

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Ивана Ђ. Јовановић

**ИЗБОР И ЛОКАЦИЈА СЕНЗОРА
НА ТРАНСПОРТНИМ МРЕЖАМА ПРИМЕНОМ
МЕТОДА ОПЕРАЦИОНИХ ИСТРАЖИВАЊА**

докторска дисертација

Београд, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORTATION AND
TRAFFIC ENGINEERING

Ivana Đ. Jovanović

**SENSORS SELECTION AND DEPLOYMENT
ON TRANSPORT NETWORKS USING
OPERATIONS RESEARCH METHODS**

Doctoral Dissertation

Belgrade 2020.

Ментор:

др Милица Шелмић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет.

Чланови комисије:

др Милица Шелмић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет;

др Јован Поповић, редовни професор,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет;

др Милош Николић, доцент,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет;

др Маријо Видас, доцент,
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет;

др Драгана Макајић Николић, ванредни професор,
Универзитет у Београду, Факултет организационих наука.

Датум одбране: _____

ИЗБОР И ЛОКАЦИЈА СЕНЗОРА НА ТРАНСПОРТНИМ МРЕЖАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДА ОПЕРАЦИОНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Сажетак: За правилну примену и функционисање концепта ИТС-а (Интелигентних транспортних система) неопходни су поуздани уређаји који обезбеђују податке о саобраћајним показатељима. Без правовремених података у реалном времену није могуће доносити адекватне управљачке одлуке. У том смислу, сензори саобраћајног тока, као део система детекције, кључни су део ИТС-а. Доносиоци одлука имају могућност избора типа сензора из широког опсега технологија од којих свака има своје предности, али и недостатке. Досадашња светска искуства показују да не постоји једна врста сензора која би задовољила све потребеса којима се суочавају ИТС. У дисертацији су анализирана два проблема у вези са сензорима саобраћајног тока.

Први проблем који је разматран је *развој методолошког оквира за рангирање и избор конкретне сензорске технологије* за потребе прикупљања података о саобраћајном току. Разматране су различите интересне групе и захтеви које они постављају пред систем детекције, анализиран је и агрегиран велики скуп релевантних критеријума који су укључени у процес доношења одлуке. Представљени модел заснован је на групном доношењу одлука (енгл. *Group decision making*) у оквиру Фази аналитичко хијерархијског процеса (енгл. *Fuzzy Analytic-Hierarchy Process* – Фази АНП) где је оцењивање аспеката одлуке, као и свих алтернативних сензорских технологија по свим критеријумима представљено троуглстим фази бројевима. Критеријуми су сврстани у четири групе: користи (енгл. *Benefits*), могућности (енгл. *Opportunities*), трошкови (енгл. *Costs*) и ризици (енгл. *Risks*), који чине тзв. *BOCR* аспекте одлуке. Предложени Фази АНП-*BOCR* модел је општи и може бити примењен на различитим транспортним мрежама и у различитим окружењима.

Методолошки оквир је тестиран на студији случаја одабира сензора за мерење брзине са становишта доносилаца одлуке из различитих интересних група. Фази оцене алтернатива по критеријумима су добијене из релевантне литературе, а оцене самих критеријума, као и *BOCR* аспеката одлуке су евалуиране од стране 13 експерата из ове области из три интересне групе. Као коначни резултат спровођења модела евалуације свакој сензорској технологији се придружује јединствена оцена која представља меру квалитета ове сензорске технологије у односу на то колико је прихватљив доносиоцу одлуке из одређене интересне групе.

Други проблем који је разматран у дисертацији је *одређивање најподобнијих локација сензора на деоници пута за потребе процене времена путовања*. Број инсталираних сензора утиче на тачност процењеног времена путовања. Што је више сензора постављено, процењени подаци ће бити тачнији. Са друге стране, потребна средства која треба уложити за набавку и одржавање инсталираних уређаја су ограничена, те је у интересу управљача пута да уложи што мање средстава, односно да постави што мањи број сензора.

Модел одређивања локација сензора који је преузет из литературе минимизира кумулативну релативну грешку процене времена путовања, и узима у обзир финансијска ограничења која се огледају у броју постављених сензора на деоници пута. Модел, такође, омогућава и да се установи које локације сензора су веома значајне са становишта оцене времена путовања, те је за њих неопходно често вршити проверу исправности како не би дошло до одступања оцењеног времена путовања од њене стварне вредности.

За решавање проблема лоцирања сензора на деоници пута у дисертацији је коришћена метахеуристика Оптимизација колонијом пчела (енгл. *Bee Colony Optimization - BCO*), и то њена варијанта заснована на побољшању решења, *BCO_i*. Проблем лоцирања сензора је у досадашњој литератури решаван конструктивном варијантом ове метахеуристике, *BCO_s*. *BCO_i* метахеуристика је оригинално развијена како би се превазишли неки неповољни

резултати добијени код неколико комбинаторних проблема на које је примењена конструктивна варијанта *BCO_s*. Бољи резултати *BCO_i* били су мотив за коришћење ове метахеуристике приликом решавања проблема одређивања локација сензора на транспортним мрежама.

Решење проблема је тестирано на реалним подацима студије случаја на деоници пута Е-763 у Републици Србији. Извршена је анализа утицаја броја постављених сензора и њихових локација на релативну грешку процене времена путовања. *BCO_i* метахеуристика је достигла довољно добра решења за прихватљиво време рада рачунара. Резултати добијени коришћењем *BCO_i* метахеуристике упоређени су потом са резултатима добијеним коришћењем метахеуристике Симулираног каљења (*Simulated annealing – SA*). У погледу брзине извршавања алгоритма *BCO_i* је надмашила алгоритам Симулираног каљења, док је у упоредивом времену рада алгоритма *BCO_i* постизала боља решења за проблеме већих димензија.

Кључне речи: Сензори саобраћајног тока, Вишеатрибутивно доношење одлука, Аналитичко-хијерархијски процес, Теорија фази скупова, метахеуристика, Оптимизација колонијом пчела

Научна област: Саобраћајно инжењерство

Ужа научна област: Операциона истраживања у саобраћају

УДК број:

SENSORS SELECTION AND DEPLOYMENT ON TRANSPORT NETWORKS USING OPERATIONS RESEARCH METHODS

Abstract: The proper ITS (Intelligent Transport Systems) concept implementation and operation requires reliable devices that provide traffic data. Without well-timed real-time data, it is not possible to make adequate management decisions. Traffic flow sensors, as part of the detection system that provide real-time data, are a key part of ITS. Decision makers have to choose the type of sensor from a wide range of technologies, each with its own advantages and disadvantages. World experience so far shows that there is no one type of sensor that meets all the needs of ITS. Two problems associated with traffic flow sensors have been analyzed in the dissertation.

The first problem discussed in the dissertation is the *development of a decision making framework for the sensor technology evaluation and selection for the purpose of collecting traffic flow data*. Various stakeholders were considered and the requirements they set for the detection system. Large set of relevant criteria included in the decision making process were analyzed and aggregated. The criteria were classified into four groups: Benefits, Opportunities, Costs and Risks, so called BOCR merits of the decision making. The model presented is based on Group decision making and Fuzzy Analytic-Hierarchy Process (Fuzzy AHP), where evaluation of hierarchy elements such as BOCR merits, different criteria, as well as sensor technology alternatives, were represented by triangular fuzzy numbers. The proposed Fuzzy AHP-BOCR model is general and can be applied across transport networks and environments.

The decision making framework was tested on a case study of selecting speed sensors from the perspective of decision makers from different stakeholders. Fuzzy criteria evaluations of the alternatives were obtained from the relevant literature, and the evaluations of the criteria themselves as well as the BOCR merits were evaluated by 13 experts in the field, from three stakeholders. As a final result of the implementation of the evaluation model, each sensor technology is associated with a unique rate that represents a quality measure of this sensor technology from the point of view of acceptability by the decision maker from a particular stakeholder.

Another problem discussed in the dissertation is the *determination of the most appropriate sensor locations on the road section for the purposes of estimating travel time*. The number of sensors installed affects the accuracy of the estimated travel time. The more sensors are placed, the more accurate the data will be. Otherwise, the resources required to purchase and maintain installed devices are limited, and it is in the interest of the road controller to invest as little as possible and to install as few sensors as possible.

The sensor location model taken from the literature minimizes the cumulative relative travel time estimation error, and takes into account the financial constraints reflected in the number of sensors placed in the road section. The model also makes it possible to identify which sensor locations are very significant from the point of view of the travel time estimation, and it is necessary for them to check the correctness frequently so that the estimated travel time does not deviate from its real value.

The Bee Colony Optimization (BCO) metaheuristic was used to solve the sensor location problem in the section of the dissertation, and its variant based on solution improvement, BCOi. The problem of sensor location has been addressed in the literature so far by the constructive variant of this metaheuristic, BCOc. BCOi metaheuristic was originally developed to overcome some unsatisfying

results obtained from several combinatorial problems to which the constructive variant BCOc was applied. Better BCOi results were a motivating factor for using this metaheuristic when solving sensor location issues on transportation networks.

The solution to the problem was tested on real case study data on a section of the E-763 road in the Republic of Serbia. The effect of the number of sensors and their locations on the relative travel time estimation error was analyzed. BCOi metaheuristics has come up with good enough solutions for acceptable computer running times. The results obtained using BCOi metaheuristics were then compared with the results obtained using the Simulated Annealing (SA) metaheuristics. In terms of the execution speed of the algorithm, BCOi outperformed the SA algorithm, while in comparable operating time the BCOi algorithm achieved better solutions to larger scale problems.

Keywords: Traffic flow sensors, Multiple Attribute Decision Making, Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Set Theory, metaheuristics, Bee Colony Optimization

Scientific field: Traffic Engineering

Scientific subfield: Operations research in Transport and Traffic Engineering

UDC number:

Мајки, Мами и Вањи.

Садржај

Садржај.....	i
Списак слика.....	v
Списак табела.....	vii
1. УВОД.....	1
1.1. Предмет и циљ истраживања	3
1.2. Основне хипотезе	4
1.3. Методе истраживања	4
1.4. Преглед садржаја дисертације	5
2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА	6
2.1. Проток возила	6
2.2. Брзина саобраћајног тока.....	7
2.3. Густина саобраћајног тока.....	9
2.4. Заузеће	10
2.5. Интервал слеђења возила	12
2.6. Растојање слеђења возила.....	12
2.7. Време путовања	13
2.8. Особености саобраћајног тока	14
2.8.1. Састав саобраћајног тока.....	14
2.8.2. Маса возила и осовинско оптерећење.....	17
3. СЕНЗОРИ ЗА МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА САОБРАЋАЈНОГ ТОКА.....	19
3.1. О терминологији.....	19
3.2. Развој детектора саобраћајног тока	20
3.3. Подела и примена сензорских технологија	21
3.4. Карактеристике сензорских технологија	24
3.4.1. Индуктивна петља.....	24
3.4.2. Магнетни сензори	26
3.4.2.1. Магнетометар	27
3.4.2.2. Магнетометар са завојницом	28
3.4.3. Пнеуматска цев.....	29
3.4.4. Пиезоелектрични сензори	30
3.4.5. Системи за мерење тежине возила у покрету.....	31
3.4.5.1. Савијајуће плоче.....	31
3.4.5.2. Пиезоелектрични WIM систем.....	32
3.4.5.3. Ћелије оптерећења	32

3.4.5.4. Капацитивне простирке	32
3.4.6. Инфрацрвени сензори	33
3.4.6.1. Пасивни инфрацрвени сензори	33
3.4.6.2. Активни инфрацрвени сензори	35
3.4.7. Микроталасни радарски сензори	36
3.4.7.1. Доплер радар са континуалним сигналом	37
3.4.7.2. Радар са фреквентно модулисаним сигналом	37
3.4.8. Ултразвучни сензори	39
3.4.9. Пасивни звучни сензори	40
3.7.10. Видео сензори	41
3.4.11. Пробна возила	43
3.4.11.1. Аутоматска локација возила	44
3.4.11.2. Аутоматска идентификација возила	45
3.4.11.3. <i>Global Positioning Systems (GPS)</i>	46
3.4.11.4. Мобилни телефон	48
3.4.12. Даљинско мерење	48
3.5. Предности и недостаци	49
4. МЕТОДОЛОГИЈА	54
4.1. Оптимизација колонијом пчела	54
4.1.1. Метакхеуристички алгоритми	54
4.1.2. Метакхеуристике инспирисане процесима у природи	55
4.1.3. Интелигенција групе	56
4.1.4. Алгоритми инспирисани понашањем пчела у природи	60
4.1.5. Оптимизација колонијом пчела	64
4.1.5.1. Две варијанте VCO алгоритма	65
4.1.5.1.1. <i>Конструктивна варијанта VCO алгоритма (VCOc)</i>	65
4.1.5.1.2. <i>Варијанта VCO алгоритма, заснована на побољшању решења (VCOi)</i>	67
4.1.5.2. Одређивање лојалности пчела	70
4.1.5.3. Процес регрутације	71
4.1.6. Симулирано каљење	72
4.2. Вишеатрибутивно доношење одлука	74
4.2.1. О вишекритеријумском и вишеатрибутивном доношењу одлука	74
4.2.2. Аналитичко хијерархијски процес	75
4.2.2.1. Хијерархијска структура	76
4.2.2.2. Поређење по паровима и фундаментална скала	77
4.2.2.3. Метода сопственог вектора	79
4.2.2.4. Мерење конзистентности - Индекс конзистентности	80
4.2.2.5. Одређивање ранга алтернатива	80
4.2.2.6. VOCR модели	81
4.2.2.7. Групно доношење одлука у АНР	82
4.2.2.7.1. <i>Агрегација вектора приоритета</i>	82
4.3. Теорија фази скупова	83

Изјава о ауторству.....	171
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.....	172
Изјава о коришћењу.....	173

Списак слика

Слика 2.1. Дисконтинуални скок преко ивице горње површи шиљак катастрофе	12
Слика 3.1. Адлеров сензор који се активира сиреном аутомобила	20
Слика 3.2. Облици кратких петљи	25
Слика 3.3. Облици дугачких петљи	25
Слика 3.4. Мерење брзине возила помоћу две индуктивне петље на познатом растојању ...	25
Слика 3.5. Промена линија магнетног поља Земље при појави возила	27
Слика 3.6. Пример инсталације магнетног сензора	27
Слика 3.7. Типична електрична шема магнетометра	28
Слика 3.8. Конфигурације постављања сонди магнетометра за потребе прикупљања различитих података о саобраћајном току	29
Слика 3.9. Конфигурација пнеуматске цеви на двотрачним и вишетрачним путевима	30
Слика 3.10. Типична конфигурација савијајућих плоча	32
Слика 3.11. Изглед кондензаторне простирке	33
Слика 3.12. Положај пасивног инфрацрвеног сензора у односу на осу коловоза	34
Слика 3.13. Емитована и рефлектована топлотна енергија возила	35
Слика 3.14. Емисија и пријем инфрацрвених зрака	35
Слика 3.15. Послати сигнали активног инфрацрвеног сензора	36
Слика 3.16. Функционисање микроталасног радара	37
Слика 3.17. Зависност фреквенција послатог и примљеног сигнала од времена	38
Слика 3.18. Мерење брзине возила кад постоје две зоне детекције	38
Слика 3.19. Постављање микроталасног радара поред саобраћајнице омогућава покривање више трака	39
Слика 3.20. Принцип рада пулсног ултразвучног сензора	39
Слика 3.21. Пасивни звучни сензор	40
Слика 3.22. Концепт обраде слике за потребе детекције, класификације и праћења возила ..	42
Слика 3.23. Заклањање у хоризонталној равни	43
Слика 3.24. Заклањање у вертикалној равни	43
Слика 3.25. Процес преноса информација код система за аутоматско лоцирање возила	45
Слика 3.26. Комуникација возило-пут код система за аутоматску идентификацију возила ..	46
Слика 3.27. Распоред <i>GPS</i> сателита у Земљиној орбити	46

Слика 3.28. Распоред сателита и референтне станице и комуникација код <i>DGPS</i> система ...	47
Слика 4.1. Примери колективног понашања друштвених животиња	57
Слика 4.2. Шематски приказ пчелињег плеса	61
Слика 4.3. Пример конструктивне варијанте након другог лета унапред	66
Слика 4.4. Пример конструктивне варијанте након другог лета уназад	67
Слика 4.5. Пример конструктивне варијанте након трећег лета унапред	67
Слика 4.6. Пример <i>BCO_i</i> варијанте након <i>j</i> -тог лета унапред.....	69
Слика 4.7. Лојалне и неопредељене пчеле	69
Слика 4.8. Могућа решења након <i>j</i> -тог лета уназад.....	69
Слика 4.9. Одређивање лојалности пчеле помоћу случајног броја.....	71
Слика 4.10. Процес регрутације неопредељене пчеле помоћу случајног броја.....	72
Слика 4.11. Пример једноставне <i>AHP</i> хијерархије одлучивања.....	76
Слика 4.12. Фази скупови A и B и фази број C	83
Слика 4.13. Фази број A	84
Слика 5.1. Пример <i>BOCR</i> структуре хијерархије.....	95
Слика 5.2. Хијерархијска структура <i>BOCR</i> модела избора сензорске технологије за мерење брзине	97
Слика 5.3. Поређење по паровима аспеката одлуке	100
Слика 5.4. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке <i>Користи</i>	103
Слика 5.5. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке <i>Могућности</i> ...	103
Слика 5.6. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке <i>Трошкови</i>	105
Слика 5.7. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке <i>Ризици</i>	105
Слика 5.8. Упоредни приказ вредности алтернатива по интересним групама	124
Слика 5.9. Редослед алтернатива за појединачне интересне групе.....	125
Слика 6.1. Деоница Велика Моштаница – Мељак	131
Слика 6.2. Зоне утицаја сензора на деоници пута.....	132
Слика 6.3. Дискретизација деонице пута	136
Слика 6.4. Пример добијања брзине на потенцијалној локацији сензора (тачка <i>D</i>)	136
Слика 6.5. Пример модификације комплетног решења	137
Слика 6.6. Провера лојалности пчела.....	138
Слика 6.7. Кумулативна релативна грешка по вожњи (а) вршни период смер <i>A</i> ; (б) вршни период смер <i>B</i> ; (в) ванвршни период смер <i>A</i> и (г) ванвршни период смер <i>B</i>	143
Слика 6.8. Стандардно одступање кумулативне релативне грешке по вожњи.....	144
Слика 6.9. Приказ прозора програма.....	145
Слика 6.10. Поређење <i>BCO_i</i> и <i>SA</i> (релативна кумулативна грешка по вожњи).....	146

Списак табела

Табела 2.1. Категорије возила	15
Табела 2.2. Класификација возила према <i>FHWA</i> подели.....	16
Табела 3.1. Врсте сензорских технологија према положају сензорског елемента	22
Табела 3.2. Примена сензорских технологија.....	23
Табела 3.3. Предности и недостаци сензорских технологија.....	49
Табела 4.1. Пример табеле одлучивања	75
Табела 4.2. Фундаментална Сатијева скала	77
Табела 4.3. Случајни индекс конзистентности <i>RI</i>	80
Табела 4.4. Фази Сатијева скала.....	86
Табела 5.1. Критеријуми вредновања сензорских технологија према <i>Jelušić</i> (2008)	93
Табела 5.2. Критеријуми за вредновање сензора брзине	96
Табела 5.3. Индекси конзистентности матрица поређења по паровима	106
Табела 5.4. Оцене сензорских технологија по критеријумима	106
Табела 5.5. Претварање вредности оцена (1, 1-2, 2, 2-3, 3) у Сатијеву скалу, где је 1 најлошија, а 3 најбоља оцена.....	107
Табела 5.6. Претварање вредности оцене (1, 1-2, 2, 2-3, 3) у Сатијеву скалу, где је 1 најбоља, а 3 најлошија оцена.....	108
Табела 5.7. Фази оцене алтернатива по критеријумима $w_{A_i}^{M_j}$	110
Табела 5.8. Фази поређење по паровима за <i>BOCR</i> аспекте одлуке, интересна група академска заједница	111
Табела 5.9. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Користи</i> , интересна група академска заједница.....	111
Табела 5.10. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Могућности</i> , интересна група академска заједница.....	111
Табела 5.11. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Трошкови</i> , интересна група академска заједница.....	112
Табела 5.12. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Ризици</i> , интересна група академска заједница.....	112
Табела 5.13. Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група академска заједница	113
Табела 5.14. Фази тежине алтернативе према <i>BOCR</i> аспектима одлуке $w_{A_i}^{M_j}$, интересна група академска заједница.....	113

Табела 5.15. Фази и <i>crisp</i> приоритет алтернатива, интересна група академска заједница	114
Табела 5.16. Фази поређење по паровима за <i>BOCR</i> аспекте одлуке, интересна група државна управа и локална самоуправа	114
Табела 5.17. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Користи</i> , интересна група државна управа и локална самоуправа	114
Табела 5.18. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Могућности</i> , интересна група државна управа и локална самоуправа	115
Табела 5.19. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Трошкови</i> , интересна група државна управа и локална самоуправа	115
Табела 5.20. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Ризици</i> , интересна група државна управа и локална самоуправа	115
Табела 5.21. Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група државна управа и локална самоуправа	116
Табела 5.22. Фази тежине алтернатива према <i>BOCR</i> аспектима одлуке $w_{A_i}^{M_j}$, интересна група државна управа и локална самоуправа	116
Табела 5.23. Фази и <i>crisp</i> приоритет алтернатива, интересна група државна управа и локална самоуправа.....	117
Табела 5.24. Фази поређење по паровима за <i>BOCR</i> аспекте одлуке, интересна група управљач пута	117
Табела 5.25. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Користи</i> , интересна група управљач пута	117
Табела 5.26. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Могућности</i> , интересна група управљач пута	118
Табела 5.27. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Трошкови</i> , интересна група управљач пута	118
Табела 5.28. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Ризици</i> , интересна група управљач пута	118
Табела 5.29. Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група управљач пута.....	119
Табела 5.30. Фази тежине алтернатива према <i>BOCR</i> аспектима одлуке $w_{A_i}^{M_j}$, интересна група управљач пута	119
Табела 5.31. Фази и <i>crisp</i> приоритет алтернатива, интересна група управљач пута	120
Табела 5.32. Фази поређење по паровима за <i>BOCR</i> аспекте одлуке, укупно	120
Табела 5.33. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Користи</i> , укупно	120
Табела 5.34. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Могућности</i> , укупно	121
Табела 5.35. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Трошкови</i> , укупно	121

Табела 5.36. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке <i>Ризици</i> , укупно	121
Табела 5.37. Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, укупно	122
Табела 5.38. Фази тежине алтернатива према <i>BOCR</i> аспектима одлуке $w_{A_i}^{M_j}$, укупно	122
Табела 5.39. Фази и <i>crisp</i> приоритет алтернатива, укупно	123
Табела 5.40. Упоредни преглед коначних вредности алтернатива за различите интересне групе	123
Табела 5.41. Редослед алтернатива за поједине интересне групе	124
Табела 6.1. Структура улазних података	135
Табела 6.2. Минимална кумулативна релативна грешка по вожњи за различите параметре <i>BCO_i</i> алгоритма	140
Табела 6.3. Тестирање параметара алгоритма Симулираног каљења, кумулативна релативна грешка оцене времена путовања по вожњи	141
Табела 6.4. Кумулативна релативна грешка по вожњи за десет пролазака кроз <i>BCO_i</i> алгоритам	142
Табела 6.5. Позиције сензора (<i>PL_i</i>) са највећом учесталашћу појављивања у решењима	144
Табела 6.6. Релативна кумулативна грешка по вожњи за алгоритме	146

1. УВОД

Последњих деценија присутан је велики пораст саобраћајних захтева, како у свету тако и код нас. У Републици Србији је, према подацима ЈП „Путеви Србије”¹ за период од 2006. до 2016. године, број возила која су прошла ауто-путевима с наплатом увећан за 34,1%, док је у истом периоду број километара путева са савременим коловозом повећан за 24,8%, а дужина ауто-путева у том периоду није промењена. Повећање потражње – саобраћајних захтева, у односу на ограничену изградњу нових путева – лимитирано повећање понуде, доводи до загушења. У прошлости је одговор на пораст саобраћајних захтева било повећање капацитета постојеће мреже путева.

Алтернатива скупој изградњи путева јесте примена стратегија које омогућавају ефикасније коришћење постојећих транспортних система. Ове стратегије укључене су у интелигентне транспортне системе (ИТС, енгл. *ITS – Intelligent Transportation Systems*). „Интелигентни транспортни системи представљају примену нових технологија у циљу смањења загушења, побољшања ефикасности, повећања материјалних уштеда, повећања безбедности и смањења негативних утицаја на окружење у свим видовима транспорта. Ови системи су састављени од великог броја физичких компоненти, као што су различите врсте сензора, камера и елемената сигнализације, чији је рад подржан различитим управљачким и телекомуникационим технологијама, саобраћајним и оптимизационим моделима са основном функцијом обезбеђења оперативног управљања и контроле функционисања саобраћајног система” (Vukanović, 2010).

Концепт ИТС-а заснива функционисање на подацима добијеним помоћу сензора саобраћајног тока, како би се обезбедила детекција возила, рано откривање инцидентних ситуација, обезбедило адаптивно управљање светлосним сигналимa у реалном времену, изводило аутоматско праћење путника, добили подаци за информисање путника, успоставили сервиси за комерцијална возила, за возила хитних служби, као и за архивирање података. Успех ИТС-а у великој мери зависи од правилног пројектовања, уградње и одржавања сензорске компоненте целокупног система. Осим тога, други стручњаци, као што планери и пројектанти, или службе за одржавање коловоза, имају потребу за тачним подацима о саобраћају.

Прикупљени подаци морају бити бројни, разноврсни и тачни. Ови комплексни захтеви представљају изазов за системе детекције. Различити делокрузи рада имају потребе за различитим типовима података. На пример, за потребе пројектовања путева и раскрсница потребни су краткорочни подаци о саобраћајном оптерећењу, укључујући класификацију возила. За планирање и прогнозу саобраћајних токова прикупљају се дугорочни подаци о саобраћају. За потребе пројектовања система светлосне сигнализације потребни су подаци на нивоу смерова кретања у петнаестоминутним интервалима. У циљу регулисања саобраћаја, контроле саобраћаја, пружања информација путницима, кључни су тренутни подаци о брзини, времену путовања, протоку, густини, локацијама инцидентних ситуација и загушења.

¹ Подаци преузети из Годишњих извештаја наплате путарине са сајта ЈП „Путеви Србије“ <http://www.putevi-srbije.rs/index.php/годишњи-извештај-наплате-путарине>, приступљено октобра 2018.

Користећи прикупљене податке могуће је одредити где се, у периодима вршних оптерећења, налазе уска грла и проценити величину проблема на овим локацијама. Оцењени фактори омогућавају да се изврши предикција експанзије обима проблема, као и где ће се појавити нове критичне локације. Слично, на основу постојећих података о протоцима, могуће је предвидети које се нежељене ситуације могу појавити, када се, за време вршних или ванвршних периода, догоди инцидентна ситуација.

Систем детекције окосница је управљања саобраћајем и прикупљања података о саобраћају. Без тачних и поузданих уређаја који обезбеђују податке у реалном времену, није могуће доносити правовремене и исправне одлуке. У пракси се за ове потребе користе сензори саобраћајног тока. Сензори који прикупљају податке о саобраћајном току генерално се могу поделити на интрузивне и неинтрузивне, где интрузивни захтевају физичке захвате на коловозу, или у њему, за време постављања и одржавања. Примери интрузивних уређаја су индуктивне петље и пнеуматске цеви. Неинтрузивни уређаји, у процесу уградње, имају мањи утицај на саобраћајни ток, јер није неопходно да се уграђују у коловоз, или на њега, већ се уграђују изнад или поред коловоза. Примери за овај тип сензора јесу видео уређаји, инфрацрвени или акустични уређаји.

Неинтрузивни системи постају све значајнији и заступљенији у практичној употреби, због све већих загушења на путевима у градској и ванградској мрежи. Неинтрузивни уређаји могу да се користе и на мостовима, на којима није могућа уградња индуктивних петљи. У прошлости, неке од технологија неинтрузивних уређаја биле су мање тачне у односу на широко заступљене индуктивне петље. То је један од разлога због кога управљачи пута нису стекли искуство с овим уређајима, већ су користили претходно у пракси доказане уређаје.

Досадашња светска искуства система детекције показују да не постоји једна врста сензора која би задовољила све потребе транспортних захтева: сви типови сензора имају предности, али и недостатке. Технологије неинтрузивних система временом се унапређују, те ће у будућности постати све више трошковно конкурентне и довољно прецизне за специфичне примене. Индуктивне петље ће, упркос томе, остати примарна технологија још неко време, нарочито на локацијама на којима је тачност података критична при неповољним временским условима или условима осветљења.

Како доносиоци одлука имају широк избор сензорских технологија, морају бити упознати с њиховим карактеристикама, трошковима и другим предностима и недостацима појединих алтернатива, како би могли да донесу правилну одлуку коју сензорску технологију да одаберу.

У литератури постоје опсежна истраживања о карактеристикама појединих сензорских технологија, као и неке смернице за избор када су појединачне примене у питању, али свеобухватне, опште, методологије за избор и лоцирање изабране сензорске технологије применом метода Операционих истраживања, не постоје.

У том смислу, избор адекватног сензора захтева препознавање потреба њихових корисника и проучавање карактеристика (технолошких решења и функција) свих расположивих технологија. Свеобухватни опис различитих сензора и упоредни приказ њихових предности и недостатака детаљно су дати у радовима аутора: *Mimbella* и *Klein* (2000); *Klein* (2001); *Martin* и *cap.* (2003); *Klein* и *cap.* (2006); *Jelušić* (2008); *Jelušić* и *cap.* (2009).

Различита технолошка решења и функције које поседују сензори за мерење параметара саобраћајног тока указују на постојање неколико аспеката за доносиоца одлуке. Тако се ови аспекти могу сврстати у четири групе: предности – користи (енгл. *benefit* – *B*), мане – трошкови (енгл. *cost* – *C*), али и потенцијалне користи – могућности (енгл. *opportunity* – *O*) и евентуални

потенцијални трошкови и други ризици (енгл. *risk* – *R*). Прегледом релевантне литературе (*Mimbella* и *Klein*, 2000; *Klein*, 2001; *Martin* и сар, 2003; *Jelušić*, 2008; *Jelušić* и сар, 2009) може се закључити да доносиоци одлуке често користе лингвистичке променљиве или квалитативне вредности за евалуацију критеријума, али и за оцену алтернатива по различитим критеријумима. Како би се непрецизност и рачунање речима инкорпорирали у методолошки оквир, у дисертацији је представљен модел Фази вишекритеријумске анализе (Фази *AHP*) где се оцењивање свих елемената по свим критеријумима представља троугластим фази бројевима. С обзиром на то да постављање сензора на транспортној мрежи представља стратешки проблем који подразумева и велику инвестицију, логично је да у процесу одлучивања учествује више доносилаца одлуке који могу бити из различитих интересних група, попут управљача пута, академске институције, надлежних органа државне управе или локалне самоуправе, итд. Из свега наведеног намеће се мотивација за развој иновативног методолошког оквира за избор сензора за мерење параметара саобраћајног тока заснованог на групној Фази *AHP-BOCR* методи.

Последњих година потреба за сензорима на транспортним мрежама све више расте због повећаног обима саобраћаја. Један од циљева истраживања у оквиру докторске дисертације јесте развој методологије за избор најподобнијих локација сензора на транспортним мрежама. Наведени проблем спада у класу Теорије локације и има карактеристику да је *NP* тежак проблем. Из тог разлога је неопходно да се решава техникама Операционих истраживања, у које спада и метахеуристика Оптимизација колонијом пчела (*Lučić* и *Teodorović*, 2001, 2002, 2003). Бројни аутори решавали су проблем локације сензора на мрежи применом неке од хеуристичких техника (*Ban* и сар, 2009; *Chan* и сар, 2002; *Danczyk* и *Lio*, 2011; *Edara* и сар, 2011; *Kim*, 2011). Међутим, када је реч о Оптимизацији колонијом пчела, у досадашњој литератури постојао је само приступ који се ослања на конструктивну варијанту алгоритма, у којој вештачке пчеле итеративно граде решење (*Teodorović* и сар, 2010; *Шелмић*, 2011). Други концепт, развијен у раду (*Davidović* и сар, 2011) подразумева да се крене од случајно генерисаног коначног решења, па се кроз итерације то решење поправља. Овај концепт ће бити примењен у дисертацији и тестиран на примеру локације сензора на делу транспортне мреже и то на реалним подацима прикупљеним на Ибарској магистрали (државни пут ИБ22) у Републици Србији. Охрабрујући резултати добијени при решавању овог проблема објављени су у раду (*Jovanović* и сар, 2019) и уједно овај рад представља и главни резултат који је до сада проистекао из истраживања на дисертацији.

1.1. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања докторске дисертације јесу проблеми избора одговарајуће сензорске технологије и одређивања најподобнијих локација сензора на транспортним мрежама.

- Први проблем који је разматран у дисертацији јесте развој алата за доношење одлуке о избору конкретне сензорске технологије за потребе прикупљања података о саобраћајном току. Разматране су различите интересне групе и захтеви које постављају пред систем детекције. У дисертацији је анализиран и агрегиран велики скуп релевантних критеријума који су укључени у процес доношења одлуке. Једном када се донесе одлука о томе коју сензорску технологију треба одабрати, поставља се питање на којим би локацијама требало поставити изабрану врсту сензора.
- Други проблем који је разматран у дисертацији је одређивање најподобнијих локација сензора на деоници пута за потребе процене времена путовања, једног од основних параметара саобраћајног тока. Број инсталираних сензора утиче на тачност добијених података. Што је више сензора постављено, подаци о процени времена путовања ће бити тачнији. Са друге стране, потребна средства која треба уложити за набавку и

одржавање инсталираних уређаја су ограничена, те је у интересу управљача пута да уложи што мање средстава, односно да постави што мањи број сензора.

Научни циљеви докторске дисертације могу се анализирати кроз два аспекта:

- Развој општег методолошког оквира за подршку одлучивању приликом избора сензорске технологије за потребе прикупљања података о саобраћајном току, који би узео у обзир становишта бројних интересних група и укључио различите, релевантне критеријуме за избор сензора;
- Формирање модела за избор најподобнијих локација сензора на транспортним мрежама, чији је критеријум минимизација грешке у процени времена путовања, уз истовремену тежњу да се минимизирају улагања у постављање и одржавање сензора.

1.2. Основне хипотезе

Докторска дисертација има четири полазне хипотезе:

- У постојећој пракси не постоји једна сензорска технологија која је оптимална по више постављених критеријума. Дефинисањем одговарајућег општег методолошког оквира могао би се формирати систем за подршку одлучивању за евалуацију и избор сензорске технологије за прикупљање података о саобраћајном току.
- Одабир локације сензора веома је значајан проблем, с обзиром на то да је у питању стратешка одлука, која изискује велика улагања и прилагођавања постојећим техничко-експлоатационим карактеристикама саобраћајне деонице, као и урбанистичким, правним, економским и организационим ограничењима.
- Број и распоред сензора на транспортним мрежама утиче на грешку у процени времена путовања на деоници пута. Одређивањем оптималних или најподобнијих локација сензора на мрежи могуће је смањити грешку у процени времена путовања.
- Метакхеуристика Оптимизација колонијом пчела може се успешно користити као универзални алат за решавање читавог низа саобраћајних и других комбинаторних проблема.

1.3. Методе истраживања

Током истраживања и решавања постављених проблема коришћено је више научних метода. У сврху прикупљања података о особинама сензора коришћена је метода компилације из више различитих извора (монографије, књиге, стручни и научни радови, извештаји са пројеката и др). За добијање информација о важностима појединачних критеријума коришћена је метода анкете.

За формулисање и решавање оба проблема: евалуације и избора врсте сензорске технологије и лоцирања сензора на транспортним мрежама коришћене су методе Операционих истраживања, као што су Вишеатрибутивно одлучивање, Аналитичко хијерархијски процес, *BOCR* (*Benefit, Opportunity, Cost, Risk*) модели, Фази логика, метакхеуристика Оптимизација колонијом пчела, метакхеуристика Симулирано каљење.

У циљу тестирања проблема евалуације и избора сензорске технологије, за испитивање конзистентности оцена добијених од анкетираних стручњака коришћен је програм *SuperDecisions*. За потребе тестирања и имплементације предложене методе за одређивање локација сензора развијени су програмски кодови у програмском језику *Java* (едитор *NetBeans* 8.2).

1.4. Преглед садржаја дисертације

Дисертација је структурирана тако да одговори на постављене циљеве истраживања. Подељена је на седам поглавља.

У првом, уводном поглављу, описани су мотиви за избор теме и дефинисане четири полазне хипотезе, предмет и циљеви истраживања, као и методе истраживања које су коришћене у дисертацији.

У другом поглављу детаљно су дефинисани основни параметри као и одабране особности саобраћајног тока и описане њихове међусобне релације. Дефинисани су проток возила, брзина саобраћајног тока, густина саобраћајног тока, заузеће, интервал и растојање слеђења, време путовања, састав саобраћајног тока, као и маса возила.

Треће поглавље бави се технологијама сензора за прикупљање података о саобраћајном току. Након дискусије о терминологији и историји развоја детектора саобраћајног тока дата је подела сензорских технологија и детаљно описане карактеристике сваке од технологија доступних на тржишту. Такође су описане и предности и недостаци сваке од поменутих сензорских технологија.

У четвртном поглављу описане су све технике Операционих истраживања које су коришћене у оквиру дисертације. Дефинисане су метахеуристике и њихова подела, описана Интелигенција групе, алгоритми инспирисани понашањем пчела у природи и детаљно описана Оптимизација колонијом пчела, као и алгоритам Симулираног каљења. Такође је описан Аналитичко хијерархијски процес као поступак Вишеатрибутивног доношења одлука, дате су основе теорије Фази скупова и Фази аритметике и описан Фази аналитичко хијерархијски процес, као надградња Аналитичко хијерархијског процеса.

У петом поглављу развијен је општи методолошки оквир као систем за подршку одлучивању за евалуацију и избор сензорске технологије за прикупљање података о саобраћајном току на транспортним мрежама. Методолошки оквир тестиран је на студији случаја одабира сензора за мерење брзине, са становишта доносилаца одлуке из различитих интересних група.

У шестом поглављу представљен је модел одређивања најподобнијих локација сензора, коришћењем метахеуристике Оптимизација колонијом пчела. Предложени модел минимизира грешку у процени времена путовања, узимајући у обзир ограничења расположивог капитала. За тестирање и нумеричку процену модела спроведена је студија случаја о карактеристикама саобраћајног тока на деоници Ибарске магистрале у околини Београда. Резултати добијени метахеуристиком Оптимизација колонијом пчела упоређени су с резултатима који се добијају коришћењем метахеуристике Симулираног каљења.

У последњем, седмом, поглављу дата су закључна разматрања, изложени главни доприноси докторске дисертације, као и правци будућих истраживања.

2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ САОБРАЋАЈНОГ ТОКА

Саобраћајни ток дефинише се (Kuzović, 1987) као истовремено кретање више возила у одређеном поретку, на деоници пута.

Основни (фундаментални) параметри саобраћајног тока јесу (Kuzović, 1987): проток возила, густина саобраћајног тока, брзина саобраћајног тока (средња просторна брзина, средња временска брзина), време путовања, јединично време путовања, интервал слеђења возила, растојање слеђења возила.

Параметри се могу поделити на микроскопске и макроскопске, у зависности од тога да ли се баве појединачним возилима, или групом возила, односно саобраћајним током.

Неки од параметара и особености саобраћајног тока биће детаљније описани у наставку.

2.1. Проток возила

Проток возила q дефинише се као број возила који прође кроз посматрани пресек пута у јединици времена. Јединице времена могу бити различите, па су тако уобичајене јединице у којима се изражава проток: воз/час, воз/24 часа, воз/дан, воз/15 минута. Неке од уобичајених ознака протока возила су и ПГДС (просечан годишњи дневни саобраћај – од енгл. *AADT* – *Average Annual Daily Traffic*) који се изражава у јединицама [воз/дан], ПДС (просечан дневни саобраћај – од енгл. *ADT* – *Average Daily Traffic*) [воз/дан], ДС (дневни саобраћај – од енгл. *DT* – *Daily Traffic*) [воз/дан] и q [воз/час]. Проток возила је једна од основних макроскопских карактеристика саобраћајног тока. Проток се може представити као у једначини:

$$q = \frac{N}{T} \quad (2.1)$$

где је N број возила, а T временски интервал.

Амерички приручник (*Highway Capacity Manual (HCM)*, 2000) дефинише проток кроз две величине:

- волумен протока (енгл. *volume*) – укупан број возила која прођу кроз тачку или деоницу, траке или пута, током одређеног временског интервала. Означава се са V , а изражава се у годишњим, дневним, сатним или периодима мањим од једног сата.
- часовни проток (енгл. *flow rate*) – еквивалентни часовни проток возила која прођу кроз тачку или деоницу, траке или пута, током одређеног временског интервала мањег од једног сата, обично 15 минута. Часовни проток добија се експанзијом вредности са 15-минутног интервала на читав сат.

ПГДС је укупан проток на деоници пута у периоду од годину дана, подељен са 365 дана. То је репрезент за проток типичног дана у години.

ПДС је укупан проток у датом временском периоду (цео број дана) који је већи од једног дана, а мањи од једне године, подељен са бројем дана у посматраном периоду.

Проток возила уобичајено се мери на пресеку саобраћајнице, тако што се возила пребројавају. Широки спектар технологија може да се користи за бројање возила. Неке сензорске технологије детектују свако појединачно возило које прође, док друге технологије не препознају само возило, већ њихове осовине. Ако технологија препознаје возила, одмах се добијају подаци о протоку, док је, ако технологија препознаје осовине, потребно применити факторе корекције. Према (*Traffic Monitoring Guide*, 2016) технологије које препознају возила јесу индуктивне петље, магнетни сензори, видео сензори, акустични, ултразвучни, микроталасни радар, ласерски радар, пасивни инфрацрвени сензори; док су технологије које препознају осовине инфрацрвени сензори, већина ласерских сензора, пиезоелектрични, кварцни сензори, оптички сензори, капацитивне простирке, савијајуће плоче, хелије оптерећења, контактни сензори (нпр. пнеуматске цеви).

2.2. Брзина саобраћајног тока

Брзина возила дефинише се као пређени пут у јединици времена. Математички, брзина (v – од енгл. *velocity*) израчунава се једначином $v=s/t$, где је v брзина возила у $[m/s]$, d је пређени пут у метрима $[m]$, а време t у секундама $[s]$. Брзина возила је микроскопска карактеристика саобраћајног тока.

У општем случају, брзина саобраћајног тока дефинише се као средња (просечна) вредност брзина свих возила која учествују у саобраћајном току. Брзина саобраћајног тока једна је од основних макроскопских карактеристика саобраћајног тока.

Брзине појединачних возила варирају у зависности од времена и простора. Како би се представиле обе ове промене, у литератури се дефинишу различити начини израчунавања просечне брзине скупа возила.

Први начин израчунавања је налажење аритметичке средине брзина појединачних возила, измерених на пресеку пута.

$$\bar{v}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (2.2)$$

Овако израчуната величина назива се *средња временска брзина* (\bar{v}_t), јер се просек посматра у односу на временске промене. Вредност v_i представља брзину возила i , а N је укупан број возила ($i = 1, \dots, N$) који је у датом временском периоду прошао кроз посматрани пресек пута. Средња временска брзина просторно је везана за пресек пута, а временски за интервал посматрања.

Други термин који се користи у литератури јесте *средња просторна брзина*. Постоје два основна типа дефиниције. Без обзира на то о којој дефиницији је реч, средња просторна брзина просторно је везана за деоницу пута, а временски за тренутак посматрања.

Прва дефинише средњу просторну брзину као аритметичку средину тренутних брзина свих возила на посматраној деоници пута. Може се представити формулом као и средња временска брзина:

$$\bar{v}_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j \quad (2.3)$$

али су овде v_j појединачне брзине возила j која се у датом тренутку налазе на посматраној деоници пута, а N је укупан број возила која се у датом тренутку налазе на посматраној деоници пута.

Друга дефиниција заснована је на просечном времену за прелазак одређене удаљености, односно дужине посматране деонице, D :

$$\bar{v}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} \quad (2.4)$$

где је t_i време да возило i пређе дужину D .

Неки аутори, почев од *Wardrop* (1952), показују да је ова једначина еквивалентна употреби хармонијске средине појединачних брзина возила, као у једначини:

$$\bar{v}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D}{v_i}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \quad (2.5)$$

Овде је претпостављено да се возила крећу униформним брзинама на целој дужини деонице.

Wardrop (1952) је установио зависност између средње просторне и средње временске брзине:

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \frac{\sigma_s^2}{\bar{v}_s} \quad (2.6)$$

где је σ_s^2 квадрат стандардног одступања средње просторне брзине, дефинисан као $\sum k_i (v_i - \bar{v}_s)^2 / K$, k_i је густина подтока i , а K је густина укупног тока. У општем случају, ако се подаци x_1, x_2, \dots, x_n појављују с релативним фреквенцијама f_1, f_2, \dots, f_n , а $\sum_{i=1}^n f_i = N$ обим узорка, тада је аритметичка средина $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i f_i$, а квадрат стандардног одступања је $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2$.

Брзина је један од уобичајених параметара који се прикупљају помоћу сензора. Већина сензорских технологија има могућност мерења брзине као рутинску функцију. Типично, за мерење брзине користе се следеће сензорске технологије: индуктивна петља (две петље за прецизно мерење, а једна за процену брзине преко заузећа и броја возила), магнетни (потребна су два уређаја), пнеуматска цев (два уређаја), поједини пасивни инфрацрвени, активни инфрацрвени, микроталасни радар (доплер), поједини пасивни акустични, као и видео сензори.

2.3. Густина саобраћајног тока

Густина саобраћајног тока једна је од основних макроскопских карактеристика саобраћајног тока. Дефинише се као број возила по јединици дужине саобраћајнице. Ознаке које се користе су g од густина, или k од *concentration* и d од *density* у англосаксонској литератури. Као и код других основних релација у теорији саобраћајног тока, густина се посматра у једном смеру и једном низу возила. Уобичајене јединице су [воз/ km] или [воз/миља].

$$g = \frac{N}{S} \quad (2.7)$$

где је N број возила, а S дужина деонице у [km].

