34, no. 3, pp. 336–344, 1988.
-

-
- [39] J.-F. Cordeau, M. Gendreau, G. Laporte, J.-Y. Potvin, and F. Semet, "A guide to vehicle routing heuristics," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 53, no. 5, pp. 512–522, May 2002.
- [40] M. M. Solomon, "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints," *Oper. Res. VOL. 35, NO. 2. (MAR.- APR., 1987)*, vol. 35, pp. 254–265, 1987.
- [41] A. Wren and A. Holliday, "Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points," *Oper. Res. Q.*, vol. 23, no. 3, p. 333, Sep. 1972.
- [42] B. E. Gillett and L. R. Miller, "A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem," *Oper. Res.*, vol. 22, no. 2, pp. 340–349, Apr. 1974.
- [43] J. E. Beasley, "Route firstcluster second methods for vehicle routing," *Omega*, vol. 11, no. 4, pp. 403–408, 1983.
- [44] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numer. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, Dec. 1959.
- [45] S. Lin, "Computer solutions of the traveling salesman problem," *Syst. Tech. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 498–516, 1965.
- [46] G. Croes, "A method for solving traveling-salesman problems," *Oper. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 791–812, 1958.
- [47] N. Christofides and S. Eilon, "Algorithms for Large-Scale Travelling Salesman Problems," *Oper. Res. Q.*, vol. 23, no. 4, p. 511, Dec. 1972.
- [48] S. Lin and B. W. Kernighan, "An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem."
- [49] K. Helsgaun, "An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 126, no. 1, pp. 106–130, Oct. 2000.
- [50] S. Lin, "Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 44, no. 10, pp. 2245–2269, 1965.
- [51] J.-Y. Potvin and S. Bengio, "The Vehicle Routing Problem with Time Windows Part II: Genetic Search," *INFORMS J. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 165–172, May 1996.
- [52] M. Gendreau, A. Hertz, and G. Laporte, "New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem," *Oper. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 1086–1094, Dec. 1992.
- [53] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi, "Positive Feedback as a Search Strategy," *Tech rep., 91-016, Dip Elettron. Politec. di Milano, Italy*, 1999.
- [54] M. Dorigo, G. Di Caro, and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization.," *Artif. Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–72, 1999.
- [55] Y. Bin, Y. Zhong-zhen, and Y. Baozhen, "An improved ant colony optimization for vehicle routing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 196, no. 1, pp. 171–176, 2009.
- [56] L. M. Gambardella, E. Taillard, and G. Agazzi, "MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows," *Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale*, 1999.
- [57] J. E. Bell and P. R. McMullen, "Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 41–48, Jan. 2004.
- [58] M. Reimann, K. Doerner, and R. F. Hartl, "D-Ants: Savings Based Ants divide and conquer the vehicle routing problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 31, no. 4, pp. 563–591, Apr. 2004.
- [59] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.," *U Michigan Press*, 1975.

-
- [60] B. M. Baker and M. A. Ayechev, "A genetic algorithm for the vehicle routing problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 787–800, Apr. 2003.
- [61] J. Berger and M. Barkaoui, "A Hybrid Genetic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem," Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, pp. 646–656.
- [62] C. Prins, "A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1985–2002, Oct. 2004.
- [63] J. K. Lenstra and A. H. G. R. Kan, "Complexity of vehicle routing and scheduling problems," *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 221–227, 1981.
- [64] K. M. Ponnampalani and S. Selvamuthukumar, "International Journal of Computer Science and Mobile Computing Analysis of Face Recognition using Manhattan Distance Algorithm with Image Segmentation," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 3, no. 7, pp. 18–27, 2014.
- [65] C. C. Murray and A. G. Chu, "The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 54, pp. 86–109, 2015.
- [66] Q. M. Ha, Y. Deville, P. Q. Dung, and M. H. Hà, "Heuristic methods for the Traveling Salesman Problem with Drone," *Publ. ArXiv 2015*, 2015.
- [67] Q. M. Ha, Y. Deville, Q. D. Pham, and M. H. Hà, "On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 86, pp. 597–621, Jan. 2018.
- [68] N. Agatz, P. Bouman, and M. Schmidt, "Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone," *SSRN Electron. J.*, pp. 1–40, 2015.
- [69] S. M. Ferrandez, T. Harbison, T. Weber, R. Sturges, and R. Rich, "Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm," *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 374–388, 2016.
- [70] N. I. Polivanova, "Some functional and structural features of visual components of a problem-solving process," *Vopr. Psikhol.*, vol. 4, pp. 41–51, 1974.
- [71] D. Vickers, M. Butavicius, M. Lee, and A. Medvedev, "Human performance on visually presented Traveling Salesman problems," *Psychol. Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 34–45, 2001.
- [72] T. C. Ormerod and E. P. Chronicle, "Global perceptual processing in problem solving: The case of the traveling salesperson," *Percept. Psychophys.*, vol. 61, no. 6, pp. 1227–1238, 1999.
- [73] P. Vickers, D. Lee, M. D., Dry, M., Hughes, "The roles of the convex hull and the number of potential intersections in performance on visually presented traveling salesman problems," *Mem. Cogn.*, vol. 31, no. 7, pp. 1094–1104, 2003.
- [74] J. Macgregor, T. Ormerod, and E. P. Chronicle, "A model of human performance on the traveling salesperson problem," *Mem. Cognit.*, vol. 28, pp. 1183–1190, 2000.
- [75] A. Walwyn and D. Navarro, "Minimal Paths in the City Block: Human Performance on Euclidean and Non-Euclidean Traveling Salesperson Problems," *J. Probl. Solving*, vol. 3, no. 1, pp. 93–105, 2010.
- [76] T. Rach and A. Kirsch, "Modelling human problem solving with data from an online game," *Cogn. Process.*, vol. 17, no. 4, pp. 415–428, Nov. 2016.
- [77] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bull. Math. Biophys.*, vol. 5, no. 4, pp. 115–133, Dec. 1943.
- [78] A. L. Samuel, "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 3, no. 3, pp. 210–229, Jul. 1959.