У прошлости се израз концентрација користио као синоним за густину саобраћајног тока (*Gerlough* и *Huber*, 1975). Неки аутори (*Hall*, 1992) сматрају да је израз концентрација шири појам који обухвата како густину, тако и заузеће. Он објашњава густину као концентрацију у простору, а заузеће као концентрацију у времену, за исти саобраћајни ток.

Густина је веома важан параметар за услове непрекинутог тока, јер карактерише квалитет саобраћајног тока. Она описује растојање између возила, једних у односу на друге, и одражава слободу маневрисања унутар саобраћајног тока. Из ових разлога битно је тачно измерити или израчунати вредности густине саобраћајног тока.

Густина се може мерити само дуж саобраћајнице, просторним мерењем. Мерење густине на терену је веома компликовано јер захтева постојање тачке за фотографисање, видео снимање или осматрање веће дужине саобраћајнице. Ово често није могуће остварити, и тада се за мерење користе подаци на пресеку. Ако је доступно само мерење на пресеку, густину је потребно израчунати. Постоје два начина за израчунавање густине саобраћајног тока. Један користи брзину и проток, а други заузеће.

Поступак израчунавања густине помоћу брзине и протока заснива се на основној релацији између ова два параметра.

$$g = \frac{q}{\bar{v}_s} \quad (2.8)$$

Ова једначина представља основну релацију теорије саобраћајног тока, коју је први извео *Wardrop* (1952). Он је претпоставио да се саобраћајни ток састоји од низа подтокова у којима се „сва возила крећу истим брзинама и формирају случајан низ”. *Hall* (1992) објашњава да, имајући у виду да су све брзине возила константне и једнаке међу собом, растојања између возила ће такође остати константна, а случајност се односи на вредности растојања између возила (параметар растојање слеђења описан је у поглављу 2.6). Ова претпоставка важи само у условима засићеног тока, када се сва возила крећу приближним брзинама. Претпоставка о константном растојању слеђења није тачна у већини опсега протока, а постаје тачнија с порастом протока. У условима загушења, ни претпоставка једнаких брзина такође није испуњена. Имајући све ово у виду, тачност израчунавања густине саобраћајног тока из протока и брзине може бити задовољавајућа само у једном делу опсега услова у саобраћајном току.

Имајући у виду да други начин израчунавања густине користи заузеће, овај поступак је објашњен у поглављу 2.4.

Према *Hall* (1992) већина аутора даје предност густини када је реч о теоријским истраживањима, док мањина сматра да заузеће треба да преузме примат над густином у

теорији саобраћајног тока. Два су основна разлога за веће коришћење заузећа уместо густине. Први је потреба за већом повезаношћу теоријских и практичних истраживања на ауто-путевима. Ако управљање саобраћајем на ауто-путу у великом обиму користи променљиве које теорија занемарује, тада је професија на губитку. Други разлог је што густина, као број возила по дужини пута, занемарује дужину возила и састав саобраћајног тока. Заузеће, са друге стране, зависи од оба ова параметра, што га чини поузданијом мером удела пута која је заузета возилима. Постоје и добри разлози за наставак употребе густине у теоријским истраживањима. *Hall* (1992) наводи аналогију с убрзањем у Њутновој механици. У Њутново време убрзање је било немогуће директно измерити, а и индиректно мерење било је компликовано. Он је ипак засновао теорију механике баш на убрзању као једној од основних променљивих. *Hall* (1992) закључује да ће и даље бити аналитичара који користе било заузеће или густину, и да је ово расправа која неће бити решена.

2.4. Заузеће

Заузеће представља удео времена када је детектор заузет возилом, према укупном времену, и једна је од макроскопских карактеристика саобраћајног тока. Најчешћа ознака која се среће у литератури је O (од енгл. *occupancy*), а изражава се у процентима [%].

Hall (1992) заузеће назива временском концентрацијом, и подвлачи да су је *Gerlough* и *Huber* (1975) називали „оценом за густину”, док је *May* (1990) назива „заменом за густину”. И у приручнику *HCM 2000* пише да се „заузеће често користи као замена за густину, јер се лакше мери”.

Заузеће се дефинише за одређени временски интервал T , и представља однос збира времена када се возила налазе над детектором и у њему стварају побуду, и временског интервала T . За свако појединачно возило побуда на детектору траје од тренутка када предњи крај возила прође кроз почетак зоне детекције до тренутка када задњи крај возила прође крај зоне детекције. Време побуде детектора одређује брзина возила, v_i , његова дужина, L_i , као и дужина детектора, d .

Заузеће се израчунава као у једначини (*Hall*, 1992):

$$O = \frac{\sum_i \frac{(L_i + d)}{v_i}}{T} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + \frac{d}{T} \sum_i \frac{1}{v_i} \quad (2.9)$$

Ако се други сабирак помножи и подели са бројем возила N , и замене једначине (2.1) и (2.5) добија се:

$$O = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \frac{N}{T} \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_i} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \frac{q}{\bar{v}_s} \quad (2.10)$$

Даље, имајући у виду основну једначину теорије саобраћајног тока (2.8) добија се:

$$O = \frac{1}{T} \sum_i \frac{L_i}{v_i} + d \cdot g \quad (2.11)$$

Време T може да се напише као збир појединачних интервала слеђења h_i (овај параметар дефинисан је у поглављу 2.5):

$$T = \sum_{i=1}^N h_i \quad (2.12)$$

Када се ово уврсти у израз за заузеће (2.11), и бројилац и именилац поделе са бројем возила N , добија се:

$$O = \frac{\sum_i \frac{L_i}{v_i}}{T} + d \cdot g = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\frac{1}{N} \sum_i h_i} + d \cdot g = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\bar{h}} + d \cdot g \quad (2.13)$$

Уведена је претпоставка да су дужине свих возила једнаке L (Athol, 1965; Hall, 1992) чиме се израз за заузеће додатно поједностављује:

$$O = \frac{\frac{1}{N} \sum_i \frac{L_i}{v_i}}{\bar{h}} + d \cdot g = \frac{1}{\bar{h}} L \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{v_i} + d \cdot g = L \frac{q}{\bar{v}_s} + d \cdot g = (L + d)g \quad (2.14)$$

Како је за једну локацију детектора вредност d константна, то значи да је, под претпоставком једнаке дужине свих возила, заузеће константни умножак густине.

$$O = (L + d)g \quad (2.15)$$

Последња добијена формула представља основу за други начин израчунавања густине на основу мерења на пресеку, који је поменут у глави 2.3:

$$g = \frac{O}{(L + d)} \quad (2.16)$$

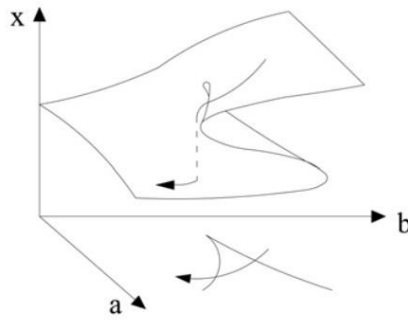
Замењујући још једном основну релацију теорије тока (2.8) у једначину за заузеће, могуће је изразити и средњу просторну брзину:

$$\bar{v}_s = \frac{q \cdot (L + d)}{O} \quad (2.17)$$

Корисно је напоменути да рачунање густине и средње просторне брзине преко заузећа (једначине 2.16 и 2.17) важе и у условима ако су дужине возила различите, а брзине на посматраној деоници константне, али би тада L требало тумачити као средњу дужину возила.

С друге стране, ако се и дужине и брзине разликују, тада неће бити успостављена оваква једноставна веза између брзине, протока и заузећа. Успостављање везе између ове три променљиве могуће је, користећи новије моделе теорије саобраћајног тока који су засновани на теорији катастрофе. Неки од њих објашњени су у радовима (Hall и Persaud, 1989) и (Pushkar и сар, 1994).

Теорија катастрофе приказује тродимензионалну везу брзине, протока и заузећа, која се приказује као површ слична оној на слици 2.1. Назив „катастрофа” мотивисан је чињеницом да се променом вредности параметара, стање система може довести у стање на ивици горњег дела површи, након чега дисконтинуално пада на доњу површ (Кузмановић и сар, 2013).



Слика 2.1. Дисконтинуални скок преко ивице горње површи шиљак катастрофе (извор: Кузмановић и сар, 2013).

Многе сензорске технологије могу да дају податке о заузећу. Почев од једноставних индуктивних петљи, па до софистицираних видео сензора. Ове модерне технологије „имитирају” петљу, снимајући одређени део коловоза, и пружају могућност добијања података о заузећу траке, и о проценту времена у ком возило заузима зону детекције.

2.5. Интервал слеђења возила

Интервал слеђења возила представља време између проласка истог дела два узастопна возила (нпр. чела, краја, предње или задње осовине) кроз замишљени пресек пута, и микроскопска је карактеристика саобраћајног тока. Најчешће коришћени симбол је t_h (t од енгл. *time*, h од енгл. *headway* растојање слеђења или време слеђења), док у англосаксонској литератури налазимо и h од енгл. *headway*, јер се овај израз упоредо употребљава како за интервал, тако и за растојање слеђења (Fišer-Popović и сар, 1992; HCM, 2000). Јединица у којој се изражава интервал слеђења је s (секунда) или $s/\text{воз}$.

Интервал слеђења се, осим за појединачна возила, може рачунати и као средња вредност за N возила током времена T на једном пресеку, као и средња вредност ових просека на m различитих пресека, што чини интервал слеђења на деоници (Kuzović, 1987).

Уређаји за надзор саобраћаја који бележе тренутке проласка појединачних возила или осовина појединачних возила могу се користити за мерење, како интервала, тако и растојања слеђења возила. Ови показатељи су корисни за специфичне анализе саобраћајног тока, али се уобичајено не прикупљају, већ се подаци добијају у оквиру посебних студија. Уређаји за мерење масе возила у покрету (енгл. *weigh-in-motion*) прикупљају податке о тренуцима наилазака возила, па се и они могу користити за процену интервала слеђења (Traffic Monitoring Guide, 2016). О овим уређајима ће бити више речи у поглављу 2.9.

2.6. Растојање слеђења возила

Растојање слеђења возила представља раздаљину између истих тачака (нпр. чела, краја, предње или задње осовине) два узастопна возила. Уобичајено се обележава са s_h (s од енгл. *space*, h од енгл. *headway* растојање слеђења или време слеђења), као и s (од енгл. *spacing*) или h (од енгл. *headway*). Јединица у којој се изражава растојање слеђења је m (метар) или $m/\text{воз}$. Као и претходна карактеристика, и ова је микроскопска, јер се односи на појединачне парове возила у саобраћајном току.

Растојање слеђења, осим за појединачна возила, може се рачунати и као средња вредност за N возила која су се у тренутку t нашла на посматраној деоници пута, као и средња вредност ових

просека за t различитих тренутака на посматраном одсеку, у периоду времена T , што чини растојање слеђења на деоници (Kuzović, 1987). Овако израчунате просечне вредности представљају макроскопске карактеристике.

Растојање слеђења може се одредити директним мерењем растојања између заједничких тачака два узастопна возила (нпр. два чела возила). Ово обично захтева сложене технике фотографисања из ваздуха, па се растојање слеђења чешће израчунава помоћу других показатеља који се лакше мере. Интервал слеђења једноставно се мери штоперицом, тако што се бележе моменти проласка возила кроз посматрани пресек.

Просечно растојање слеђења возила у саобраћајном току s_h у вези је са густином саобраћајног тока g као у релацији 2.18 (НСМ, 2000):

$$g \left[\frac{\text{ВОЗ}}{\text{km}} \right] = \frac{1000}{s_h \left[\frac{\text{m}}{\text{ВОЗ}} \right]} \quad (2.18)$$

Однос између просечног интервала слеђења, t_h и просечног растојања слеђења, s_h зависи од брзине саобраћајног тока, v , као у једначини 2.19 (НСМ, 2000):

$$t_h \left[\frac{\text{s}}{\text{ВОЗ}} \right] = \frac{s_h \left[\frac{\text{m}}{\text{ВОЗ}} \right]}{v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \quad (2.19)$$

Овај однос важи и ако су у питању појединачни интервали слеђења и растојања слеђења. Брзина која фигурише у релацији тада је једнака брзини другог возила из посматраног пара возила.

Проток, q , је такође могуће изразити преко просечног интервала слеђења t_h (НСМ, 2000):

$$q \left[\frac{\text{ВОЗ}}{\text{h}} \right] = \frac{3600}{t_h \left[\frac{\text{s}}{\text{ВОЗ}} \right]} \quad (2.20)$$

Као и када је реч о интервалу слеђења, уређаји за надзор саобраћаја који бележе тренутке проласка појединачних возила или осовина појединачних возила могу се користити за мерење растојања слеђења возила. Растојање слеђења корисно је за специфичне анализе саобраћајног тока па се ови подаци добијају само у оквиру посебних студија.

2.7. Време путовања

Време путовања представља време потребно да возило прође посматрану деоницу пута. Тако посматрано представља микроскопску карактеристику. С друге стране, ако се посматра просек за сва возила, тада се може говорити о времену путовања као карактеристици саобраћајног тока, и онда је то макроскопска карактеристика. Уобичајена ознака за време путовања је t (од енгл. *time*), а јединица s (секунд), минут или час.

Ако су t_i измерена времена путовања N појединачних возила, тада се просечно време путовања на деоници може израчунати као:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (2.21)$$

Време путовања некад се изражава преко јединичног времена путовања, потребног да се пређе јединица растојања (1 km) посматране деонице. У том случају, јединично време путовања изражава се у s/km , или $\text{mПЮредin}/\text{km}$, s/m и слично.

2.8. Особености саобраћајног тока

Поред параметара саобраћајног тока, за боље разумевање законитости које владају у саобраћајном току користе се и особености саобраћајног тока. Састав саобраћајног тока, једна од особености саобраћајног тока која је нарочито значајна са становишта функционисања сензора саобраћајног тока, дефинисана је у наставку.

2.8.1. Састав саобраћајног тока

Састав саобраћајног тока подразумева учешће појединих категорија возила у саобраћајном току. Саобраћајни ток, имајући у виду његову структуру, може се поделити на хомоген, када су сва возила у току исте категорије, и нехомоген (мешовит) када га чине различите категорије возила. Реалан саобраћајни ток је нехомоген.

Хомоген саобраћајни ток је идеализација, може се састојати од једне, било које категорије возила. Тако може бити ток путничких аутомобила, ток теретних возила, ток аутобуса и слично. Ако је ток састављен од путничких аутомобила, који су притом сви истих техничко-експлоатационих карактеристика, којима управљају возачи истих психо-физичких особина и стилова вожње, такав ток се назива идеалан хомоген ток.

Степен нехомогености саобраћајног тока мери се процентуалним учешћем возила која нису путнички аутомобили (тзв. комерцијалних возила):

$$P_{kv} = \frac{q - q_{PA}}{q} * 100[\%] \quad (2.22)$$

Где је q укупан проток, а q_{PA} проток путничких аутомобила.

С друге стране, степен хомогености саобраћајног тока изражава се процентуалним учешћем путничких аутомобила у саобраћајном току:

$$P_{PA} = \frac{q - q_{KV}}{q} * 100[\%] \quad (2.23)$$

Где је q_{KV} проток комерцијалних возила. Уобичајено је да се при бројању возила класификују у категорије. Подела на категорије не мора бити увек једнака. Једна од подела која се користи у Републици Србији дата је у табели 2.1.


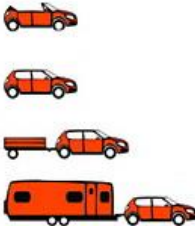
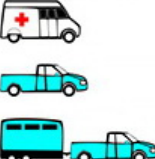


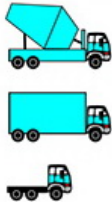
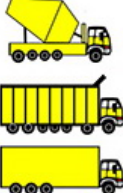
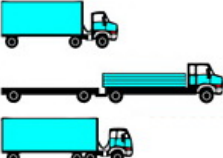
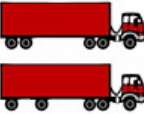


Табела 2.1. Категорије возила

Категорија	Дефиниција категорије
Бицикл	Бицикли с ножним погоном, бицикли с помоћним мотором, мопеди с педалама за окретање и без њих, инвалидска колица, трицикли и друга превозна средства која се покрећу људском снагом и мотоцикли до 50 cm ³ запремине.
Мотоцикл	Све врсте мотоцикала и скутера, моторни трицикли, моторна инвалидска колица, теретни трицикли и друга возила која се крећу моторним погоном на два или три точка и имају регистарску таблицу.
Путнички аутомобил	Све врсте моторних возила на четири точка која су намењена превозу до 9 путника, комби возила (комби каравани) без обзира на то да ли превозе терет или људе, теретни аутомобили до једне тоне носивости с отвореном или затвореном каросеријом и сва остала возила на шасији путничког аутомобила, без обзира на намену, ако су задњи точкови с једноструким пнеуматиком. Овде су укључена и возила која имају једноосовинску приколицу, теретна или путничка.
Аутобус	Сва возила за превоз путника с више од 9 уграђених седишта, као и аутобуси с приколицом. Овде припадају и аутобуси и тролејбуси јавног градског путничког превоза.
Трамвај	Шинско електрично возило намењено за превоз путника, било да има приколицу или не.
Лако теретно возило	Моторно возило за превоз терета с отвореном или затвореном каросеријом, носивости од једне до три тоне. То су возила која се у граду углавном користе за доставу робе.
Тешко теретно возило	Теретно возило свих категорија, почевши од три тоне навише. Овде су укључени и теретни аутомобили, цистерне, хладњаче, мешалице, специјална возила, ватрогасна и војна возила, самоходне грађевинске машине.
Аутовоз	Сви теретни аутомобили са полуприколицом и приколицом, возила која су шлепована због квара, без обзира на категорију, радне и грађевинске машине које имају приколицу или су вучене од стране теретног аутомобила или другог вучног возила, тенкови и друга тешка возила која не спадају у нормална теретна возила. Овде спадају и хладњаче, цистерне, силоси и друга специјална возила уколико имају приколицу или полуприколицу.
Трактор	Трактори с полуприколицом и приколицом и све друге самоходне (са сопственим мотором) пољопривредне машине.
Запрежно возило	Сва возила са запрегом на два или четири точка.

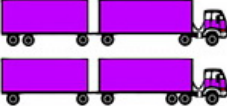
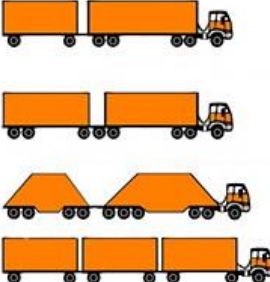
Извор: Истраживање карактеристика саобраћаја на подручју града Београда, Институт саобраћајног факултета, Београд 2007.

У Сједињеним Државама најчешће коришћени систем класификације возила је систем који је развила федерална администрација за путеве FHWA (*Federal Highway Administration*) која се састоји од 13 класа возила. Амерички систем класификације дат је у табели 2.2.

Табела 2.2. Класификација возила према FHWA подели

Класа	Назив класе	Класа обухвата
1	Мотоцикл	
2	Путнички аутомобил	
3	Друга возила са две осовине и четири точка	
4	Аутобуси	
5	Двоосовински једноделни камиони са шест точкова	
6	Троосовински једноделни камиони	
7	Четворо- или вишеосовински једноделни камиони	
8	Камион с приколицом са четири или мање осовина	
9	Камион с приколицом са пет осовина	
10	Камион с једном приколицом са шест и више осовина	
11	Камион с више приколица са пет или мање осовина	

Табела 2.2. Класификација возила према FHWA подели (наставак)

12	Камион с више приколица са шест осовина	
13	Камион с више приколица са седам и више осовина	

Многе анализе на планерском и пројектантском нивоу не захтевају овако детаљну класификацију. Други начин класификације јесте према дужини возила. Он је једноставнији, и категорије су аутомобили, мали камиони, велики камиони и камиони с више приколица.

Различите врсте сензорских технологија на различите начине класификују возила: једни то раде према броју осовина, а други управо према дужини возила. Неке од технологија које препознају осовине возила јесу: инфрацрвени сензори, ласерски радар, пиезоелектрични, кварцни сензори, оптички сензори, капацитивне простирке, савијајуће плоче, ћелије оптерећења, контактни сензори (нпр. пнеуматске цеви). Насупрот њима, уређаји који класификују возила према дужини су: парови индуктивних петљи, индуктивне петље које раде на принципу индуктивног „потписа”, магнетни сензори, видео сензори, микроталасни радар, доплер радар.

2.8.2. Маса возила и осовинско оптерећење

Маса возила m не спада у параметре нити особености саобраћајног тока, али се мери за потребе праћења токова робе, праћења поштовања ограничења максималног осовинског оптерећења на појединим саобраћајницама, као и за потребе планирања одржавања коловоза. Маса возила изражава се у тонама $[t]$ или у тонама по осовини возила $[t/\text{осовини}]$.

Одређене технологије сензора могу да мере оптерећење. Поред статичког мерења тежине, постоји и мерење тежине возила у покрету, тзв. *Weigh-In-Motion (WIM)*. *WIM* системи мере динамичко оптерећење осовина, које се разликује од статичког мерења тежине у мировању.

Сензори су пројектовани не само да детектују присуство возила (или осовине), већ и да измере силу којом возило делује на подлогу. То је сила тежине Q .

$$Q = m \cdot g \quad 2.24$$

где је m маса возила, а g убрзање Земљине теже. Мерењем сила којим свака осовина делује на сензор, и њиховим сабирањем за све осовине које су препознате да припадају једном возилу, може се израчунати маса возила.

Уобичајене технологије за мерење тежине возила јесу пиезоелектрични сензори, кварцни сензори, капацитивне простирке, савијајуће плоче, ћелије оптерећења које могу бити хидрауличне и механичке.

У већини случајева, потребно је поставити секундарне сензоре (нпр. индуктивне петље) у комбинацији са примарним сензорима за мерење тежине, како би се обезбедиле информације

о присуству возила. Систем *WIM* комбинује информације о брзини и присуству возила с временом између мерења тежине осовина, тиме правилно одређује које осовине припадају ком возилу и исправно групише осовине (појединачне, удвојене, или групе више осовина). На тај начин правилно се класификује свако возило и израчунава његова укупна тежина.

Важно је поменути да се подаци о маси возила и осовинском оптерећењу не могу прикупити користећи неинтрузивне сензорске технологије, имајући у виду да је потребно измерити силу којом возило делује на подлогу.

Подаци о маси возила користе се за одређивање потребне дебљине коловозног застора, за одабир тренутка и врсте одржавања коловоза. Подаци о укупној маси возила која пролазе неком рутом могу да се користе за процену количине терета која се превози том рутом и представља улазни податак за одређивање трошкова загушења, или уштеда које би се оствариле изградњом алтернативне руте. Број и тежина возила од значаја су и за пројектовање мостова и њихов очекивани век трајања, али и за процену квалитета ваздуха и утицаја токова терета на животну средину.

3. СЕНЗОРИ ЗА МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА САОБРАЋАЈНОГ ТОКА

3.1. О терминологији

У домаћој и иностраној литератури користе се различити појмови за описивање уређаја за прикупљање података о саобраћајном току. Ти изрази су бројач, уређај за надгледање, уређај за надзор, мерни уређај, сензор, детектор. Често се користи израз бројач (*Путеви Србије*, 2015) када је реч о уређајима инсталираним на путевима, који се користе за снимање броја возила, а израз детектор користи се када се мисли на уређаје који откривају присуство возила на раскрсницама (*Peeta и Zhang*, 2002).

Klein (2001) у својој књизи користи израз сензор, да би представио хардвер и уграђени софтвер који детектује возила и претвара те информације у податке о саобраћајном току. На примеру индуктивне петље објашњава да сензор обухвата како саму петљу, уграђену у коловоз, која се састоји од неколико намотаја жице, тако и електронски део уређаја у металном кућишту поред пута (тзв. контролеру). Електронски део уређаја и струјно коло које се користи за напајање индуктивне петље понекад се назива детектор. У другим случајевима, комбинација жичане петље и електронике назива се детектор индуктивне петље. Код описивања инфрацрвених сензора, израз детектор се односи на материјал осетљив на светлост постављен на жижној равни сочива, који прикупља енергију која садржи информације о возилима и параметрима саобраћајног тока.

Klein и сарадници (2006) не праве разлику између израза сензор и детектор. Они детектор или сензор дефинишу као „уређај који означава присуство или пролазак возила, лаких или тешких шинских возила, аутобуса или пешака. Уз општи термин, често се додаје назив врсте (нпр. детектор индуктивне петље, магнетни детектор, радарски сензор, видео сензор), начина функционисања (детектор или сензор у тачки, детектор или сензор присуства, сензор велике површине)”. Они додају да америчка Национална асоцијација произвођача електричних уређаја *NEMA* (акроним од *National Electrical Manufacturers Association*) ограничава значење израза сензор само на сензорски (осетљиви) елемент система детекције.

У општем случају, улога сензора је детектовање или мерење неке физичке величине у простору, односно генерисање одзива на побуду у облику електричног сигнала, на основу којег може да се закључи о којој се физичкој величини ради и колика је вредност те величине. Код детектора саобраћајног тока сензорски елемент може бити осетљив на промене различитих физичких величина које проузрокује присуство или пролазак возила. На пример, возило мења магнетно поље Земље, или мења температуру околине у смислу инфрацрвеног зрачења, или производи звук, и све те промене могу да се детектују и претворе у одговарајући електрични сигнал. Тај део прикупљања података обавља сензорска јединица.

Одзив који даје сензор, потребно је трансформисати у други, погоднији облик. То обавља тзв. претварач. Претварачи трансформишу једну врсту енергије у другу, док сензор претвара побуду у електрични сигнал.

Под сензором у ужем смислу могао би се сматрати сензорски елемент који реагује на побуду и ствара електрични сигнал, а сензором у ширем смислу цео уређај чији је излаз приказ података или вредност измерене величине.

Поменуте разлике не истичу се у дисертацији, па се изрази сензор и детектор користе као синоними.

3.2. Развој детектора саобраћајног тока

Почетком двадесетог века, 1920-их, кад су светлосни сигнали с ручног управљања прешли на аутоматско, фиксно управљање, инжењери су схватили да је потребно створити методу за прикупљање података, што је претходно, визуелно, радио саобраћајни полицајац на раскрсници. Један од пионира био је Чарлс Адлер Јуниор (*Charles Adler Jr.*) из Балтимора, железнички сигнални инжењер. Он је развио сензор који се активира кад возач затруби, што је био сигнал да се промени светло на семафору (Слика 3.1). Овај уређај, који се састојао од микрофона у кутији поред пута, инсталиран 1928. на раскрсници у Балтимору, представља први полуаутоматски уређај за управљање светлосним сигналом, с најавом од стране возача (*Klein и сар, 2006*).



Слика 3.1. Адлеров сензор који се активира сиреном аутомобила (извор: *Vincel, 2016*).

Негде у исто време, електроинжењер Хенри Хо (*Henry A. Haugh*) развио је сензор осетљив на притисак који се уграђује у коловоз, а састојао се од две металне плочице, које се под притиском тежине аутомобила споје, и на тај начин успоставе електрични контакт. Овај сензор, осетљив на притисак, показао се као погоднији од оног који се активира сиреном, и био је широко распрострањен током више од 30 година, као примарно средство за детекцију возила на сигнаlima с најавом (*Klein и сар, 2006*).

Механички проблеми са сензором контактних плоча довели су до увођења електропнеуматског сензора. Иако је овај уређај пронашао примену, био је скуп за инсталацију, способан само за детекцију проласка (покрета), а његова тачност бројања (осовина) ограничена је стварањем таласа ваздушног притиска и његовог одбијања при контакту с капсулом (*Klein и сар, 2006*).

Различити проблеми довели су до потраге за сензорима заснованим на суптилнијим особинама као што су (*Klein и сар, 2006*):

- Звук (акустични сензори),
- Непровидност (оптички, инфрацрвени сензори и видео-процесори),
- Геомагнетизам (магнетни сензори, магнетометри),
- Одбијање послате енергије (инфрацрвени ласерски сензор, ултразвучни сензори и микроталасни радарски сензори),
- Електромагнетна индукција (индуктивне петље),
- Вибрације (трибоелектрични, сеизмички и инерцијски прекидачи).

Нису сви набројани концепти били комерцијално експлоатисани. Магнетни сензори коришћени су већ у 1940-им годинама прошлог века. До 1960-их, ултразвучни и микроталасни сензори такође су били на тржишту. Међутим, од краја 1960-их, доминантне методе детекције постале су индуктивне петље и пнеуматске цеви (*Minge и сар, 2010*). Данас је индуктивна петља далеко најзаступљенији сензор у модерним системима за управљање саобраћајем. Магнетометри, магнетни сензори, видеосензори, микроталасни и ласерски радарски сензори, ултразвучни, акустични и пасивни инфрацрвени сензори такође се комерцијално производе и користе за различите апликације управљања саобраћајем. Оптички сензор пронашао је употребу за детекцију приоритетних возила и возила с прекорачењем висине (*Klein и сар, 2006*).

3.3. Подела и примена сензорских технологија

Уређаје који прикупљају податке о саобраћају могуће је поделити на различите начине.

Са становишта положаја сензора могуће је сензоре поделити на **фиксне** (који не мењају положај у простору) и **покретне** (који се налазе на објектима који се крећу у простору, нпр. у возилу које је део саобраћајног тока) (*Jelušić, 2008*).

Фискни уређаји, с обзиром на врсту технологије коју користе за прикупљање сирових података, могу се поделити у две главне групе: **интрузивне** и **неинтрузивне**. Интрузивни уређаји ометају саобраћајни ток за време постављања и одржавања, уграђени су у коловоз. Постоје интрузивни уређаји који се само постављају на коловоз, али они су намењени краткорочном прикупљању података (пнеуматске цеви, пиезоелектрични сензори). Неинтрузивни уређаји уграђују се и одржавају са далеко мањим ометањем саобраћајног тока, обично се налазе поред или изнад коловоза.

У типичне интрузивне уређаје спадају:

- индуктивне петље: најчешћа технологија, састоји се од жичане петље, уграђене у коловоз, која ради на принципу електромагнетне индукције,
- магнетни сензори: мере промену магнетног поља Земље коју проузрокује пролазак возила,
- пнеуматске цеви: гумене цеви преко којих пролазе возила и мењају притисак ваздуха у њима,
- пиезоелектрични сензори: раде на принципу пиезоелектричног ефекта, где се под притиском возила на одређени материјал ствара разлика потенцијала,
- *weigh-in-motion* уређаји: служе за мерење масе тешких возила у покрету.

Неинтрузивни уређаји могу бити:

- инфрацрвени (активни: емитују инфрацрвену енергију и детектују повратни талас; и пасивни: не емитују него детектују енергију коју одашиљу возила, коловоз и други објекти),
- микроталасни радар: емитују микроталасну енергију и детектују повратни талас,
- ултразвучни: емитују ултразвучни талас и мере растојање на основу фреквенције повратног таласа,
- пасивни звучни: детектују звук који производе возила,
- видео сензори: дигитализацијом и обрадом слике претварају информације у податке о саобраћајном току,
- њихове комбинације.

Подела сензорских технологија према положају приказана је у Табели 3.1.

Табела 3.1. Врсте сензорских технологија према положају сензорског елемента (прилагођено из *Jelušić, 2008*)

Фиксни сензори: сензори се постављају у саобраћајну површину или су у непосредној близини		Мерење покретним осматрачем: сензорски елемент налази се у возилу које је у саобраћајном току	Даљинско мерење: сензорски елемент је у удаљеном посматрачу које није део саобраћајног тока
Интрузивне сензорске технологије	Неинтрузивне сензорске технологије	Пробна возила	
Индуктивна петља	Инфрацрвени сензори	Аутоматска локација возила (<i>Automatic vehicle location - AVL</i>)	Авионско снимање
Пнеуматска цев	Микроталасни радар	Аутоматска идентификација возила (<i>Automatic vehicle identification - AVI</i>)	Снимање из дрона
Магнетни сензори	Ултразвучни сензори	Глобални позициони системи (<i>Global position system - GPS</i>)	Сателитско снимање
Пиезоелектрични сензори	Пасивни звучни сензори	Мобилни телефон	
<i>Weigh-in-motion</i> уређаји	Видео сензори		

Разне сензорске технологије користе се за различите примене у области управљања саобраћајем. Оне су детаљно описане у *Klein* и сар. (2006), а у табели 3.2. систематизовано су приказане све примене поменуте у овом раду.

Табела 3.2. Примена сензорских технологија

Примена	Детаљи примене
Управљање светлосним сигнаlima на градској мрежи	<p>На изолованој раскрсници:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ фиксно и ▪ адаптивилно управљање. <p>На групи раскрсница:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ фиксно управљање на мрежи раскрсница, ▪ адаптивилно управљање са онлајн израчунавањем планова темпирања).
Управљање саобраћајем на ауто-путу	<p>Подразумева управљање</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ на рампама ауто-пута, ▪ на главним тракама, ▪ управљање на коридорима који напајају ауто-пут, ▪ систем информисања путника како би се избегла загушења. <p>Стратегије су:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ контрола приступа (затварање рампи, систем управљања на рампама тзв. <i>ramp metering</i>), ▪ приоритетан третман за возила с високом попуњеношћу (енгл. <i>High occupancy vehicle - HOV</i>), траке за аутобусе, ▪ надзор, ▪ управљање при инцидентним ситуацијама (детекција, идентификација и реаговање), ▪ контрола брзина и информисање возача на критичним деоницама ауто-пута, ▪ објава информација са саветима (брзина, време путовања, препоручене руте, обиласци).
Прикупљање података о саобраћају	<ul style="list-style-type: none"> ▪ подаци за адаптивилно управљање у реалном времену, ▪ дугорочни подаци за саобраћајно планирање и администрацију и формирање база података, ▪ подаци за вредновање показатеља ефикасности.
Подаци о раду сензора	<ul style="list-style-type: none"> ▪ уочавање кварова на сензорима, ▪ анализа узрока кварова.
Детекција приоритетних возила	<ul style="list-style-type: none"> ▪ хитна помоћ, ▪ ватрогасци, ▪ полиција.
Детекција пешака и најава сигнала	<ul style="list-style-type: none"> ▪ „дугме” за пешаке, ▪ детекција пешака који чекају.
Сензори прекорачења висине	<ul style="list-style-type: none"> ▪ тунели, ▪ подвожњаци, ▪ вишеспратна паркиралишта.
Сензори временских услова	<ul style="list-style-type: none"> ▪ смер и брзина ветра, ▪ температура и влажност ваздуха, ▪ видљивост, ▪ температура коловоза за потребе одлеђивања.
Сензори у возилу који побољшавају безбедност	<ul style="list-style-type: none"> ▪ за избегавање судара и других опасности, ▪ детекција растојања слеђења, ▪ детекција близине објекта, ▪ детекција пешака, ▪ детекција траке, ▪ побољшање видљивости.

Поменуте примене података које дају сензори имају различите захтеве тачности података. Интервали у којима се прикупљају подаци крећу се од 0,1s за адаптивилно управљање сигналисаним раскрсницама у реалном времену, преко 20-30s за детекцију саобраћајних

незгода, 1 минут за за системе управљања на рампама ауто-пута (енгл. *ramp metering*), дужине циклуса за адаптивно управљање светлосним сигнаlima у зависности од саобраћаја, 5 минута за доношење одлуке о реакцији на саобраћајну незгоду, па све до 5-15 минута за мерење ефикасности управљачког система. Подаци се, након коришћења за тренутне потребе, обрађују и складиште у базе података за касније коришћење, где се описују временске неравномерности на нивоу сата, вршног периода, дана, дана у недељи, месеца, године, као и просторне неравномерности на нивоу смерова кретања (Klein и сар, 2006).

3.4. Карактеристике сензорских технологија

3.4.1. Индуктивна петља

Индуктивне петље су већ дуго у употреби. До 1934. детектори у облику петље, као нова технологија заснована на електромагнетној индукцији, почели су да се примењују и замењују већину других сензорских технологија (Lay и Vance, 1992). Широку примену достижу од 1960-их година (Klein и сар, 2006). Индуктивна петља до данас је остала најзаступљенији сензор који се користи за мерење параметара саобраћајног тока у Европи и Северној Америци.

Основни електронски делови сензора индуктивне петље су (Klein и сар, 2006):

- Један или више навоја проводника који чине петљу, уграђени у уски плитки шав у коловозу,
- Електронски уређај који претвара сигнал (тзв. контролер), смештен у кућиште поред пута и
- Каблови који спајају навоје с електронским уређајем.

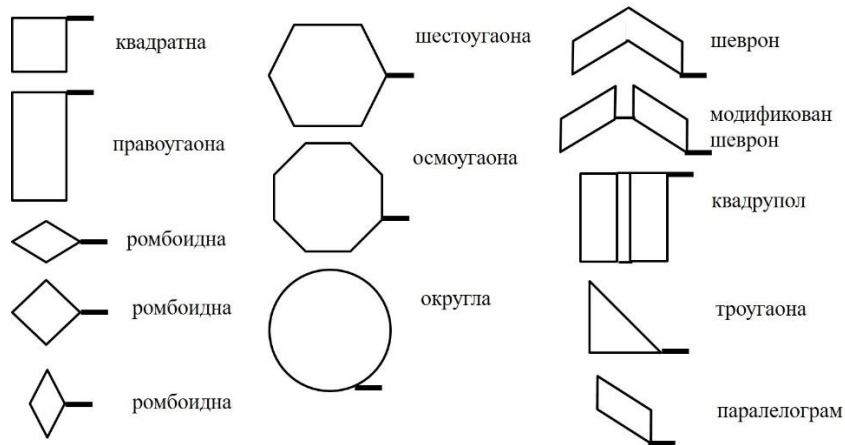
Принцип рада индуктивне петље заснива се на електромагнетној индукцији. Проводник кроз који протиче струја ствара магнетно поље, и индуктивност петље има неку вредност. Сви делови индуктивне петље (навоји петље, спојни проводници, изолација) као комбинација отпорника, индуктивности и капацитета, чине електрично осцилаторно коло које има одређену фреквенцију. Унутар електронске сензорске јединице у контролеру налази се осцилатор и појачивач, који омогућавају да се побуди осцилаторно коло.

Када се у непосредној близини проводника нађе објекат који поседује особину феромагнетизма² (возило са деловима од гвожђа), тада се у том објекту стварају вртложне струје супротног смера од смера струје у проводнику, чиме се мења магнетно поље које ствара проводник, и смањује магнетна индукција проводника. Та промена магнетне индукције детектује се у сензорској јединици као промена фреквенције осцилаторног кола, и тиме се потврђује присуство објекта (возила).

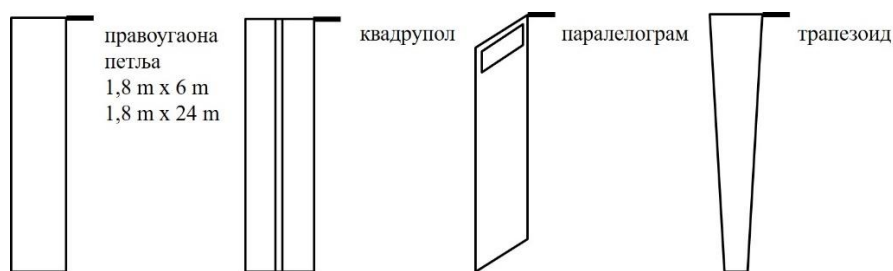
Електронска јединица у контролеру подржава и друге функције, као што су одабир осетљивости петље, одабир модалитета рада (пулсни мод, и мод присуства) за детекцију возила које пролази преко зоне детекције петље. Мод присуства подразумева континуирано слање сигнала све време док је возило унутар зоне детекције, док се код пулсног мода шаље сигнал само при уласку возила у зону детекције.

Индуктивне петље могу имати различите облике и величине. Када је реч о величини, петље могу бити кратке и дугачке. Кратке петље користе пулсни мод, а дугачке петље мод присуства. Облици кратких и дугачких петљи приказани су на сликама 3.2. и 3.3.

² Феромагнетни материјали су гвожђе, челик, никл, кобалт, и њихове легуре.



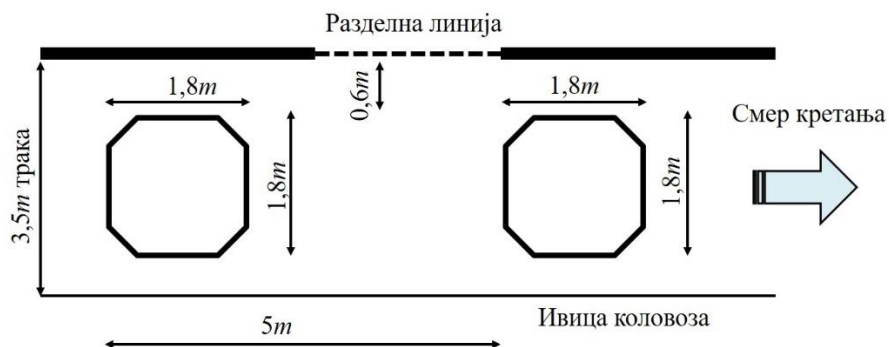
Слика 3.2. Облици кратких петљи (извор: Klein и сар, 2006).



Слика 3.3. Облици дугачких петљи (извор: Klein и сар, 2006).

Уобичајене ширине петљи су $1,8\text{m}$ за ширину траке од $3\text{--}3,5\text{m}$, док се дужине крећу од $1,8\text{m}$ за кратке петље, и од 6 до чак 24m за дугачке петље.

Индуктивне петље омогућавају добијање вредности протока, класификације возила, заузећа. Вредност брзине може се израчунати ако се поставе две петље на познатом растојању, или се може оценити, али само у случају да су петље дугачке и раде у моду присуства, кад је могуће очитати време заузећа. У другом случају брзину је немогуће измерити, јер није позната дужина возила, она може само да се претпостави на основу класификације возила. Пример конфигурације две петље за потребе мерења брзине приказан је на слици 3.4. Овакав начин уградње петљи назива се „брзинска клопка” (енгл. *speed-trap*).



Слика 3.4. Мерење брзине возила помоћу две индуктивне петље на познатом растојању (извор: Klein и сар, 2006).

Индуктивним петљама може се детектовати и присуство возила. За то се користе дугачке петље.

Дугачке петље могу се заменити низом кратких петљи које се постављају једна иза друге. Коришћење низа кратких петљи доноси користи у смислу боље детекције мањих возила, мањег утицаја возила из суседне траке, мање вероватноће квара услед оштећења коловоза.

Петље се могу користити и за детекцију дужине реда на прилазима сигналисаним раскрсницама. Једна петља поставља се код зауставне линије, а друга петља налази се даље у траци, тамо где се очекује да буде максималан крај реда.

Уградња петљи у коловоз веома је важан процес који умногоме утиче на век трајања петљи. Неправилно и неопрезно постављање може да прозрокује честе кварове, као и неправилно функционисање. У коловозу је потребно направити плитак, узак рез, у тај рез треба поставити петљу, повезати са спојним кабловима, рез пажљиво напунити заптивним средством, везати спојни кабл с електронском јединицом у кућишту контролера. Због оваквог процеса уградње, сензори индуктивне петље спадају у интрузивне сензоре саобраћајног тока.

Највећи број кварова сензора индуктивне петље представљају кварови саме петље, као и везе петље са спојним каблом, док су кварови електронских уређаја занемарљиви. У највећем броју случајева кварови на петљи су прекид кабла или оштећење изолације, а то се најчешће дешава кад је коловоз лошег квалитета, или кад је уградња лоше или нестручно урађена. Осим тога, процес уклањања постојећих неисправних петљи је неисплатив, већ се у близини контролера инсталира нова петља, док неисправна остаје у коловозу.

3.4.2. Магнетни сензори

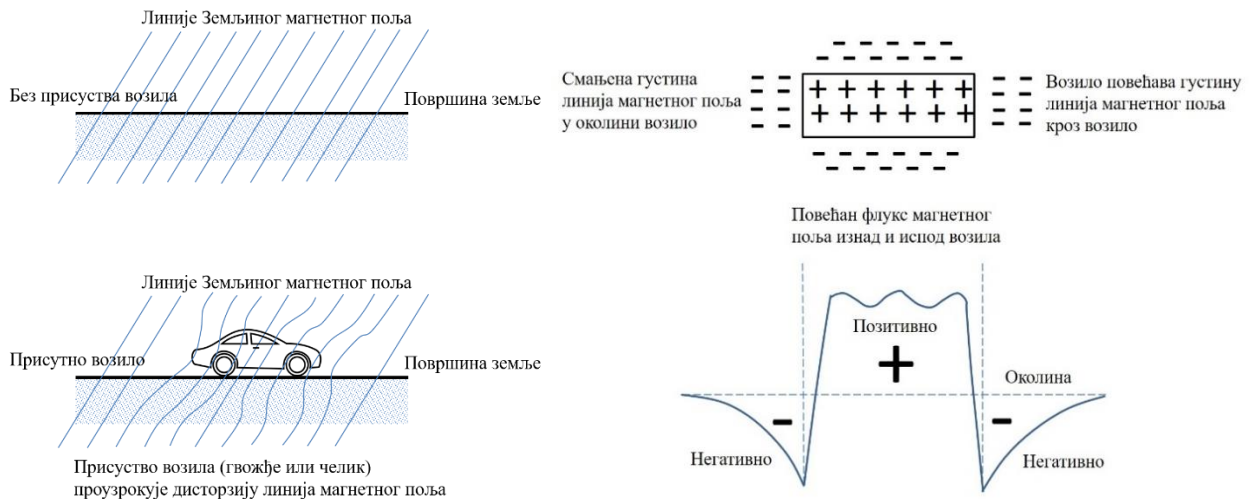
Магнетни сензори пасивни су уређаји. Они не стварају сопствено магнетно поље, већ детектују промене магнетног поља Земље. Када се у Земљином магнетном пољу нађе феромагнетни објекат, он ствара тзв. магнетну аномалију. Такав објекат је возило, јер оно поседује доста делова од гвожђа. Гвожђе има већу магнетну пермеабилност³ (пропустљивост) него ваздух.

На простору који захвата возило (његова пројекција на површину коловоза) линије магнетног поља биће гушће, а у непосредној близини линије ће бити ређе, што је приказано на слици 3.5. Оваква промена магнетног поља назива се „магнетна сенка” и, како се возило креће, и она се креће заједно с њим. Ову појаву дисторзије линија магнетног поља детектују магнетни сензори.

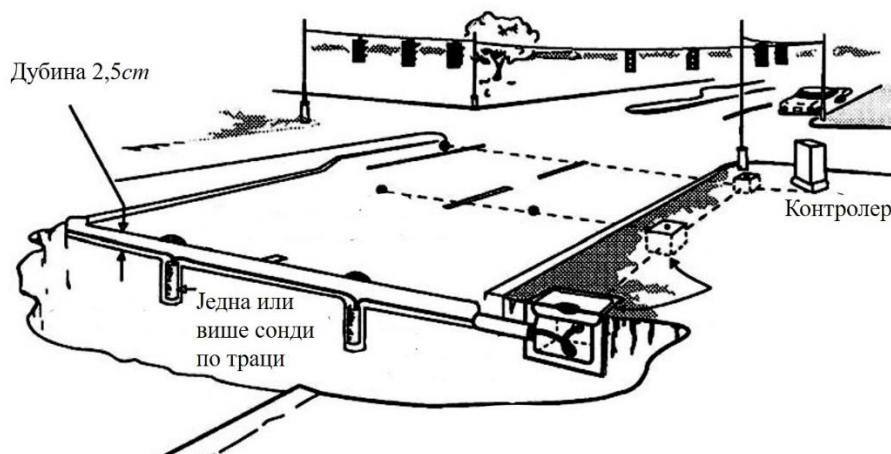
Магнетни сензори састоје се од цилиндричне сонде која се уграђује у коловоз, електронског уређаја и кабла који спаја сонду с уређајем. Пример инсталације магнетног сензора приказан је на слици 3.6.

Неке врсте магнетних сензора могу да пруже само податке о проласку, а не и о присуству или заузећу, јер детектују само возила у кретању, а не и заустављена возила. За мерење брзине и за класификацију возила потребна су два сензора. Из ових разлога, магнетни сензори користе се углавном за посебне примене. На пример, за разлику од сензора индуктивне петље, магнетни сензори могу се користити на мостовима, где је присутна челична конструкција, а резање коловоза за инсталацију петље није допуштено.

³ Магнетна пермеабилност је електромагнетна особина материјала која показује интензитет магнетизације тела када су она изложена спољашњем магнетном пољу.



Слика 3.5. Промена линија магнетног поља Земље при појави возила (извор: Klein и сар, 2006).



Слика 3.6. Пример инсталације магнетног сензора (извор: Klein и сар, 2006).

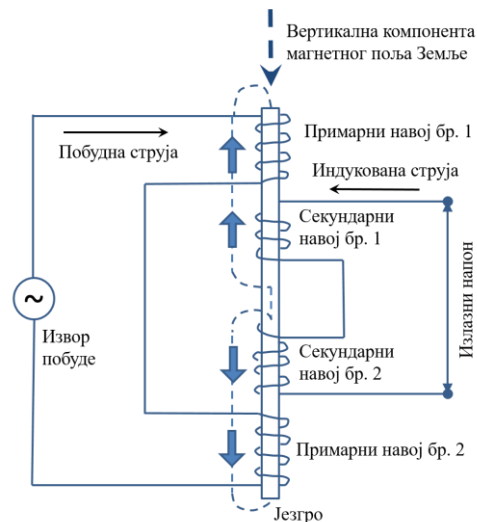
Постоје два основна типа магнетних сензора: магнетометар и магнетни сензор с индукционом завојницом.

3.4.2.1. Магнетометар

Магнетометар је уређај који детектује промене у магнетном пољу Земље у две осе: хоризонталној и вертикалној компоненти магнетног поља, када се у зони детекције нађе феромагнетни објекат.

Двоосни магнетометар садржи два примарна и два секундарна намотаја око језгра од меког магнетског материјала, високе магнетне пермеабилности. Као одговор на аномалију магнетног поља, тзв. „магнетни потпис возила”, електронски уређај магнетометра детектује излазни напон, генерисан у секундарним намотајима. Уколико је овај напон већи од унапред одређеног прага, детектује се возило. Магнетометар може да мери пролазак возила ако ради у пулсном

моду, док у моду присуства дају континуирани сигнал, све док возило не напусти зону детекције.



Слика 3.7. Типична електрична шема магнетометра (извор: Klein и сар, 2006).

Подаци који могу да се добију од магнетометра исти су као код индуктивне петље. То су проток, класификација возила, заузеће, присуство, а за мерење брзине потребна су два сензора.

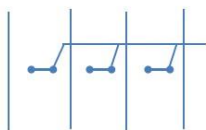
3.4.2.2. Магнетометар са завојницом

Магнетометар са завојницом такође реагује на пертурбације у магнетном пољу Земље које производе возила која пролазе кроз зону детекције. Ови уређаји садрже једну завојницу (или више њих, везаних редно) обмотану око језгра, постављену тако да је оса завојнице ортогонална на правац саобраћајног тока. Дисторзија линија магнетног поља у времену иницира појаву малог напона на крајевима завојнице, и тај напон се појачава у електронском делу уређаја. Напон се читава све време док се возило креће кроз зону детекције. Најмања брзина возила која је потребна да се прочита појава возила је 5 до 16 km/h. Један магнетни сензор не може да детектује заустављено возило, зато што детектује само промену „магнетног потписа возила”, па се не може користити као детектор присуства. Уколико се инсталира више сензора, уз специјализовану обраду сигнала, могуће је генерисати и податке о присуству возила.

Ови детектори обезбеђују податке о протоку, заузећу и брзини, на основу величине зоне детекције и претпостављене дужине возила. Критеријуми за њихов избор јесу тачност одређивања протока, осетљивост и трошкови, уколико се не захтева детектовање заустављених возила. Магнетни детектори добро су прилагођени пределима с високом количином снега и леда који лоше утичу на индуктивне петље, а где су пожељни подземни сензори. Такође се добро понашају у топлим поднебљима, где асфалтни коловоз омекшава од сунчеве топлоте и оштећује се под оптерећењем.

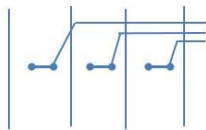
Континуални мод

Најава, пролазак возила



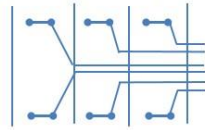
Сензори у свим тракама везани за исти канал

Брзина, заузеће



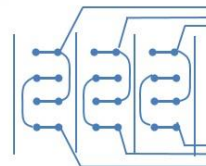
Сензор у свакој траци користи свој канал

Класификација (брзина/дужина)



Сензори у свакој траци користе по два канала

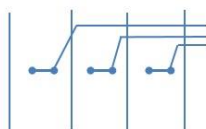
Присуство, већа област



Сензори у свакој траци користе по два канала

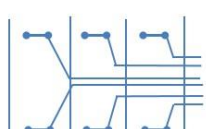
Пулсни мод

Проток



Сензор у свакој траци користи свој канал

Брзина



Сензори у свакој траци користе по два канала

Слика 3.8. Конфигурације постављања сонди магнетометра за потребе прикупљања различитих података о саобраћајном току (извор: Klein и сар, 2006).

3.4.3. Пнеуматска цев

Принцип рада пнеуматског сензора је промена ваздушног притиска. Пнеуматска цев је еластична цев испуњена ваздухом, преко које се возила крећу. Возило својом тежином промени притисак у цеви, а промена ваздушног притиска затвара ваздушни прекидач, који емитује електрични сигнал који се преноси на бројач или софтвер за анализу података. Пнеуматска цев је преносиви сензор и користи батерије као извор напајања.

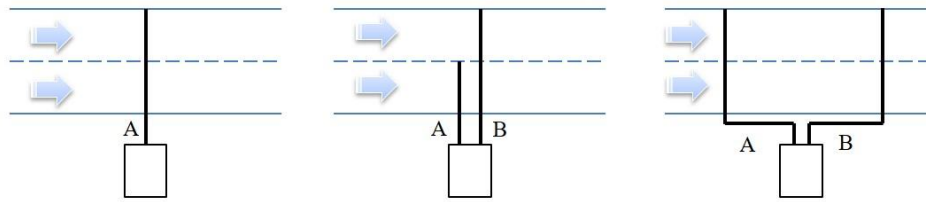
Пнеуматска цев поставља се управно на правац саобраћајног тока и обично се користи за краткорочно бројање саобраћаја, класификацију возила помоћу броја осовина и размака. Неки модели прикупљају податке за израчунавање интервала слеђења, временских губитака на раскрсници, вредности засићеног тока, брзине возила у зависности од категорије возила, као и времена путовања (Mimbela и Klein, 2000).

Предности пнеуматске цеви јесу брза инсталација за привремено прикупљање података и ниска потрошња енергије; они су обично лаки и једноставни за одржавање.

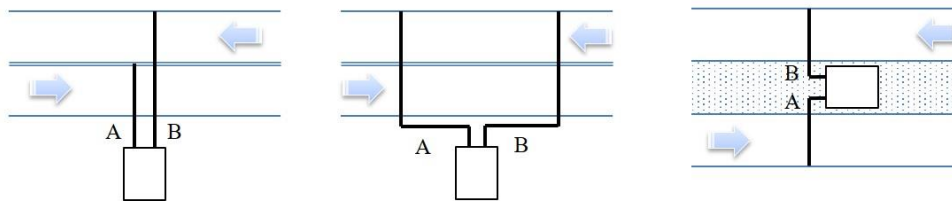
Недостаци укључују непрецизно бројање осовина када су у питању тешка теретна возила и аутобуси с удвојеним осовинама, осетљивост ваздушног прекидача на високе и ниске температуре, као и оштећења цеви које настају услед вандализма и хабања камионским пнеуматцима.

Слика 3.9. показује неке од конфигурација пнеуматске цеви које се користе на двотрачним и вишетрачним путевима за бројање и класификацију возила.

Један смер



Два смера



Слика 3.9. Конфигурација пнеуматске цеви на двотрачним и вишетрачним путевима (извор: *Mimbela и Klein, 2000*).

3.4.4. Пиезоелектрични сензори

Принцип рада пиезоелектричних сензора је претварање кинетичке енергије у електричну. Пиезоелектрични ефекат јавља се код кварца и неких кристала (тзв. пиезоелектрични елементи) тако што се под дејством механичких деформација ремети њихова поларизација, и на крајевима кристала јавља се напон. Као пиезоелектрични материјали користе се специјални полимери, керамике и кристали (најчешће кварц). Када возило пређе преко сензора, пиезоелектрични материјал генерише напон који је пропорционалан сили којом се на њега делује, односно тежини возила.

Сензорски елемент пиезоелектричког сензора израђује се у облику коаксијалног кабла или друге нагазне површине. Пиезокабл има метално језгро, пиезоелектрични материјал и метални омотач, и осетљив је на притисак из свих смерова, што смањује тачност приликом мерења тежине. Ови сензори могу давати податке о протоку, временском интервалу слеђења, класификацији на основу броја осовина, о тежини возила и о брзини возила. Мерење брзине захтева најмање два сензорска елемента. Имајући у виду да је пиезоелектрични ефекат динамичке природе, напон се јавља само док је сила променљива, иницијални напон ће нестати ако је сила која делује на кристал константна. Користећи претходну особину, пиезоелектрични сензори користе се за динамичко мерење тежине возила у покрету.

Према могућностима прикупљања података разликују се две класе пиезоелектричних сензора (*Mimbela и Klein, 2007*). Класа I детектује осовине и мери тежину возила (по осовини), док класа II детектује само прелазак осовине, па се користи за бројање возила према броју осовина.

Квалитет површине коловоза утиче на вероватноћу квара, као и животни век пиезоелектричних сензора. Лош квалитет коловоза, неравнине на њему могу да доведу до грешке у детекцији (грешка у процени врсте возила или чак изостанак детекције) као и до грешке у мерењу тежине возила. Ови сензори такође су осетљиви на температуру тла, као и на брзину возила.

3.4.5. Системи за мерење тежине возила у покрету

Тежина возила може се мерити на различите начине (Haugen и сар, 2016):

- статичко мерење: возила морају да се зауставе у теретним станицама,
- мерење при малој брзини: мери се тежина док се возила крећу брзинама 5-15km/h,
- мерење при већој брзини: мери се тежина возила при уобичајеној брзини,
- комуникација возило-инфраструктура: тежина се добија помоћу сензора који се налазе у возилу.

Постоји разлика између статичког и динамичког оптерећења. Код статичког, сила тежине остаје константна током времена, док се код динамичког мења, у зависности од спољашњих услова. Један од таквих спољашњих услова је кретање.

Системи за мерење тежине возила у покрету (енгл. *weigh-in-motion* - *WIM*) могу да оцене бруто масу возила, као и део масе која се на коловоз преноси преко сваког скупа тачкова (полуосовина са једним или више тачкова), као и да броје осовине или групе осовина. Осим тога обезбеђују и информације о временским неравномерностима протока и брзина возила, њихову класификацију на основу броја осовина, као и еквивалентно осовинско оптерећење. Овако добијени подаци користе се за планирање и пројектовање путева, као и за спровођење ограничења дозвољене масе возила.

Тачност система *WIM* зависи од четири главна фактора (Mimbela и Klein, 2007):

- динамика возила,
- стање коловоза (врста коловозног застора, ниво оштећења, начин пројектовања),
- прецизност *WIM* система, и
- калибрација.

Динамика возила зависи од храпавости површине коловоза (приањања), врсте вешања возила, динамичке равнотеже возила, тежине, брзине возила, маневрисања возача и слично. Иако се *WIM* системи уграђују у коловоз који је у добром стању, увек се могу јавити неочекивана погоршања или структурне аномалије. Тачност мерења *WIM* системима смањује се када асфалт омекша услед високих температура. Прецизност *WIM* система зависи од технологије која се користи за мерење осовинског оптерећења. Калибрација обезбеђује да је измерена тежина довољно близу стварној статичкој тежини возила, и мора узети у обзир локалне услове температуре и стања коловоза, као брзине возила.

Користе се четири технологије у оквиру *WIM* система: савијајуће плоче, пиезоелектрични сензори, хелије оптерећења и капацитивне простирке.

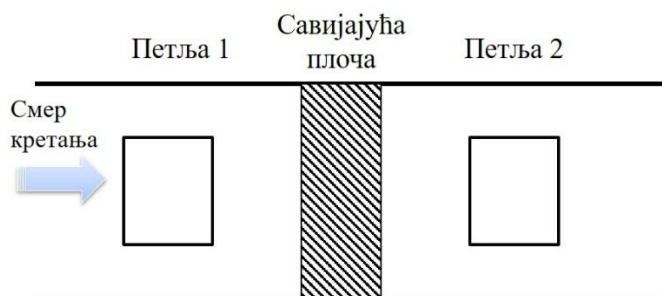
3.4.5.1. Савијајуће плоче

Савијајуће плоче (енгл. *bending plate*) које се користе у оквиру *WIM* система, имају мераче тензије уграђене испод плоча. Док возило прелази преко плоче, систем евидентира промену силе и израчунава динамичко оптерећење. Статичко оптерећење оцењује се помоћу измереног динамичког оптерећења и калибрационих параметара. Калибрациони параметри узимају у обзир брзину возила, стање коловоза и динамику вешања возила.

Савијајуће плоче састоје се од једне или две ваге и два сензора индуктивне петље. Типична инсталација сензора савијајућих плоча представљена је на слици 3.10. Вага се поставља у саобраћајну траку, нормално на правац кретања, тако да захвата оба тачка на једној осовини. Ако се постављају две ваге, оне ће бити на траговима тачкова, тако да се тежина левих и десних

точкова мери посебно. Индуктивне петље постављају се испред и иза ваге, гледајући у смеру саобраћајног тока. Прва петља на коју наилази детектује возило које стиже на мерење, оно се затим мери, а друга петља служи да се израчуна брзина на основу разлике у времену потребном да возило пређе од прве до друге петље.

Тачност савијајућих плоча већа је него код пиезоелектричних сензора, али је и њихова цена виша. Савијајуће плоче захтевају ревитализацију након периода од 5 година.



Слика 3.10. Типична конфигурација савијајућих плоча (прилагођено из: *Mimbela* и *Klein*, 2007)

3.4.5.2. Пиезоелектрични WIM систем

Принцип рада пиезоелектричних сензора објашњен је у поглављу 3.4.4. Када се пиезоелектрични сензори користе у систему WIM, они се комбинују са две индуктивне петље, слично савијајућим плочама. Разлика у односу на савијајуће плоче је у томе што пиезоелектрични сензори имају мању тачност, краћи им је век трајања, јефтинији су, и могу да се користе у ширем опсегу брзина возила (15 - 130km/h).

3.4.5.3. Ћелије оптерећења

Ћелије оптерећења (енгл. *load cell*) претварачи су чија је функција да производе електрични сигнал јачине која одговара сили која на њега делује. Ови сензори такође се користе у оквиру WIM система и раде на хидрауличном принципу. Ћелија садржи течност која детектује притисак и шаље информацију о тежини на мерни елемент.

Типичан систем WIM са ћелијом оптерећења састоји се од једне ћелије оптерећења, најмање једне индуктивне петље и једног сензора осовине. Слично другим WIM системима, возило прво наилази на индуктивну петљу, затим на ћелију оптерећења и сензор осовине. Сензор осовине може бити пиезоелектрични или на принципу промене отпорности. Ако се инсталира и друга индуктивна петља, она се налази на крају низа и служи за мерење брзине и размака између осовина.

Ћелије оптерећења најтачнији су уређаји у оквиру WIM технологија, имају најдужи век трајања, али и највишу цену.

3.4.5.4. Капацитивне простирке

Капацитивна простирка (енгл. *capacitance mat*) састоји се од две танке металне плоче, између којих се налази диелектрик (изолатор), чинећи кондензатор одређеног капацитета. Када возило пређе преко плоча, растојање између њих се смањи, што проузрокује раст капацитета. Ово мења резонантну фреквенцију електричног кола, чији је део кондензатор који чини капацитивна простирка. Резонантна фреквенција пропорционална је сили којом возило делује

на простирку (тежини по осовини), а читава се у мерном уређају. Металне плоче могу бити од нерђајућег челика или алуминијума, а као диелектрик користи се полиуретан или ваздух.

Капацитивне простирке имају мању тачност мерења тежине од осталих уређаја у оквиру *WIM* система, а предност им је у томе што се могу користити и као преносни уређаји. На слици 3.11. приказана је капацитивна простирка.



Слика 3.11. Изглед капацитивне простирке (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

3.4.6. Инфрацрвени сензори

Инфрацрвено или термичко зрачење је електромагнетно зрачење које емитује свако тело чија је температура изнад температуре апсолутне нуле ($0\text{ K} = -273^{\circ}\text{C}$). Инфрацрвено зрачење део је електромагнетног (оптичког) спектра, таласних дужина већих од видљивог дела спектра. Посебни оптички уређаји детектују инфрацрвено зрачење и претварају га у електрични сигнал.

Код примене у области прикупљања података о саобраћајном току користи се особина да је свако возило температуре више од температуре окружења, па је могуће детектовати топлоту коју емитује. С обзиром на начин рада, разликују се пасивни и активни инфрацрвени сензори.

Сензори се постављају изнад коловоза, тако да гледају долазни саобраћај (постављени низ саобраћајни ток) или одлазни саобраћај (постављени уз саобраћајни ток), или поред коловоза тако да саобраћајни ток гледају са стране. Због оваквог начина постављања сврстани су у неинтрузивне сензоре. Инфрацрвени сензори користе се за управљање светлосним сигнаlima (детектујући присуство возила испред зауставне линије), за мерење протока, класификације возила, брзине, као и за детекцију пешака на пешачким прелазима.

3.4.6.1. Пасивни инфрацрвени сензори

Пасивни инфрацрвени сензори детектују енергију коју возило емитује или одбија. Сам уређај не одашиље никакву енергију, па је добио назив пасивни. Када возило уђе у зону детекције, зрачењем мења термичку „слику” окружења. Ову промену детектује пасивни инфрацрвени сензор.

Када нема возила, пасивни инфрацрвени сензор читава енергију коју зрачи коловоз и која се од њега одбија. Енергија је пропорционална тзв. привидној температури површине. Када се возило појави у зони детекције инфрацрвеног сензора, он ће читавати енергију сразмерну разлици температура возила и коловоза. Разлика температура дата је формулом (3.1) (Klein, 2001).

$$\Delta T_v(\phi, \theta) = (\varepsilon_k T_k - \varepsilon_v T_v) + (\varepsilon_v + \varepsilon_k) T_o \quad (3.1)$$

где је:

$\Delta T_v(\phi, \theta)$ - разлика температура која се читава на сензору у правцу који у сферном координатном систему одређују углови ϕ и θ ,

θ - угао који упадни зрак (оса сензора) заклапа с нормалом на коловоз, у равни нормалној у односу на коловоз (слика 3.12),

ϕ - угао који упадни зрак (оса сензора) заклапа с осом коловоза у равни коловоза (x оса у O_{xy} равни на слици 3.12).

T_k - температура коловоза,

T_v - температура возила,

T_o - температура околине,

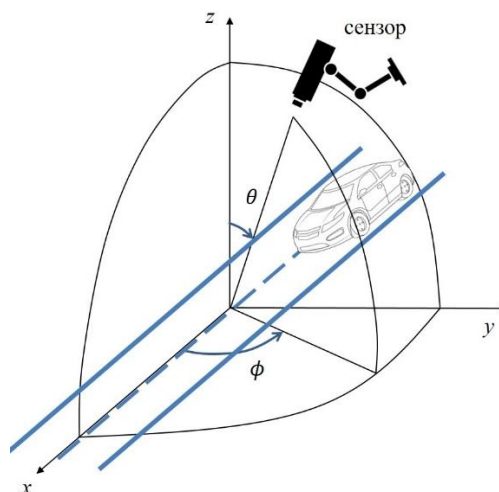
ε_k - фактор емисије коловоза,

ε_v - фактор емисије возила,

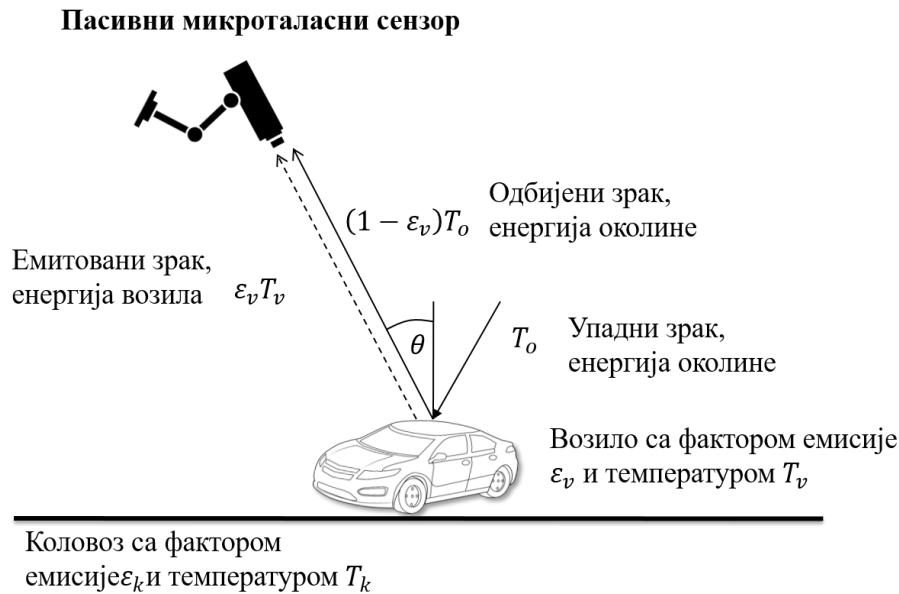
На слици 3.12. шематски је приказан положај пасивног инфрацрвеног сензора у односу на осу коловоза, а на слици 3.13 одбијени и емитовани зраци енергије возила.

Пасивни инфрацрвени сензори могу садржати неколико сензорских елемената (обично не више од пет) у жиљној равни уређаја. Они само мере енергију, а не дају тзв „термалну слику”. Такве уређаје Klein (2001) сврстава у оне који немају могућност стварања слике (енгл. *nonimaging*).

Насупрот њима, тзв. „*imaging*” сензори поседују матрицу с великим бројем сензорских елемената сложених у xy равни, слично пикселима дигиталне слике.



Слика 3.12. Положај пасивног инфрацрвеног сензора у односу на осу коловоза



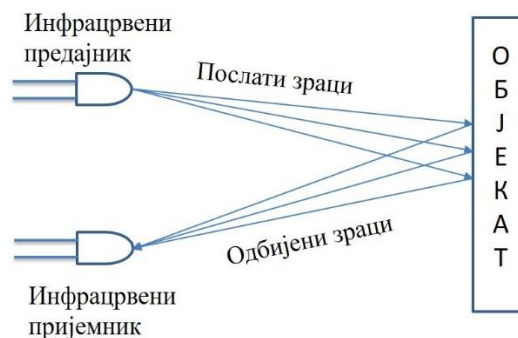
Слика 3.13. Емитована и рефлектована топлотна енергија возила (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

Пасивни инфрацрвени сензори могу имати једну или више детекцијских зона. Сензори с једном зоном детекције могу да прикупљају податке о протоку, заузећу и проласку возила. Сензори са више зона детекције, поред поменутих параметара могу да мере и брзину, класификују возила према дужини и детектују присуство, и тиме пружају функционалност као две индуктивне петље.

3.4.6.2. Активни инфрацрвени сензори

Активни инфрацрвени сензор „осветљава” део коловоза инфрацрвеним зрацима ниске снаге, које емитују ласерске диоде. Инфрацрвена енергија, која се одбија од возила на коловозу, прима се и усмерава преко оптичког система на материју осетљиву на инфрацрвено зрачење, која се налази у жижној равни.

Активни инфрацрвени ласерски сензор има два сета оптике. Један, задужен за емитовање сигнала, и други, који прима одбијени сигнал. Принципом рада шематски је приказан на слици 3.14.



Слика 3.14. Емисија и пријем инфрацрвених зрака (извор: <https://electricalfundablog.com/infrared-sensor/>, приступљено новембра 2018).

Обично се емитују најмање два зрака, који су међусобно удаљени неколико степени, као што приказује слика 3.15. Пријемна оптика има шире видно поље, тако да боље може да прихвати одбијену енергију. Тиме што постоје бар два послата зрака, омогућено је да се активним инфрацрвеним сензором мери брзина регистравањем времена када је возило ушло у зону детекције сваког појединачног зрака.



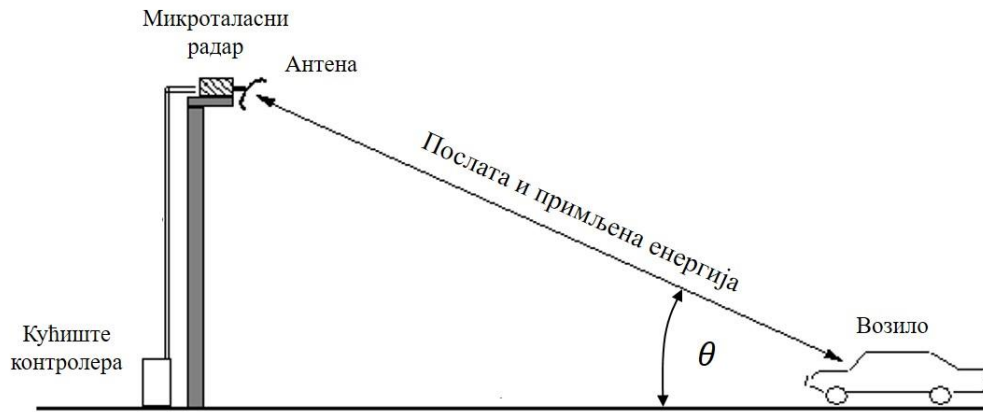
Слика 3.15. Послати сигнали активног инфрацрвеног сензора (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

Активни инфрацрвени сензори обезбеђују податке о присуству, протоку, брзини, дужини возила, класификацији, као и дужини реда. На раскрсницама је могуће поставити више уређаја за различите смерове, а њихови зраци неће се међусобно ометати. Модерни сензори имају могућност да приказују дводимензионалне или тродимензионалне слике.

На тачност свих инфрацрвених сензора утичу временске прилике. Честице у ваздуху могу да распу или апсорбују део енергије која би иначе стигла до сензора. Тако, на пример, магла, киша и снег умањују примљену енергију и смањују способност детектовања возила. Правило је да ће, ако човек може да уочи возило, оно бити детектовано инфрацрвеним сензором.

3.4.7. Микроталасни радарски сензори

Радар је електронски уређај који служи за детекцију објеката и одређивање њихове удаљености помоћу радио-таласа. Реч радар је акроним, настао од енгл. **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging. Радар је изумљен непосредно пре II светског рата и првенствено је служио за лоцирање бродова и авиона. Већина радара користи електромагнетне таласе врло мале таласне дужине (3-10cm, одговарајуће фреквенције 1-30GHz) који спадају у класу микроталаса (таласна дужина мања од 1m, фреквенције веће од 300MHz), те отуда и назив микроталасни радари. Принцип рада заснива се на слању радио-таласа. Кад таласи наиђу на препреку, део зрака се одбија и враћа, и бива детектован помоћу антене. Мерењем времена, потребног да се талас врати, могуће је израчунати удаљеност предмета. Исти принцип примењује се и код микроталасних радарских сензора саобраћајног тока. Шематски приказ рада овог типа сензора приказан је на слици 3.16.



Слика 3.16. Функционисање микроталасног радара (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

Подаци који могу да се добију коиршћењем микроталасног радара јесу присуство, заузеће, пролазак возила, проток, брзина, дужина возила и дужина реда.

Користе се два типа микроталасних радара: доплер радар с континуалним таласом (енгл. *Continuous Wave Doppler Radar - CW Doppler*) и радар с континуалним фреквентно модулисаним таласом (енгл. *Frequency Modulated Continuous Wave radar - FMCW radar*).

3.4.7.1. Доплер радар са континуалним сигналом

Доплер радар шаље сигнал чија је фреквенција константна током времена. Сагласно Доплеровом ефекту, који се јавља код свих таласних појава (механички, звучни, електромагнетни итд.), долази до промене фреквенције одбијеног таласа, ако се тело од ког се талас одбио креће и промена фреквенције сразмерна је брзини објекта.

Ову особину користи доплер радар, када возило у покрету проузрокује промену фреквенције одбијеног таласа у односу на послати. То значи да доплер радар може да детектује само возила у покрету и измери њихову брзину, али не може да детектује возила у мировању.

Ако је положај сензора фиксан, и константна брзина возила, могуће је израчунати промену фреквенције према формули (3.2) (*Klein*, 2001; *Jelušić*, 2008).

$$\Delta f_D = 2fv \frac{\cos \theta}{c} \quad (3.2)$$

где је:

Δf_D - разлика фреквенција услед Доплеровог ефекта,

f - радна фреквенција сензора,

v - брзина возила,

θ - угао који правац кретања возила заклапа са осом сензора (Слика 3.16) и

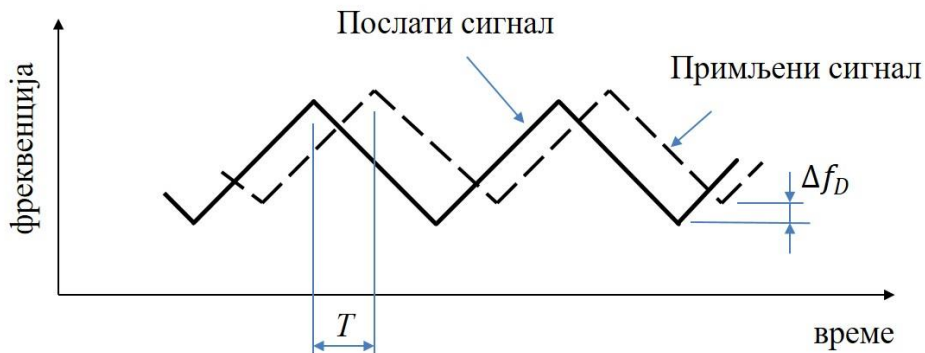
c - брзина електромагнетног таласа (брзина светлости $3 \cdot 10^8$ m/s).

Сагласно с формулом (3.2), уколико је угао $\theta = 90^\circ$, сензор неће моћи да измери брзину возила, док је најосетљивији кад је овај угао једнак нули: тада је промена фреквенције максимална.

3.4.7.2. Радар са фреквентно модулисаним сигналом

Други тип микроталасног радарског сензора, који се користи у управљању саобраћајем, емитује радио талас чија се фреквенција стално мења. Унутар задатог радног опсега, фреквенција се мења линеарно у функцији времена. Промена фреквенције послатог и

примљеног сигнала приказана је на слици 3.17. Мерењем временског помака између послатог и примљеног сигнала (T) и разлике њихових фреквенција, настале услед Доплеровог ефекта (Δf_D), могуће је одредити да ли је у зони детекције присутно возило, да ли мирује или се креће, као и која је брзина кретања возила.

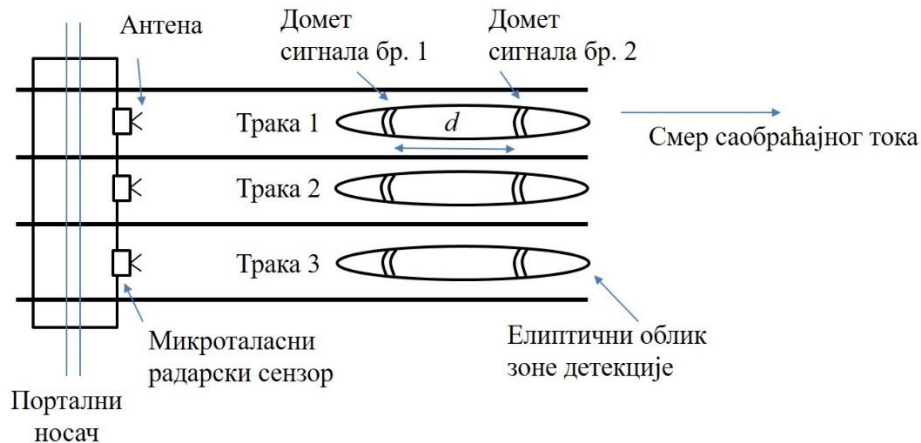


Слика 3.17. Зависност фреквенција послатог и примљеног сигнала од времена (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

Ако је сензор постављен тако да је правац слања сигнала паралелан с правцем кретања возила, тада је брзину могуће измерити и мерењем времена потребног да возило прође између две зоне детекције, као на слици 3.18. Ако је познато растојање између зона детекције, d , тада се брзина возила v може израчунати према (*Klein*, 2001):

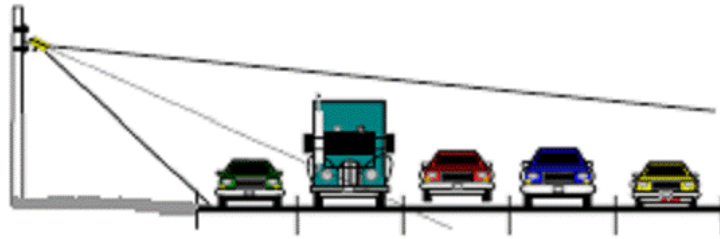
$$v = \frac{d}{\Delta T} \quad (3.3)$$

где је ΔT време између тренутка проласка возила кроз прву и другу зону детекције.



Слика 3.18. Мерење брзине возила кад постоје две зоне детекције (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

Микроталасни радар с фреквентно модулисаним сигналом могуће је поставити и поред саобраћајнице, тада се различите зоне детекције користе за прикупљање података у различитим тракама, као што је приказано на слици 3.19.



Слика 3.19. Постављање микроталасног радара поред саобраћајнице омогућава покривање више трака (извор: *Mimbela* и *Klein*, 2007).

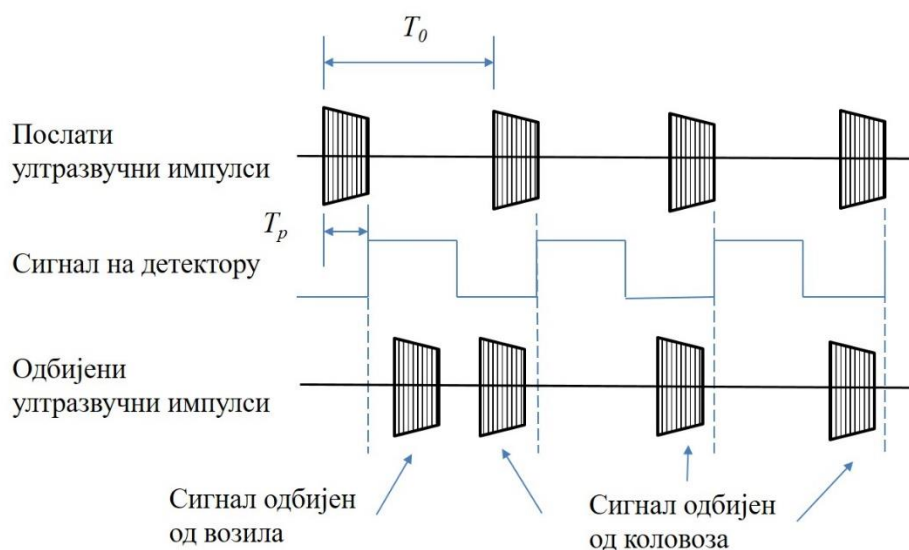
Радарски сензори, постављени паралелно с правцем кретања возила, прецизнији су у односу на оне постављене нормално на правац кретања. Сензори постављени нормално на правац кретања најчешће се користе за детекцију присуства возила на прилазима сигналисаних раскрсница.

Главна предност оба типа микроталасних радарских сензора јесте неосетљивост на лоше временске услове, могућност директног мерења брзине, као и могућност покривања више трака помоћу једног уређаја.

Недостатак доплер радара је у томе што нема могућност детекције заустављених возила.

3.4.8. Ултразвучни сензори

Ултразвучни сензор одашиље механичке таласе фреквенција између 25 и 50kHz (ултразвук), што представљају фреквенције изнад области коју може да региструје човечије ухо. Постоје ултразвучни сензори који емитују континуалан сигнал, и они који одашиљу импулсе, кратке секвенце ултразвука. Послати ултразвучни талас одбија се од препреке и враћа. Ако сензор емитује континуални сигнал, присуство возила детектује се преко промене фреквенције узроковане Доплеровим ефектом. Код пулсних ултразвучних сензора присуство возила детектује се мерењем времена за које је послатом сигналу потребно да се врати. Принцип рада ултразвучног пулсног сензора приказан је на слици 3.20, где је T_p трајање импулса (обично од 0,02-2,5ms), а T_0 временски размак између два импулса (33-170ms) (*Klein* и сар, 2006).



Слика 3.20. Принцип рада пулсног ултразвучног сензора (извор: *Klein* и сар, 2006).

Ултразвучни сензори могу се постављати поред или изнад коловоза. Показатељи саобраћајног тока који се могу добити ултразвучним сензорима јесу присуство, проток, брзина и класификација возила (*Martin* и сар, 2003).

Главна предност ултразвучних сензора је могућност инсталирања без потребе уграђивања у коловоз, као и могућност коришћења једног сензора за више трака. Недостаци које показују ултразвучни сензори јесу осетљивост на промену температуре и јак ветар. Код великих вредности временских размака између импулса, смањена је могућност детекције возила која се крећу великим брзинама.

Најобимнија искуства у коришћењу ултразвучних сензора су из Јапана, због политике да се на постојећим путевима користе неинтрузивни уређаји (*Martin* и сар, 2003).

3.4.9. Пасивни звучни сензори

Пасивни звучни сензори примају звучне таласе које производе возила у покрету. Примарни звук је онај који настаје услед трења пнеуматика о коловоз. При мањим брзинама возила или ако су возила заустављена, у зависности од тога какви су услови на прилазима раскрсницама, сензори „слушају” и звуке које производе мотори.

Сензорски елемент састоји се из правоугаоне матрице микрофона која прима звучни сигнал. Када возило уђе у зону детекције, оно производи повећање снаге звучних таласа које микрофони потом региструју. Обрадом ових сигнала детектује се возило. Уређаји се постављају изнад или поред коловоза, паралелно с правцем кретања саобраћајног тока. Један пример инсталације приказан је на слици 3.21.



Слика 3.21. Пасивни звучни сензор (извор: *SmartTek Systems Inc.* <http://www.smarteksys.com/>, приступљено новембра 2018).

Подаци који се могу добити помоћу пасивних звучних сензора јесу проток, заузеће, брзина и класификација возила. Брзина се може добити помоћу брзинске клопке (ако се користе два уређаја на познатом растојању), или на основу претпостављене дужине возила и податка о заузећу. Пасивни звучни уређаји могу да детектују возила у мировању, док им је мотор укључен. Класификација возила заснива се на поређењу звукова које стварају различите категорије возила.

На тачност добијених података утичу екстремни временски услови, као што су јак ветар, јака кише или густ снег, јер мењају начин простирања звука. Такође, бучна возила у траци која је најближа сензорском елементу могу да „замаскирају” звукове које производе тиша возила у даљим тракама.

3.7.10. Видео сензори

Коришћење технологије анализе слике и видео снимка као замене за индуктивне петље започело је средином 1970-их година у Сједињеним Америчким Државама. Током 1970-их и 1980-их година обављана су истраживања примене видео сензора и у Јапану, Великој Британији, Немачкој, Шведској и Француској (Klein, 2001). Захтевана снага је тек две деценије касније постала доступна по таквој цени да су ови системи постали конкурентни. Уобичајени називи система за обраду слике, помоћу којих се добијају подаци о саобраћајном току, је су *Video Image Processor (VIP)*, *Video Imaging Vehicle Detection System (VIVDS)* или видео сензор. У дисертацији ће се користити израз видео сензор.

Видео сензори обично се састоје од једне или више видео камера, микропроцесорске опреме за обраду слике и софтвера за анализу слике и претварање у податке о саобраћајном току.

Принцип рада видео сензора заснива се на мерењу промена осветљености на низу узастопних слика (фрејмова од енгл. *frame*) које пружају видео камере. Пролазак возила проузрокује промене елемената слике (групе пиксела). На црно-белој слици мења се ниво сиве боје приликом проласка возила, док новији уређаји, који користе камере у боји, боље препознају објекте (возила, пешаке).

У зависности од начина обраде слике и добијању података о саобраћајном току, постоје три врсте видео сензора: *Tripline*, *Closed-Loop Tracking (CLT)* и *Data Association Tracking (DAT)* (Mimbella и Klein, 2007).

Tripline приступ заснива се на мерењу параметара слике кад је возило присутно, у односу на то кад нема присутних возила. Коловоз је подељен на мрежу малих квадрата, у којима се посматра да ли се возило креће, стоји или нема возила и на тај начин се добијају подаци о протоку, класификацији возила и брзини.

Closed-Loop Tracking приступ је проширење *Tripline* приступа и омогућава детекцију возила на већој површини коловоза тако да се појединачно возило прати све док је у видокругу камере. У тренутку кад возило уђе у зону детекције, оно се региструје променом групе пиксела, и затим се та промена пиксела изнова детектује и прати све док возило не изађе из зоне детекције. Провера детекције обавља се вишеструко. На овај начин могу да се добију и подаци о трајекторији возила, укључујући промену саобраћајне траке, смер скретања и слично.

Трећи приступ, *Data Association Tracking*, идентификује и прати појединачно возило док је у видном пољу. Појединачно возило идентификује се помоћу групе пиксела која се издваја из околине на основу градијента осветљења и морфологије. Анализом градијента добијају се границе возила, а морфологијом облик и димензије возила. Тако идентификован скуп пиксела придружује се конкретном возилу, и прати док не изађе из видног поља. Повезивањем више камера могуће је добити податке о времену путовања као и податке извор-циљ за подручје које је покривено камерама (Mimbella и Klein, 2007).

На слици 3.22. приказан је поступак обраде слике за потребе детекције, класификације и праћења возила. Након што се подаци дигитализују и складиште, помоћу низа алгоритама обавља се екстракција просторних и временских карактеристика, како би се возила диференцирала од позадине. У процесу детекције, у његовој раној фази постоји више различитих прагова који омогућавају да се евентуално погрешно детектовано возило не искључи одмах у почетку, јер би се уклањањем података у раној фази изгубила могућа информација. У раним фазама допушта се грешка, која ће се у каснијим фазама детекције исправити алгоритмима класификације, идентификације и праћења (Klein, 2001). Следећи

корак је процес сегментације слике, која се дели на мање делове, обично величине једног возила, јер се на тај начин боље препознају карактеристике возила. Карактеристике возила унапред су познате и процесом екстракције, пиксели се испитују, и препознају се те унапред задате карактеристике. За препознавање ових карактеристика користе се вештачке неуронске мреже, нарочито у поступцима идентификације и класификације возила.

Врсте видео сензора с могућношћу праћења трајекторије возила користе технике тзв. Калманових филтера (*Gil и сар, 1996*) за ажурирање позиције и процену брзине возила. Познавањем промене положаја возила током времена креирају се путање возила, и на тај начин се добијају локални подаци о саобраћајном току, као што су проток, фреквенција промене траке и сл. Ови подаци, заједно с информацијама о појединачним возилима (време податка, врста возила, боја, облик, позиција и брзина) шаљу се у центар за управљање саобраћајем (*Klein, 2001*).