-
- [79] F. Rosenblatt, "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in The Brain," *Psychol. Rev.*, pp. 65–386, 1958.
- [80] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Neurocomputing: Foundations of Research," J. A. Anderson and E. Rosenfeld, Eds. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1988, pp. 696–699.
- [81] J. R. (John R. Anderson, R. S. (Ryszard S. Michalski, J. G. (Jaime G. Carbonell, and T. M. (Tom M. Mitchell, *Machine learning : an artificial intelligence approach*. M. Kaufmann, 1983.
- [82] I. H. (Ian H. . Witten, E. Frank, and M. A. (Mark A. Hall, *Data mining : practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann, 2011.
- [83] M. Nikolić and A. Zečević, "Mašinsko učenje," 2019. [Online]. Available: <http://ml.matf.bg.ac.rs/readings/ml.pdf>. [Accessed: 06-Jun-2019].
- [84] T. G. Crainic, N. Ricciardi, and G. Storch, "Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems," *Transp. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 432–454, 2009.
- [85] T. Allen, J., Browne, M., Cherrett, "Survey Techniques in Urban Freight Transport Studies," *Transp. Rev.*, vol. 32, no. 3, pp. 287–311, 2012.
- [86] R. Gevaers, E. Van de Voorde, and T. Vanelander, "Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 125, pp. 398–411, 2014.
- [87] R. Dobbs, S. Smit, J. Remes, J. Manyika, C. Roxburgh, and A. Restrepo, "Urban world: Mapping the economic power of cities | McKinsey." [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/urbanization/urban-world-mapping-the-economic-power-of-cities>. [Accessed: 29-May-2019].
- [88] "Evolving E-Commerce Market Dynamics – Capgemini Worldwide." [Online]. Available: <https://www.capgemini.com/resources/evolving-e-commerce-market-dynamics/>. [Accessed: 29-May-2019].
- [89] M. Joerss, J. Schröder, F. Neuhaus, C. Klink, and F. Mann, "Parcel delivery: The future of last mile," *McKinsey & Company*, 2016. [Online]. Available: [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel transport and logistics/our insights/how customer demands are reshaping last mile delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx). [Accessed: 29-May-2019].
- [90] F. Malerba, *Poste Italiane: Innovation a Winning Strategy*. EGEA, 2012.
- [91] E. Demir, Y. Huang, S. Scholts, and T. Van Woensel, "A selected review on the negative externalities of the freight transportation : Modeling and pricing," *Transp. Res. Part E*, vol. 77, pp. 95–114, 2015.
- [92] "European Environment Agency. Greenhouse gas emission trends and projections in Europe."
- [93] E. Taniguchi, R. G. Thompson, and T. Yamada, "Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 39, pp. 3–18, 2012.
- [94] Đ. Dupljanin, T. Savković, S. Dumnić, M. Miličić, and M. Marčeta, "Istraživanje emisije CO2 kod vozila poštanskog saobraćaja na teritoriji Vojvodine," *Put i saobraćaj*, vol. LXIII, no. 2, pp. 49–53, 2017.
- [95] O. Kunze, "Replicators, Ground Drones and Crowd Logistics A Vision of Urban Logistics in the Year 2030," *Transp. Res. Procedia*, vol. 19, pp. 286–299, Jan. 2016.
- [96] M. Hassanalain and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges

-
- of drones: A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, May 2017.
- [97] V. Olivares, F. Cordova, J. M. Sepúlveda, and I. Derpich, "Modeling Internal Logistics by Using Drones on the Stage of Assembly of Products," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 55, pp. 1240–1249, Jan. 2015.
- [98] S. Brar, R. Rabbat, V. Raithatha, G. Runcie, and A. Yu, "Drones for Deliveries," 2015.
- [99] J. B. Edwards, A. C. McKinnon, and S. L. Cullinane, "Comparative analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 40, no. 1/2, pp. 103–123, 2010.
- [100] H. L. Lee, Y. Chen, B. Gillai, and S. Rammohan, "Technological Disruption and Innovation in Last-Mile Delivery," *Stanford Bus.*, no. June, pp. 1–26, 2016.
- [101] O. Kunze, "Replicators, Ground Drones and Crowd Logistics A Vision of Urban Logistics in the Year 2030," *Transp. Res. Procedia*, vol. 19, no. June, pp. 286–299, 2016.
- [102] S. Walia, U. Somarathna, R. Hendricks, A. Jackson, and , Nagendra, "Optimizing the Emergency Delivery of Medical Supplies with Unmanned Aircraft Vehicles," 2018.
- [103] Đ. Dupljanin, M. Marčeta, and S. Dumnić, "Advantages and disadvantages of autonomous vehicles in postal companies," in *Proc. of the 6th International conference "Towards a Humane City", Novi Sad, 26-27 October, 2017*, pp. 117–123.
- [104] "One Planet Mobility: A Journey towards a sustainable future," 2008.
- [105] Đ. Dupljanin, S. Dumnić, and P. Atanasković, "Uticaj novih tehnologija na kvalitet i pouzdanost dostave poštanskih pošiljaka," in *ICQDM, Prijedor, 28-29 Jun, 2017*, pp. 291–295.
- [106] S. Dumnić, Đ. Dupljanin, D. Čulibrk, and V. Božović, "Brz razvoj prototipa mobilne aplikacije u funkciji unapređenja poslovanja kurirskih sistema," in *16. Infoteh-Jahorina, 22-24 Mart, 2017*, vol. 16, pp. 377–340.
- [107] "SBS. Technological Disruption and Innovation in Last-Mile Delivery—White Paper; Stanford Business School, Stanford University: Stanford, CA, USA, 2016."
- [108] "Starship Technologies // European Business: Data protection? We need a feasible balance between business and privacy." [Online]. Available: <https://www.european-business.com/starship-technologies/interviews/data-protection-we-need-a-feasible-balance-between-business-and-privacy/>. [Accessed: 29-May-2019].
- [109] "The Robotics Ecosystem: Startup Funding By Category Broken Down In One Infographic," 2017. [Online]. Available: <https://www.cbinsights.com/research/robotics-deals-consumer-enterprise-medical/>. [Accessed: 29-May-2019].
- [110] "International Data Corporation. Worldwide Semiannual Robotics and Drones Spending Guide; International Data Corporation: Framingham, MA, USA, 2017."
- [111] M. Maurer, J. C Gerdes, B. Lenz, and H. Winner, *Autonomes Fahren Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. 2015.
- [112] S. Basu, A. Omotubora, M. Beeson, and C. Fox, "Legal framework for small autonomous agricultural robots," *AI Soc.*, May 2018.
- [113] "Службени гласник РС", ПРАВИЛНИК о беспилотним ваздухопловима. .
- [114] "Starship. Data Protection? We Need a Feasible Balance between Business and Privacy. Available online: <https://www.european-business.com/starship-technologies/interviews/data-protection-we-need-a-feasible-balance-between-business-and-privacy/> (accessed on 1." .
- [115] M. E. O. Kelly, "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities," vol. 2217, no. December 1987, 2017.
-

-
- [116] R. Rault and D. Trentesaux, “Artificial Intelligence, Autonomous Systems and Robotics: Legal Innovations,” Springer, Cham, 2018, pp. 1–9.
- [117] “<http://paperjs.org/>.” .
- [118] “<http://flask.pocoo.org/>.” .
- [119] “<https://www.heroku.com/>.” .
- [120] “<https://github.com/perrygeo/simanneal>.” .
- [121] “<https://pytorch.org/>.” .

КРАТКА БИОГРАФИЈА



Славиша Думнић рођен је 25.11.1984. године у Билећи. Интегрисане основне и мастер студије на Студијском програму *Поштански саобраћај и комуникације* завршио је на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду 2011. године, где је и одбранио мастер рад под називом *„Управљање технолошким процесима у циљу оптимизације рада поште 89230 Билећа”* и исте године уписује докторске академске на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду на Студијском програму *Саобраћај*. Запослен је на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду од 2011. године као истраживач приправник, 2013. године изабран је у звање асистента. Учествује на извођењу вежби из предмета: *Модели управљања поштанском мрежом, Управљање инвестицијама, Организација и менаџмент и Директни маркетинг*. У периоду од 2016. до 2018. године учествовао је на пројекту *„Информациони системи за подршку колаборативним курирским службама у градским срединама”* у оквиру билатералне сарадње између Републике Србије и Црне Горе. Тренутно је учесник једног пројекта финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Коаутор је једног рада објављеног у часопису међународног значаја.