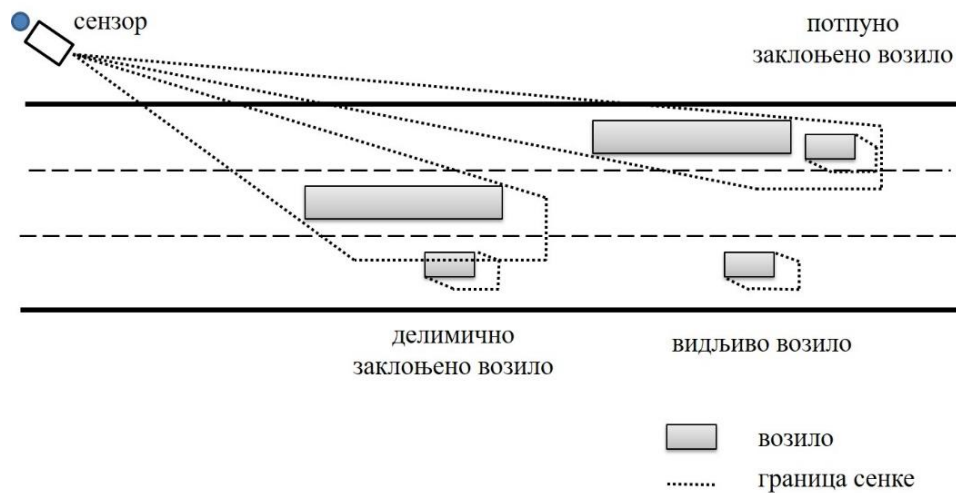


Слика 3.22. Концепт обраде слике за потребе детекције, класификације и праћења возила (извор: *Mimbella и Klein, 2007*).

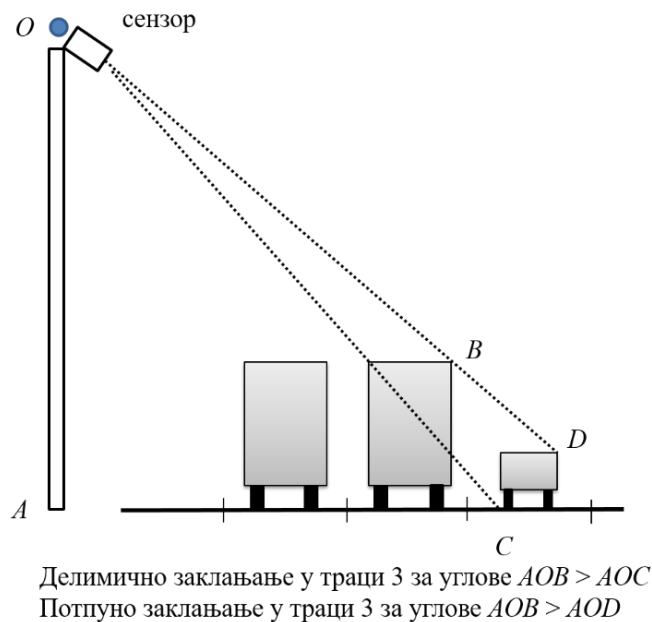
Утицај временских услова на видео сензоре је значајан. Светлост (сунчева или светлост фарова), рефлексија, сумрак или зора, сенка, снег, магла, ветар који помера камеру, неки су од спољашњих услова који утичу на тачност детекције возила. Ове појаве су неизбежне, али очекиване, па су развијени алгоритми за обраду слике који умањују њихов утицај. Технологија временом напредује и изналазе се све бољи алгоритми, те самим тим и видео сензори стално побољшавају перформансе.

Једна од предности видео сензора јесте могућност да се помоћу једног уређаја види неколико саобраћајних трака. Удаљеност до које могу да се виде возила у некој од посматраних трака зависи од позиције и оријентације камере. Позиција камере такође је важна када се ради о заклањању, наиме, ближа возила могу да законе возила која се налазе у даљим тракама. Ово заклањање може се посматрати како у хоризонталној тако и у вертикалној равни, као што је приказано на сликама 3.23. и 3.24.

Видео сензори могу се постављати поред коловоза или изнад њега. Њихова усмереност може бити таква да гледају долазећи или одлазећи саобраћајни ток. Ако је сензор постављен уз саобраћајни ток (гледа долазећи саобраћај), долази до заслепљивања светлима фарова или одсјајем од мокрог коловоза, веће је заклањање високим возилима (камиони и аутобуси), место евентуалне саобраћајне незгоде није заклоњено возилима који стварају ред. С друге стране, уколико је сензор постављен низ саобраћајни ток, он гледа одлазећи саобраћај, анализом задњих светала на возилима могу се добити додатне информације о кочењу или промени правца, лакша је детекција и праћење возила јер се оно први пут детектује кад је најближе камери (*Klein, 2001*).



Слика 3.23. Заклањање у хоризонталној равни (извор: Јовановић, 1997)



Слика 3.24. Заклањање у вертикалној равни (извор: Јовановић, 1997)

Од свих сензора, видео сензори имају највеће могућности са становишта разноврсности прикупљених података и могућности примене. Подаци који се могу добити јесу присуство, заузеће, проток, брзина, класификација, густина, време путовања, дужина реда, подаци извор-циљ. Функционално, један видео сензор може да замени више индуктивних петљи.

3.4.11. Пробна возила

Коришћење возила која се налазе на мрежи, у саобраћајном току, за потребе прикупљања података о саобраћајном току, у пракси је још од 1920-их година (Turner и сар, 1998). Подаци који се могу добити помоћу пробних возила јесу брзина и време путовања. Приручник *SEMOG Travel Time Data Collection* (2008) разликује тест и пробна возила, док се она у Turner и сар. (1998) називају активним (одговарају тест возилима) и пасивним (представљају пробна возила).

Тест возила јесу возила која су на мрежи управо с разлогом прикупљања података и таква возила су опремљена уређајима, било *GPS (Global Positioning Systems)* или електронским уређајима за мерење растојања (*Distance Measuring Instruments - DMI*). Возач је свестан да прикупља податке, и потребно је да његово понашање у саобраћајном току буде сагласно с неким од приступа:

- **Метод плутајућег возила** (енгл. *Floating Car Method*): Циљ плутајућег возила је да се креће просечном брзином саобраћајног тока. Ово се постиже тиме да возило претекне једнак број возила оном броју возила која су њега претекла.
- **Метод просечног возила** (енгл. *Average Car Method*): Ово је мање ограничен приступ, возач се понаша према сопственој перцепцији осталог саобраћајног тока, онако како допуштају општи услови у саобраћају.
- **Модел максималног возила** (енгл. *Maximum Car Method*): Возач се креће према ограничењу брзине, осим уколико му услови у саобраћају то не допуштају.
- **Модел праћења возила** (енгл. *Chase Car Method*): Возач на случајан начин изабере неко возило у саобраћајном току, и прати га. Ово омогућава да се прати понашање просечног возача, а не возача који вози тест возило које прикупља податке.

Према *SEMCOG Travel Time Data Collection (2008)* најчешћи метод који се помиње у литератури јесте метод плутајућег возила. Неки аутори податке прикупљене возилима која се крећу на мрежи називају *Floating Car Data (Brockfeld и сар, 2007; Leduc, 2008)* без обзира на који начин су подаци из возила прикупљени.

Са друге стране, **пробна** возила су пасивна возила, која се иначе налазе на мрежи, а опремљена су уређајима који могу да се користе за прикупљање података о тренутној позицији, брзини и времену путовања. Пробна возила могу бити путнички аутомобили (приватна или такси возила), аутобуси јавног превоза или друга комерцијална возила.

Основна разлика у односу на тест возила је та што возачи нису упућени на посебан начин вожње, већ се подаци прикупљају док се возило налази на мрежи са својим нормалним (уобичајеним) извором, циљем и сврхом путовања.

Сврха прикупљања оваквих података није да би се пратила појединачна возила (како то можда чине поједине компаније које прате сопствена возила) већ прикупљање података за надзор саобраћаја на мрежи. Генерално гледајући, користе се за детекцију појава загушења, потребе вођења саобраћаја по мрежи, информисања корисника и слично. Прикупљање оваквих података многе компаније или приватна лица могу сматрати као задирање у приватност или пословне податке, и из тог разлога је овакав вид прикупљања података мање заступљен.

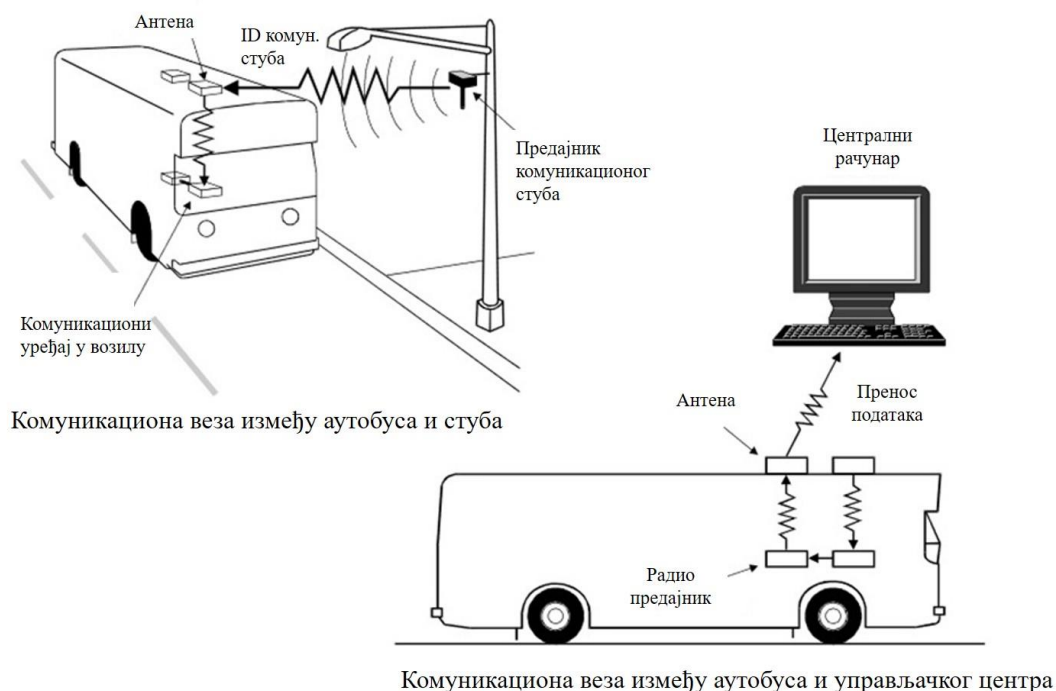
С аспекта коришћења података, тест возилима добија се узорак величине 4-12 појединачних времена путовања за једно подручје, за један дан, док се пробним возилима добијају подаци о временима путовања од 10% до чак 30% укупног протока за исти период (*SEMCOG Travel Time Data Collection, 2008*).

Подаци су, од почетка примене ове технике, прикупљани ручно, а касније су развијене многе апликације за аутоматско прикупљање података. Неки од начина аутоматског прикупљања података у возилима на мрежи описани су у наставку.

3.4.11.1. Аутоматска локација возила

Аутоматску локацију возила (енгл. *Automatic Vehicle Location - AVL*) користе углавном компаније које обављају јавни превоз. Опрема у возилу комуницира с пријемницима који се налазе на стајалиштима, како би преузели информацију о локацији. Та локација се онда

прослеђује управљачком центру, где се обрађују, складиште и прослеђују подаци о локацијама, времену путовања и брзини возила. Начин комуникације приказан је на слици 3.25.



Слика 3.25. Процес преноса информација код система за аутоматско лоцирање возила (извор: *Turner* и сар, 1998).

3.4.11.2. Аутоматска идентификација возила

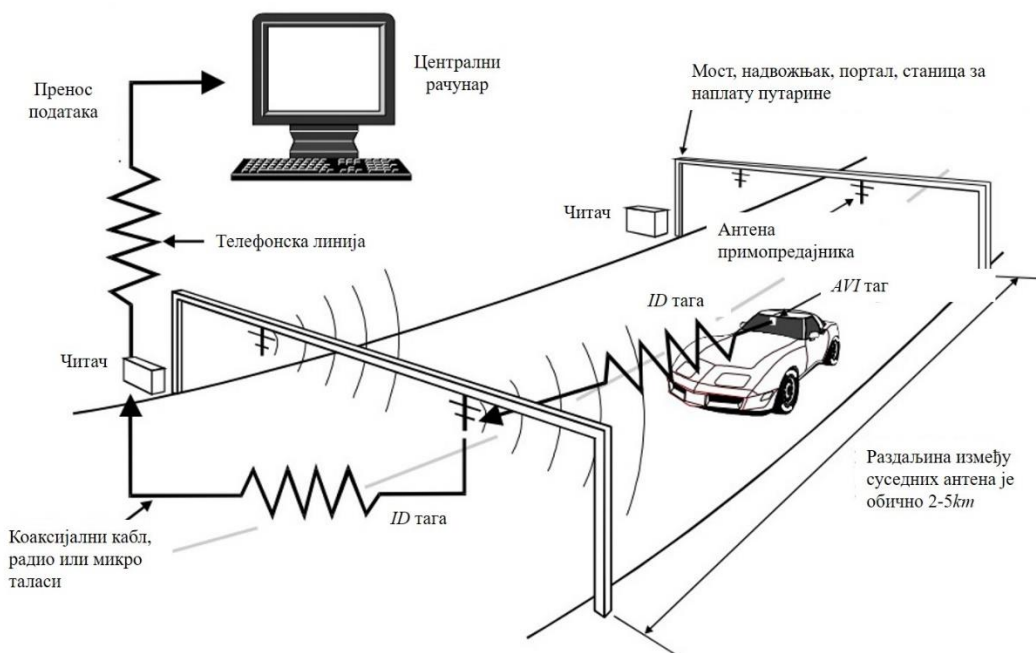
Аутоматска идентификација возила (енгл. *Automatic Vehicle Identification - AVI*) првенствено се користи код аутоматске наплате путарине, а друге примене су за надзор саобраћаја у реалном времену, управљање саобраћајним незгодама, информисање корисника, праћење ефикасности система (време путовања и брзина) (*Turner* и сар, 1998).

Возила су опремљена тзв. таговима (енгл. *tag*), који су у суштини транспондери (реч настала од енгл. термина *transmitter/responder*) који на трансмисију читача шаљу одговор (*respond*) који садржи податак. Податак који таг носи у себи јесте врста електронске регистрационе ознаке возила.

Поред или изнад коловоза налазе се антене које шаљу сигнал радио-фреквенције, који се од тага враћа измењен за додати податак о идентификацији. Сигнал се враћа у читач, који прикупља информације и шаље у управљачки центар. На тај начин могуће је израчунати време путовања возила између два *AVI* одашиљача.

Радио-фреквентни сигнал може да се одашиље константно, или да има најаву помоћу индуктивне петље, какав је случај на наплатним станицама електронске наплате путарине.

Пример инсталације и начин комуникације код *AVI* система приказан је на слици 3.26.

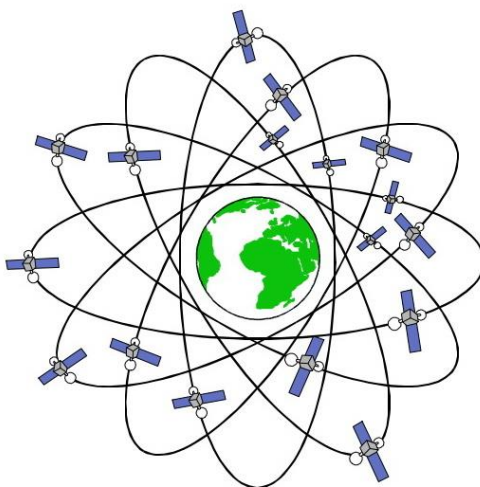


Слика 3.26. Комуникација возило-пут код система за аутоматску идентификацију возила (извор: *Turner* и *cap*, 1998).

3.4.11.3. Global Positioning Systems (GPS)

Глобални систем позиционирања (енгл. *Global Positioning Systems - GPS*) пројектован је 1973. године у Министарству одбране САД. Првобитна намена овог система била је у навигацији војних бродова, авиона и друмских возила.

Општи принцип рада *GPS*-а заснива се на мерењу удаљености неког објекта од неколико сателита, путем којих се добија прецизна тренутна позиција. У Земљину орбиту лансиран је одређени број сателита (слика 3.27) који омогућавају сталну покривеност било ког дела Земљине површине. У сваком тренутку са било које тачке неопходно је да буду видљива намање четири сателита, који представљају референтне тачке на основу којих се *GPS* пријемнику одређује тренутна локација (*Dimitrijević*, 1999).

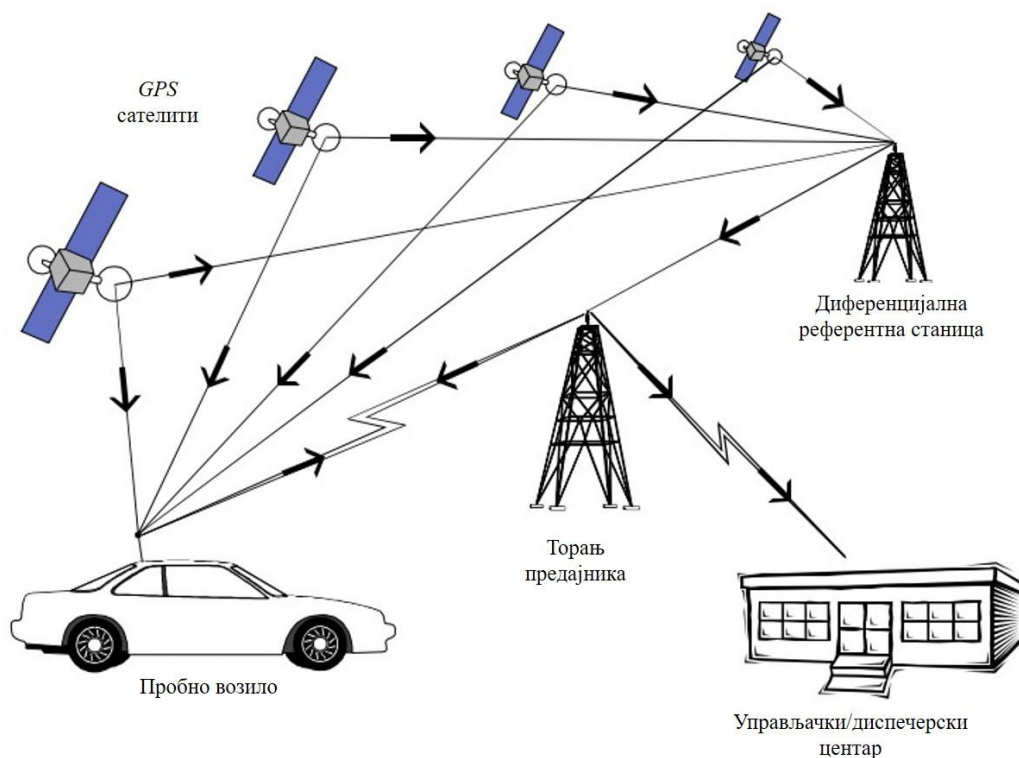


Слика 3.27. Распоред *GPS* сателита у Земљиној орбити (извор: *SEMCOG Travel Time Data Collection*, 2008).

Прорачун положаја *GPS* пријемника на површини Земље одређује се трилатерацијом, мерењем растојања између *GPS* пријемника и сателита. У простору се позиција тражене тачке налази у пресеку три сфере (пресек прве две сфере је кружница, пресек ове кружнице и треће сфере су две тачке). Решење не може једнозначно бити одређено с три мерења, већ је потребно и четврто, којим се одбацује једна од две пресечне тачке. Из тог разлога је потребна локација најмање четири сателита.

Из разлога војне безбедности Министарство одбране САД уноси у систем тзв. „намерну грешку” под називом „селективни приступ” (*Selective Availability - SA*) када се прецизност смањује на око 91m (300 стопа), за разлику од пуне прецизности која износи 18m (60 стопа) (*SEMCOG Travel Time Data Collection, 2008*).

Проблем смањене прецизности услед примене „селективног приступа” превазилази се употребом тзв. диференцијалног *GPS*-а (*DGPS*). Ова техника састоји се у томе да се један *GPS* пријемник постави на локацију с познатим координатама који чини тзв. референтну станицу. Она служи за одређивање грешке, односно, за емитовање корекције за мобилне *GPS* пријемнике. Прецизност која се добија коришћењем *DGPS*-а креће се од 5 до 0,02m (*Dimitrijević, 1999*). Пример распореда сателита и начин комуникације код *DGPS* приказан је на слици 3.28.



Слика 3.28. Распоред сателита и референтне станице и комуникација код *DGPS* система (извор: *SEMCOG Travel Time Data Collection, 2008*).

Коришћењем *GPS*-а могу се добити подаци о положају, смеру и брзини возила на било ком месту на Земљи.

Било да су у питању тест или пробна возила, она су опремљена *GPS* пријемницима, који прикупљају податке о тренутним локацијама. Тест возила поседују и уређаје који податке о тренутним локацијама у реалном времену шаљу у управљачки центар. Како би и пробна возила

могла да се користе за добијање информација, мора постојати двосмерна комуникациона веза, да би се информација од пробног возила доставила управљачком центру.

Последњих година присутан је значајан пораст тржишта за *GPS* јединице у возилима, и како поседовање *GPS* уређаја више не представља луксуз, подаци које је могуће добити на овакав начин представљају значајан потенцијал. Највећи проблем који је потребно превазићи јесте проблем приватности.

3.4.11.4. Мобилни телефон

Коришћење мобилне телефоније у сврху прикупљања података о саобраћајном току користи геолоцирање мобилних телефона. Деведесетих година прошлог века користила се и тзв. пријава мобилним телефоном, где је било потребно да возач, добровољно, позове управљачки центар, али је овај начин прикупљања података напуштен.

Геолоцирање мобилних телефона заснива се на чињеници да је могуће искористити то што данас сви мобилни телефони поседују *GPS* уређај, па је могуће одредити њихову локацију у било ком тренутку. Праћењем локација мобилних телефона сваке секунде могуће је одредити да ли се неки конкретан мобилни телефон налази у возилу и, ако је то случај, могуће је одредити локацију и брзину тог возила.

3.4.12. Даљинско мерење

Последњих година спроводе се истраживања како би нека од метода прикупљања података тзв. даљинским мерењем постала доступна. Даљинско мерење подразумева прикупљање података о земљишту и објектима без директног физичког контакта. Употребљавају се различита снимања из ваздуха или из Земљине орбите. Снимање из ваздуха може се обављати из авиона, хеликоптера или дрона, а у Земљиној орбити се користе сателити.

За добијање информација о саобраћајном току, осим фотографија (орто-фото снимака), могу се користити и скенери, видео камере, термалне камере, радари и слично.

Фотографисање из ваздуха, као начин да се прикупе подаци о саобраћају, датира од краја двадесетих година прошлог века. *Johnson* (1928) је у свом раду описао студију спроведену у Мериленду 1927, када је снимљено 127 фотографија, с размаком од 13 секунди, из авиона који је летео на висини од 1 *km* и тиме је било покривено око 43 *km* пута од Балтимора до границе с Колумбија дистриктом (*District of Columbia*). Један од раних поборника употребе фотографија из ваздуха био је и Гриншилдс, познати стручњак из области теорије саобраћајног тока. Он је у својим радовима (*Green Shields*, 1933; 1947) предлагао фотографски метод за проучавање понашања у саобраћају, и веровао је да ће тачност и комплетност података за подручје обухваћено фотографијама из ваздуха засенити све тешкоће у имплементацији ове методе (*Jiang*, 2005).

Новија истраживања датирају од краја 20. века, кад је 1998. године Конгрес САД позвао на истраживања даљинског мерења и технологија за прикупљање информација о простору. *Angel* и сарадници (2003) представили су методе за одређивање брзине, густине саобраћајног тока, времена путовања, временских губитака, као и нивоа услуге на ауто-путу помоћу фотографија из ваздуха. *Toth* и сарадници (2003) развили су нову методу коришћења *LiDAR* (енгл. *light detection and ranging*) уређаја из ваздуха, који користе сличан принцип као *RADAR* (*Jiang*, 2005).

У својој дисертацији, *Paska* (2009) је дала детаљан опис савремених технологија за даљинско мерење геопросторних података, са посебним освртом на употребу за управљање саобраћајем.

Технологије даљинског мерења користе се за добијање података о протоку, класификацији возила, брзинама возила, ПГДС-у, густини саобраћајног тока, И-Ц матрицама кретања.

3.5. Предности и недостаци

Не постоји једна сензорска технологија која је погодна за све примене. Анализом карактеристика рада појединих сензорских технологија долази се до предности и недостатака сваке од њих. Анализом постојеће литературе (*Klein, 2001; Peeta и Zhang, 2002; Martin и сар, 2003; Mimbella и Klein, 2007; Jelusić, 2008; Paska, 2009; Traffic Monitoring Guide, 2016*) синтетизоване су предности и недостаци сваке појединачне сензорске технологије, и представљене у Табели 3.3.

Табела 3.3. Предности и недостаци сензорских технологија

Сензорска технологија	Предности	Недостаци
Индуктивна петља	<ul style="list-style-type: none"> ▪ добро позната технологија с великим постојећим искуством ▪ ниска цена ▪ висока тачност ▪ одличне могућности прилагођавања за различите зоне детекције (облик и величина) ▪ лоши метеоролошки услови (падавине, осветљеност, ветар) не утичу на рад сензора 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ инсталација захтева радове на коловозу ▪ уградњом се погоршава стање коловоза ▪ инсталација и одржавање захтевају затварање траке ▪ на тачност утиче обим саобраћаја и варијација температуре коловоза ▪ неопходна уградња више сензора за поједине примене (мерење брзине, управљање раскрсницом) ▪ немогућност уградње ако коловозна конструкција садржи гвожђе (мостови, надвожњаци, армирано-бетонске конструкције) ▪ оштећење контролера услед утицаја вандализма
Магнетни сензори		
двоосни магнетометар	<ul style="list-style-type: none"> ▪ лоши метеоролошки услови (падавине, осветљеност, ветар) не утичу на рад сензора ▪ могућност уградње ако коловозна конструкција садржи гвожђе (мостови, надвожњаци, армирано-бетонске конструкције) ▪ неки модели омогућавају бежичну везу 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ инсталација захтева радове на коловозу, али мање него код индуктивне петље ▪ уградњом се погоршава стање коловоза ▪ инсталација и одржавање захтевају затварање траке ▪ мала зона детекције
магнетометар са завојницом	<ul style="list-style-type: none"> ▪ једноставност, робусност, дуговечност ▪ ниска цена ▪ једноставнија уградња него код индуктивне петље 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ инсталација захтева радове на коловозу или просецање тунела испод коловоза ▪ немогућност детекције заустављених возила ▪ мали скуп података ▪ мала зона детекције

Табела 3.3. Предности и недостаци сензорских технологија (наставак)

Сензорска технологија	Предности	Недостаци
Пнеуматска цев	<ul style="list-style-type: none"> ▪ брзо постављање ▪ погодни за привремено прикупљање података ▪ мало коришћење енергије ▪ ниска цена ▪ једноставно одржавање 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ непрецизност бројања осовина при великом обиму саобраћаја ▪ температурна осетљивост ваздушног прекидача ▪ оштећење услед утицаја пнеуматика возила или вандализма
Пиезоелектрични сензори	<ul style="list-style-type: none"> ▪ мерење тежине и броја осовина ▪ пружају више информација него индуктивна петља, ▪ висока тачност мерења брзине ▪ класификација возила према тежини и размаку осовина 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ инсталација захтева радове на коловозу ▪ инсталација и одржавање захтевају затварање траке ▪ на тачност утиче квалитет коловоза, обим саобраћаја, састав саобраћајног тока, брзина возила и варијација температуре коловоза ▪ неопходна уградња више сензора за поједине примене (мерење брзине, управљање раскрсницом)
<i>WIM</i> технологија		
Савијајуће плоче	<ul style="list-style-type: none"> ▪ могу се користити за прикупљање података, као и за мерење тежине ▪ већа тачност у односу на пиезоелектричне <i>WIM</i> уређаје ▪ нижа цена у односу на ћелије оптерећења ▪ одржавање не захтева замену, већ рехабилитацију након 5 година 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ мања тачност у односу на ћелије оптерећења ▪ већа цена у односу на пиезоелектричне <i>WIM</i> уређаје
Пиезоелектрични <i>WIM</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ могу се користити за прикупљање података, као и за мерење тежине ▪ најнижа цена од свих <i>WIM</i> технологија ▪ могу да се користе у ширем опсегу брзина возила (15-130 <i>km/h</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ најмања тачност у односу на остале <i>WIM</i> технологије ▪ осетљиви на брзе промене температуре ▪ кратак век трајања, морају се заменити после 3 године
Ћелије оптерећења	<ul style="list-style-type: none"> ▪ могу се користити за прикупљање података, као и за мерење тежине ▪ највећа тачност од свих <i>WIM</i> технологија 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ највећа цена у односу на остале <i>WIM</i> технологије (иницијални и трошкови одржавања) ▪ неопходна замена након 5 година
Капацитивне простирке	<ul style="list-style-type: none"> ▪ могу се користити за прикупљање података, као и за мерење тежине ▪ погодни како за привремено, тако и за стално прикупљање података о тежини ▪ зона детекције покрива до 4 траке 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ мања тачност у односу на савијајуће плоче и ћелије оптерећења ▪ висока цена у односу на остале <i>WIM</i> технологије (иницијални и трошкови одржавања), слично као код ћелија оптерећења

Табела 3.3. Предности и недостаци сензорских технологија (наставак)

Сензорска технологија	Предности	Недостаци
Инфрацрвени сензори		
Пасивни инфрацрвени	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Један уређај може да има више зона детекције у једној саобраћајној траци ▪ могућност мерења брзине једним уређајем с више зона детекције ▪ веома мали утицај временских прилика на уређаје кратког домета ▪ могућност детекције на растојању 100 m од уређаја (детектори дугог домета) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ утицај временских услова смањене видљивости (магла, смог, киша, снег) на тачност код уређаја дугог домета ▪ изражена појава заклањања код уређаја дугог домета
Активни инфрацрвени	<ul style="list-style-type: none"> ▪ висока тачност мерења брзине, позиције и класификације возила ▪ зона детекције покрива више трака 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ утицај временских услова смањене видљивости (магла, смог, киша, снег) на тачност ▪ потребна прецизна израда, садржи осетљиву електронику и прецизну механику ▪ висока цена
Микроталасни радари	<ul style="list-style-type: none"> ▪ неосетљивост на временске услове ▪ директно мерење брзине ▪ зона детекције покрива више трака 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Доплер радари не могу да детектују заустављено возило, па не могу да се користе за мерење заузећа ▪ Изражена појава заклањања ако је сензор постављен поред саобраћајнице ▪ Доплер радари нису се показали као погодни за бројање саобраћаја на раскрсницама
Ултразвучни сензори	<ul style="list-style-type: none"> ▪ зона детекције покрива више трака ▪ висока тачност мерења протока ▪ једноставна уградња ▪ мали захтеви за одржавањем 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ утицај временских услова (промена температуре, јак ветар) на тачност ▪ смањена тачност детекције возила која се крећу већим брзинама (на ауто-путу) уколико је временски размак између импулса велики ▪ зона детекције искључиво кружног облика, нормална на осу сензора
Пасивни акустични сензори	<ul style="list-style-type: none"> ▪ пасивна детекција ▪ зона детекције покрива више трака ▪ брзо и једноставно постављање ▪ постављање поред коловоза без ометања саобраћајног тока 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ утицај временских услова (јак ветар, јака киша, густ снег, ниске температуре) на тачност ▪ поједини модели нису погодни при условима загушења (стани-крани услови у саобраћајном току) ▪ слаба могућност класификације возила ▪ бучна возила у ближним тракама могу да „замаскирају” тиша возила у даљим тракама

Табела 3.3. Предности и недостаци сензорских технологија (наставак)

Сензорска технологија	Предности	Недостаци
Видео сензори	<ul style="list-style-type: none"> ▪ зона детекције покрива више трака ▪ један уређај може да има више зона детекције ▪ једноставно прилагођавање зона детекције ▪ широк скуп података које је могуће прикупити ▪ могућност интеграције детекције возила, прикупљања података и надзора ▪ могућност повезивања уређаја на различитим локацијама 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ лоши метеоролошки услови (киша, магла, снег, ветар) утичу на рад сензора ▪ услови осветљења (сумрак и зора, заслепљивање од сунца, одсејај од површина воде на коловозу, замагљивање) утичу на рад сензора ▪ изражена појава заклањања видног поља ▪ неопходно редовно уклањање нечистоћа (прашина, паучина, иње, снег, леденице) како би се постигао несметани рад сензора ▪ потребна инсталација на одређеној висини да би се постигла оптимална детекција и мерење других параметара ▪ својства сензора зависе од положаја камере ▪ захтевна калибрација
Пробна возила	<ul style="list-style-type: none"> ▪ покривање великог простора ▪ могућност одређивања параметара на читавој мрежи саобраћајница ▪ ниски трошкови увођења система, као и оперативних трошкова, ако се користе пробна возила постојећих флота ▪ висок квалитет података, уз одговарајући удео пробних или тест возила у укупном саобраћајном току ▪ посебно погодни за прикупљање података у градским подручјима 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ захтевна обрада података ▪ питање заштите приватности и пословне тајне ▪ захтева усклађивање различитих интересних група (администрација, управљање саобраћајем, надзор саобраћаја, стручњаци, наука, јавни градски превоз, такси службе, компаније, власници возила)
Даљинско мерење	<ul style="list-style-type: none"> ▪ покривање великог простора ▪ могућност одређивања параметара на читавој мрежи саобраћајница ▪ широк скуп података које је могуће прикупити (проток, класификација возила, брзина, ПГДС, густина саобраћајног тока, И-Ц матрице кретања ▪ могућност прикупљања података у неприступачним подручјима 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ висока цена снимања из ваздуха или са сателита ▪ захтевна обрада података ▪ релативно нова технологија

Резултати истраживања у САД приказани у *Martin* и сар. (2003) показују да су најпопуларније технологије за прикупљање различитих типова података:

- Бројање (проток) - индуктивна петља, пнеуматска цев, пиезоелектрични сензор;
- Брзина - индуктивна петља, пиезоелектрични сензор, пнеуматска цев;
- Класификација возила - пнеуматска цев, пиезоелектрични сензор, ручно мерење;
- Тежина возила - пиезоелектрични сензор, савијајуће плоче.

Када је реч о недостацима појединих технологија, као оне са највише недостатака издвајају се (*Martin* и сар. 2003):

- Утицај временских услова - пнеуматска цев, ручно мерење, пиезоелектрични сензор;
- Тачност података - пнеуматска цев, ручно мерење, пиезоелектрични сензор;
- Отказ система - пиезоелектрични сензори;
- Захтевна инсталација - пиезоелектрични сензори, индуктивна петља;
- Захтевно одржавање - пиезоелектрични сензори, индуктивна петља, савијајуће плоче;
- Једноставност калибрације - пиезоелектрични сензори, савијајуће плоче.

Технологије које имају највећи број недостатака код највећег процената корисника јесу пнеуматска цев и пиезоелектрични сензори.

Резултати истраживања показују да традиционалне (интрузивне) сензорске технологије, као што су индуктивна петља, пиезоелектрични сензори, пнеуматске цеви и савијајуће плоче, представљају основне технологије које се користе за прикупљање података о саобраћају. Агенције које спроводе прикупљање података препознају неке недостатке, као што су тачност података, кварове система, захтевну инсталацију и одржавање. Почињу да се користе савременије сензорске технологије, као што су радар, видео сензори, пасивни звучни и магнетни сензори. Сви они имају неке предности у односу на традиционалне технологије. Међутим, задовољство постојећим технологијама и даље предњачи у односу на недостатак искуства с новијим технологијама (*Martin* и сар, 2003).

4. МЕТОДОЛОГИЈА

Ово поглавље представља преглед метода које ће се користити при решавању саобраћајних проблема, приказаних у дисертацији. У даљем тексту дат је детаљан опис метахеуристика Оптимизација колонијом пчела и Симулираног каљења, Вишеатрибутивног доношења одлука – Аналитичко-хијерархијског процеса, *Benefit Opportunity Cost Risk - BOCR* модела, групног доношења одлука, Фази логике као и Фази аналитичко-хијерархијског процеса.

4.1. Оптимизација колонијом пчела

4.1.1. Метахеуристички алгоритми

Значајан број проблема из области саобраћаја и транспорта спада у проблеме комбинаторне оптимизације. За проблеме овог типа карактеристично је да имају велики број допустивих решења (величина простора претраживања), као и велики број разноликих ограничења. Као последица, често се дешава да егзактне методе претраживања не могу да дођу до оптималног решења у реално расположивом времену, чак и уколико су ангажовани велики рачунарски ресурси. Да би се превазишао овај проблем, уместо да се израчунава оптимално решење проблема, могуће је користити технике које за прихватљиво време рада рачунара проналазе *довољно добро* решење које је блиско оптималном. Ове технике називају се хеуристикама⁴.

Могућност брзог добијања довољно доброг решења посебно је значајна код проблема који се решавају у реалном времену, какви су углавном проблеми из области саобраћаја и транспорта, када се одлуке морају донети у веома кратком времену.

Последњих деценија развијају се тзв. метахеуристички алгоритми, који представљају хеуристичке алгоритме „вишег нивоа”⁵, који се користе за решавање сложених проблема комбинаторне оптимизације, за које нису развијени одговарајући хеуристички алгоритми. (*Teodorović и Šelmić, 2012*).

Особине које карактеришу већину метахеуристика су (*Blum и Roli, 2003*):

- Метахеуристике су универзалне процедуре, нису специфичне за појединачне проблеме;
- Метахеуристике су стратегије које воде процес претраживања;
- Метахеуристички алгоритми су приближни;
- Циљ је ефикасно претражити простор допустивих решења, како би се пронашло решење блиско оптималном;
- Технике код метахеуристичких алгоритама крећу се од једноставних процедура локалног претраживања до сложених процеса учења;

⁴ Израз хеуристика потиче од грчке речи $\epsilon\upsilon\text{ρισ}\kappa\omicron$ (*heurískō*) што значи „наћи, пронаћи, открити“. Хеуристика је вештина и наука о методима у проналажењу нових, нарочито научних чињеница и сазнања (извор: *Вујаклија, 1954*).

⁵ Префикс мета- од грчког $\mu\epsilon\tau\acute{\alpha}$ (*metá*) што значи „изнад, иза, после, по“, одговара латинском *trans-*. (извор: *Вујаклија, 1954*).

Две главне компоненте било ког метахеуристичког алгоритма су интензивирање и диверзификација (Yang, 2010). Диверзификација (или истраживање) подразумева генерисање међусобно различитих решења, како би се простор претраживања истражио на глобалном нивоу. Са друге стране, интензивирање (или експлоатација) подразумева фокусирање на локалну област, из разлога што се претпоставља да се у околини тренутно пронађеног доброг решења налази још добрих или бољих решења. Избор бољих решења, у околини већ пронађеног, осигурава да ће се решења приближавати оптималности (конвергирати ка оптималном), док диверзификација (користећи рандомизацију) избегава да решења буду заробљена у локалном оптимуму, а истовремено повећава разноликост решења. Добра комбинација ове две компоненте може, у општем случају, да омогући да се достигне глобални оптимум (Yang, 2010).

Метахеуристички алгоритми практични су и корисни, али их карактерише немогућност одређивања стварног квалитета понуђеног решења. Чак и када је добијено решење оптимално, не постоји доказ да је оно заиста оптимално (Jakšić Krüger, 2013).

Метахеуристички алгоритми могу се поделити на више начина (Talbi, 2009; Jakšić Krüger, 2013): према начину заснивања, према броју решења или према начину формирања решења.

Према начину заснивања разликују се метахеуристички алгоритми, инспирисани природним процесима (еволуцијом врста, процесом каљења, понашањем колонија организама, имунолошким системом итд.) и метахеуристике засноване на математичким принципима (табу претраживање, претраживање засновано на променљивој околини) (Jakšić Krüger, 2013). Метахеуристички алгоритми инспирисани природом су детаљније описани у поглављу 4.1.2.

Према броју решења која се појављују у једној итерацији Talbi (2009) је метахеуристике поделио на алгоритме с једним решењем (енгл. *single-solution based*) и алгоритме с више решења – засноване на популацији решења (енгл. *population-based*). Алгоритми с једним решењем кроз претрагу мењају то решење, тежећи да кроз итерације оно постане боље. Примери техника с једним решењем су локално претраживање, претраживање засновано на променљивој околини, табу претраживање, симулирано каљење. Алгоритми с више решења поправљају више потенцијалних решења, углавном користећи предности присуства популације агената који усмеравају ток претраживања. Примери техника с више решења су генетски алгоритми, оптимизација групом честица, оптимизација колонијом мрава, оптимизација колонијом пчела и друге засноване на интелигенцији групе.

Према начину формирања решења метахеуристике се могу поделити на конструктивне, које кроз итерације формирају решење, и оне засноване на принципу побољшања, код којих се решење кроз итерације мења како би се добили бољи резултати (Talbi, 2009). Примери конструктивних метахеуристика јесу оптимизација колонијом мрава, конструктивна варијанта оптимизације колонијом пчела, похлепно случајно адаптивно претраживање (енгл. *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP*). Примери метахеуристика које се заснивају на побољшањима решења су генетски алгоритми, симулирано каљење, претраживање засновано на променљивој околини, новија *improvement* варијанта оптимизације колонијом пчела (Jakšić Krüger, 2013).

4.1.2. Метахеуристике инспирисане процесима у природи

Чест извор идеја за развој метахеуристичких алгоритама су различити процеси у природи. Метахеуристички алгоритми у поступку претраге простора допустивих решења опонашају природне процесе или системе. Ове метахеуристике инспирисане природом (енгл. *nature-inspired, bio-inspired*) заснивају се на разноликим идејама као што су (Talbi, 2009): биолошки

процеси (еволуција врста, понашање имунолошког система), физичке појаве у природи, заједнице животиња, и слично.

У деветнаестом веку, Грегор Мендел први је описао основе наслеђивања од родитеља до потомака. Чарлс Дарвин је, затим, 1859. представио теорију еволуције у чувеној књизи „Постанак врста” (*Darwin, 1859*). Током 1980-их теорије стварања нових врста и њихова еволуција инспирисале су научнике да развију читав скуп техника под називом Еволуционо рачунање (енгл. *Evolutionary computing*). Различити приступи развили су се самостално током протеклих пола века: Генетски алгоритми (енгл. *Genetic algorithms*), које је развио *Holland* (1962, 1975) у Мичигену, САД; еволуционе стратегије (енгл. *Evolution strategies*) које су развијене у Берлину, у Немачкој (*Rechenberg, 1965, 1973; Schwefel, 1965*); и Еволуционо програмирање (енгл. *Evolutionary programming*) у Сан Дијегу, САД (*Fogel, 1962; Fogel и сар, 1966*). У ову групу техника, заснованих на процесу еволуције, могу се сврстати и нешто новији алгоритми: Диференцијална еволуција (енгл. *Differential Evolution*) (*Storn и Price, 1995; Das и Suganthan, 2011*), Генетско програмирање (енгл. *Genetic Programming*) (*Koza, 1992*) и други. Сваки од ових алгоритама заснива се на другачијем приступу; међутим, сви су инспирисани истим принципима природне еволуције (*Talbi, 2009*).

Вештачки имуни систем (енгл. *Artificial Immune System*) још је једна метахеуристика заснована на биолошким системима (*Farmer и сар, 1986*). Биолошки имуни систем има моћне способности учења и памћења и представља еволуцијски тип одговора на спољашњу заразу (*Talbi, 2009*).

Физички процес каљења⁶ метала послужио је као инспирација за алгоритам Симулираног каљења (енгл. *Simulated Annealing*) (*Kirkpatrick и сар, 1983; Černý, 1985*). Алгоритам Симулираног каљења је детаљније описан у поглављу 4.1.6.

Велика група алгоритама инспирисана је понашањем заједница животиња. Ова група алгоритама, позната под називом интелигенција групе, детаљније је описана у поглављу 4.1.3.

4.1.3. Интелигенција групе

Поједине животињске врсте друштвена су бића која живе у заједницама. Ове колоније друштвених животиња у стању су да као група решавају проблеме (налажење хране, проналажење места за станишта, одбрана од предатора и сл.) које појединачни чланови групе не могу да реше сами. Колоније друштвених организама карактеришу (*Talbi, 2009*): (1) самоорганизација: децентрализована (заједничка) координација активности без надзора; (2) адаптивност: одговор на динамичке промене окружења и (3) робусност: остваривање циља групе, чак и ако су неки чланови групе неуспешни. Примери природних група животиња приказани су на слици 4.1.

Алгоритми, инспирисани колективним понашањем животињских врста, као што су мрави, пчеле, осе, термити, рибе и птице, представљају алгоритме интелигенције групе (роја, јата, крда) (енгл. *swarm intelligence*). Интелигенција групе део је научне области под називом Вештачка интелигенција (енгл. *Artificial Intelligence*). Израз *Интелигенција роја* представљена је први пут у радовима *Beni* (1988), *Beni и Wang* (1989), *Beni и Hackwood* (1992), *Vonabeau и сар. (1999)* (*Шелмић, 2011*). Главне карактеристике алгоритама, заснованих на интелигенцији групе, чине јединке, представљене једноставним агентима који се, комуницирајући међусобно, крећу кроз простор допустивих решења.

⁶ Под каљењем се подразумева смањивање температуре материјала до стања коме одговара најнижа енергија (*Teodorović, 2007*)



Image by [jggrz](#) from [Pixabay](#)



Image by [John Hessler](#) from [Pixabay](#)



Image by [PollyDot](#) from [Pixabay](#)



Image by [gamagapix](#) from [Pixabay](#)



Image by [skeeze](#) from [Pixabay](#)



Image by [Hilde Swets](#) from [Pixabay](#)

Слика 4.1. Примери колективног понашања друштвених животиња (извор: <https://pixabay.com/>, приступљено марта 2020).

Значајна карактеристика интелигенције групе је самоорганизација, при чему је систем у стању да прикаже одговоре на глобалном нивоу (бољитак заједнице) кроз итерације на нижем нивоу, међу самим агентима и с окружењем. *Bonabeau* и сарадници (1999) истичу четири карактеристике самоорганизације група: (1) позитивна повратна спрега (енгл. *positive feedback*) – кроз једноставна правила понашања која промовишу стварање одговарајућих структура; (2) негативна повратна спрега (енгл. *negative feedback*) – које делује као противтежа позитивној повратној спреси; (3) осцилације – као што су случајна понашања, грешке или неспровођење задатака; и (4) вишеструке интеракције између агената и окружења – које омогућавају размену информација (*Masutti* и *de Castro*, 2017).

Велика је разноврсност алгоритама интелигенције групе. У наставку ће бити укратко описане неке од група алгоритама.

Оптимизација колонијом мрава (енгл. *Ant Colony Optimization*) један је од најпознатијих алгоритама. Читаву групу алгоритама, инспирисаних колонијом мрава, чини неколико варијанти ове метахеуристике (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012): Мрављи систем (енгл. *Ant system*) развили су *Dorigo* и сарадници (1991, 1996) и *Dorigo* (1992); Систем мравље колоније (енгл. *Ant Colony System*) аутора *Dorigo* и *Gambardella* (1997); Мах-мин мрављи систем (енгл. *Max-Min Ant System*) чији су аутори *Stützle* и *Hoos* (2000). Главна инспирација је начин на који мрави траже храну. Циљ је да мрави пронађу најкраћу путању од мравињака до извора хране. У потрази за храном, мрави за собом остављају траг хемијске супстанце - феромона. Други мрави, пратећи траг феромона, такође стижу до хране. Што је већа концентрација феромона на путањи, то је знак да тај пут води ка извору хране већи. Мрави, заправо, индиректно комуницирају путем феромона.

Друга велика група алгоритама инспирисана је понашањем пчела у природи, као што су потрага за храном, комуникација, парење, развитак врсте. Ови алгоритама детаљније су описани у поглављу 4.1.4.

Оптимизација групом честица (енгл. *Particle Swarm Optimization*) је метахеуристика мотивисана синхронизованим кретањем јата риба и птица (*Kennedy* и *Eberhart* 1997). Јединке јата при кретању избегавају да се сударе са другим јединкама, непрекидно се труде да су на „оптималном” растојању од суседа у јату. Јата су такође успешна у проналажењу хране, тако ће птице следити ону птицу која је најближа извору хране (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012). Свако потенцијално решење представља једну јединку у јату, и *Kennedy* и *Eberhart* (1997) назвали су их честицама. Честице се крећу кроз простор решења, као што птице лете у јату. Свака честица поседује вредност критеријумске функције, као и позицију у простору и брзину лета. Честица има сопствено искуство, као и способност да одреди квалитет свог искуства. Као друштвене јединке, оне такође имају и сазнање о понашању својих суседа. Ове две врсте информација одговарају индивидуалној и друштвеној компоненти понашања честице која припада групи (*Krause* и *cap*, 2013).

Оптимизација претрагом кукавица (енгл. *Cuckoo search algorithm*) новији је алгоритам аутора *Yang* и *Deb* (2009). Алгоритам се заснива на познатој чињеници да птице кукавице подмећу своја јаја у гнезда других птица, због чега се називају паразитима гнезда. Оптимизација претрагом кукавица користи следећа главна правила (*Krause* и *cap*, 2013): (1) свака кукавица леже по једно јаје и оставља га у случајно изабраном гнезду; (2) најбоља гнезда с најбољим јајима излећи ће птиће и добиће се следећа генерација кукавица, (3) број расположивих гнезда је ограничен и птица домаћин ће с вероватноћом $p \in [0,1]$ открити кукавичје јаје. У том случају, птица домаћин може или да избаци кукавичје јаје из гнезда, или да напусти гнездо и направи друго. Тада неће доћи до формирања следеће генерације кукавица. Код оптимизације претрагом кукавица решења су представљена гнездима (*Krause* и *cap*, 2013).

Оптимизацију инспирисану најездом бубашваба (енгл. *Roach Infestation Optimization*) представили су *Havens* и сарадници (2008). Овај алгоритам има сличности с Оптимизацијом групом честица. Агенти су бубашвабе које претражују простор, користећи три једноставна правила понашања (*Krause* и *cap*, 2013): (1) бубашвабе траже најтамнију локацију у простору претраживања (фаза тражења мрака); (2) бубашвабе се удружују с најближим јединкама (фаза налажења пријатеља); (3) бубашвабе повремено огладне и тада напуштају пријатеље и крећу у потрагу за храном (фаза тражења хране).

Алгоритам свица⁷ (енгл. *Firefly Algorithm*) предложио је Yang (2008) и он користи три главна правила која описују међусобну интеракцију свица (Krause и сар, 2013): (1) свици се међусобно привлаче без обзира на пол; (2) привлачност је пропорционална светлости свица, и смањује се како расте међусобна удаљеност; (3) облик критеријумске функције одређује светлост свица.

Још један алгоритам који опонаша биолумисценцију је алгоритам Светлећег црва⁷ (енгл. *Glowworm Swarm Optimization*) предложили су Krishnanand и Ghose (2005). Сваки светлећи црв на случајан начин бира блиског црва која има одређени ниво ензима који производи светлост и креће се ка њему. Црве привлаче јаче осветљене јединке. Кретања јединки се заснивају на локалним информацијама о осветљености, и интеракцијама са суседним јединкама. Ово омогућава да се јато подели у одвојене подгрупе које се онда независно крећу према различитим локалним оптимумима (Krause и сар, 2013).

Алгоритам слепог миша (енгл. *Bat Algorithm*) први је представио Yang (2010). Овај алгоритам инспирисан је особином колоније слепих мишева да користе ехолокацију⁸, како би одредили удаљеност. Они на случајан начин лете кроз простор претраживања, при чему стално коригују своју позицију и брзину (потенцијална решења). Циљ лета слепог миша је налажење хране или плена (најбоље решење). С растом удаљености опада јачина звука, и то слабљење је веће што је фреквенција већа, зато што се енергија високе фреквенције расипа брже него енергија ниске фреквенције. Ово слабљење звука има сличну улогу као хлађење код методе Симулираног каљења. С друге стране, како би повећао прецизност налажења плена, у тренутку кад звук ослаби, слепи миш повећава фреквенцију импулса које одашиље (Krause и сар, 2013).

Оптимизација јатом планктона (енгл. *Krill Herd Algorithm*) нова је метахеуристика чији су аутори Gandomi и Alavi (2012) која се заснива на понашању јата планктона. Предатор има три главна ефекта (Gandomi и сар, 2013): (1) уклања појединачне планктоне; (2) доводи до смањења просечне густине јата; и (3) удаљава јато планктона од локације хране. Способност сваког појединачног планктона је функција његове позиције, која подразумева како удаљеност од извора хране, тако и удаљеност од других јединки јата (густина јата). Позиција у зависности од времена зависи од три фактора (Hofmann и сар, 2004): (1) кретање под утицајем других планктона у јату; (2) активности потраге за храном; и (3) случајна дифузија. Два су главна циља јата планктона (Gandomi и Alavi, 2012): повећање густине јата и налажење хране. Појединачни планктони, крећући се кроз простор претраживања, приближавају се решењу које одговара највећој густини јата и најмањој удаљености од извора хране.

Алгоритам вештачког јата риба (енгл. *Artificial Fish School Algorithm*) представио је Cai (2010). У природи, рибе увек налазе храну на местима где је има много, пратећи друге рибе, па тако, што има више риба на једном месту, има и више хране. Пратећи ово правило, у Алгоритму вештачког јата риба формирају се вештачке рибе које претражују простор допустивих решења онако како то ради јато риба. Три су основна правила кретања вештачких риба (Cai, 2010; Krause и сар, 2013): (1) плен - риба уочава концентрисану храну у води, и одређује како ће се кретати према томе где је запазила храну, или према осећају кретања других јединки; (2) јато - рибе се крећу груписано, у јату, и то омогућава да се обезбеди опстанак колоније и лакше

⁷ Свици (лат. *Lampyridae*) су крилате бубе које ноћу користе особину биолуминисценције како би привукли партнера или намамили плен. Ларве свица често емитују светлост и у Европи и Азији називају се светлећим црвима. У Америци се овај термин односи и породицу *Phengodidae* (извор: <https://sr.wikipedia.org/wiki/свици>, приступљено јануара 2019).

⁸ навигација помоћу звука коју користе многе животињске врсте (осим слепих мишева то су китови, делфини, перјари, ровачице па и неке птице) (извор: Paunović и Karapandža, 2019).

избегну опасности; (3) праћење - док се крећу, ако једна или неколико риба пронађу храну, остале рибе ће се груписано кретати за суседним рибама, пратећи траг до хране.

4.1.4. Алгоритми инспирисани понашањем пчела у природи

Понашање пчела у природи од давнина је привлачило човека. Једна од првих књига у којој је са биолошке стране детаљно описано понашање пчела јесте „Живот пчела”, белгијског писца и есејисте, нобеловца Мориса Метерлинка (*Maeterlinck*, 1901). Аутор је, између осталог, описао и друштвену компоненту понашања пчела⁹:

„Пчела је пре свега, још више него мрав, биће гомиле. Она може да живи само у гомили. ... Ако живи усамљено, умреће после неколико дана, ма имала хране у изобиљу и најповољнију температуру: свиснуће не од глади и зиме, већ од самоће. Гомила, насобина пчела, даје јој невидљиву храну исто онако потребну као мед. Ту њену потребу ваља имати у виду ако желимо да утврдимо дух закона кошнице. У њој јединка не значи ништа. Њена је егзистенција само условна, она је безначајни моменат, крилати орган врсте. Цео њен живот је потпуно жртвовање нечем безбројном и вечном чији је и она део.”

Сазнање о животу пчела у великој мери променило се од почетка прошлог века, ипак, управо ова описана друштвеност пчела била је инспирација многим метахеуристичким алгоритмима, насталим деценијама касније. Последње две деценије алгоритми инспирисани пчелама су у великом успону. Различите особине пчела биле су инспирација за формирање метахеуристика. *Karaboga* и *Akay* (2009) истакли су неке од задатака које пчелиње заједнице обављају, као и јасну поделу задатака између врста пчела. Три су главне врсте пчела у једној колонији (*Karaboga* и *Akay*, 2009):

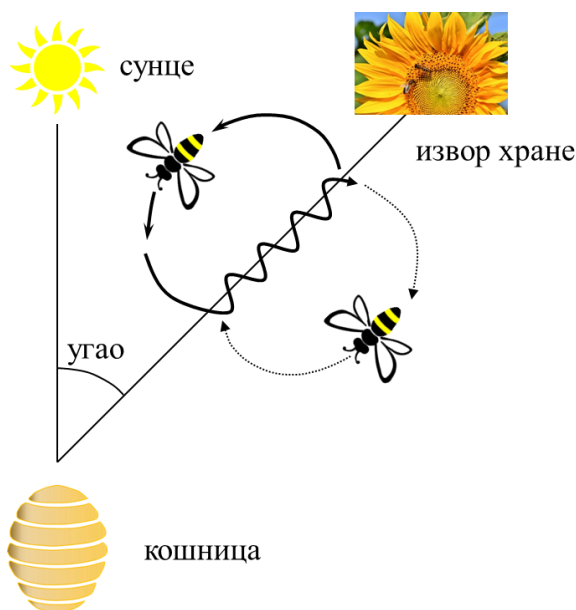
1. **Матица** је једина женка у колонији која леже јаја и која је предак свих пчела у колонији. Она живи неколико година и пари се само једном. Оплођење се обавља у периоду од две или више година, коришћењем сперме, сакупљене за време парења. Када постоји мањак извора хране, матица леже више јаја, а када је колонија превише бројна, матица не леже јаја. Када се потроши сва сперма сакупљена за време парења, матица леже неоплођена јаја, а из једног од њих ће се излећи нова матица.
2. **Трутови** су мушке јединке колоније. Њихова улога је репродукција и они су преци свих других пчела у колонији. Легу се из неоплођених јаја, и хране се другачије када су у стању ларве. Зависно од периода, може бити хиљаде трутова у једној колонији, али они живе највише шест месеци. Њихова главна улога је парење с матицом, и након тога умиру.
3. **Пчеле радилице** обављају различите послове у колонији, као што су прикупљање и чување хране, уклањање рушевина у кошници, заштита кошнице и слично. Радилице живе од неколико недеља до неколико месеци и послови које обављају зависе од њихове старости и тренутних потреба колоније. Уобичајено је да другу половину живота обављају послове потраге за храном.

Нека интелигентна понашања пчелињег роја, која су послужила као инспирација метахеуристикама јесу (*Karaboga* и *Akay*, 2009):

1. **Лет парења**: Парење матице одвија се у ваздуху, током тзв. лета парења (енгл. *mating flight*). Оно почиње плесом матице, коју следе трутови. Парење се обавља с одређеном вероватноћом, зависно од брзине матице и спремности трутова и матице. Сперма трутова складишти се у тзв. спермотеци и користи се касније за оплодњу.

⁹ одломак из Метерлинк, М. (1949) *Живот пчела*, Матица српска, Нови Сад, Југославија.

2. **Потрага за храном** (енгл. *foreaging*) један је од најважнијих задатака пчелињег роја. На овај процес утичу различити спољашњи или унутрашњи фактори, као што су мирис, локација, присуство других пчела на извору хране, сећање на раније посете истом извору хране и слично. Процес почиње када пчела радилица напушта кошницу у потрази за храном. Кад пронађе извор хране, радилица скупља нектар и складишти га у стомаку и доноси назад у кошницу, где се он сакупља у саћу.
3. **Плес** је начин комуникације између пчела. Након што је пчела радилица, вративши се из похода за храном, оставила сакупљени нектар у саћу, она спроводи низ покрета – тзв. плес (енгл. *waggle dance*). Правац њеног кретања у себи садржи информације о смеру извора хране, трајање плеса указује на удаљеност, док фреквенција покрета одговара квалитету извора хране. Шематски приказ плеса приказан је на слици 4.2.
4. **Избор места за кошницу**. Када заједница достигне одређену величину, пчеле траже место за ново гнездо. Велики број пчела, тзв. скаута, самостално истражују простор који би послужио за градњу новог гнезда. Критеријуми за избор су величина шупљине, погодност за изградњу саћа, оријентација улаза, заштићеност од временских прилика и слично. Када скаут пронађе одговарајућу локацију, враћа се у кошницу и, изводећи плес, обавештава остале пчеле о пронађеној локацији. Својим плесом пчела ће привући друге пчеле да посете исту локацију, и о њој извести колонију. За гнездо ће бити одабрана она локација о којој је извештавао највећи број скаута.
5. **Навигација**. Приликом лета, било за тражење извора хране, или нове локације гнезда, пчеле се оријентишу у простору. Оне користе положај сунца као фиксну референтну тачку, као и друге оријентире у простору (Menzel и сар, 2005).
6. **Подела рада**. Иако је, физиолошки гледано, свака пчела способна да изврши било који задатак који се појављује у кошници, постоји одређена специјализација међу појединим пчелама. Зависно од старости, количине хормона, или генетски одређених предиспозиција, пчеле радилице деле задатке међу собом. Једне ће скупљати храну, друге хранити ларве, и слично. Ови задаци мењају се и током времена, па уколико постоји недостатак хране, и пчеле које се брину о ларвама биће „прерасподељене” на потрагу за храном.



Слика 4.2. Шематски приказ пчелињег плеса

Издвајају се три главне групе алгоритама засноване на: (1) међусобној комуникацији између пчела; (2) понашању пчела приликом парења, и (3) понашању при потрази за храном.

Један од првих алгоритама, инспирисаних понашањем пчела, предложили су *Sato* и *Hagiwara* (1997) под називом *Bee System*, који представља модификацију Генетског алгорита, опонашајући процес комуникације између пчела. Појединачне пчеле одговарају хромозомима код генетских алгоритама, и свака од њих тежи да пронађе појединачно боље решење. Неки од хромозома сматрају се супериорнијим, и други хромозоми траже боље решење у његовој околини, увећавајући популацију која обавља претрагу. Радећи експерименте на девет тест функција, аутори су показали да *Bee System* има боље перформансе него Генетски алгоритми (*Шелмић*, 2011).

Wedde и сарадници (2004) предложили су алгоритам *BeeHive*, такође инспирисан комуникацијом између пчела. Овај алгоритам примењен је на проблему рутирања на мрежи. Пчеле-агенти путују кроз мрежу, трагајући за храном. Током претраге размењују информације о стању мреже, и то користе за ажурирање локалног знања. *Zhang* (2005) је даље развио *BeeHive* алгоритам, базиран на стохастичким процесима (*Коџ*, 2010).

Алгоритам *BeeAdHoc* развили су аутори *Wedde* и сарадници (2005a, 2005b) за потребе решавања задатка енергетски ефикасног рутирања на мобилним *AdHoc*¹⁰ мрежама. Овај алгоритам развијен је из *BeeHive* алгоритама, али има различите врсте пчела-агената (*Коџ*, 2010): пакере (енгл. *packers*) који примају и складиште пакете података; извиђаче (енгл. *scouts*) који откривају нове руте; трагаче за храном (енгл. *foragers*) који се користе за примање и пренос пакета података; и ројеве (енгл. *swarms*) који се користе за помоћ с непоузданим транспортним протоколима.

Abbas (2001) је развио алгоритам, инспирисан понашањем пчела приликом парења, под називом *Marriage in Honey Bees Optimization (MBO)*. Овај алгоритам симулира развој колоније кроз неколико стадијума, и заснован је на концепту сличном Симулираном каљењу. Колонија се на почетку састоји од једне матице, да би се на крају процеса створила читав колонија. Матица обавља лет парења и, кад буде успешан, враћа се у кошницу да у тзв. спермотеку положи сперму трута. У следећем стадијуму на случајан начин бира сперму и ствара потомке. Тако се ствара популација пчела. Уколико је неки од потомака бољи од матице, он је замењује, остатак популације се убија, а нова матица лети на нови лет парења (*Коџ*, 2010).

Yang и сарадници (2007) направили су побољшање *MBO* алгоритама, и представили *Fast Marriage in Honey Bees Optimization (FMBO)*. У овом алгоритму поправљена је способност конвергенције, па је извршавање алгоритама убрзано (*Шелмић*, 2011).

Варијанту *MBO* алгоритама предложили су *Haddad* и сарадници (2006) под називом *Honey-Bees mating optimization (HBMO)* за решавање проблема оптимизације водних ресурса. Још једну варијанту *MBO* алгоритама под називом *Honey-Bees Optimization (HBO)* развили су *Ćurković* и *Jerbić* (2007) за решавање проблема планирања руте (*Јусе* и сар, 2013).

Међу првим алгоритмима, заснованим на потрази за храном, јесте Оптимизација колонијом пчела коју су први пут представили *Lučić* и *Teodorović* (2001). Ова метахеуристика детаљно је описана у поглављу 4.1.5.

Један од најшире примењиваних алгоритама у литератури је *Artificial Bee Colony (ABC)* алгоритам чији су аутори *Karaboga* и *Basturk* (*Karaboga*, 2005; *Karaboga* и *Basturk*, 2007; 2008; *Karaboga* и сар, 2007). *ABC* је инспирисан процесом потраге за храном. Циљ пчела је да се открију места извора хране (региони у простору претраживања) с великом количином нектара

¹⁰ Мобилна *AdHoc* мрежа је бежична мрежа без инфраструктуре, која мења своју конфигурацију. (извор https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_ad_hoc_network, приступљено фебруара 2019.)

(добра вредност критеријумске функције). У колонији постоје три врсте пчела (*Krause* и сар, 2013): (1) извиђачи, који на случајан начин лете кроз простор претраживања, (2) пчеле радилице које експлоатишу околину извора хране (решења) у коме се налазе, вршећи мале пертурбације и (3) посматрачи, који користе способност популације како би пронашли добро решење чију ће околину експлоатисати. Ако је количина нектара новог извора већа од претходног запамћеног најбољег решења, ажурира се нова локација и заборавља претходна. Ако се решење не побољша кроз унапред одређен број покушаја, пчела радилица напушта извор хране и постаје пчела извиђач (*Krause* и сар, 2013).

Pham и сарадници (2006) предложили су *Bee Algorithm* и применили га на бенчмарк математичке функције. У овом алгоритму пчела представља решење. Решење у себи садржи посећену локацију (извор хране), као и вредност критеријумске функције која одговара тој локацији. Пчеле истражују локације на случајан начин (диверзификација) и користе регрутацију да детаљније истраже суседство добрих решења (интензификација). Пчеле које имају најбољу вредност критеријумске функције проглашавају се елитним, а локације које су посетиле елитним локацијама. Ове елитне локације користе се за експлоатацију, тј. детаљније претраживање њихове околине (*Krause* и сар, 2013).

Yang (2005) предложио је *Virtual Bee Algorithm (VBA)* за решавање оптимizacionих и инжењерских проблема. Алгоритам *VBA* започиње распоређивањем трупа вештачких пчела, које започињу случајну претрагу кроз простор претраживања. Основни кораци *VBA* су (*Yang*, 2005): (1) креирање популације агената (вештачких пчела), где је свакој пчели придружена меморија од неколико стрингова; (2) кодирање циљева (критеријумских функција) и претварање у вештачку храну; (3) дефинисање критеријума за преношење информација о правцу и удаљености извора хране, на сличан начин као критеријумска функција или као критеријум селекције у генетским алгоритмима; (4) ажурирање нових индивидуалних позиција појединачних пчела у потрази за вештачком храном, означавање хране и смера помоћу виртуелног плеса; (5) након одређеног времена еволуције, највећи број виртуалних пчела или интензитет/учесталост посећивања вештачке хране одговара најбољим решењима; (6) декодирање резултата како би се добило решење проблема.

Lemmens и сарадници (2005) предложили су *Bee Foraging Algorithm* који је такође нашао инспирацију у пчелињој потрази за храном. Алгоритам користи две основне стратегије: регрутовање и навигацију. Стратегија регрутовања користи се за преношење информација о извору нектара другим члановима колоније. Стратегија навигације користи се за постизање ефикасности лета у непознатом окружењу и заснива се на стратегији названој *Path Integration (PI)*, коју природне пчеле користе да би се вратиле у кошницу док се крећу између удаљених извора нектара. Вектор *PI* садржи информације о смеру и удаљености од кошнице. Алгоритам се састоји од три главне функције и тзв. унутрашњих стања у овим функцијама. Прва функција *ManageBeesActivity* бави се активностима појединачних агената на основу њихових унутрашњих стања. Постоји шест унутрашњих стања у којима сваки агент обавља одређено понашање: *AtHome*, *StayAtHome*, *Exploitation*, *Exploration*, *HeadHome*, *CarryingFood*. Друга функција *CalculateVectors* израчунава *PI* векторе за све агенте. Трећа функција *DaemonActions* користи се за спровођење централизованих одлука на нивоу кошнице, које појединачни агенти нису у стању да спроведу (*Lemmens* и сар, 2005). Након овог модела *Lemmens* и сарадници (2007) предложили су модел који користи феромон, под називом *Bee System with inhibition pheromones*, који представља спој њиховог претходног алгоритма с оптимизацијом колонијом мрва.

4.1.5. Оптимизација колонијом пчела

Оптимизација колонијом пчела (енгл. *Bee Colony Optimization - BCO*) јесте метахеуристика која припада делу вештачке интелигенције под називом Интелигенција групе. Оптимизација колонијом пчела је стохастички алгоритам, представља технику локалног претраживања и припада класи алгоритама заснованих на популацији решења. Први пут је представљена у радовима *Lučić* и *Teodorović* (2001, 2002, 2003a, 2003b) под називом *Bee System*. У овој варијанти алгоритма постојале су пчеле скаути (извиђачи) и пчеле следбеници, била је важна улога локације кошнице, процес регрутације био је сличнији природном процесу регрутације пчела, уопште, алгоритам је у много већој мери опонашао природни систем пчелиње колоније (*Шелмић*, 2011).

Алгоритам је временом еволуирао и у раду *Teodorović* и *Dell'Orco* (2005) назван је именом које данас носи – *Bee Colony Optimization*. У садашњој форми алгоритма све пчеле су једнаке, не постоји подела на пчеле скауте и пчеле следбенике, као у првобитној верзији алгоритма.

Основна идеја *BCO* метахеуристике је да претрагу простора допустивих решења обављају вештачки агенти, инспирисани понашањем пчела у природи, приликом потраге за храном. Вештачки агенти (пчеле) током процеса претраге комуницирају међусобно и на тај начин интензивирају претрагу делова простора у којима су пронађена добра решења. Са друге стране, пчеле напуштају делове простора претраживања у којима пронађена решења нису била задовољавајућа. Ове два поступка представљају две поменуте компоненте сваке метахеуристике, интензификацију и диверзификацију.

Алгоритам се спроводи кроз итерације, које се састоје из две фазе: *лета унапред* и *лета уназад*. Током лета унапред, пчеле истражују простор допустивих решења и свака пчела формира по једно решење. Приликом лета уназад, пчеле међусобно пореде своја решења, након чега (с одређеном вероватноћом) свака пчела доноси одлуку да ли ће остати лојална свом решењу, или ће од њега одустати и одлучити се да прати неку другу пчелу чије је решење боље. Уколико је пчела одустала од свог решења, она ће се (поново са одређеном вероватноћом) одлучити којој ће се другој пчели придружити.

Након што је извршена једна итерација алгоритма, свака пчела генерисала је по једно решење. Сва решења свих пчела међусобно се пореде и ажурира се вредност до тада најбољег пронађеног решења. Итерације се понављају све док се не задовољи неки од унапред дефинисаних критеријума заустављања. Критеријуми заустављања могу бити различити: максималан број летова унапред/уназад, максималан број летова унапред/уназад без побољшања вредности критеријумске функције (без поправљања тренутно достигнутог најбољег решења), максимално дозвољено *CPU* време, и слично.

Након извршавања последње итерације, достигнуто најбоље решење, остварено током свих итерација, усваја се као коначно.

Метахеуристика Оптимизација колонијом пчела до сада је примењена на бројним проблемима комбинаторне оптимизације:

- проблеми рутирања: *Lučić* и *Teodorović* (2001), *Wong* и сар. (2009), *Wong* и сар. (2010), *Nikolić* и сар. (2013);
- локацијски проблеми: *Teodorović* и *Šelmić* (2007), *Šelmić* и сар. (2008), *Šelmić* и сар. (2010), *Davidović* и сар. (2011), *Dimitrijević* и сар. (2011), *Levanova* и *Tkachuk* (2011), *Sohi* и сар. (2011);

- проблеми распоређивања: *Teodorović* и *Dell'Orco*, (2005; 2008); *Davidović* и сар, (2009); *Mousavinasab* и сар, (2011); *Pertiwi* и *Suyanto*, (2011); *Arabnejad* и сар, (2011); *Todorović* и *Petrović*, (2013); *Davidović* и сар, (2012);
- мрежни проблеми: *Nikolić* и *Teodorović*, (2013b);
- проблеми кластеровања: *Forsati* и сар, (2015);
- проблеми у медицини и хемији: *Sa'idi* и сар, (2013); *Teodorović* и сар, (2013);
- проблеми у лингвистици: *Kumar* и *Ariss*, (2018);
- непрекидне и мешовите оптимизације: *Nikolić* и *Teodorović*, (2013a); *Stojanović* и сар, (2015);
- проблеми у телекомуникацијама: *Marković* и сар, (2007); *Marković*, (2017a; 2017b);
- проблеми у саобраћају и транспорту *Teodorović* и *Dell'Orco*, (2008); *Šelmić* и сар, (2010); *Nikolić* и *Teodorović*, (2013b; 2014; 2015, 2019), *Jovanović* и сар, (2017), *Jovanović* и сар, (2019).

Детаљан преглед појединачних примена *BCO* метахеуристике може се наћи у прегледним радовима *Teodorović* и сар. (2015) и *Davidović* и сар. (2015). Теоријске поставке о конвергенцији *BCO* метахеуристике могу се наћи у раду *Jakšić Krüger* (2013).

Осим стандардне *BCO* метахеуристике, још неколико измењених варијанти метахеуристике инспирисаних Оптимизацијом колонијом пчела може се наћи у литератури. Вишециљну (енгл. *multiobjective*) варијанту *BCO* предложили су *Low* и сарадници (2009). Аутономну (енгл. *autonomous*) варијанту *BCO* представили су *Zeng* и сарадници (2010). Аутори *Abualhaija* и *Zimmermann* (2016), инспирисани *BCO* метахеустиком, предложили су методу *D-Bees*.

4.1.5.1. Две варијанте *BCO* алгоритма

У литератури се налази на две варијанте *BCO* алгоритма, које се разликују према начину формирања решења: (1) конструктивна варијанта (*BCOc*) и (2) варијанта заснована на побољшању решења, тзв. *improvement* варијанта (*BCOi*).

У конструктивној варијанти пчеле постепено граде решење током итерације, док у варијанти заснованој на побољшању решења, пчеле на почетку итерације имају комплетно решење, које кроз итерацију мењају са циљем да га побољшају.

За обе варијанте алгоритма заједнички су улазни параметри:

B – број пчела;

IT – број итерација;

NP – број летова (унапред и уназад);

NC – број промена у једном лету унапред.

Као излаз из алгоритма добија се најбоље пронађено решење (*S*).

Обе варијанте детаљно су описане у наставку.

4.1.5.1.1. Конструктивна варијанта *BCO* алгоритма (*BCOc*)

Конструктивна варијанта *BCO* прва је развијена варијанта алгоритма, представљена у радовима *Lučić* и *Teodorović* (2001; 2002; 2003a). У литератури је коришћена у радовима *Lučić* и *Teodorović*, (2003b); *Marković* и сар, (2007); *Davidović* и сар, (2009); *Wong* и сар, (2009; 2010); *Šelmić* и сар, (2010).

Конструктивна варијанта *BCO* алгоритма почиње празним решењем, излаз *S* садржи празно решење (корак 1 у алгоритму 1). У *BCO* алгоритму претраживање се обавља кроз итерације. У свакој појединачној итерацији (бројач итерација представљен је кораком 2) извршавају се кораци од 3 до 17. На почетку итерације све пчеле добијају празна решења која треба да граде током те итерације. Бројач летова представљен је кораком 5. Лет унапред обухвата кораке од 6 до 9, а лет уназад кораке од 10 до 15. Након извршеног лета унапред и уназад проверава се да ли је пронађено боље решење од до тада најбољег запамћеног решења (Николић, 2015).

Алгоритам 1. Псеудокод конструктивне варијанте *BCO* алгоритма (Николић, 2015)

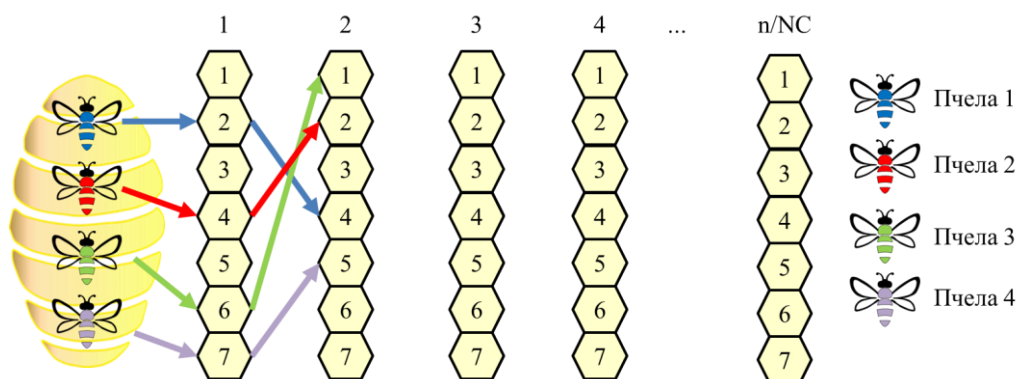
BCO процедура (улаз *B*, *IT*, *NP*, *NC*, излаз *S*)

```

1:  $S \leftarrow$  Поставити празно решење.
2: for  $j = 1$  to  $IT$  do
3:   for  $i = 1$  to  $B$  do
4:     пчела  $i \leftarrow$  Поставити празно решење
5:     for  $k = 1$  to  $NP$  do
6:       for  $r = 1$  to  $NC$  do
7:         for  $i = 1$  to  $B$  do
8:           Вредновати могуће кораке пчеле  $i$ .
9:           Коришћењем рулета одабрати један корак.
10:        Нормализовати квалитете решења свих пчела
11:        for  $i = 1$  to  $B$  do
12:          Одредити да ли је пчела  $i$  лојална.
13:          for  $i = 1$  to  $B$  do
14:            if пчела  $i$  није лојална then
15:              Изабрати једну од лојалних пчела коју ће пчела  $i$  да прати.
16:            if најбоље решење од свих пчела боље од решења  $S$  then
17:               $S \leftarrow$  Сачувати најбоље решење пчела као тренутно најбоље.

```

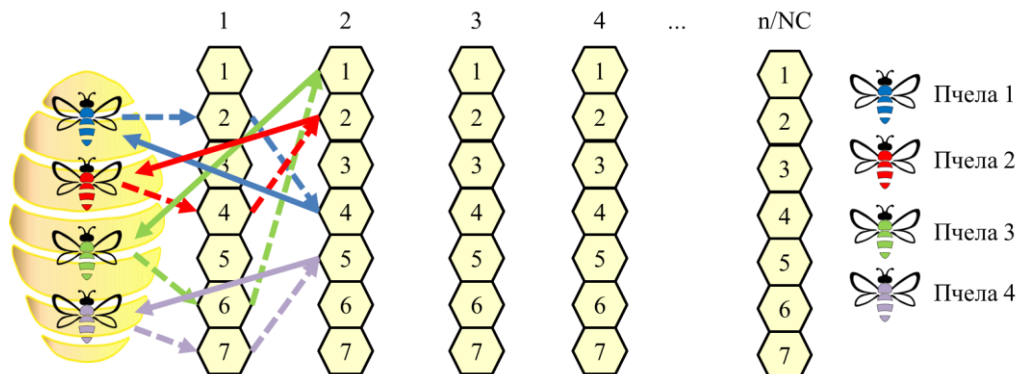
У наставку је на конкретном примеру објашњено извршавање једне итерације алгоритма. Нека, на пример, четири пчеле ($B = 4$) учествују у процесу претраге допустивих решења. Нека у сваком лету унапред пчеле бирају по једну компоненту решења ($NC = 1$) од укупно 7. Могућа ситуација након другог лета унапред приказана је на слици 4.3. Током процеса грађења решења пчела 1 је изабрала компоненте 2 и 4, пчела 2 компоненте 4 и 2, пчела 3 компоненте 6 и 1, а пчела 4 компоненте 7 и 5.



Слика 4.3. Пример конструктивне варијанте након другог лета унапред

Након завршеног лета унапред, пчеле лете уназад до кошнице (Слика 4.4). Током лета уназад обавља се нормализација решења свих пчела. Пчеле се на основу квалитета својих решења одлучују да ли ће остати лојалне свом решењу, или ће постати неопредељене. Поступак

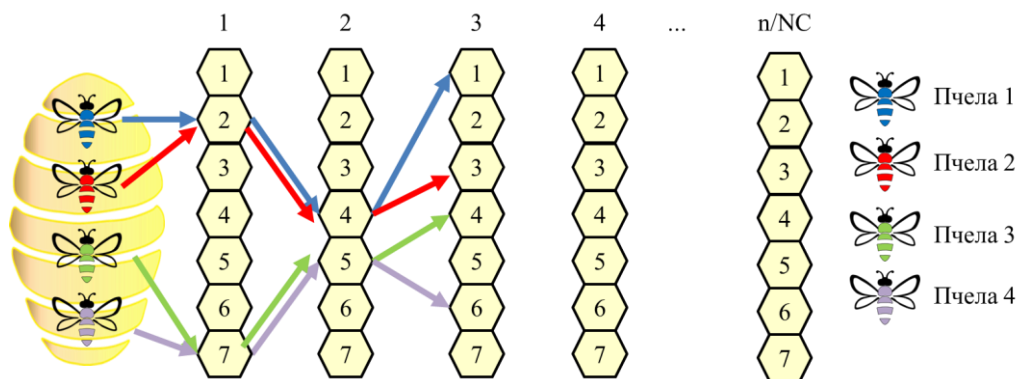
одређивања лојалности пчела приказан је у поглављу 4.1.5.2. Нека су у примеру пчеле 1 и 4 остале лојалне својим решењима а пчеле 2 и 3 су одустале од својих решења и постале неопредељене.



Слика 4.4. Пример конструктивне варијанте након другог лета уназад

Неопредељене пчеле морају се придружити некој од лојалних пчела. Овај поступак регрутовања одвија се у кошници, у простору за плес. Лојалне пчеле плесом „рекламирају” своје решење, како би регрутовале неке од неопредељених пчела. Лојалне пчеле које имају боље решење, имају већу вероватноћу да ће регрутовати неопредељене пчеле. Поступак регрутације описан је у поглављу 4.1.5.3. Нека је у примеру, лојална пчела 1 регрутовала неопредељену пчелу 2, а лојална пчела 4 регрутовала неопредељену пчелу 3.

У наредном лету унапред, претходно регрутоване пчеле пратиће пчеле чијим су се решењима приклониле, закључно с претходним конструктивним кораком. У наредном кораку су слободне да на случајан начин изаберу своју нову компоненту решења. Пример након трећег лета унапред приказан је на слици 4.5.



Слика 4.5. Пример конструктивне варијанте након трећег лета унапред

На крају итерације, свака пчела генерисала је по једно комплетно решење. Међу свим решењима у датој итерацији проналази се најбоље решење и ажурира се до тада пронађено најбоље решење. Тада се сва решења свих пчела бришу, и почиње наредна итерација. Итерације се понављају док се не достигне критеријум заустављања, и до тада пронађено најбоље решење представља коначно решење.

4.1.5.1.2. Варијанта BCO алгоритма, заснована на побољшању решења (BCO_i)

Варијанта BCO која се заснива на побољшању решења први пут је коришћена у раду чији су аутори Davidović и сарадници (2011). Нова варијанта BCO_i развијена је како би се превазишли

незадовољавајући резултати, добијени код неколико комбинаторних проблема на које је примењена конструктивна варијанта *BCOc* (Davidović и сар, 2015). У литератури је коришћена у радовима Davidović и сар, (2011); Nikolić и Teodorović, (2013b; 2014; 2015, 2019); Todorović и Petrović, (2013); Nikolić и сар, (2015), Jovanović и сар, (2017), Jovanović и сар, (2018).

Псеудокод ове верзије *BCO* метахеуристике приказан је у алгоритму 2. Алгоритам *BCOi* почиње одређивањем почетног решења (кораца 1 и 2 алгоритма 2), које се у кораку 3 чува као тренуто најбоље пронађено. Корак 4 отпочиње петља за итерације. У корацима 5 и 6 се пчелама додељује решење које ће се током итерације модификовати. Лет унапред је представљен корацима од 8 до 11. У оквиру лета унапред свака пчела направи *NC* промена свог решења. Када све пчеле направе једну модификацију решења, проверава се да ли је пронађено боље решење од до тада најбољег познатог (кораца 12 и 13 алгоритма 2). Лет уназад представљен је корацима од 14 до 19. У оквиру лета уназад се проверава лојалност пчела и, уколико пчела није лојална, бира се пчела која ће се следити (Николић, 2015).

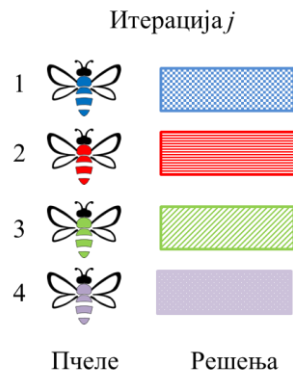
Алгоритам 2. Псеудокод варијанте *BCO* алгоритма, засноване на побољшањима решења (Николић, 2015)

***BCOi* процедура (улаз *B, IT, NP, NC*, излаз *S*)**

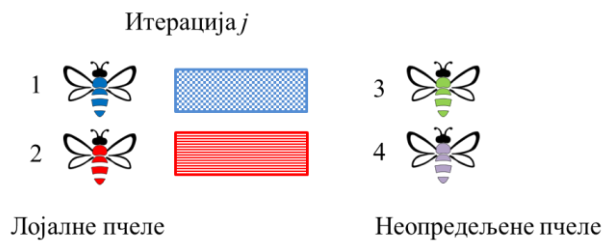
```
1: Одредити почетно решење.
2: Одредити квалитет почетног решења.
3:  $S \leftarrow$  Сачувати почетно решење као најбоље.
4: for  $j = 1$  to IT do
5:   for  $i = 1$  to B do
6:     пчела  $i \leftarrow$  Пчели доделити почетно решење.
7:     for  $k = 1$  to NP do
8:       for  $r = 1$  to NC do
9:         for  $i = 1$  to B do
10:           Направити једну модификацију решења пчеле  $i$ .
11:           Одредити квалитет решења пчеле  $i$ .
12:           if најбоље решење од свих пчела боље од решења  $S$  then
13:              $S \leftarrow$  Сачувати најбоље решење пчела као тренутно најбоље.
14:           Нормализовати квалитете решења свих пчела
15:           for  $i = 1$  to B do
16:             Одредити да ли је пчела  $i$  лојална.
17:           for  $i = 1$  to B do
18:             if пчела  $i$  није лојална then
19:               Одредити једну од лојалних пчела коју ће пчела  $i$  да прати.
```

У наставку је на конкретном примеру објашњено је извршавање једне итерације алгоритма. Нека, на пример, четири пчеле ($B = 4$) учествују у процесу претраге допустивих решења. Нека у итерацији j пчеле имају решења као на слици 4.6. Правоугаоници означавају комплетна решења, а различите шрафуре означавају различита решења.

Након што су у лету унапред формирале комплетна решења, правећи *NC* промена решења из претходне итерације, пчеле се враћају у кошницу. Током лета уназад, слично као код конструктивне варијанте, нормализују се решења свих пчела и проверава се њихова лојалност. Поступак одређивања лојалности пчела приказан је у поглављу 4.1.5.2. Нека су у примеру пчеле 1 и 2 остале лојалне својим решењима, а пчеле 3 и 4 одустале су од својих решења и постале неопредељене. Ова ситуација приказана је на слици 4.7.



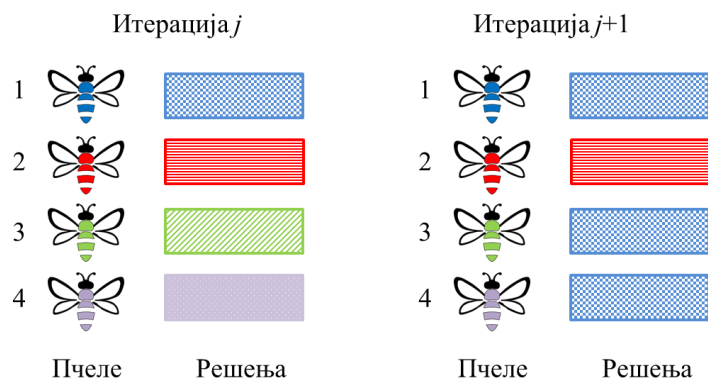
Слика 4.6. Пример BCO_i варијанте након j -тог лета унапред



Слика 4.7. Лојалне и неоопредељене пчеле

Као код конструктивне варијанте, неоопредељене пчеле морају се придружити некој од лојалних пчела. Поступак регрутације одвија се у кошници, у простору за плес. Лојалне пчеле плесом „рекламирају” своје решење, како би регрутовале неке од неоопредељених пчела. Лојалне пчеле које имају боље решење имају већу вероватноћу да ће регрутовати неоопредељене пчеле. Поступак регрутације описан је у поглављу 4.1.5.3.

Нека је, у примеру, лојална пчела 1 регрутовала обе неоопредељене пчеле 3 и 4, док лојална пчела 2 није регрутовала ниједну неоопредељену пчелу. Нова решења свих пчела након регрутације приказана су на слици 4.8.



Слика 4.8. Могућа решења након j -тог лета уназад

На крају итерације, свака пчела поседује по једно решење. Међу свим решењима у датој итерацији проналази се најбоље решење и ажурира се до тада пронађено најбоље решење. Решења свих лојалних пчела додељују се пчелама које су регрутовале, и започиње наредна итерација. У наредном лету унапред све пчеле самостално обављају промене решења.

Итерације се понављају док се не достигне критеријум заустављања, и до тада пронађено најбоље решење представља коначно решење.

4.1.5.2. Одређивање лојалности пчела

Током лета уназад, код обе варијанте *BCO* метахеуристике обавља се нормализација решења, како би могла да се међусобно пореде. Нека је E_b ($b = 1, 2, \dots, B$) вредност критеријумске функције пчеле b , која представља меру квалитета појединачних решења (парцијалних или комплетних). Нормализација се може извршити на два начина, у зависности од тога који је критеријум оптимизације.

Уколико је критеријум оптимизације минимизација, тада ће се нормализована вредност критеријумске функције за пчелу b (O_b) рачунати према једначини (*Jakšić Krüger, 2017*):

$$O_b = \begin{cases} \frac{E_{max} - E_b}{E_{max} - E_{min}}, & E_{max} \neq E_{min}, b = 1, 2, \dots, B \\ 1 & E_{max} = E_{min} \end{cases} \quad (4.1)$$

где E_{min} и E_{max} представљају минималну (најбољу) и максималну (најлошију) вредност критеријумских функција свих пчела које учествују у претрази.

Уколико је критеријум оптимизације максимизација, тада ће се нормализована вредност критеријумске функције за пчелу b (O_b) рачунати према једначини (*Jakšić Krüger, 2017*):

$$O_b = \begin{cases} \frac{E_b - E_{min}}{E_{max} - E_{min}}, & E_{max} \neq E_{min}, b = 1, 2, \dots, B \\ 1 & E_{max} = E_{min} \end{cases} \quad (4.2)$$

У овом случају E_{min} и E_{max} представљају минималну (најлошију) и максималну (најбољу) вредност критеријумских функција свих пчела које учествују у претрази.

У оба случаја, што је вредност критеријумске функције E_b удаљенија од најбоље вредности, мања ће бити нормализована вредност критеријумске функције, и обрнуто, што је E_b ближе најбољој вредности, нормализована вредност критеријумске функције биће већа.

Тек након што је извршена нормализација вредности критеријумских функција, приступа се одређивању лојалности пчела. Лојална ће бити она пчела која прихвати своје решење да од њега наставља даљу претрагу, а неодређена ће постати она пчела која од свог решења одустане. Лојалност се утврђује на основу квалитета решења, а с вероватноћом која се одређује користећи тзв. функцију лојалности.

Већина имплементација *BCO* алгоритма користи функцију лојалности следећег облика:

$$p_b^{u+1} = e^{-\frac{O_{max} - O_b}{u}}, b = 1, 2, \dots, B \quad (4.3)$$

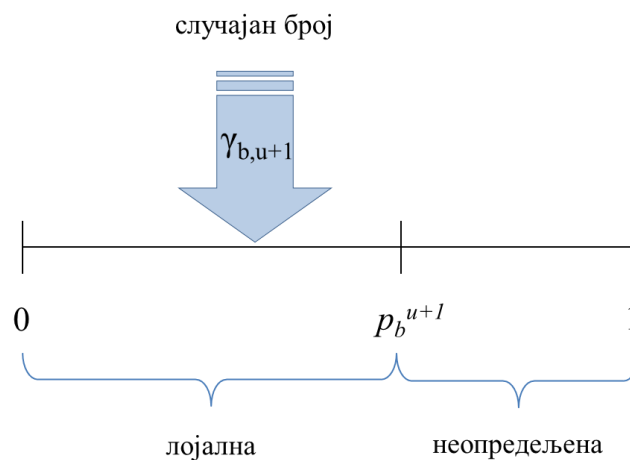
где су:

- p_b^{u+1} – вероватноћа да пчела b у лету унапред $u+1$ остане лојална свом решењу;
- O_b – нормализована вредност критеријумске функције решења (парцијалног или комплетног) пчеле b , $O_b \in [0, 1]$;
- O_{max} – највећа вредност свих нормализованих вредности решења које се пореде, тј. нормализована вредност која одговара најбољем решењу;
- u – редни број лета унапред.

Уколико је пчела достигла боље решење (вредност O_b ближа најбољем достигнутом решењу O_{max}), разлика у бројиоцу разломка је мања, па ће вероватноћа да пчела остане лојална свом решењу бити већа. С друге стране, што је редни број лета унапред већи, вероватноћа p_b^{u+1} да пчела остане лојална свом решењу такође је већа. Ово значи да ће се пчеле, што је процес претраге више одмакао, са све мањом вероватноћом одлучивати да своје решење напусте.

Поред функције лојалности, описане у релацији (4.3), постоје и други облици ових функција. Детаље о другим функцијама лојалности могуће је наћи у дисертацији *Jakšić Krüger* (2017).

Након што је израчуната вероватноћа да пчела b у лету $u+1$ остане лојална свом решењу, приступа се извлачењу случајног броја. Уколико извучени случајан број припада интервалу $[0, p_b^{u+1}]$ пчела b ће остати лојална свом решењу. У супротном, уколико је случајан број из интервала $(p_b^{u+1}, 1]$, пчела b ће постати неопредељена. Поступак одређивања лојалности приказан је на слици 4.9.



Слика 4.9. Одређивање лојалности пчеле помоћу случајног броја

4.1.5.3. Процес регрутације

Пчеле које су у поступку проверавања лојалности одлучиле да задрже своје решење, приступају регрутацији пчела које су постале неопредељене. Вероватноћа да ће пчела b регрутовати неку од неопредељених пчела израчунава се према релацији:

$$p_b = \frac{O_b}{\sum_{k=1}^R O_k}, b = 1, 2, \dots, R, \quad (4.4)$$

где су:

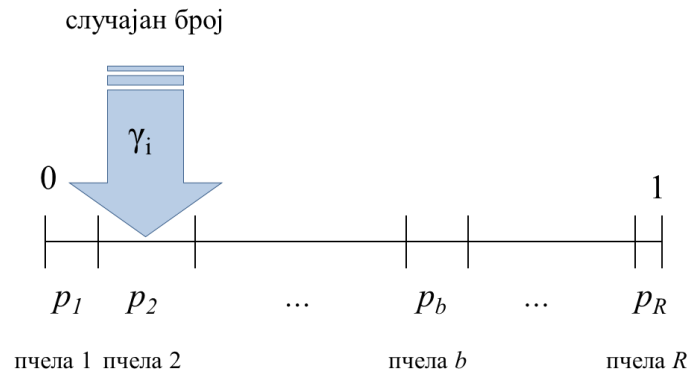
O_k – нормализована вредност критеријумске функције k -тог понуђеног решења лојалне пчеле;

R – број лојалних пчела.

Због начина на који су вероватноће израчунате (израз (4.4)), њихов збир једнак је јединици, што показује једначина (4.5).

$$\sum_{b=1}^R p_b = 1 \quad (4.5)$$

Користећи ову чињеницу, одабиром случајног броја, неодређена пчела i изабраће једну лојалну пчелу коју ће следити. Након што је израчуната вероватноћа да пчела b регрутује неодређене пчеле, приступа се извлачењу случајног броја. Уколико извучени случајан број припада интервалу $[0, p_1]$ пчела 1 регрутоваће неодређену пчелу i ; ако припада интервалу $[p_1, p_1+p_2]$ пчела 2 ће регрутовати неодређену пчелу i , итд. Поступак регрутације приказан је на слици 4.10.



Слика 4.10. Процес регрутације неодређене пчеле помоћу случајног броја

Решење лојалне пчеле b додељује се регрутованој пчели, која је до тада била неодређена пчела i . У новом лету унапред, свака пчела самостално бира кораке које ће да изврши, или врши промене решења у зависности од тога која је варијанта *BCO* алгоритма примењена.

4.1.6. Симулирано каљење

Метахеуристички алгоритам Симулираног каљења заснован је на аналогији с процесом каљења метала (нпр. челика) у металургији. Овај процес подразумева загревање метала до течног стања (топљење) и његово постепено хлађење (каљење). Постепеним, контролисаним, хлађењем постиже се да кристална решетка метала достигне минималну енергију, што доприноси постизању веће чврстоћа метала.

Метахеуристику Симулираног каљења за решавање сложених проблема комбинаторне оптимизације предложили су *Kirkpatrick* и сар, (1983) и *Černý* (1985), независно једни од других.

Идеја технике Симулираног каљења је истраживање простора решења у околини тренутног решења, уз извршење малих промена на случајан начин. Притом се израчунава постигнута разлика енергије ΔE између претходног и новог решења. Ако је постигнуто боље решење ($\Delta E < 0$), ново решење се усваја. У супротном, ако је $\Delta E > 0$, постигнуто лошије решење не одбацује се аутоматски, већ се дозвољавају тзв. „скокови енергије” који се дешавају и у термодинамичким процесима. Ове скокове описали су *Metropolis* и сарадници (1953) користећи Болцманову (*Boltzmann*) расподелу за израчунавање вероватноће овог скока енергије (*Teodorović*, 2007). Овим дозвољавањем „скокова” избегава се да решење остане заробљено у локалном минимуму.

Вероватноћа P да ће се повећати енергија ΔE ако се систем налази на температури T израчунава се (*Teodorović*, 2007):

$$P = e^{-\frac{\Delta E}{T}} \quad (4.6)$$

Уводећи аналогију, под конфигурацијом честица кристалне решетке подразумева се једно допустиво решење задатка комбинаторне оптимизације, а под енергијом физичког система може се сматрати вредност функције циља. Промена енергије ΔE онда се односи на промену вредности функције циља. Вероватноћа да ће ново решење чија је функција циља лошија ипак бити прихваћено као ново тренутно најбоље решење, тада се израчунава као у релацији:

$$P = e^{-\frac{f(j)-f(i)}{T}} \quad (4.7)$$

где су $f(j)$ и $f(i)$ вредности функције циља за старо i и ново j решење, а T контролни параметар који је аналоган температури на којој се налази систем.

Ова вероватноћа P сада се упоређује са генерисаним случајним бројем $R \in [0,1]$ и, уколико је $R > P$, ново решење се усваја као ново најбоље, док се у супротном одбацује (Teodorović, 2007). Поступак снижавања енергије на датој температури понавља се све док се не достигне тзв. термални еквилибријум, који подразумева да се после већег броја ($N(t)$) случајних пертурбација решења, више не добија смањење енергије. Тада се температура спушта и наставља тражење новог термалног еквилибријума. Снижавање температуре обавља се као у релацији:

$$T(t) = \alpha T(t-1) \quad (4.8)$$

где је $T(t)$ нова температура, $T(t-1)$ претходна температура, а α параметар спуштања температуре. Параметар спуштања температуре је из интервала $[0,1]$ и, ако је његова вредност мала, то значи да је спуштање температуре брзо, што може да доведе до упадања у локални минимум, што је у физичким системима аналогно пуцању метала. Ако је параметар исувише велик, то доводи до сувише спорог спуштања температуре, температуре су дуго времена високе, што доводи до тога да се сувише често лошија решења прихватају као најбоља, због зависности вероватноће од температуре у релацији (4.7).

Цео поступак се понавља док се не задовољи критеријум заустављања, који може бити максималан број итерација, максималан број понављања најбољег решења, укупно време извршавања алгорита и слично.

Алгоритам Симулираног каљења може се представити псеудокодом као у алгоритму 3.

Алгоритам 3. Псеудокод алгоритма Симулираног каљења (Eglese, 1990; Jovanović, 2017)

Процедура симулираног каљења

- 1: Поставити иницијално решење $i \in S$.
- 2: Поставити иницијалну температуру T .
- 3: Поставити бројач температуре $t = 0$.
- 4: **repete**
- 5: Поставити бројач понављања $n = 0$.
- 6: **repete**
- 7: Генерисати стање j , у околини претходног стања i .
- 8: Израчунати $\Delta E = f(j) - f(i)$
- 9: **if** $\Delta E < 0$ **then** $i = j$
- 10: **else if** $\text{random}(0,1) < \exp(-\Delta E / T)$ **then** $i = j$
- 11: $n = n + 1$
- 12: **until** $n = N(t)$
- 13: $t = t + 1$
- 14: $T = T(t)$
- 15: **until** задовољен критеријум заустављања.

4.2. Вишеатрибутивно доношење одлука

4.2.1. О вишекритеријумском и вишеатрибутивном доношењу одлука

Вишекритеријумско доношење одлука (енгл. *Multiple Criterion Decision Making – MCDM*) односи се на поступак доношења одлука када је присутно више, обично међусобно супротстављених, критеријума. Проблеми вишекритеријумског одлучивања могу да се поделе у две категорије (Rao, 2007): (1) вишеатрибутивно доношење одлука (енгл. *Multiple Attribute Decision Making – MADM*) и (2) вишециљно доношење одлука (енгл. *Multiple Objective Decision Making – MODM*). *MADM* се односи на одабир најбоље варијанте (алтернативе) када су присутни вишеструки, често конфликтни атрибути. С друге стране, код *MODM* алтернативе нису унапред познате, већ се аналитички формира низ алтернатива. Од тако формираних алтернатива бира се она која у највећој мери задовољава постављене циљеве (Rao, 2007). Термин *MCDM* често се поистовећује с термином *MADM* (Dimitrijević, 2017).

*Алтернативе*¹¹ представљају потенцијална решења проблема. Скуп алтернатива треба да буде потпун, тј. да укључи сва потенцијална решења која су вредна пажње (Dimitrijević, 2017). Разматраће се проблеми с коначним бројем алтернатива. Нека је A скуп свих алтернатива које су препознате као потенцијална решења проблема: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$. Скуп A садржи m различитих алтернатива.

Свакој алтернативи придружени су *атрибути*, који представљају мере вредности алтернатива. Различити атрибути, придружени алтернативама, називају се још и особине, перформансе, карактеристике и сл. (Dimitrijević, 2017).

Критеријуми представљају начине вредновања и поређења алтернатива, и дефинисани су из претходно постављених циљева. Критеријуми се заснивају на атрибутима који су придружени алтернативама. Појмови критеријума и атрибута понекад се изједначавају, јер један критеријум може бити изражен једним атрибутом. Међутим, како један критеријум може чинити више атрибута, ипак треба направити разлику између ових појмова (Dimitrijević, 2017).

Нека је K скуп свих дефинисаних критеријума: $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$. Скуп K садржи n различитих критеријума.

Вредновање алтернатива по критеријумима подразумева одређивање вредности сваке алтернативе A_i , ($i=1, 2, \dots, m$) по сваком критеријуму K_j , ($j=1, 2, \dots, n$) (Dimitrijević, 2017): $K_j(A_i) = x_{ij}$. Ове вредности могу се представити тзв. матрицом одлучивања $X = [x_{ij}]_{m \times n}$.

Вредновање алтернатива по критеријумима описује се табелом одлучивања која је приказана у табели 4.1. Табела одлучивања одређена је скупом алтернатива, скупом критеријума, матрицом одлучивања, као и скупом тежина критеријума, које одговарају значају појединих критеријума.

Сви елементи у табели одлучивања морају бити нормализовани, како би могли бити међусобно упоредиви.

¹¹ Иако термин алтернатива упућује на то да постоје само два решења, овај израз широко је распрострањен у литератури.

алтернатива (л. *alternativa*) избор између двога, одређивање за једну од две одлуке, тежак избор једне од двеју могућности. (извор: Вујаклија, (1954))

Табела 4.1. Пример табеле одлучивања

алтернативе\критеријуми	K_1	K_2	...	K_j	...	K_n
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}
...						
A_i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ij}	...	x_{in}
...						
A_m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mj}	...	x_{mn}
min/max	max	max	...	max	...	max
W	w_1	w_2	...	w_j	...	w_n

Нека је r_{ij} нормализована вредност алтернативе A_i по критеријуму K_j . Она представља однос између вредности x_{ij} и норме по одговарајућем критеријуму. Ако се критеријум максимизира нормализована вредност се израчунава као (Dimitrijević, 2017):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4.9)$$

Уколико се критеријум минимизира, тада се нормализована вредност израчунава као (Dimitrijević, 2017):

$$r_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{x_{ij}}} \quad (4.10)$$

Нормализацијом се све вредности алтернатива по критеријумима своде на вредности из интервала $[0,1]$, при чему важи да је $\sum_{i=1}^m r_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n$.

На сличан начин обавља се и нормализација тежина критеријума:

$$w_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4.11)$$

где су W_j ($j=1, 2, \dots, n$) тежине придружене критеријумима K_j , за које важи да је $W_j \geq 0$. Након нормализације испуњен је услов $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

4.2.2. Аналитичко хијерархијски процес

Аналитичко хијерархијски процес (енгл. *Analytic Hierarchy Process -AHP*) је представио Saaty (1980). *AHP* представља ефикасан алат који омогућава да се компликовани проблем вишеатрибутивног доношења одлуке креира као хијерархијска структура одлучивања. Поред тога, комплексно доношење одлука поједностављује се кроз низ поређења по паровима елемената хијерархије. Након тога се обавља синтетизовање резултата и одређивање тежинских коефицијената свих елемената хијерархије. Поред тога, у *AHP* је укључена и техника за проверу конзистентности оцена доносиоца одлука, чиме се смањује пристрасност у процесу доношења одлуке.

AHP разматра скуп критеријума вредновања, као и скуп алтернатива међу којима треба изабрати најбољу.

АНР, затим, генерише тежину за сваки критеријум, у складу с поређењем по паровима критеријума од стране доносиоца одлуке. Што је тежина већа, критеријум је важнији. Затим, за сваки критеријум, *АНР* додељује тежине свакој алтернативи, такође на основу поређења по паровима од стране доносиоца одлуке. Што је тежина већа, то је алтернатива боља у односу на разматрани критеријум. На крају, *АНР* комбинује тежине критеријума и алтернатива, и на тај начин одређује глобалну оцену за сваку алтернативу, као и њихово рангирање.

АНР метода заснива се на аксиомама које је представио *Saaty* у свом раду (1987). Теоријска основа на којој почива *АНР* метода су следеће аксиоме:

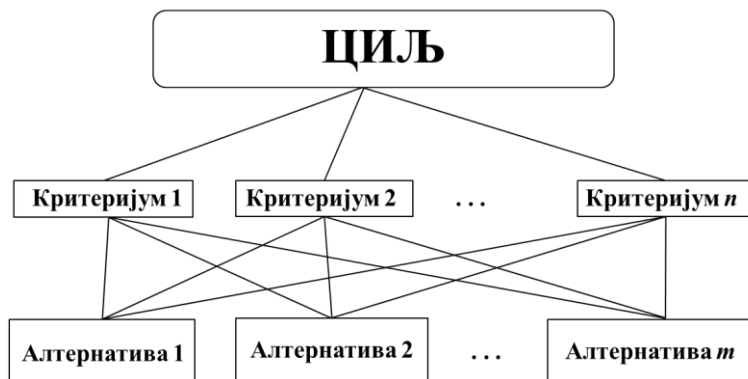
1. Аксиома **реципрочности** (ако је елемент *A* *n* пута значајнији него елемент *B*, тада је *B* $1/n$ пута значајнији него елемент *A*.);
2. Аксиома **хомогености** (поређење има смисла једино ако су елементи упоредиви, односно, немогуће је да елемент *A* буде бесконачно пута значајнији него елемент *B*.);
3. Аксиома **зависности** (формира се хијерархија и обавља се поређење између елемената једног нивоа хијерархије у односу на елемент који се налази на вишем нивоу хијерархије. Поређења на нижем нивоу не утичу на елемент вишег нивоа.);
4. Аксиома **очекивања** (сви елементи хијерархије морају бити укључени у разматрање и свака промена у структури хијерархије захтева поновно рачунање приоритета у новој хијерархији. Ово практично значи да је *АНР* метода осетљива на накнадну промену структуре хијерархије).

Аксиоме 1. и 2. говоре о оцењивању парова елемената хијерархије и додељивању преференција, док аксиоме 3. и 4. описују формулисање и решавање проблема као хијерархије.

4.2.2.1. Хијерархијска структура

АНР метода разлаже сложени проблем доношења одлуке на једноставније елементе, који граде хијерархијску структуру. У општем случају, проблем доношења одлуке садржи три основна елемента: (1) циљ који је потребно постићи, (2) критеријуме на основу којих се врши поређење и (3) алтернативе које представљају могућа решења проблема одлучивања. Циљ је изабрати алтернативу која најбоље задовољава постављене критеријуме.

Сагласно с овом основном структуром формира се хијерархија одлучивања. На њеном врху се налази циљ. Ниво испод циља представљају критеријуми, а испод њих се налази ниво алтернатива. Пример овакве минималне структуре приказан је на слици 4.11. Хијерархијске структуре формирају се у зависности од конкретног проблема који се решава, и могу бити компликованије, садржати аспекте одлуке, више нивоа критеријума, различите сценарије, скупове алтернатива и слично.



Слика 4.11. Пример једноставне *АНР* хијерархије одлучивања

4.2.2.2. Поређење по паровима и фундаментална скала

Након што је хијерархијска структура формирана, спроводи се поређење елемената на истом хијерархијском нивоу, како би се добиле релативне тежине (приоритети) у односу на надређени ниво хијерархијске структуре. Поређење се обавља по паровима, сваки са сваким. На пример, посматрајући хијерархијску структуру на слици 4.11, биће поређено n критеријума, сваки са сваким, а у односу на надређени циљ. Такође, биће поређено m алтернатива, свака са сваком, у односу на њима надређене критеријуме.

Приликом поређења елемената по паровима, додељена оцена одражава степен преференције једног елемента хијерархије у односу на други. Ово одређивање преференција критеријума и алтернатива на основу поређења по паровима представља теоријску основу АНР методе.

За поређење елемената хијерархије користи се позната, тзв. фундаментална Сатијева скала, коју је зачетник АНР методе предложио у својим радовима (Saaty, 1977; 1980). Saaty је (1977) поредио је ову деветостепену скалу са 25 других скала када је желео да одабере скалу погодну за поређење по паровима. Ова скала, која је у међувремену постала веома широко коришћена, приказана је у табели 4.2.

Табела 4.2. Фундаментална Сатијева скала (извор: Saaty, 2008)

Интензитет или важност	Дефиниција (лингвистички исказ)	Објашњење
1	Једнака важност, нема преференције	Две активности једнако доприносе циљу.
2	Слаба или блага преференција	
3	Умерена преференција	Мало фаворизовање једне активности у односу на другу.
4	Више од умерене преференције	
5	Јака преференција	Значајно фаворизовање једне активности у односу на другу.
6	Више од јаке преференције	
7	Веома јака преференција, демонстрирана преференција	Једна активност је веома фаворизирана у односу на другу, у пракси се показује доминантност.
8	Веома, веома јака преференција	
9	Апсолутна преференција	Једна активност има највиши могући ниво фаворизовања у односу на другу.
Реципрочна вредност	Ако активност i има ненулту вредност важности у односу на активност j , тада ће активност j имати реципрочну вредност важности у односу на активност i .	Разумна претпоставка.

Резултати поређења елемената у оквиру једног хијерархијског нивоа приказују се матрицом поређења. Нека се међусобно пореди n елемената хијерархије, и нека је вредност поређења i -тог елемента ($i=1, 2, \dots, n$) према j -том елементу ($j=1, 2, \dots, n$) хијерархије означен са a_{ij} . Матрица поређења A је квадратна, димензија $n \times n$:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Како је у матрици A важност елемента i према елементу j изражена са a_{ij} , следећи правило из Сатијевог скале, вредност важности елемента j према елементу i мора бити $1/a_{ij}$. Поред тога, вредности на дијагонали су једнаки јединици јер се пореде исти елементи, тј. $a_{ii} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n$. То заправо значи да је број потребних поређења једнак броју комбинација без понављања од n елемената друге класе:

$$C_2^n = \binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (4.13)$$

Матрица поређења A се упрошћава и сада се може записати на следећи начин:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1i} & 1/a_{2i} & \dots & 1 & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1/a_{in} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

На сваком хијерархијском нивоу, помоћу матрице A рачунају се релативне тежине, које се приказују вектором $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$.

У случају потпуне конзистентности доносиоца одлуке важи следећа релација:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4.15)$$

Ако постоји потпуна конзистентност важи и правило транзитивности:

$$a_{ik}a_{kj} = \frac{w_i w_k}{w_k w_j} = \frac{w_i}{w_j} = a_{ij}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.16)$$

Компоненте вектора релативних тежина могу се, у случају потпуне конзистентности, израчунати као (Dimitrijević, 2017):

$$w_i = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.17)$$

Ово практично значи да је вредност w_i једнака, свеједно за коју вредност j се израчуна:

$$w_i = \frac{a_{i1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} = \frac{a_{i2}}{\sum_{k=1}^n a_{k2}} = \dots = \frac{a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}}. \quad (4.18)$$

Компоненте вектора релативних тежина, такође у случају потпуне конзистентности, могу се израчунати и сумирањем вредности по врстама матрице, и њиховом нормализацијом, као у изразу (Dimitrijević, 2017):

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (4.19)$$

У процесу поређења важности у датом нивоу хијерархије, доносиоци одлука нехотично праве грешке и одступају од потпуне конзистентности. Ове грешке нарочито долазе до изражаја ако је велики број елемената који је потребно поредити.

Како би се овај проблем превазишао, предложени су поступци како да се из матрице A , која садржи елементе неконзистенције, израчунају вредности вектора релативних тежина. Једна од метода коју је предложио Saaty (1977) је метода сопственог¹² (својственог или карактеристичног) вектора (енгл. *Eigenvector Method*). Ова метода је објашњена у наставку.

4.2.2.3. Метода сопственог вектора

За матрицу поређења A и вектор релативних тежина колона $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ могуће је наћи сопствену вредност λ матрице A ако матрична једначина:

$$Aw = \lambda w \quad (4.20)$$

има ненулта решење. То решење је сопствени вектор λ .

Ако је I јединична матрица, тада се једначина (4.20) може написати у облику:

$$(A - \lambda I)w = 0 \quad (4.21)$$

Сопствене вредности матрице A су нуле катактеристичног полинома $\det(A - \lambda I)$ (Mitrinović, 1986), односно:

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (4.22)$$

Ако је матрица поређења A (4.14) потпуно конзистентна тада, заменом вредности (4.15), из релације (4.20) следи (Dimitrijević, 2017):

$$Aw = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_1 \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_1 \end{bmatrix} = nw = \lambda w \quad (4.23)$$

Једина ненулта сопствена вредност потпуно конзистентне матрице A једнака је $\lambda = n$. Та највећа сопствена вредност матрице означава се са λ_{max} .

¹² Нека је A квадратна матрица реда n . Ако је $Ax = \lambda x$ (λ скалар), где је x вектор различит од 0, кажемо да је x сопствени (својствени или карактеристични) вектор матрице A , и да је λ сопствена (својствена или карактеристична) вредност матрице A (извор: Mitrinović, 1986)

4.2.2.4. Мерење конзистентности - Индекс конзистентности

Ако је матрица поређења конзистентна, тада је $\lambda = n$. Када доносилац одлуке направи грешке у проценама, матрица поређења неће бити конзистентна, и тада ће сопствена вредност λ бити већа од n . Ова разлика сопствених вредности при неконзистенцији и конзистенцији служи као мера неконзистентности. На тај начин је могуће измерити грешку у проценама доносиоца одлуке.

Saaty (1980) је предложио да се за меру одступања од конзистентности усвоји степен конзистентности (енгл. *Consistency Ratio – CR*):

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.24)$$

Након одређивања степена конзистентности, потребно је ову вредност поредити са средњом вредношћу степена конзистентности великог броја случајно генерисаних матрица истих димензија као матрица поређења ($n \times n$). Ова средња вредност степена конзистентности великог броја генерисаних матрица названа је случајни индекс конзистентности (енгл. *Random Index – RI*). Вредности *RI* зависе од димензија матрице n , и њихове вредности приказане су у табели 4.3.

Табела 4.3. Случајни индекс конзистентности *RI* (извор: Saaty и Tran, 2007)

Димензија матрице n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

Финална мера конзистентности матрице поређења је индекс конзистентности (енгл. *Consistency Index – CI*) који се израчунава као однос индекса конзистентности и случајног индекса конзистентности:

$$CI = \frac{CR}{RI} \quad (4.25)$$

Толерише се неконзистентност којој одговара вредност индекса конзистентности $CI < 0,1$, односно 10% неконзистентности. Saaty (1987) напомиње и да индекс конзистентности не треба да буде ни сувише мали (1% или чак 0,1%). Неконзистентност је важна, јер без ње нова знања не могу бити прихваћена. Ако је знање потпуно конзистентно, Saaty (1987) сматра да онда оно противречи искуству које захтјева сталну промену разумевања ствари. Такође, његов став је да глобални развитак управо зависи од прихватања неконзистентности.

Треба, наравно, тежити да индекс конзистентности буде испод вредности 10%. Уколико се ипак деси да је већи од 10%, потребно је преиспитати матрицу поређења и утврдити узрок настанка недоследности.

4.2.2.5. Одређивање ранга алтернатива

Након што се спроведе поређење по паровима елемената сваког хијерархијског нивоа и утврди задовољавајући ниво неконзистентности, потребно је извршити синтезу ових вредновања, како би се добио укупни вектор релативних тежина (приоритета) свих алтернатива, а тиме и њиховог ранга (редоследа).

Посматрамо једноставну хијерархију са слике 4.11. Она садржи m алтернатива A_i ($i=1, \dots, m$) којима је надређено n критеријума K_j ($j=1, \dots, n$). Критеријумима је надређен циљ.

Нека је релативна тежина сваке алтернативе A_i ($i=1, \dots, m$) у односу на надређени критеријум K_j ($j=1, \dots, n$) означена са $w_{A_i}^{K_j}$. Нека је, са друге стране, релативна тежина сваког критеријума K_j ($j=1, \dots, n$) у односу на надређени циљ означена са w_{K_j} . Укупна релативна тежина (приоритет) сваке алтернативе A_i ($i=1, \dots, m$) биће једнака:

$$w_{A_i} = \sum_{j=1}^n w_{K_j} w_{A_i}^{K_j} \quad (4.26)$$

На основу израчунатих релативних тежина алтернатива w_{A_i} одређује се коначни ранг алтернатива. Алтернатива с највећом вредношћу w_{A_i} је најбоља и представља решење проблема избора.

4.2.2.6. *BOCR модели*

У неким случајевима критеријуме је могуће, али и пожељно, груписати. Један од начина груписања критеријума јесте формирање тзв. аспеката одлуке. Четири аспекта одлуке су користи (енгл. *Benefits* - B), могућности (енгл. *Opportunities* - O), трошкови (енгл. *Costs* - C) и ризици (енгл. *Risks* - R). *BOCR* је акроним који означава проблеме који су формиран тако да је њихова структура таква да су „подељени” на четири потпроблема, по један за сваки од аспеката одлуке. Приоритети алтернатива вреднују се према сваком од појединачних аспеката одлуке, и онда се комбинују како би се добила једна, коначна, вредност сваке алтернативе.

Постоји пет начина за комбиновање вредности алтернатива према аспектима одлуке. Ако са B_i , O_i , C_i и R_i означимо тежине алтернатива A_i ($i=1, \dots, m$) према *BOCR* аспектима одлуке, а са b , o , c и r тежине *BOCR* аспеката одлуке, тада ће се укупне релативне тежине (приоритети) алтернатива w_{A_i} добити као у релацијама (Lee, 2009; Saaty, 2003):

1. Адитивна (енгл. *Additive*):

$$w_{A_i} = bB_i + oO_i + c \left(\frac{1}{C_i} \right)_{\text{нормализовано}} + r \left(\frac{1}{R_i} \right)_{\text{нормализовано}} \quad (4.27)$$

2. Пробабалистичка адитивна (енгл. *Probabilistic additive*):

$$w_{A_i} = bB_i + oO_i + c(1 - C_i) + r(1 - R_i) \quad (4.28)$$

3. Суптрактивна¹³ (заснована на разлици) (енгл. *Subtractive*):

$$w_{A_i} = bB_i + oO_i - cC_i - rR_i \quad (4.29)$$

4. Мултипликативна са степеном приоритета (енгл. *Multiplicative priority powers*):

$$w_{A_i} = B_i^b O_i^o \left[\left(\frac{1}{C_i} \right)_{\text{нормализовано}} \right]^c \left[\left(\frac{1}{R_i} \right)_{\text{нормализовано}} \right]^r \quad (4.30)$$

¹³ суптрактиван (нл. *subtractivus*), који се може одбити или одрачунати; мат. одузимљив, израз за величине са знаком суптракције (–) или за негативне; супр. адитиван. (извор: Вујаклија, (1954))

5. Мултипликативна (енгл. *Multiplicative*):

$$w_{A_i} = \frac{B_i O_i}{C_i R_i} \quad (4.31)$$

На основу овако израчунатих релативних тежина алтернатива w_{A_i} одређује се коначни ранг алтернатива који, поред критеријума, узима у обзир и аспекте одлуке. Алтернатива с највећом вредношћу w_{A_i} је најбоља и представља решење *BOCR* проблема избора.

4.2.2.7. Групно доношење одлука уАНР

Групно доношење одлука (енгл. *Group decision making*) процес је доношења одлуке на основу мишљења различитих појединаца. Преласком с једног доносиоца одлуке на групу доносилаца одлуке, процес доношења одлуке се усложњава. Како има више доносилаца одлуке, потребно је имати у виду да они могу бити са различитих заинтересованих страна, па су њихови погледи на решење проблема често супротстављени. Имајући у виду ову конфликтност становишта, при групном доношењу одлука често је присутно преговарање и усаглашавање ставова.

4.2.2.7.1. Агрегација вектора приоритета

Код групног доношења одлука појединачни доносиоци одлуке саопштавају своје векторе приоритета. Два начина добијања једног, групног, мишљења приказана су у раду *Forman* и *Penewati* (1998): (1) агрегација појединачних оцена (енгл. *Aggregation of individual judgements – AIJ*) и (2) агрегација појединачних приоритета (енгл. *Aggregation of individual priorities – AIP*). Агрегација индивидуалних оцена обавља се пондерисаном геометријском средином, док се за агрегацију појединачних приоритета користе пондерисана аритметичка средина или пондерисана геометријска средина (*Forman* и *Penewati*, 1998).

Нека се група састоји од r доносилаца одлуке, и нека је вектор приоритета k -тог доносиоца одлуке ($k=1,2, \dots, r$) који доноси одлуке о n ентитета: $d_k = (d_{1k}, d_{2k}, \dots, d_{jk}, \dots, d_{nk})$, при чему је $0 \leq d_{jk} \leq 1$ и $\sum_{j=1}^n d_{jk} = 1$. Нека је β_k важност (тежина) k -тог доносиоца одлуке, при чему је $0 \leq \beta_k \leq 1$ и $\sum_{k=1}^r \beta_k = 1$.

Елементи вектора групног приоритета $D = (D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_n)$ ако се користи пондерисана геометријска средина рачунају се према релацији (*Dimitrijević*, 2017):

$$D_j^G = \prod_{k=1}^r (d_{jk})^{\beta_k}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.32)$$

Уколико се користи пондерисана аритметичка средина, тада се елементи групног вектора приоритета рачунају као у релацији (*Dimitrijević*, 2017):

$$D_j^A = \sum_{k=1}^r \beta_k d_{jk}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.33)$$

Уколико су сви доносиоци одлуке једнако важни, тада ће њихове важности бити: $\beta_k = \frac{1}{r}$ за $\forall k = 1, 2, \dots, r$.

4.3. Теорија фази скупова

Историјски гледано, теорија вероватноће била је прва теорија која је увела неизвесност у математичке моделе. Претпостављало се да било која неизвесност може да се опише вероватноћом, шансом да се нешто деси. Насупрот томе, теорија фази скупова (енгл. *fuzzy sets*) описује неодређеност, другачији тип неизвесности. Теорија фази скупова је алат за моделирање врсте неизвесности која је повезана с непрецизношћу, неодређеношћу, и недостатком информација о одређеном проблему.

Теорију фази скупова први је представио *Zadeh* (1965) као начин представљања и манипулисања подацима који су непрецизни и неодређени. Фази скуп дефинише се помоћу функције припадности. Функција припадности сваком елементу фази скупа додељује одговарајући степен припадности. За разлику од класичних скупова, где је тачно одређено да ли неки елемент припада скупу или не, у теорији фази скупова функција припадности одређује у којој је мери одређени елемент припада фази скупу. Релацијом (4.34) приказана је функција припадности $\mu_A(x)$ елемента x скупу A у класичној теорији скупова (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{ако и само ако } x \text{ припада скупу } A \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (4.34)$$

У класичној теорији скупова функција припадности може имати само вредности 0 или 1. Са друге стране, у теорији фази скупова, функција припадности фази скупу A (фази скуп се означава масним, *bold*, словима) може имати било коју вредност између 0 и 1, као што показује релација (4.35) (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012):

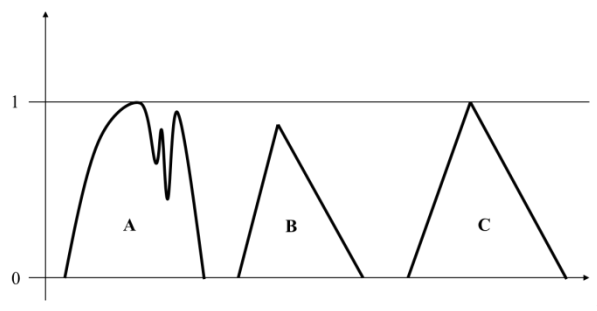
$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1, \forall x \in X \quad (4.35)$$

Фази скуп A дефинише се као скуп уређених парова (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012):

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \quad (4.36)$$

где је $\mu_A(x)$ степен припадности елемента x скупу A .

Фази скуп који је конвексан и нормализован назива се фази бројем (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012). Примери фази скупова приказани су на слици 4.12: конвексан (**A**), нормализован (**A**), и фази број (**C**).

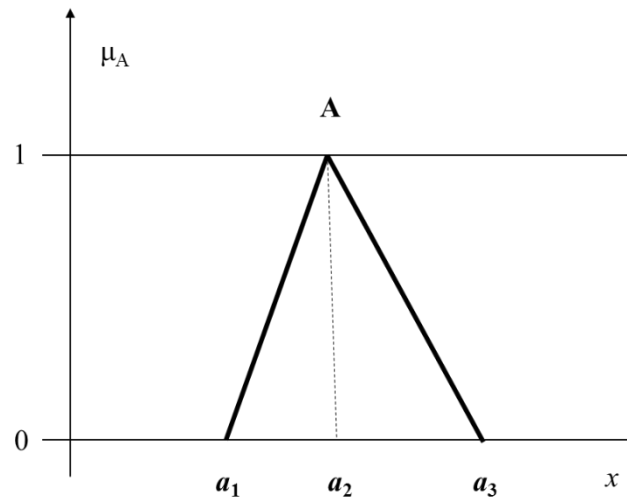


Слика 4.12. Фази скупови **A** и **B** и фази број **C**

Троугласти фази број је посебна врста фази бројева и најчешће се изражава на следећи начин (*Teodorović* и *Šelmić*, 2012):

$$A = (a_1, a_2, a_3) \quad (4.37)$$

где су a_1 доња (лева) граница троугластог фази броја, a_2 вредност којој одговара највећи степен припадности, a_3 горња (десна) граница фази броја. Фази број **A** приказан је на слици 4.13.



Слика 4.13. Фази број $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$

Функција припадности троугластог фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ гласи:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x \notin [a_1, a_3] \end{cases} \quad (4.38)$$

У наставку ће бити описане неке аритметичке операције с троугластим фази бројевима.

Збир два фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ и $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)$ дат је релацијом:

$$\mathbf{A}(+)\mathbf{B} = (a_1, a_2, a_3)(+)(b_1, b_2, b_3) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (4.39)$$

Фази броју $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ супротан је фази број $\mathbf{A}^- = (-a_3, -a_2, -a_1)$.

Разлика два фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ и $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)$ дат је релацијом:

$$\mathbf{A}(-)\mathbf{B} = \mathbf{A}(+)\mathbf{B}^- = (a_1, a_2, a_3)(+)(-b_3, -b_2, -b_1) = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1) \quad (4.40)$$

Множење фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ позитивном константом $c > 0$ дато је релацијом:

$$c\mathbf{A} = c(a_1, a_2, a_3) = (ca_1, ca_2, ca_3) \quad (4.41)$$

Множење фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ негативном константом $d < 0$ дато је релацијом:

$$d\mathbf{A} = d(a_1, a_2, a_3) = (da_3, da_2, da_1) \quad (4.42)$$

Производ два фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ и $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)$, ако су $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$, реални, ненегативни бројеви, дат је релацијом (Deng, 1999):

$$\mathbf{A}(\times)\mathbf{B} = (a_1, a_2, a_3)(\times)(b_1, b_2, b_3) = (a_1b_1, a_2b_2, a_3b_1) \quad (4.43)$$

Реципрочна вредност фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$, ако су a_1, a_2, a_3 , реални, ненегативни бројеви дата је релацијом (Deng, 1999):

$$\mathbf{A}^{-1} = \left(\frac{1}{a_3}, \frac{1}{a_2}, \frac{1}{a_1} \right) \quad (4.44)$$

Количник два фази броја $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$ и $\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)$, ако су $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$, реални, ненегативни бројеви дат је релацијом (Deng, 1999):

$$\mathbf{A}(\div)\mathbf{B} = \mathbf{A}(\times)\mathbf{B}^{-1} = (a_1, a_2, a_3)(\times) \left(\frac{1}{b_3}, \frac{1}{b_2}, \frac{1}{b_1} \right) = \left(\frac{a_1}{b_3}, \frac{a_2}{b_2}, \frac{a_3}{b_1} \right) \quad (4.45)$$

Дефазификација представља конверзију фази скупа (нпр. троугластог фази броја) у скаларну величину. Постоје бројне методе дефазификације, неке од њих су детаљно описане у раду Van Leekwijck и Kerre (1999).

Једна од метода дефазификације које се користе у литератури (Chou, 2003) јесте метода интегрисаних оцењених средњих вредности (енгл. *graded mean integration representation method*) коју су предложили Chen и Hsieh (1998) за представљање генерализованог фази броја у облику реалног броја (енгл. *crisp value*). Chou (2003) је показао да за троугласти фази број $\mathbf{A} = (a_1, a_2, a_3)$, *crisp* вредност $P(\mathbf{A})$ износи као у релацији:

$$P(\mathbf{A}) = \frac{1}{6}(a_1 + 4a_2 + a_3) \quad (4.46)$$

4.3.1. Фази аналитичко хијерархијски процес

Класичне методе вишеатрибутивног доношења одлука претпостављају да су вредности алтернатива по критеријумима (x_{ij} из табеле 4.1) или тежине критеријума (w_j из табеле 4.1) реалне (*crisp*) вредности. У стварности, ове величине могу бити *crisp*, и/или лингвистичке (фази) променљиве. Многи *MADM* проблеми садрже комбинацију *crisp* и фази променљивих.

Bellman и Zadeh (1970) први су теорију фази скупова повезали с проблемима доношења одлука. Van Laarhoven и Pedrycz (1983) предложили су комбинацију Аналитичко хијерархијског процеса и Теорије фази скупова, користећи троугласте фази бројеве, за одређивање односа важности између парова елемената хијерархије. Коришћење троугластих фази бројева и израчунавање фази тежина елемената хијерархије предложио је Chang (1992, 1996).

Фази *AHP* (*FAHP*) заснива се на принципима класичног аналитичко хијерархијског процеса. Структура проблема формира се као хијерархија, која је приказана на слици 4.11. За поређење парова елемената хијерархије, уместо фундаменталне Сатијеве скале (табела 4.2), употребљава се тзв. фази Сатијева скала, приказана у табели 4.4.

Табела 4.4. Фази Сатијева скала

Важност критеријума	Дискретна вредност	Фази вредност	Дискретна реципрочна вредност	Фази реципрочна вредност
Једнака важност	1	(1,1,1)	1	(1,1,1)
Међувредност	2	(1,2,4)	$\frac{1}{2}$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1)$
Умерена преференција	3	(1,3,5)	$\frac{1}{3}$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$
Међувредност	4	(2,4,6)	$\frac{1}{4}$	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2})$
Јака преференција	5	(3,5,7)	$\frac{1}{5}$	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3})$
Међувредност	6	(4,6,8)	$\frac{1}{6}$	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4})$
Демонстрирана преференција	7	(5,7,9)	$\frac{1}{7}$	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$
Међувредност	8	(6,8,10)	$\frac{1}{8}$	$(\frac{1}{10}, \frac{1}{8}, \frac{1}{6})$
Апсолутна преференција	9	(7,9,11)	$\frac{1}{9}$	$(\frac{1}{11}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7})$

Нека се међусобно пореди n елемената хијерархије, и нека је вредност поређења елемента i ($i=1, 2, \dots, n$) према елементу j ($j=1, 2, \dots, n$) хијерархије означена троугластим фази бројем $\mathbf{a}_{ij} = (a_{ijl}, a_{ijs}, a_{ijd})$ где су $a_{ijl}, a_{ijs}, a_{ijd}$ лева, средња и десна граница фази броја \mathbf{a}_{ij} . Матрица поређења по паровима представљена је фази матрицом:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (a_{12l}, a_{12s}, a_{12d}) & \dots & (a_{1nl}, a_{1ns}, a_{1nd}) \\ \left(\frac{1}{a_{12d}}, \frac{1}{a_{12s}}, \frac{1}{a_{12l}}\right) & (1,1,1) & \dots & (a_{2nl}, a_{2ns}, a_{2nd}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{1}{a_{1nd}}, \frac{1}{a_{1ns}}, \frac{1}{a_{1nl}}\right) & \left(\frac{1}{a_{2nd}}, \frac{1}{a_{2ns}}, \frac{1}{a_{2nl}}\right) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Тежине елемената хијерархије су троугласти фази бројеви $\mathbf{w}_i = (w_{il}, w_{is}, w_{id})$ ($i=1, 2, \dots, m$) и израчунавају се, сагласно једначинама (4.16), као у једначинама (4.48), водећи притом рачуна о томе да су и вредности \mathbf{a}_{ij} такође троугласти фази бројеви:

$$\mathbf{w}_i = (w_{il}, w_{is}, w_{id}) = \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ijl}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijd}}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ijs}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijs}}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ijd}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijl}} \right), \quad (4.48)$$

$i = 1, 2, \dots, m.$

Посматрамо једноставну хијерархију са слике 4.11. Она садржи m алтернатива A_i ($i=1, \dots, m$) којима је надређено n критеријума K_j ($j=1, \dots, n$). Критеријумима је надређен циљ.

Нека је релативна тежина сваке алтернативе A_i ($i=1, \dots, m$) у односу на надређени критеријум K_j ($j=1, \dots, n$) означена са $\mathbf{w}_{A_i}^{K_j}$ и представља троугласти фази број. Нека је, са друге стране, релативна тежина сваког критеријума K_j ($j=1, \dots, n$) у односу на надређени циљ означена са

w_{K_j} такође троугласти фази број. Укупна релативна тежина (приоритет) сваке алтернативе A_i ($i=1, \dots, m$) биће једнака:

$$w_{A_i} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n w_{K_j} w_{A_i}^{K_j} \quad (4.49)$$

Након добијених фази вредности алтернатива, потребно је ове вредности дефазификовати, како би се добиле њихове дискретне вредности. Поступак дефазификације описан је у поглављу 4.3. Алтернатива с највећом дефазификованом вредношћу w_{A_i} је најбоља и представља решење проблема избора.

5. ИЗБОР СЕНЗОРСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА САОБРАЋАЈНОГ ТОКА

5.1. Опис проблема

Тачни и правовремени подаци о саобраћајном току имају изузетан значај за одрживост динамичких транспортних система. Релевантне информације морају бити ажуриране, како би се могле искористити на одговарајући начин. Прилагођавање информација савременим потребама транспортних система такође је значајан сегмент њиховог исправног функционисања. Разнородни подаци о саобраћајном току користе се за стратешке потребе: за планирање и пројектовање саобраћајница, избор одговарајућих стандарда, социо-економску анализу. С друге стране, ови подаци корисни су и за прогнозирање будућих саобраћајних токова, надзор саобраћаја, превенцију и рано откривање саобраћајних незгода, управљање саобраћајем у реалном времену и друге потребе интелигентних транспортних система.

Сензори имају могућност да прикупе податке о многим параметрима саобраћајног тока. С друге стране, посматрајући способности појединих сензорских технологија, није могуће дати јединствену оцену која би једнако добро описала сензорску технологију за прикупљање већег скупа параметара истовремено. Из тог разлога, као и због захтева за добијање вредности брзине за потребе решавања проблема лоцирања сензора који је решаван у поглављу 6, у дисертацији је разматран проблем евалуације и избора сензора за мерење брзине возила.

Брзина кретања возила веома је важан параметар саобраћајног тока, а који се користи у контроли, регулисању и управљању саобраћајем. Информације о брзини могу се користити и за утврђивање неуобичајених токова саобраћаја, као што су стања загушења на мрежи. Регистровање и праћење брзине возила се најчешће обавља помоћу сензора саобраћајног тока који су детаљно описани у поглављу 3. У пракси постоји велики избор сензорских технологија које се могу користити за прикупљање информација о брзини: индуктивна петља, пасивни инфрацрвени сензори, активни инфрацрвени сензори, магнетни, радарски, ултразвучни, пасивни акустични и видео сензори. Свака од ових сензорских технологија има низ предности, али и недостатка, те се приликом избора одговарајућег типа сензора мора узети у обзир велики број критеријума, од значаја за доносиоца одлуке.

У прошлости је доминантна технологија коришћена за прикупљање различитих саобраћајних показатеља, па и брзине возила, била индуктивна петља која је представник интрузивних технологија. Поставља се питање зашто мењати врсту сензора која се користи деценијама уназад. Разлог је постојање многих лоших страна ове врсте технологија (*Peeta* и *Zhang*, 2002): (1) инсталација уређаја није једноставна и често постоји опасност за мобилне посаде које изводе уградњу, посебно у условима загушења; (2) интрузивни уређаји често изазивају поремећај у преовлађујућим условима саобраћајног тока, чак и у условима умереног или слабог саобраћајног тока; (3) позната је чињеница да су интрузивни уређаји склони кваровима у екстремним температурним условима; (4) типови података које ови уређаји могу да пруже обично су ограничени и не могу да задовоље растућу потребу за софистициранијим и свеобухватнијим подацима за ИТС апликације. Као резултат тога, градске и државне агенције у САД се све радије одлучују за новију, неинтрузивну опрему, базирану на радарским,

магнетним, микроталасним, инфрацрвеним и видео технологијама. Неинтрузивни уређаји не морају бити инсталирани у коловозу или на њему, већ се могу уградити изнад или поред коловоза, измештајући се даље од банке.

Без обзира на доступност ових нових технологија за прикупљање података о саобраћајном току, већини државних агенција у САД недостаје сет смерница за избор уређаја за бројање саобраћаја. Оваква је ситуација и у Републици Србији. Разлог томе је првенствено то што су ови уређаји релативно нови на тржишту, због чега недостају поуздане информације о њиховом раду. Узимајући у обзир широк спектар тренутно доступних технологија, јединствени скуп смерница које се темеље на низу критеријума, укључујући трошкове, тачност, поузданост, трајност, флексибилност, једноставност коришћења и слично, могу бити од непроцењиве важности како за државну управу, тако и за предузећа за управљање путевима.

У дисертацији је формулисан модел за рангирање и избор сензора за мерење брзине. Уобичајена процедура у поступку доношења одлуке (*Stevenson, 1993*), која се може применити и на проблем избора најбоље сензорске технологије, састоји се од следећих корака:

- дефинисање скупа алтернатива,
- дефинисање критеријума који ће се користити за оцену алтернатива,
- идентификовање критеријума важних за доносиоца одлуке,
- оцена алтернатива по критеријумима и избор најбоље алтернативе.

Потенцијални скуп алтернатива требало би да садржи све релевантне сензорске технологије, заступљене на тржишту.

Велики број критеријума утиче на избор одговарајуће сензорске технологије. Они могу бити сврстани у четири групе: користи (енгл. *Benefits*), могућности (енгл. *Opportunities*), трошкови (енгл. *Costs*) и ризици (енгл. *Risks*), који чине тзв. *BOCR* аспекте одлуке. Сваки аспект одлуке представља одвојени део хијерархије, с финалним оценама алтернатива. Овакав приступ је могућ код проблема с хијерархијском структуром, код кога је више критеријума релевантно за разматрани проблем.

Сваки доносилац одлуке припада одређеној интересној групи и у зависности од тога даје своје оцене. Валидна селекција најбоље алтернативе могућа је једино ако се узму у обзир све интересне групе, сви релевантни критеријуми, као и важности наведених критеријума за појединачне доносиоце одлуке.

Преглед досадашње литературе показује да је избор адекватне сензорске технологије за мерење параметара саобраћајног тока тема којом су се истраживачи активно бавили (*Mimbella* и *Klein, 2000; Martin* и сар, 2003; *Jelušić, 2008; Jelušić* и сар, 2009). Традиционалне методе за избор сензора неадекватне су када се примењују на подацима који су непрецизни или квалитативно изражени. Како би се превазишао овај проблем, у дисертацији је представљен модел фази вишекритеријумске анализе, Фази аналитичко хијерархијски процес (*Фази АНП*) где је оцењивање аспеката одлуке, као и свих алтернативних сензорских технологија по свим критеријумима представљено троуглстим фази бројевима.

Предложени Фази *АНП-BOCR* модел је општи и може бити примењен на различитим транспортним мрежама и у различитим окружењима. Фази оцене алтернатива по критеријумима добијене су из релевантне литературе, а оцене самих критеријума, као и *BOCR* аспеката одлуке евалуирали су експерти из ове области. Подаци су прикупљени у Београду (Република Србија) и коришћени су за нумеричку евалуацију и тестирање модела.

У дисертацији је представљен методолошки оквир за доношење одлуке о избору сензора за мерење брзине. Као резултат овог методолошког оквира, државна управа и компаније које се баве управљањем путевима и прикупљањем података, имаће научно истраживање које доказује да је једна алтернатива доминантнија у односу на остале. Овако развијен методолошки оквир могао би бити важан материјал за доношење одлука приликом додељивања домаћих и међународних пројеката у вези са прикупљањем података о саобраћају. Могућност коришћења предложеног методолошког оквира може се сматрати практичном вредношћу предложеног модела.

5.2. Преглед релевантне литературе

У доступној литератури могуће је пронаћи бројне радове који се баве вредновањем сензора саобраћајног тока. Најзначајнија књига о сензорима саобраћајног тока дело је аутора *Klein* (2001). Аутор се бави описом појединачних сензорских технологија које се користе у управљању саобраћајем на изолованој раскрсници, управљању на повезаним раскрсницама (коридору), управљању на ауто-путевима (на рампама и на главном току), детекцији инцидентних ситуација, прикупљању податка о саобраћајном току, детекцији приоритетних и возила јавног превоза, детекцији прекорачења масе возила, прикупљању информација о временским условима, унапређењу безбедности саобраћаја. Аутор је анализирао предности и недостатке комерцијално расположивих сензорских технологија.

Један број радова бави се тестирањима перформанси сензорских технологија на одређеним локацијама, као и испитивањима могућности ових технологија за појединачне примене.

Minge и сарадници (2010) бавили су се поређењем неколико неинтрузивних сензорских технологија које се користе за детекцију саобраћаја. Уређаји су вредновани на ауто-путу, на сигналисаним и несигналисаним раскрсницама у Минеаполису у Минесоти (САД). Обухваћени су услови саобраћаја при високом загушењу, као и различити метеоролошки услови. Вреднована је тачност мерења протока и брзине, као и класификације возила на основу дужине возила и броја осовина.

Аутори *Yang* и сарадници (2015) бавили су се евалуацијом детекције возила на зауставној линији за потребе функционисања адаптивних система управљања раскрсницом. Разматрали су детекторе присуства возила, три типа видео детектора, једну термалну камеру, бежични магнетометер и два радарска уређаја. Осим за потребе детекције присуства возила, разматрана су и два радарска уређаја за одређивање зоне доношења одлуке испред зауставне линије (да ли ће се возило зауставити или ће проћи кроз раскрсницу). Подаци су прикупљани у граду *Marietta* у држави Џорџија (САД) од новембра 2014. до марта 2015, и покрили су велики опсег метеоролошких прилика. Два техничка критеријума, тачност и поузданост, били су посебно дефинисани и коришћени су за вредновање детекторских уређаја. Поред ових, разматрани су и нетехнички критеријуми, као што су трошкови животног века, једноставност инсталације и одржавања. Испитиван је укупни резултат који узима у обзир техничке и нетехничке критеријуме функционисања сензора. Овај резултат израчунат је за осам типичних геометрија раскрснице, за сваки уређај, за детекцију на зауставној линији, као и за одређивање зоне одлуке.

Део радова бави се појединачним аспектима који могу бити од значаја приликом одабира сензорске технологије. Тако се аутор *Sobie* (2016) бавио анализом трошкова различитих технологија и њиховим утицајем на адаптивне системе управљања саобраћајем.

Група аутора бавила се систематизацијом, вредновањем, и начином одабира одговарајуће сензорске технологије. *Mimbella* и *Klein* (2000) су први на једном месту описали расположиве

технологије за детекцију и надзор саобраћаја. У извештају су описане сензорске технологије, принцип рада, начин инсталације, уочене су предности и недостаци појединачних технологија. Дати су и технички подаци, прикупљени од произвођача, за сваки доступни уређај. Њихов извештај ажуриран је неколико година касније у раду (*Mimbella* и *Klein*, 2007).

Аутори *Martin* и сарадници (2003) први су који су вредновали различите технологије према неколико понуђених критеријума и предложили су процедуру одабира адекватне сензорске технологије у облику алгорита. Критеријуми поређења били су врста података, тачност при различитим условима саобраћаја и метеоролошким условима, једноставност инсталације и калибрације, трошкови, поузданост и одржавање. У раду су дате матрице поређења сензорских технологија и појединачних уређаја, а подаци су добијени из литературе и из спроведених истраживања на терену. Предложена процедура заснива се на елиминацији појединих уређаја и технологија, у зависности од конкретне потребе.

Веома опсежан, свеобухватан приручник за одабир, пројектовање, инсталирање и одржавање сензорских технологија за примену на сигналисаним раскрсницама и ауто-путевима дат је у раду (*Klein* и сар, 2006).

Аутори *Middleton* и сарадници (2009) бавили су се вредновањем сензорских технологија које би биле алтернатива индуктивним петљама и видео детекторима, а чија је примена наишла на бројне проблеме. Вреднован је један радарски детектор и два магнетометра, на основу тестирања с терена и расположивих података у литератури. Зависно од потреба конкретне примене, дат је алгоритам за одабир једног од ова три уређаја.

Коначно, аутори *Jelušić* и сарадници (2009) представили су нови приступ вредновању сензорских технологија који је проистекао из докторске дисертације *Jelušić* (2008). Креиран је вишекритеријумски модел доношења одлуке, заснован на Аналитичком хијерархијском процесу. Предложени модел тестиран је на примеру зоне управљања саобраћајем у Загребу (Хрватска).

5.3. Формирање методолошког оквира

У постојећој саобраћајној пракси користи се велики број разнородних сензора. Свака технологија има ограничења и специјализована је за одређене примене. Не постоји један сензорски уређај, нити технологија, која је идеална за све примене. Из тог разлога успешна примена неког сензора у великој мери зависи од правилног избора одговарајуће технологије.

На одабир врсте сензора утичу многи фактори, пре свега врста потребних података, њихова тачност за различите услове у саобраћају и метеоролошке услове, цена постављања и одржавања сензора, једноставност инсталације, калибрације и одржавања уређаја, поузданост, комуникација с центром, потрошња енергије, место на ком треба да се угради сензор. Такође, различити доносиоци одлуке могу имати различите захтеве које би сензорске технологије требало да испуне.

Један од циљева који је постављен у дисертацији јесте формирање општег методолошког оквира за избор сензорске технологије за потребе мерења брзине возила на путној мрежи, представљен кроз четири аспекта одлуке: користи, могућности, трошкове и ризике, а са становишта три различите заинтересоване стране: државне управе и локалне самоуправе, управљача пута и академске заједнице.

5.3.1. Дефинисање скупа алтернатива

Алтернативе се бирају из скупа сензорских технологија - фиксних сензора који су заступљени на тржишту, а које обухватају интрузивне и неинтрузивне сензорске технологије. Од интрузивних технологија на располагању су индуктивне петље, магнетни сензори, пнеуматске цеви, пиезоелектрични сензори, *weigh-in-motion* уређаји. Од неинтрузивних сензорских технологија заступљени су активни и пасивни инфрацрвени сензори, микроталасни радар, ултразвучни сензори, пасивни звучни сензори, видео сензори, као и њихове комбинације. Принцип рада свих сензорских технологија, погодности њиховог коришћења за различите примене, као и упоредни приказ предности и недостатака, приказани су у поглављу 3.

За конкретан проблем избора сензорске технологије за мерење брзина, из укупног скупа технологија фиксних сензора које се могу наћи на тржишту, одабран је следећи скуп од пет алтернатива: индуктивна петља, микроталасни радар, активни и пасивни инфрацрвени сензори и видео сензори.

5.3.2. Дефинисање критеријума и *BOCR* структуре хијерархије

Анализом литературе може се уочити да различити аутори користе широк скуп критеријума према којима вреднују сензорске технологије.

Peeta и *Zhang* (2002) поделили су критеријуме на оне који се односе на уређај и оне који се односе на окружење. Критеријуми који се односе на уређај јесу: трошкови, тачност, поузданост, једноставност уградње и одржавања, могућност преноса и складиштења, једноставност преузимања података, врста података и функционалне могућности, способност прилагођавања напретку технологије, једноставност коришћења, потреба за обуком кадрова. С друге стране, критеријуми који се односе на окружење јесу: услови саобраћајног тока, врста коловоза, локација уградње и позиција у односу на коловоз, метеоролошки услови, смерови кретања саобраћајног тока.

Martin и сарадници (2003) су за евалуацију сензора користили следеће критеријуме: врсту података, тачност добијених података, трошкове и једноставност уградње, калибрације и одржавања. Када је реч о врстама података, разматрани су проток, брзина, присуство, заузеће и класификација. Тачност података није преузимања од продаваца уређаја, јер је установљено да је она исказивана као већа од стварне тачности, па је евалуација обављена на основу података добијених експерименталним путем. Узиман је у обзир проценат грешке мерења, као и утицај метеоролошких услова, као и преовлађујућих услова у саобраћајном току на измерене вредности параметара. Једноставност уградње, калибрације и одржавања је оцењивана на основу података добијених са тест локација. Код критеријума цене узимана је у обзир цена уређаја, трошкови уградње и одржавања. Подаци о трошковима добијени су на основу података са тест локација. Рачунати су трошкови животног века уређаја за две типичне локације: раскрсницу и ауто-пут.

Jelušić (2008) је критеријуме поделио на критеријуме квалитета информација, критеријуме експлоатације, економске и остале критеријуме. Појединачни критеријуми, сврстани према групама, приказани су у табели 5.1.

Табела 5.1. Критеријуми вредновања сензорских технологија према *Jelušić* (2008)

Врсте критеријума	Опис критеријума
Квалитет информација	
Доступност саобраћајних параметара	Могућност сензора да прикупи одређену врсту податка (параметра саобраћајног тока)
Тачност мерења саобраћајних параметара	Степен слагања између стварних вредности и вредности добијених сензором
Прецизност измерених величина	Степен поделе до које се може презентовати вредност измереног параметра
Поузданост испоруке информације	Способност сензора за слање исправних података
Покривеност саобраћајне површине	Зона обухвата простор с ког је могуће прикупити податке
Резолуција унутар просторног обухвата	Колико детаљно сензор прикупља податке са саобраћајне површине
Прилагодљивост зоне детекције	Могућност просторног прилагођавања зоне детекције
Експлоатациони критеријуми	
Постављање	Време постављања, потребна опрема и ангажовано особље да би се сензор поставио на одређену локацију
Калибрација	Време калибрације, потребна опрема и особље да би сензор давао квалитетне информације.
Компатибилност	Степен функцијске и техничке прилагођености раније постављеним сензорима.
Технолошко знање и искуство	Постојеће знање и искуство с појединим сензором, у смислу његове експлоатације.
Комуникација	Потребан информациони капацитет који треба обезбедити да би се искористиле могућности сензора
Напајање	Утрошак енергије
Одржавање	Низ захвата, време, средства и особље потребно да би се сензор довео у исправно стање
Трајност	Век трајања сензора
Униформност	Истоврсност сензорских технологија на одређеном подручју
Економски критеријуми	
Трошкови набавке	Цена сензора и припадајуће опреме
Трошкови постављања	Трошкови постављања сензора, укључујући материјал и рад.
Трошкови повезивања у систем	Трошкови прилагођавања сензора постојећем систему, цена материјала и рада
Трошкови калибрације	Цена рада и материјала у поступку калибрације уређаја
Трошкови редовног одржавања	Цена рада и материјала код редовног, превентивног, одржавања и провера исправности
Трошкови одржавања у случају квара	Цена рада и материјала код поправке или замене уређаја
Трошкови животног века	Трошкови настали током животног века уређаја, укључују све трошкове сведене на једну годину

Табела 5.1. Критеријуми вредновања сензорских технологија према *Jelušić* (2008) (наставак)

Врсте критеријума	Опис критеријума
Остали критеријуми	
Оцена квалитета другог корисника	Степен задовољства другог корисника који је користио одређену сензорску технологију.
Могућност проширења примене	Могућност коришћења уређаја, уз минималне захтеве, за друге примене у саобраћају, нпр. надзор, детекцију инцидентних ситуација, мере принуде и слично.
Отпорност на уништавање	Отпорност на вандализам, штете настале услед саобраћајне незгоде и слично
Деловање на човека	Деловање на здравље људи
Естетски критеријум	Изглед уређаја, може бити важан у одређеним деловима града, да изгледом не ремети околину, нпр. старог језгра града
Еколошки критеријум	Количина отпада и његова токсичност током животног века уређаја

Прва група критеријума описује квалитет информација коју сензорски уређаји обезбеђују. *Доступност* саобраћајних параметара описује могућност уређаја да прикупи податке о одређеном саобраћајном параметру. Без обзира на то што одређени уређај може имати или не могућност да измери одређени параметар, могућност мерења може бити једноставна (директна) или компликована, нпр. захтевајући обраду сигнала. *Тачност* показује степен слагања између стварних вредности и оних измерених уређајем. *Прецизност* је блискост резултата поновљених мерења под непромењеним условима. Изражава се у најмањој подели до које се може презентовати вредност измереног параметра. За неке саобраћајне параметре прецизност је веома битна (брзина, интервал слеђења, класификација по тежини или дужини) док код неких параметара прецизност није од значаја (присуство возила, проток, класификација по броју осовина) и за њих је довољна само тачност. *Поузданост* је вероватноћа исправног рада уређаја у датом тренутку времена. Критеријум *покривености* саобраћајне површине односи се на просторни обухват саобраћајнице на којој уређај може да прикупља податке. *Резолуција* унутар просторног обухвата односи се на способност разликовања детаља. *Прилагодљивост* зоне детекције односи се на могућност промене облика, положаја или величине зоне детекције. Ако се у неком тренутку промени режим саобраћаја, веома је битно да ли постојећи уграђени сензори имају могућност да прилагоде зону детекције, или је потребно уградити нове уређаје.

Друга група критеријума у вези је с оперативним радом сензора током целокупног радног века. Критеријум *постављања* сензора односи се на захтевност процеса уградње уређаја, потребно време, ангажованост особља и опреме како би се уређај поставио на потребно место. Овде је потребно водити рачуна и о потребним радовима у смислу бушења коловоза, постављања стубова и конзоли, као и о њиховом утицају на саобраћајни ток. Након што се постави, уређај је потребно калибрисати, односно подесити његове параметре, како би се обезбедило да даје тачне податке. Процес *калибрације*, такође, захтева одређено време, особље и опрему како би се обавио. *Компатибилност* се односи на могућност једноставног повезивања уређаја са другом постојећом опремом. *Технолошко знање и искуство* у коришћењу одређене сензорске технологије омогућава једноставније коришћење, без потребе за посебном обуком особља. *Комуникација* као критеријум вредновања односи се на потребан капацитет преноса информација између елемената управљачког система (сензора и сигналног уређаја, сензора и управљачког центра и слично). Критеријум *напајања* односи се на енергетске захтеве сензора. Сензори обично нису велики потрошачи, па је код неких врста сензора могуће напајање соларном енергијом или чак помоћу батерија. Критеријум *одржавања* односи се на сложеност поступака редовног одржавања или одржавања у случају квара. *Трајност* сензора односи се на дужину животног века сензора. Овај критеријум, осим с економског гледишта, значајан је

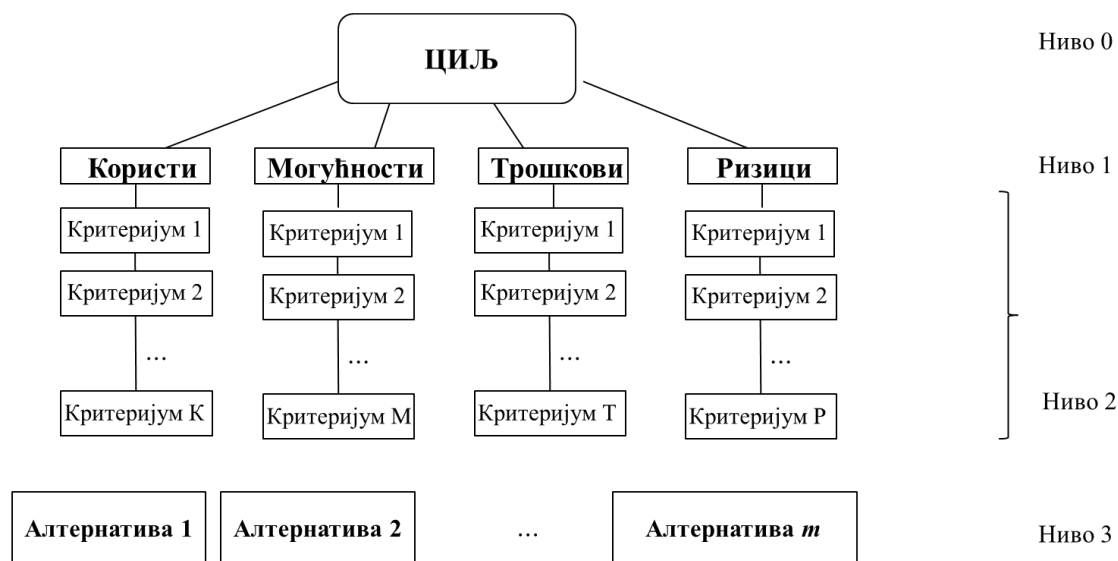
и због потребе ометања саобраћајног тока приликом замене уређаја новим. *Униформност* се односи на важност да сензори унутар једног подручја буду исте технологије. Уколико су уређаји различити, то усложњава повезивање у систем, као и њихово одржавање.

Трећа група критеријума односи се на трошкове потребне током експлоатације сензора. Почетни трошкови подразумевају трошкове *набавке, уградње, повезивања* у систем, као и поступка *калибрације*. Трошкови одржавања могу се поделити на трошкове *редовног одржавања* и одржавања у случају *квара*. Понекад се уместо рашчлањених трошкова посматрају укупни *трошкови током животног века* сензора који у себи укључују све претходно набројане трошкове, сведене на временски период од једне године.

Четврта група критеријума односи се на разнородне утицаје који се не могу сврстати у неку од претходне три групе. *Оцена квалитета другог корисника* подразумева оцену од особља које је користило поједине технологије и с њима имало одређена позитивна или негативна искуства. Могућност *проширења примене* такође може бити важан критеријум. Уместо да само прикупља информације, систем се може искористити и за надзор, детекцију инцидентних ситуација и друго. *Отпорност на уништавање* посматра се као мера осетљивости спољашњих елемената уређаја на вандализам, оштећења настала као последица саобраћајне незгоде или екстремних временских непогода. Неке сензорске технологије током рада емитују различите облике зрачења које могу имати неповољан *утицај на здравље људи*. Утицај на човека може подразумевати и облике нарушавања приватности, уколико уређаји снимају регистарске ознаке возила, или чак и лица возача и путника. *Естетски* критеријум може бити од значаја у старим језгрима градова, када је битно да спољашњи елементи уређаја не нарушавају изглед околине. Када је реч о *еколошком* критеријуму, он се односи на отпад који уређај ствара током животног века, и његову евентуалну токсичност по околни живи свет.

Скуп критеријума не мора бити коначан, он се може, по потреби, проширити додавањем нових или сузити изостављањем неких критеријума, у зависности од конкретне примене.

Након што су дефинисани скупови алтернатива и критеријума, потребно је критеријуме сврстати по одговарајућим *BOCR* аспектима одлуке и направити структуру хијерархије. Пример *BOCR* структуре хијерархије приказан је на слици 5.1. Укупан број алтернатива је m , бројеви критеријума под аспектима одлуке *Користи*, *Могућности*, *Трошкова* и *Ризика* су K , M , T и P респективно.



Слика 5.1. Пример *BOCR* структуре хијерархије

За конкретан пример избора сензорске технологије за мерење брзина, након детаљне анализе расположиве литературе о критеријумима за избор сензора (*Peeta и Zhang, 2002; Martin и сар, 2003; Jelušić, 2008*), њихове елиминације и агрегације, одабран је скуп од 17 критеријума приказан у табели 5.2.

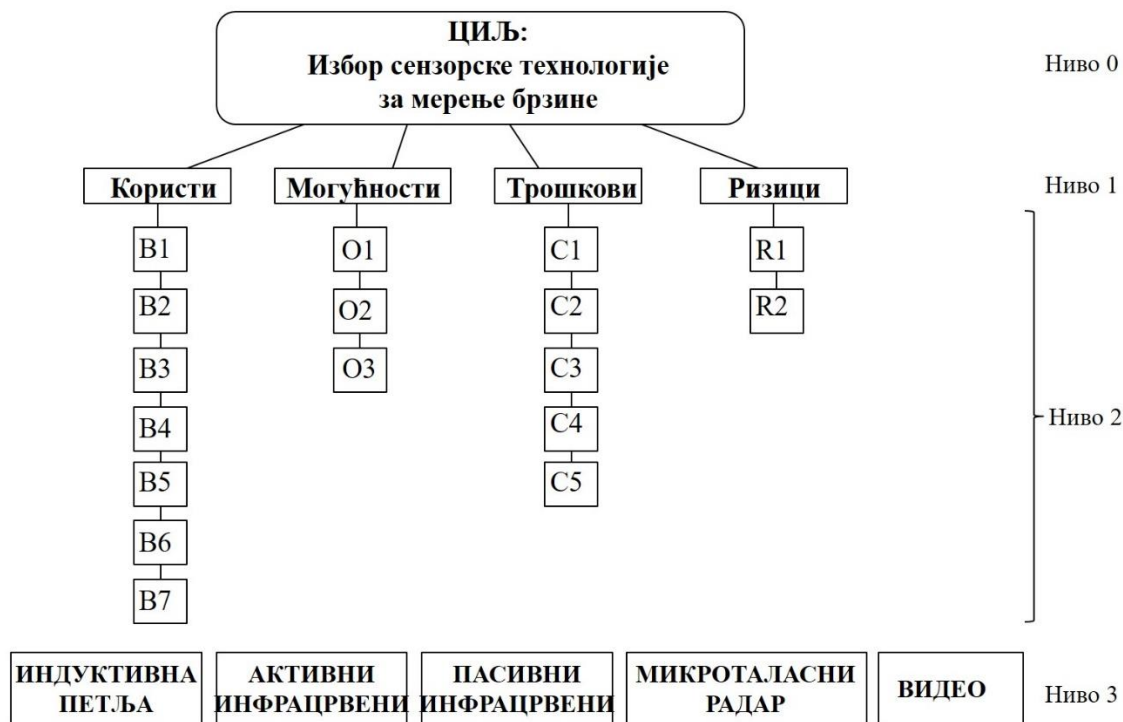
Табела 5.2. Критеријуми за вредновање сензора брзине

Циљ	Аспекти одлуке	Критеријуми	Опис критеријума
Избор сензора за мерење брзине саобраћајног тока	Користи	<i>B1</i> Тачност	Степен слагања између стварних вредности и вредности добијених мерењем
		<i>B2</i> Поузданост	Поузданост сензора у сакупљању и слању података
		<i>B3</i> Покривеност	Простор који обухвата сензор с кога је могуће добити податке, зона обухвата
		<i>B4</i> Знање и искуство	Текуће знање особља о експлоатацији сензора
		<i>B5</i> Резолуција	Способност раздвајања детаља, осетљивост сензора на величину и растојање између посматраних објеката
		<i>B6</i> Компатибилност	Степен функцијске и техничке прилагођености постојећим уређајима
		<i>B7</i> Трајност	Животни век сензора
	Могућности	<i>O1</i> Функционалност	Број параметара које је могуће мерити/прикупљати
		<i>O2</i> Проширење зоне детекције	Могућност просторног проширења зоне детекције (снимање више саобраћајних трака)
		<i>O3</i> Проширење примене	Могућност примене сензора у друге сврхе (повезивање са ИТС, надзор, детекција незгода итд.)
	Трошкови	<i>C1</i> Трошкови набавке	Цена сензора и припадајуће опреме
		<i>C2</i> Трошкови монтаже	Трошкови постављања/уградње сензора на одређену локацију и његове калибрације
		<i>C3</i> Трошкови енергије	Трошкови напајања сензора енергијом
		<i>C4</i> Трошкови комуникације	Трошкови обезбеђења капацитета и преноса информација између сензора и центра
		<i>C5</i> Трошкови одржавања	Трошкови потребни за очување исправности сензора
	Ризици	<i>R1</i> Отпорност на уништење	Сигурност у погледу крађе, случајних или намерних оштећења
		<i>R2</i> Осетљивост на временске услове	Утицај видљивости (дан/ноћ) и атмосферских услова (киша, снег, ветар, магла, лед)

Критеријуми су груписани на начин описан у наставку. У аспект одлуке *Користи* сврстани су критеријуми: тачност, поузданост, покривеност, знање и искуство, резолуција, компатибилност и трајност. У аспект одлуке *Могућности* сврстани су критеријуми: функционалност, проширење зоне детекције и проширење примене. У аспект одлуке *Трошкови* сврстани су критеријуми: трошкови набавке, монтаже, енергије, комуникације и одржавања. У аспект одлуке *Ризици* сврстани су критеријуми: отпорност на уништење и

осетљивост на временске услове. Формирана хијерархијска структура приказана је на слици 5.2.

На врху хијерархије налази се циљ, избор најбоље сензорске технологије за мерење брзине саобраћајног тока, то представља ниво 0. На нивоу 1 налазе се аспекти одлуке. Испод нивоа аспеката одлуке налази се ниво 2 у ком се налазе појединачни критеријуми сврстани по одговарајућим аспектима одлуке. На дну хијерархије, испод нивоа критеријума, градећи ниво 3, налазе се алтернативе.



Слика 5.2. Хијерархијска структура *BOCR* модела избора сензорске технологије за мерење брзине

5.3.3. Дефинисање интересних група

Приликом доношења одлуке, у процес може бити укључено више експерата, који са друге стране могу припадати различитим заинтересованим странама, или интересним групама. У општем случају, ставови различитих интересних група могу бити супротстављени.

Када је реч о проблему избора сензорске технологије, потенцијалне интересне групе могу бити: државна управа и локална самоуправа, управљач пута, академска заједница и слично.

Државна управа и локална самоуправа опредељују средства из буџета за потребе путне мреже, управљач пута је „дужан да обезбеди трајно, непрекидно и квалитетно одржавање и заштиту пута, у циљу несметаног и безбедног одвијања саобраћаја, укључујући и организацију наплате путарине” (*Закон о Путевима*, члан 13), док је академска заједница скуп доносилаца одлуке који имају највећа теоријска знања о постојећим сензорским технологијама, али и о будућим правцима развоја у овој области.

Једино уважавање мишљења и ставова свих интересних група може да формира потпуну слику и омогући да коначан избор технологије за мерење брзине буде задовољавајући по бројним

критеријумима и успешан у практичној примени. Приликом дефинисања скупа интересних група, могу бити одабране неке од поменутих, или додате друге, у зависности од конкретног проблема и одлуке истраживача.

За конкретан пример избора сензорске технологије за мерење брзине, одабране су три поменуте интересне групе: државна управа и локална самоуправа, управљач пута и академска заједница.

5.3.4. Оцена елемената хијерархије

Доносиоци одлуке по паровима оцењују елементе хијерархије на одређеном нивоу, у односу на надређени хијерархијски ниво. Потребно је обезбедити оцене *BOCR* аспеката одлуке према циљу, оцене критеријума сврстаних у одређени аспект одлуке у односу на тај аспект одлуке, као и оцене алтернатива по надређеном нивоу критеријума.

Експерти из различитих интересних група врше поређења по паровима, обављајући међусобну евалуацију *BOCR* аспеката одлуке у односу на циљ, као и критеријума у односу на надређене аспекте. Са друге стране, евалуација алтернатива по критеријумима није предмет експертског оцењивања јер се њихове оцене могу пронаћи у литератури (*Skszek, 2001; Martin и сар, 2003; Jelušić, 2008*) и заснивају се на детаљним истраживањима и експерименталним резултатима.

Доносиоци одлуке своје оцене саопштавају сагласно Сатијевој скали (табела 4.2. у поглављу 4). Након провере конзистентности матрица поређења по паровима за сваког доносиоца одлуке, оцене важности посматраних елемената по паровима „преводе” се у фази бројеве, имајући у виду присуство неодлучности доносиоца одлуке у погледу прецизне квантификације важности на стандардној Сатијевој скали.

Нека је фази оцена k -тог доносиоца одлуке ($k = 1, 2, \dots, K$), који обавља поређење елемента i ($i=1, 2, \dots, n$) према елементу j ($j=1, 2, \dots, n$) хијерархије, означена са $a_{ijk} = (a_{ijlk}, a_{ijsk}, a_{ijdk})$, где су $a_{ijlk}, a_{ijsk}, a_{ijdk}$ лева, средња и десна вредност фази броја a_{ijk} . Оцене појединачних доносилаца одлуке се потом агрегирају, користећи пондерисану геометријску средину (једначина 4.31), као у једначинама:

$$a_{ijl} = \prod_{k=1}^K (a_{ijlk})^{\beta_k}, a_{ijs} = \prod_{k=1}^K (a_{ijsk})^{\beta_k}, a_{ijr} = \prod_{k=1}^K (a_{ijdk})^{\beta_k} \quad (5.1)$$

где је β_k важност доносиоца одлуке k ($k = 1, 2, \dots, K$), при чему је $0 \leq \beta_k \leq 1$ и $\sum_{j=1}^r \beta_k = 1$. Уколико су сви доносиоци одлуке једнаке важности тада је $\beta_k = \frac{1}{K}$, па релације (5.1) постају:

$$a_{ijl} = \prod_{k=1}^K (a_{ijlk})^{\frac{1}{K}}, a_{ijs} = \prod_{k=1}^K (a_{ijsk})^{\frac{1}{K}}, a_{ijr} = \prod_{k=1}^K (a_{ijdk})^{\frac{1}{K}} \quad (5.2)$$

На овај начин, добијене су фази оцене $a_{ij} = (a_{ijl}, a_{ijs}, a_{ijr})$ парова елемената хијерархије.

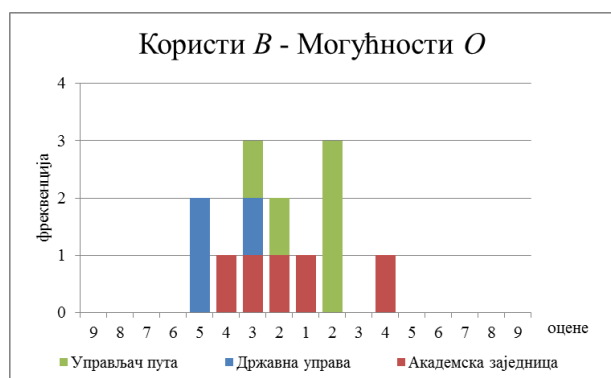
5.4. Прикупљање и обрада података

За потребе одређивања тежина *BOCR* аспеката одлуке и њима подређених критеријума спроведено је анкетирање експерата из три интересне групе: државне управе и локалне самоуправе, управљача пута и академске заједнице. Од представника државне управе и локалне самоуправе учествовало је троје експерата из Министарства грађевинарства, саобраћаја и инфраструктуре Републике Србије, од представника управљача пута, учествовала

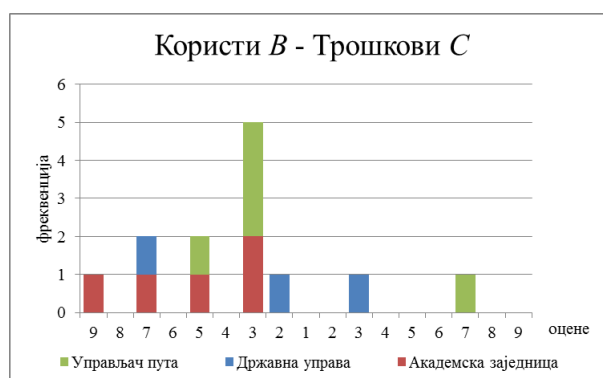
су четири експерта из ЈП „Путеви Србије” и један из ЈП „Путеви Београда”, док је од представника академске заједнице учествовало пет експерата са Саобраћајног факултета Универзитета у Београду. Сви стручњаци сматрани су равноправним, њихове тежине су међусобно једнаке.

Сагласно с формираном хијерархијском структуром, приказаном на слици 5.2, формиран је упитник за поређење парова елемената хијерархије. Изглед анкетног упитника налази се у прилогу 1. Експерти су, по паровима, поредили *BOCR* аспекте одлуке у односу на циљ, као и критеријуме подређене одговарајућим аспектима одлуке. Било је потребно заокружити број који одговара оцени о међусобној важности елемената хијерархије. Оцене лево од оцене 1 означавају већу важност елемената који се налази с леве стране, и обрнуто, ако је заокружен број са десне стране, то подразумева већу важност елемената који се у упитнику налази десно. Што је заокружени број већи, већа је и важност једног елемената у односу на други. У наставку су приказани резултати анкетања.

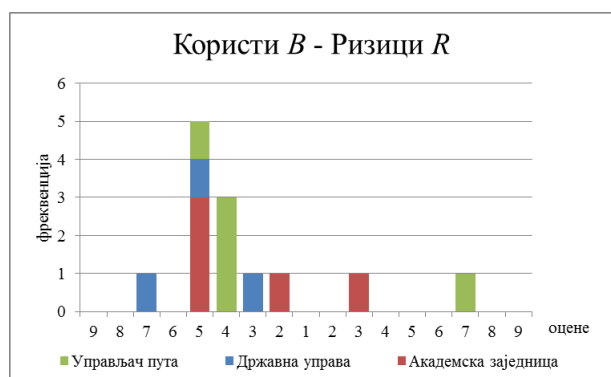
Поређење *BOCR* аспеката одлуке у односу на циљ приказано је на графиконима у наставку. На слици 5.3 (а-ђ) приказане су фреквенције оцена поређења по паровима, по интересним групама за аспекте одлуке *Користи*, *Могућности*, *Трошкове* и *Ризике*.



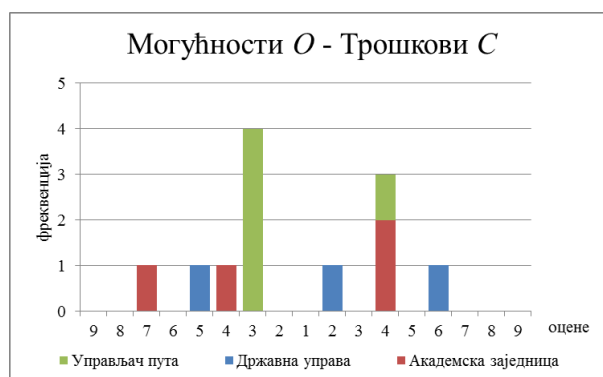
(а)



(б)

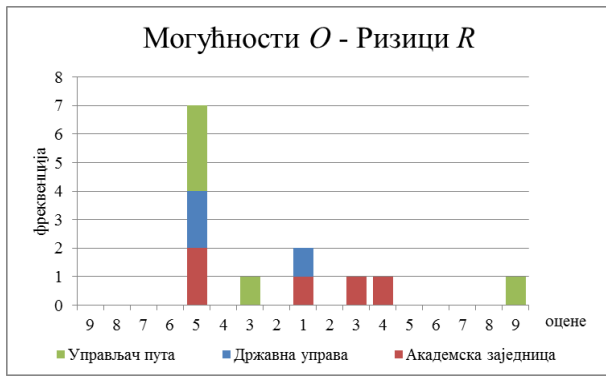


(в)

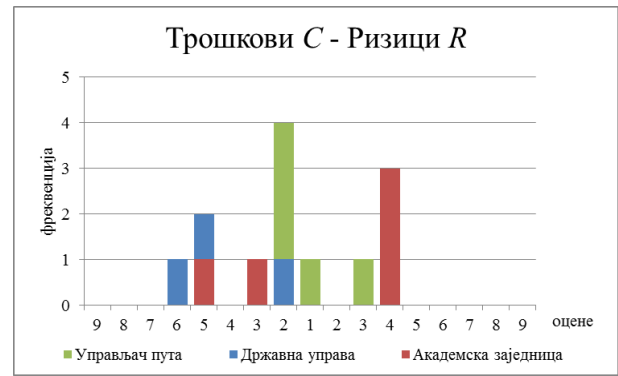


(г)

Слика 5.3. Поређење по паровима аспеката одлуке



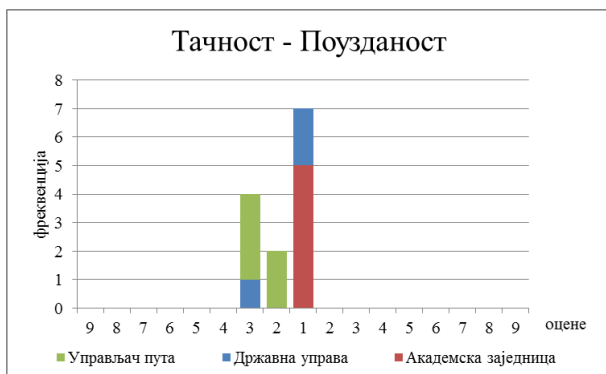
(д)



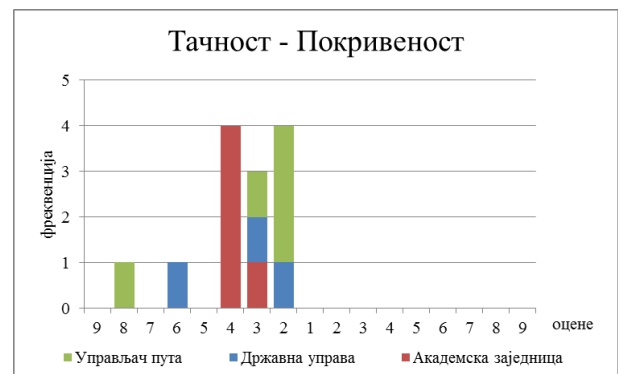
(ђ)

Слика 5.3. Поређење по паровима аспеката одлуке (наставак)

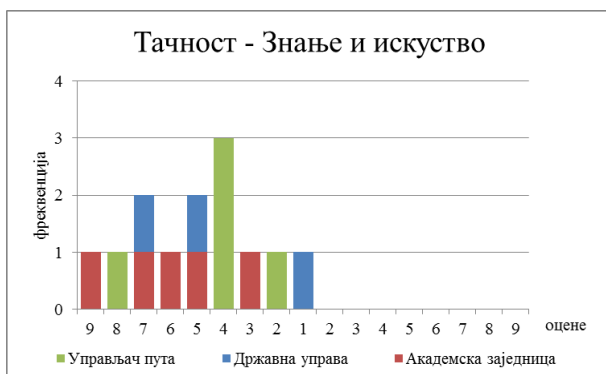
Поређење критеријума у односу на надређени аспект одлуке *Користи* приказано је на графиконима у наставку. На слици 5.4 (а-с) приказане су фреквенције оцена поређења по паровима, седам критеријума сврстаних у аспект одлуке *Користи*.



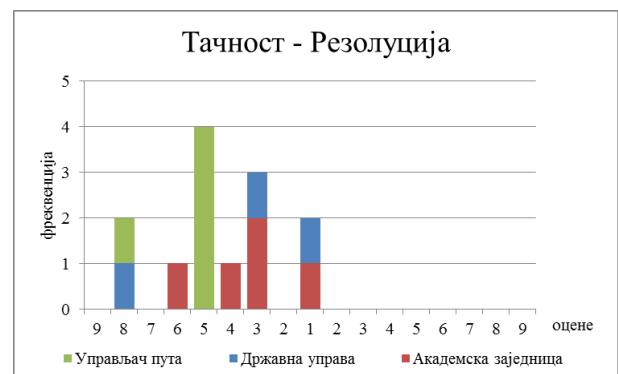
(а)



(б)

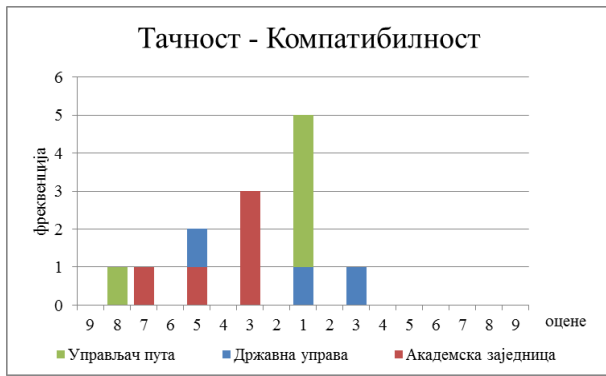


(в)

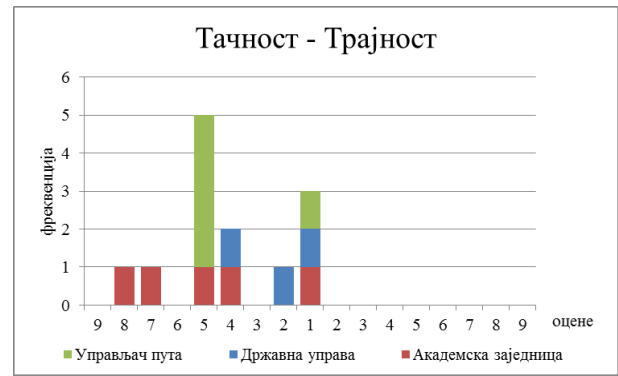


(г)

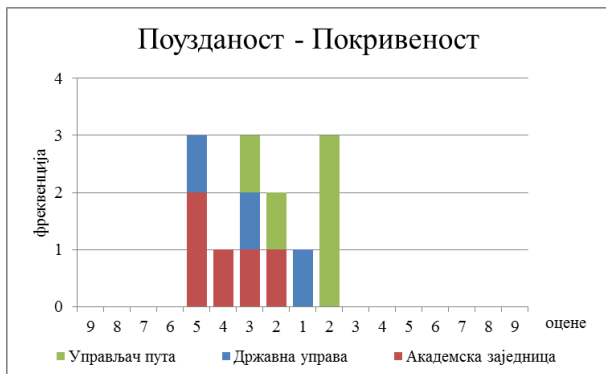
Слика 5.4. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Користи*



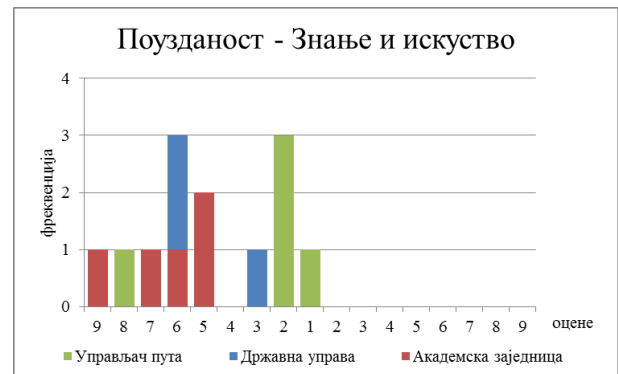
(д)



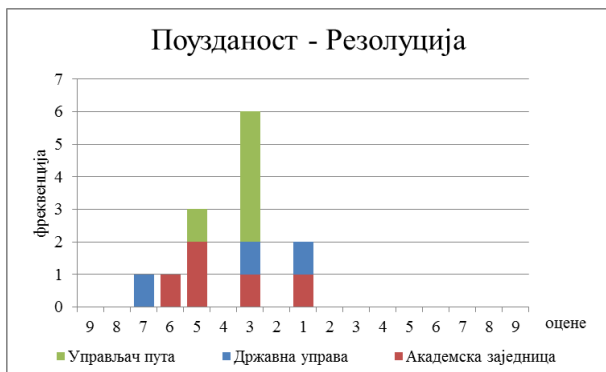
(ђ)



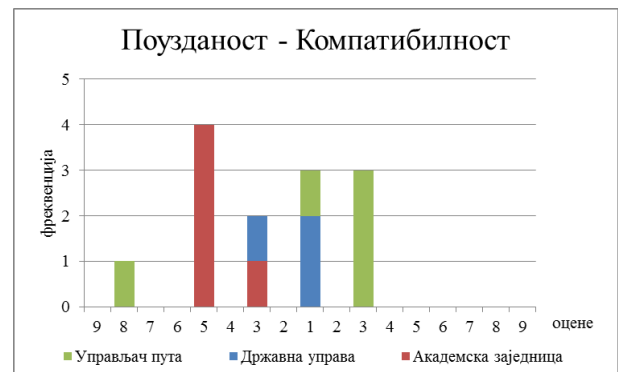
(е)



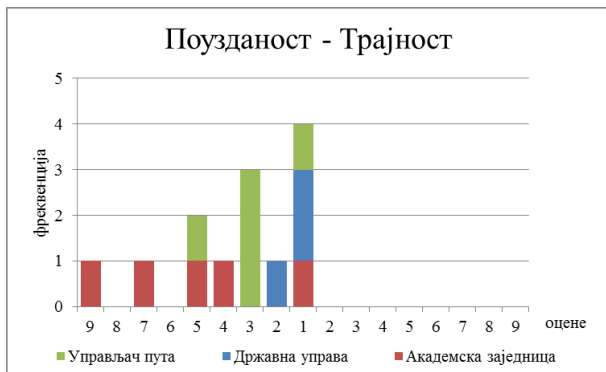
(ж)



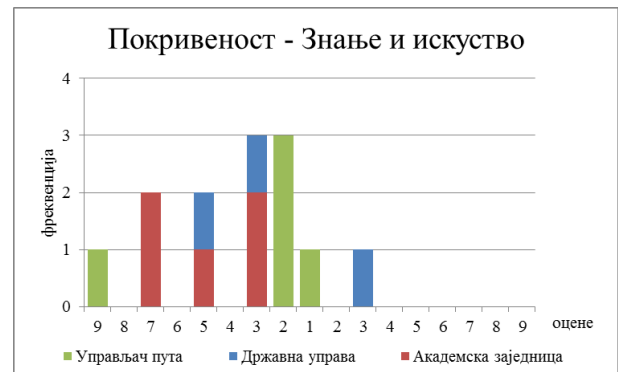
(з)



(и)

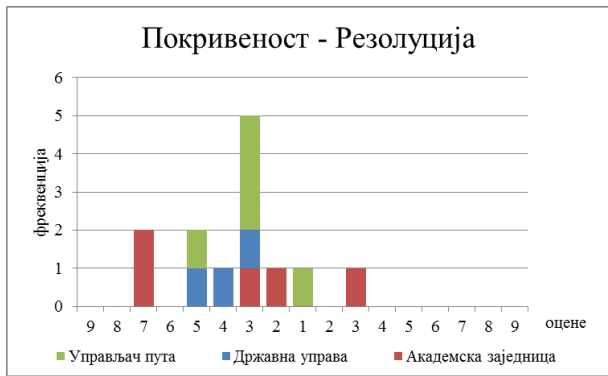


(ј)

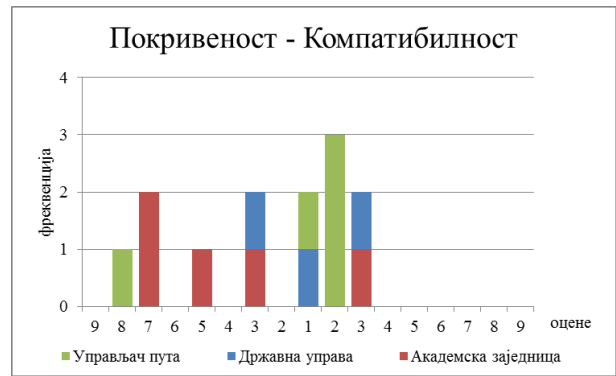


(к)

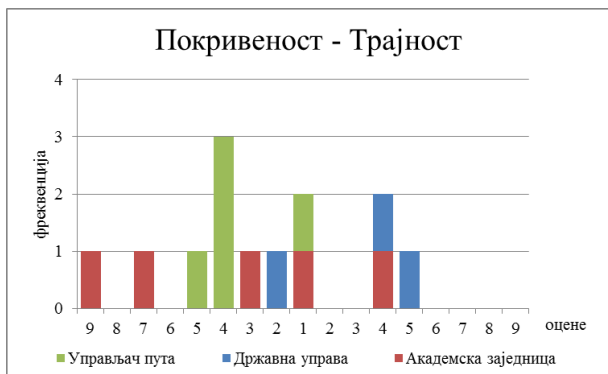
Слика 5.4. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Користи* (наставак)



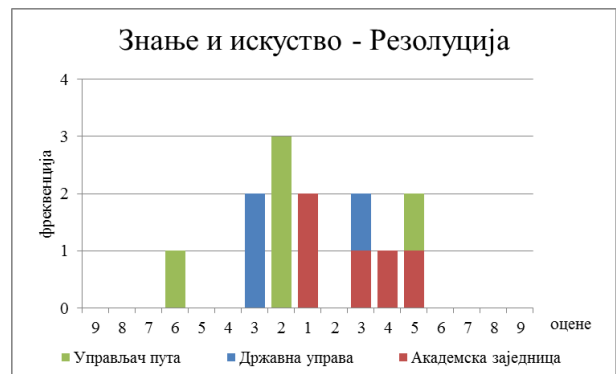
(Л)



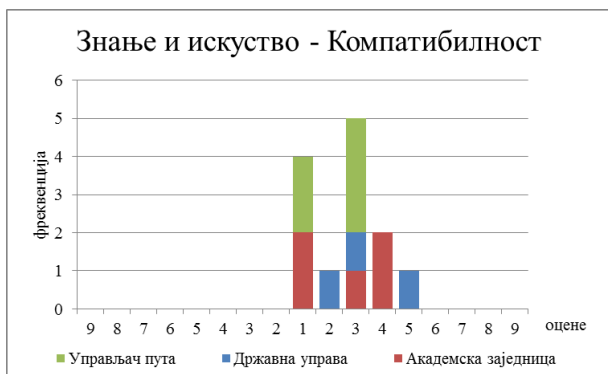
(Љ)



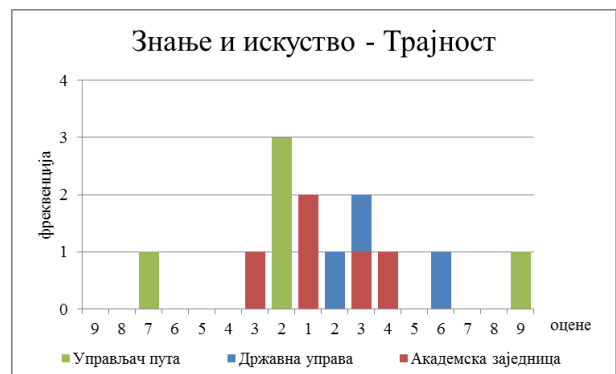
(М)



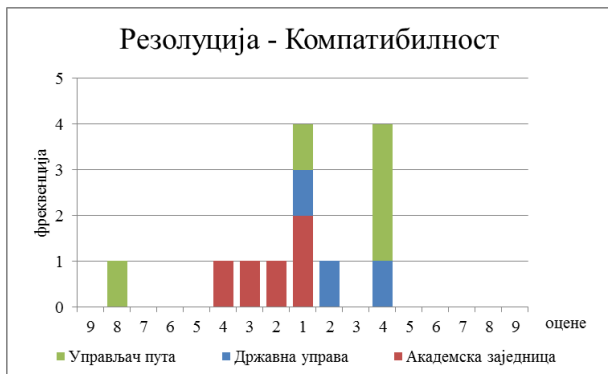
(Н)



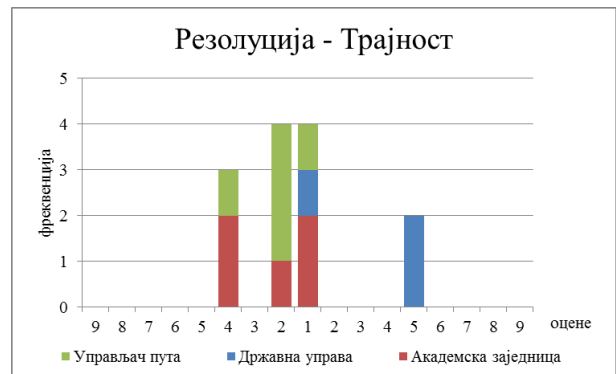
(Њ)



(о)

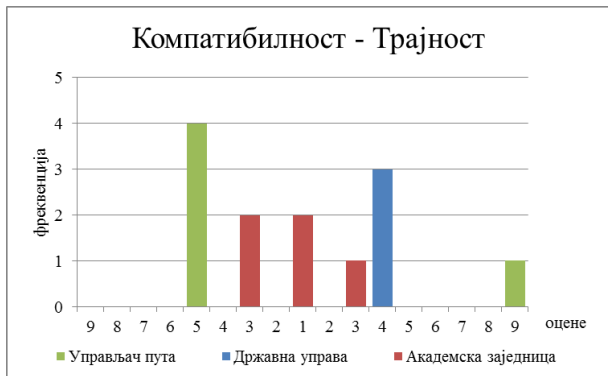


(п)



(р)

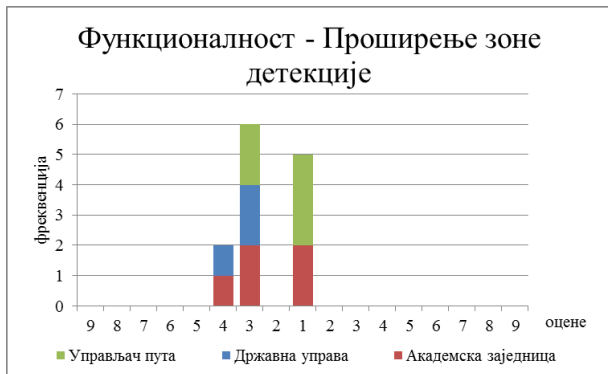
Слика 5.4. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Користи* (наставак)



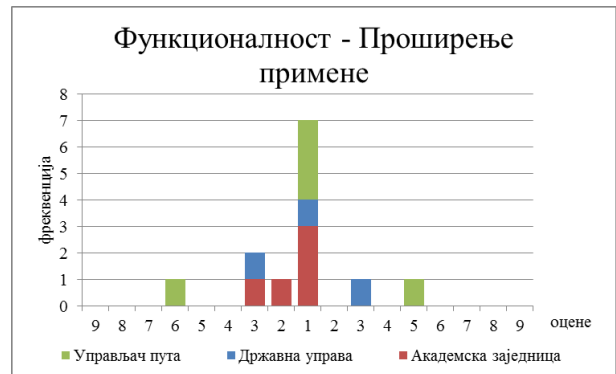
(c)

Слика 5.4. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Користи* (наставка)

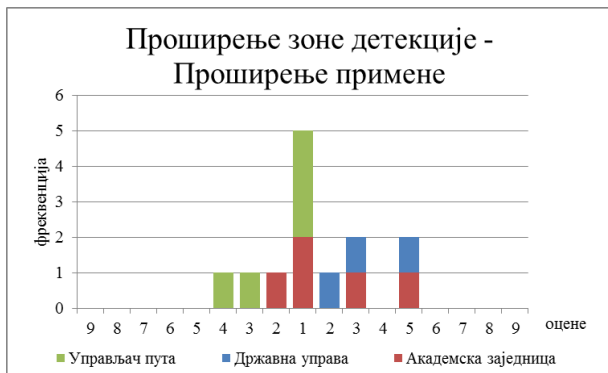
Поређење критеријума у односу на надређени аспект одлуке *Могућности* приказано је на графиконима у наставку. На слици 5.5 (а-в) приказане су фреквенције оцена поређења по паровима, три критеријума сврстана у аспект одлуке *Могућности*.



(a)



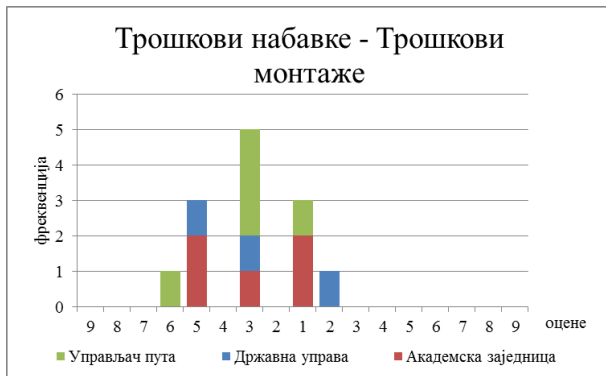
(б)



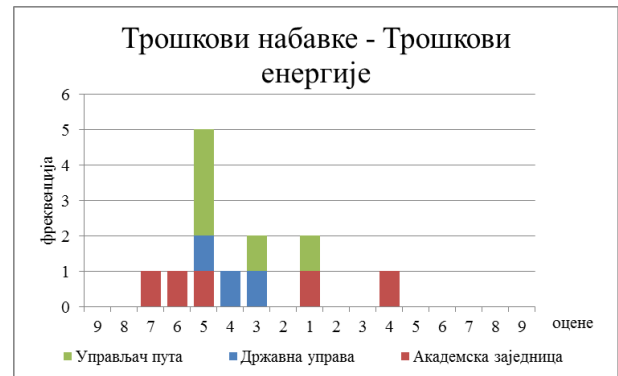
(в)

Слика 5.5. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Могућности*

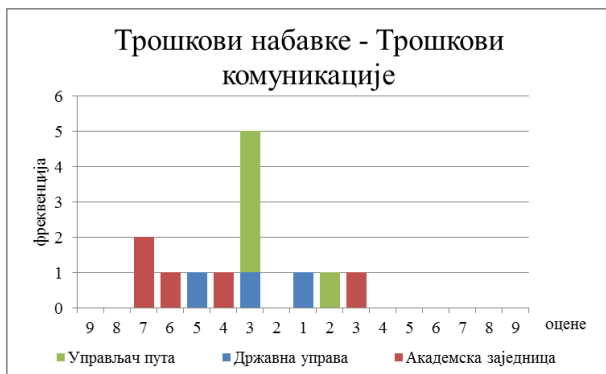
Поређење критеријума у односу на надређени аспект одлуке *Трошкови* приказано је на графиконима у наставку. На слици 5.6 (а-и) приказане су фреквенције оцена поређења по паровима, пет критеријума сврстаних у аспект одлуке *Трошкови*.



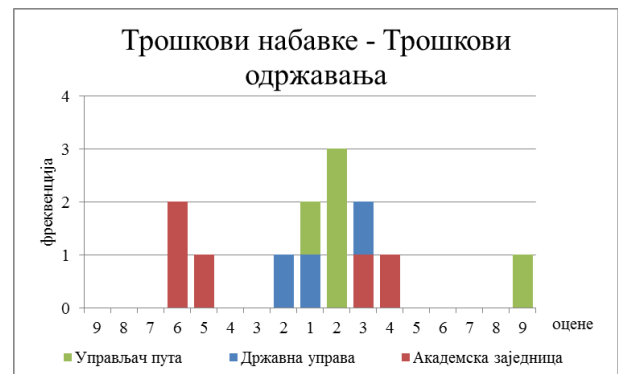
(a)



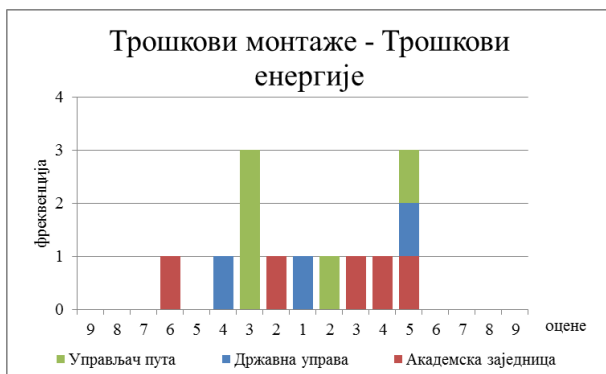
(б)



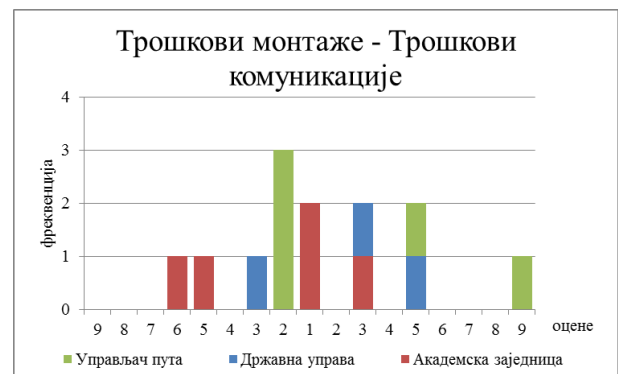
(в)



(г)



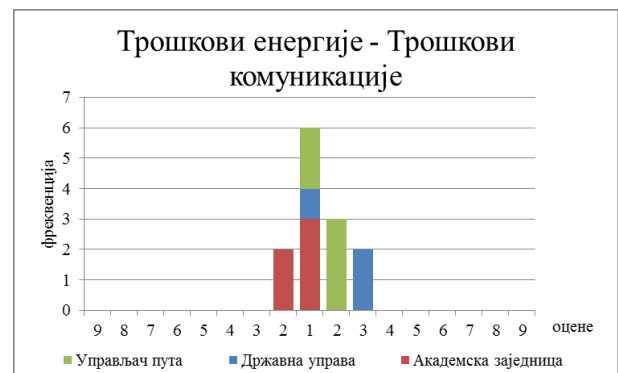
(д)



(е)

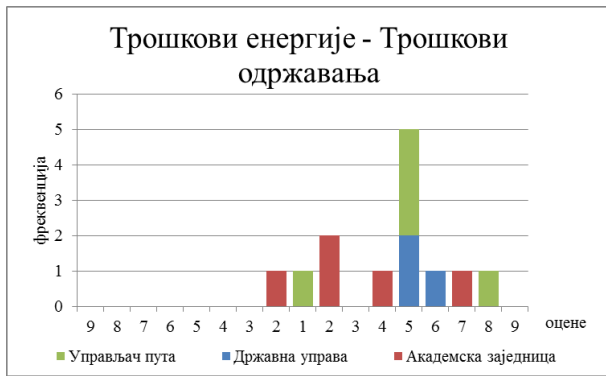


(ж)



(з)

Слика 5.6. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Трошкови*



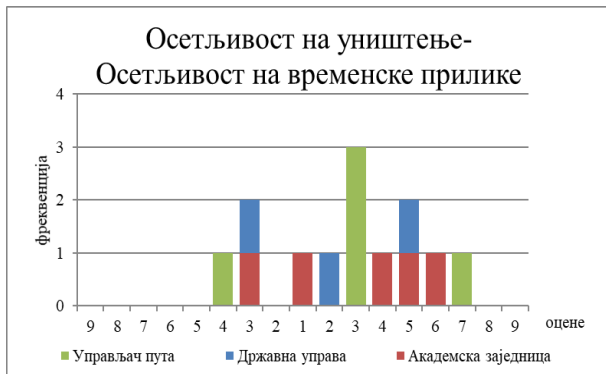
(з)



(и)

Слика 5.6. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Трошкови* (наставак)

Поређење критеријума у односу на надређени аспект одлуке *Ризици* приказано је на графиконима у наставку. На слици 5.7 приказане су фреквенције оцена поређења два критеријума сврстана у аспект одлуке *Ризици*.



Слика 5.7. Поређење по паровима критеријума у односу на аспект одлуке *Ризици*

За сваки појединачни упитник извршена је провера конзистентности матрица поређења. Уколико би се у некој матрици појавила неконзистентност, стручњаци су замољени да провере и модификују своје оцене тако да индекс конзистентности (CR) буде $CR < 0,1$. Индекс конзистентности провераван је у програму *SuperDecisions*. Вредности добијених индекса конзистентности приказани су у табели 5.3.

Како је поменуто у поглављу 5.3.4. евалуација алтернатива по критеријумима није била предмет експертског оцењивања. Њихове оцене преузете су из литературе (*Skszek, 2001; Martin и сар, 2003; Jelušić, 2008*). Ове оцене, засноване на истраживањима на терену, дате су описно, тростепеним скалама типа: лоше–средње–одлично, мало–средње–велико, ниско–средње–високо и слично, што је био додатни мотив да се за њихово међусобно поређење у дисертацији користи фази Сатијева скала, дата у табели 4.4. Оригинале оцене, преузете из литературе, приказане су у табели 5.4.

Табела 5.3. Индекси конзистентности матрица поређења по паровима

Анкетирани доносилац одлуке	Матрице поређења				
	Аспекти одлуке према циљу	Критеријуми у оквиру аспекта одлуке Користи	Критеријуми у оквиру аспекта одлуке Могућности	Критеријуми у оквиру аспекта одлуке Трошкови	Критеријуми у оквиру аспекта одлуке Ризици
1	0,05500	0,09576	0,01759	0,02213	0,00000
2	0,02190	0,01835	0,00000	0,02526	0,00000
3	0,01629	0,08100	0,05156	0,03786	0,00000
4	0,06195	0,09877	0,06239	0,09149	0,00000
5	0,03500	0,07500	0,07069	0,04763	0,00000
6	0,09106	0,08765	0,03703	0,09769	0,00000
7	0,01629	0,08100	0,05156	0,03786	0,00000
8	0,07549	0,04011	0,00000	0,09323	0,00000
9	0,09795	0,09071	0,00000	0,08726	0,00000
10	0,04298	0,11095	0,05156	0,09596	0,00000
11	0,01629	0,08100	0,05156	0,03786	0,00000
12	0,09869	0,02855	0,05156	0,00879	0,00000
13	0,09504	0,09189	0,02365	0,09186	0,00000

Табела 5.4. Оцене сензорских технологија по критеријумима

Сензорска технологија		Индуктивна петља	Магнетни	Пиезо-електрични	Активни инфрацрвени	Пасивни инфрацрвени	Микроталасни радар	Пасивни акустични	Ултразвучни	Видео сензори
Критеријум										
Користи										
V1	Тачност	2	2	2	2	1	2-3	3	1	2
V2	Поузданост	3	3	2	2-3	2-3	1-2	3	2-3	2-3
V3	Покривеност	1	1	1	1	3	2	2	1	3
V4	Знање и искуство	3	2	2	2	2	2	2	3	2
V5	Резолуција	1	1	1	2	2	3	2	1	3
V6	Компатибилност	3	1	3	2	2	2	1	2	1
V7	Трајност	1-3	3	1	2-3	2	2-3	2	2	2-3
Могућности										
O1	Функционалност	2	1-2	1-2	2	1-2	1-2	2	1-2	3
O2	Проширење зоне детекције	3	1-2	1	1	2-3	2	2	1	3
O3	Проширење примене	2	2	2	1	2	3	3	1	3
Трошкови										
C1	Трошкови набавке	1	1	1-2	3	1	3	2	1	2
C2	Трошкови монтаже	3	2	2	2	1-2	2	1	2	2-3
C3	Трошкови енергије	2	1	1	2	1	1	1	1	3
C4	Трошкови комуникације	1-2	1	1	2-3	1-2	2	1-2	1	1-3
C5	Трошкови одржавања	1	2	2	3	3	2-3	3	3	2

Табела 5.4. Оцене сензорских технологија по критеријумима (наставак)

Сензорска технологија		Индуктивна петља	Магнетни	Пиезо-електрични	Активни инфрацрвени	Пасивни инфрацрвени	Микроталасни радар	Пасивни акустични	Ултразвучни	Видео сензори
Критеријум										
Ризици										
R1	Отпорност на уништење	3	3	2	2	2	2	2	2	2
R2	Осетљивост на временске услове	1	1	2	2	1	1	3	1	3

B1: 1 лоша (грешка >10%), 2 средња (<10%), 3 одлична (<5%) (извор: *Martin* и сар, 2003)

B2: 1 ниска поузданост (незадовољавајућа), 2 средња поузданост, 3 висока поузданост (извор: *Jelušić*, 2008)

B3: 1 мала (до 20m²), 2 средња (20-50m²), 3 велика (преко 50m²) саобраћајне површине (извор: *Jelušić*, 2008)

B4: 1 технологија није у примени, нема стручних и научних пројеката, 2 позната технологија, постоји одређено искуство, 3 велико искуство, добро позната технологија (извор: *Jelušić*, 2008)

B5: 1 мала (1 зона детекције), 2 средња (2-5 зона детекције), 3 велика (преко 5 зона детекције) (извор: *Jelušić*, 2008)

B6: 1 мала компатибилност, 2 средња компатибилност, 3 велика компатибилност (према: *Skszek*, 2001)

B7: 1 мала (до 5 година), 2 средња (од 5 до 10 година), 3 велика (преко 10 година) (извор: *Jelušić*, 2008)

O1: 1 мала доступност, 2 средња доступност, 3 велика доступност (према: *Jelušić*, 2008)

O2: 1 нема прилагодљивости, 2 средња прилагодљивост, 3 велика прилагодљивост (извор: *Jelušić*, 2008)

O3: 1 мала могућност проширења, 2 средња могућност проширења, 3 велика могућност проширења (према: *Martin* и сар, 2003)

C1: 1 ниски трошкови (до 2000\$), 2 средњи трошкови (од 2000-4000\$), 3 високи трошкови (преко 4000\$) (извор: *Jelušić*, 2008)

C2: 1 ниски трошкови (до 2000\$), 2 средњи трошкови (од 2000-4000\$), 3 високи трошкови (преко 4000\$) (извор: *Jelušić*, 2008)

C3: 1 потребна мала снага напајања (до 10W), 2 потребна средња снага напајања (10-50W), 3 потребна велика снага напајања (преко 50W) (извор: *Jelušić*, 2008)

C4: 1 потребан мали капацитет, 2 средњи капацитет, 3 потребан велики капацитет (извор: *Jelušić*, 2008)

C5: 1 једноставно, 2-средње компликовано, 3 сложено (извор *Martin* и сар, 2003)

R1: 1 мала отпорност на уништавање, 2 средња отпорност на уништавање, 3 велика отпорност на уништавање (оцена аутора)

R2: 1 слаб утицај <5%, 2 средњи утицај <10%, 3 велики утицај >10% (извор *Martin* и сар, 2003)

Вредности оцена алтернатива по критеријумима претваране су у вредности из Сатијеве скале, на начин приказан у наставку. Уколико вредност 1 означава најлошију, а вредност 3 најбољу оцену, тада се вредности из литературе (табела 5.3) претварају у Сатијеву скалу као у табели 5.5. Насупрот томе, ако вредност 1 приказује најбољу, а вредност 3 најлошију оцену, тада ће се претварање обављати сагласно табели 5.6.

Табела 5.5. Претварање вредности оцена (1, 1-2, 2, 2-3, 3) у Сатијеву скалу, где је 1 најлошија, а 3 најбоља оцена

	1	1-2	2	2-3	3
1	1	1/2	1/3	1/4	1/5
1-2	2	1	1/2	1/3	1/4
2	3	2	1	1/2	1/3
2-3	4	3	2	1	1/2
3	5	4	3	2	1

Табела 5.6. Претварање вредности оцене (1, 1-2, 2, 2-3, 3) у Сатијевој скали, где је 1 најбоља, а 3 најлошија оцена

	3	2-3	2	1-2	1
3	1	1/2	1/3	1/4	1/5
2-3	2	1	1/2	1/3	1/4
2	3	2	1	1/2	1/3
1-2	4	3	2	1	1/2
1	5	4	3	2	1

За све прибављене оцене у Сатијевој скали, како од анкетираних експерата тако и из литературе, извршена је провера конзистентности овако добијених матрица оцењивања. Након тога, добијене оцене претворене су у фази оцене, сагласно с фази Сатијевог скалом приказаном у табели 4.4.

5.5. Примена FAHP-BOCR

Након што су, на начин описан у поглављу 5.3.4, добијене фази оцене парова елемената хијерархије, $\mathbf{a}_{ij} = (a_{ijl}, a_{ijs}, a_{ijd})$, матрица поређења по паровима може да се представи фази матрицом:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (a_{12l}, a_{12s}, a_{12d}) & \dots & (a_{1nl}, a_{1ns}, a_{1nd}) \\ \left(\frac{1}{a_{12d}}, \frac{1}{a_{12s}}, \frac{1}{a_{12l}}\right) & (1,1,1) & \dots & (a_{2nl}, a_{2ns}, a_{2nd}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{1}{a_{1nd}}, \frac{1}{a_{1ns}}, \frac{1}{a_{1nl}}\right) & \left(\frac{1}{a_{2nd}}, \frac{1}{a_{2ns}}, \frac{1}{a_{2nl}}\right) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Тежине елемената хијерархије су троугласти фази бројеви $\mathbf{w}_i = (w_{il}, w_{is}, w_{id})$ ($i=1, 2, \dots, m$) и израчунавају се, сагласно једначинама (4.45):

$$\mathbf{w}_i = (w_{il}, w_{is}, w_{id}) = \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ijl}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijd}}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ijs}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijs}}, \frac{\sum_{j=1}^n a_{ijd}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijl}} \right), \quad (5.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, m.$$

Формулама (5.2) и (5.4) добијене су фази тежине алтернатива по критеријумима, критеријума по одговарајућим BOCR аспектима одлуке, као и самих BOCR аспеката одлуке према циљу. Фази тежине алтернатива према BOCR аспектима одлуке означене са \mathbf{w}_i^M , где је $M = B, O, C$ и R аспект одлуке, рачунају се на следећи начин, сагласно једначинама (4.46):

$$\mathbf{w}_i^M = \sum_{j=1}^n \mathbf{w}_i^{Mj} * \mathbf{w}_{Mj} \quad i = 1, \dots, m \quad (5.5)$$

где су: \mathbf{w}_i^{Mj} фази тежина алтернативе i према критеријуму j који припада одговарајућем аспект одлуке M , а \mathbf{w}_{Mj} фази тежина критеријума j према одговарајућем BOCR аспект одлуке M .

Коначан фази приоритет алтернатива, S_i , $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$, израчунава се на следећи начин, сагласно релацији (4.26), користећи суптрактивни облик:

$$S_i = w_i^B * b + w_i^O * o - w_i^C * c - w_i^R * r \quad (5.6)$$

где су b, o, c, r фази тежине *BOCR* аспеката одлуке.

На овај начин добијене коначне фази приоритете алтернатива $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$ потребно је дефазификовати. У дисертацији је примењена метода интегрисаних оцењених средњих вредности (*Chou, 2003*) за дефазификацију и добијање реалних вредности коначних приоритета алтернатива. За троугласти фази број $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$ интегрисана оцењена средња вредност ($W(S_i)$) израчунава се на следећи начин, сагласно релацији (4.43):

$$W(S_i) = \frac{1}{6} (S_{il} + 4S_{is} + S_{id}) \quad (5.7)$$

где су S_{il}, S_{is}, S_{id} лева, средња и десна вредност троугластог фази броја $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$.

За сваку заинтересовану страну добија се ранг алтернатива, на основу вредности њихових приоритета. Потом, по правилу, следи агрегација добијених решења у јединствено, тзв. компромисно решење. С обзиром на потенцијалне конфликтне интересе заинтересованих страна, неопходно је обавити међусобну анализу компатибилности добијених решења, као и анализу компатибилности решења сваке заинтересоване стране с компромисним решењем. Анализа осетљивости решења на потенцијално различит утицај интересних група претходи коначном избору најбоље алтернативе.

5.6. Нумерички пример

Од великог броја расположивих технологија сензора за мерење брзине одабрано је пет сензорских технологија које ће бити анализирани. Тренутно су на локалним путевима у Републици Србији најзаступљеније индуктивне петље, пре свега због ниске цене уградње, док је ређе присутна радарска технологија. Имајући у виду да се у Републици Србији планира замена и осавремењивање сензора који би се користили и за мерење брзине, поред постојеће две, анализирани су и рангиране три савремене технологије: видео, активни и пасивни инфрацрвени сензори.

У дисертацији је разматрано 17 критеријума који су од значаја за доносиоца одлуке. Критеријуми и њихова структура према аспектима одлуке приказани су у табели 5.2.

Вредности алтернатива по критеријумима преузети су из литературе. Вредности из литературе (*Skszek, 2001; Martin и сар, 2003; Jelušić, 2008*) приказане су у табели 5.4. Оне су затим претворене у вредности из Сатијеве скале, које су потом претворене у троугласте фази бројеве, како је описано у поглављу 5.4. Коначне фази оцене алтернатива по критеријумима приказане су у табели 5.7.

За потребе одређивања тежина *BOCR* аспеката одлуке и одабраних критеријума, дефинисане су три интересне групе: академска заједница, државна управа и управљач пута.

Тринаесторо стручњака из три интересне групе учествовало је у анкети. Начин спровођења анкете приказан је у поглављу 5.4. Резултати за појединачне интересне групе су приказани у наставку.

Табела 5.7. Фази оцене алтернатива по критеријумима $w_{A_i}^{M_j}$, где су М=В, О, С, R аспекти одлуке

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
B₁	(0,002; 0,018; 0,155)	(0,002; 0,018; 0,155)	(0,001; 0,005 ;0,063)	(0,002; 0,024; 0,268)	(0,001; 0,014; 0,127)
B₂	(0,002; 0,028; 0,334)	(0,001; 0,017; 0,158)	(0,001; 0,017; 0,158)	(0,001; 0,010; 0,132)	(0,001; 0,017; 0,158)
B₃	(0,000; 0,004; 0,048)	(0,000; 0,004; 0,048)	(0,001; 0,017; 0,218)	(0,001; 0,013; 0,194)	(0,001; 0,015; 0,182)
B₄	(0,001; 0,009; 0,088)	(0,001; 0,003; 0,021)	(0,001; 0,003; 0,021)	(0,001; 0,003; 0,021)	(0,001; 0,003; 0,021)
B₅	(0,000; 0,003; 0,036)	(0,001; 0,007; 0,081)	(0,001; 0,007; 0,081)	(0,001; 0,012; 0,144)	(0,001; 0,012; 0,144)
B₆	(0,001; 0,009; 0,110)	(0,000; 0,005; 0,052)	(0,000; 0,005; 0,052)	(0,000; 0,005; 0,052)	(0,000; 0,002; 0,026)
B₇	(0,000; 0,002; 0,021)	(0,001; 0,005; 0,046)	(0,000; 0,002; 0,021)	(0,001; 0,005; 0,046)	(0,001; 0,005; 0,046)
O₁	(0,002; 0,014; 0,139)	(0,002; 0,014; 0,139)	(0,001; 0,007; 0,055)	(0,001; 0,007; 0,055)	(0,004; 0,037; 0,317)
O₂	(0,002; 0,010; 0,076)	(0,000; 0,002; 0,017)	(0,001; 0,008; 0,054)	(0,001; 0,006; 0,049)	(0,002; 0,010; 0,076)
O₃	(0,001; 0,008; 0,077)	(0,000; 0,003; 0,034)	(0,001; 0,008; 0,077)	(0,002; 0,014; 0,138)	(0,002; 0,014; 0,138)
C₁	(0,002; 0,032; 0,332)	(0,001; 0,007; 0,070)	(0,002; 0,032; 0,332)	(0,001; 0,007; 0,070)	(0,001; 0,014; 0,192)
C₂	(0,000; 0,002; 0,037)	(0,001; 0,008; 0,101)	(0,001; 0,015; 0,186)	(0,001; 0,008; 0,101)	(0,000; 0,004; 0,063)
C₃	(0,001; 0,005; 0,067)	(0,001; 0,005; 0,067)	(0,001; 0,014; 0,151)	(0,001; 0,014; 0,151)	(0,000; 0,003; 0,033)
C₄	(0,001; 0,013; 0,110)	(0,000; 0,003; 0,018)	(0,000; 0,003; 0,018)	(0,000; 0,003; 0,019)	(0,001; 0,005; 0,059)
C₅	(0,005; 0,042; 0,352)	(0,000; 0,004; 0,031)	(0,000; 0,004; 0,031)	(0,001; 0,010; 0,110)	(0,002; 0,019; 0,184)
R₁	(0,003; 0,032; 0,241)	(0,003; 0,011; 0,057)	(0,003; 0,011; 0,057)	(0,003; 0,011; 0,057)	(0,003; 0,011; 0,057)
R₂	(0,005; 0,044; 0,344)	(0,002; 0,017; 0,197)	(0,005; 0,044; 0,344)	(0,005; 0,044; 0,344)	(0,001; 0,010; 0,086)

5.6.1. Анализа рангирања сензора, интересна група академска заједница

За интересну групу академска заједница, вредности тежина *BOCR* аспеката одлуке проистекле из анкете приказане су у табели 5.8, а вредности тежина критеријума према одговарајућим аспектима одлуке у табелама 5.9. до 5.11.

Табела 5.8. Фази поређење по паровима за *BOCR* аспекте одлуке, интересна група академска заједница

	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>R</i>
<i>B</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,149; 2,169; 3,438)	(1,064; 1,635; 2,141)	(0,713; 1,149; 1,852)
<i>O</i>	(0,291; 0,461; 0,871)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,541; 0,871; 1,401)	(0,428; 0,608; 1,031)
<i>C</i>	(0,467; 0,612; 0,940)	(0,714; 1,149; 1,849)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,149; 2,268; 3,630)
<i>R</i>	(0,713; 1,149; 1,852)	(0,970; 1,644; 2,339)	(0,276; 0,441; 0,871)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.9. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, интересна група академска заједница

<i>Користи Benefits</i>	<i>B₁</i>	<i>B₂</i>	<i>B₃</i>	<i>B₄</i>
<i>B₁</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,059; 2,169; 3,519)	(1,821; 2,959; 4,208)
<i>B₂</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,351; 2,724; 4,300)	(2,268; 3,277; 4,501)
<i>B₃</i>	(0,284; 0,461; 0,944)	(0,233; 0,367; 0,922)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,719; 3,005; 4,904)
<i>B₄</i>	(0,238; 0,338; 0,549)	(0,222; 0,305; 0,441)	(0,204; 0,333; 0,582)	(1,000; 1,000; 1,000)
<i>B₅</i>	(0,242; 0,341; 0,660)	(0,220; 0,295; 0,488)	(0,238; 0,433; 0,725)	(1,037; 1,461; 2,112)
<i>B₆</i>	(0,229; 0,394; 0,882)	(0,211; 0,344; 0,573)	(0,281; 0,516; 0,803)	(0,768; 1,398; 2,048)
<i>B₇</i>	(0,193; 0,246; 0,354)	(0,189; 0,240; 0,343)	(0,332; 0,463; 0,703)	(0,603; 0,850; 1,431)
	<i>B₅</i>	<i>B₆</i>	<i>B₇</i>	
<i>B₁</i>	(1,516; 2,930; 4,129)	(1,246; 2,537; 4,360)	(2,993; 4,072; 5,194)	
<i>B₂</i>	(2,048; 3,393; 4,555)	(1,745; 2,909; 4,743)	(2,914; 4,169; 5,294)	
<i>B₃</i>	(1,380; 2,307; 4,193)	(1,246; 1,936; 3,554)	(1,423; 2,162; 3,011)	
<i>B₄</i>	(0,474; 0,684; 0,964)	(0,488; 0,715; 1,046)	(0,699; 1,176; 1,657)	
<i>B₅</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,149; 2,352; 3,594)	(1,741; 2,862; 4,095)	
<i>B₆</i>	(0,278; 0,425; 0,871)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,725; 1,246; 1,904)	
<i>B₇</i>	(0,244; 0,349; 0,574)	(0,525; 0,803; 1,380)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.10. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Могућности*, интересна група академска заједница

<i>Могућности Opportunities</i>	<i>O₁</i>	<i>O₂</i>	<i>O₃</i>
<i>O₁</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,149; 2,048; 2,724)	(1,246; 1,974; 2,687)
<i>O₂</i>	(0,367; 0,488; 0,871)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,491; 0,725; 1,108)
<i>O₃</i>	(0,384; 0,506; 0,871)	(0,903; 1,380; 2,036)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.11. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Трошкови*, интересна група академска заједница

<i>Трошак</i> <i>Costs</i>	C_1	C_2	C_3
C_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,719; 2,537; 3,160)	(1,585; 2,208; 3,022)
C_2	(0,316; 0,394; 0,582)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,453; 0,725; 1,398)
C_3	(0,331; 0,453; 0,631)	(0,715; 1,380; 2,208)	(1,000; 1,000; 1,000)
C_4	(0,191; 0,303; 0,478)	(0,447; 0,631; 0,839)	(0,574; 0,758; 1,000)
C_5	(0,339; 0,582; 0,910)	(0,833; 1,888; 3,594)	(1,380; 2,237; 3,178)
	C_4	C_5	
C_1	(2,091; 3,301; 5,223)	(0,795; 1,719; 2,300)	
C_2	(1,431; 1,585; 2,237)	(0,302; 0,530; 1,257)	
C_3	(1,000; 1,320; 1,741)	(0,369; 0,447; 0,795)	
C_4	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,243; 0,304; 0,500)	
C_5	(2,000; 3,288; 4,441)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.12. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Ризици*, интересна група академска заједница

<i>Ризик</i> <i>Risks</i>	R_1	R_2
R_2	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,349; 0,478; 0,910)
R_2	(1,369; 2,091; 3,201)	(1,000; 1,000; 1,000)

Према поступку приказаном у поглављу 5.5, користећи формуле (5.2) до (5.4) добијене су вредности фази тежина *BOCR* аспеката одлуке b, o, c, r , као и фази тежине критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке w_{M_j} . Ове вредности приказане су у табели 5.13.

Користећи матрице приказане у табели 5.7, као и матрице поређења критеријума према надређеним аспектима одлуке приказаним у табелама 5.8.-5.12, сагласно с формулом (5.5) израчунате су вредности фази оцена алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке. Ове вредности приказане су у табели 5.14.

Табела 5.13. Фази тежине *BOCR* аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група академска заједница

Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке	Критеријуми	Фази тежине критеријума према надређеном <i>BOCR</i> аспекту одлуке $w_{Mj}, j=1, \dots, n$
B $b=(0,150; 0,328; 0,676)$	B_1 Тачност	(0,016; 0,079; 0,346)
	B_2 Поузданост	(0,018; 0,088; 0,375)
	B_3 Покривеност	(0,011; 0,053; 0,274)
	B_4 Знање и искуство	(0,005; 0,022; 0,092)
	B_5 Резолуција	(0,008; 0,042; 0,187)
	B_6 Компатибилност	(0,005; 0,025; 0,119)
	B_7 Трајност	(0,005; 0,019; 0,085)
O $o=(0,086; 0,162; 0,345)$	O_1 Функционалност	(0,022; 0,079; 0,287)
	O_2 Проширење зоне детекције	(0,012; 0,036; 0,136)
	O_3 Проширење примене	(0,015; 0,047; 0,178)
C $c=(0,127; 0,277; 0,595)$	C_1 Трошкови набавке	(0,020; 0,093; 0,394)
	C_2 Трошкови монтаже	(0,010; 0,038; 0,177)
	C_3 Трошкови енергије	(0,010; 0,041; 0,173)
	C_4 Трошкови комуникације	(0,007; 0,026; 0,103)
	C_5 Трошкови одржавања	(0,016; 0,079; 0,355)
R $r=(0,113; 0,233; 0,486)$	R_1 Отпорност на уништење	(0,025; 0,075; 0,250)
	R_2 Осетљивост на временске услове	(0,044; 0,158; 0,549)

Табела 5.14. Фази тежине алтернативе према *BOCR* аспектима одлуке $w_{A_i}^M$, $M=B, O, C, R$, интересна група академска заједница

	B	O	C	R
A_1	(0,006; 0,073; 0,793)	(0,004; 0,032; 0,292)	(0,009; 0,095; 0,898)	(0,008; 0,076; 0,585)
A_2	(0,006; 0,059; 0,562)	(0,003; 0,019; 0,191)	(0,003; 0,027; 0,288)	(0,005; 0,028; 0,254)
A_3	(0,005; 0,056; 0,615)	(0,003; 0,023; 0,186)	(0,006; 0,067; 0,718)	(0,007; 0,054; 0,401)
A_4	(0,006; 0,072; 0,857)	(0,004; 0,027; 0,241)	(0,004; 0,042; 0,451)	(0,007; 0,054; 0,401)
A_5	(0,006; 0,067; 0,704)	(0,007; 0,061; 0,530)	(0,004; 0,046; 0,532)	(0,004; 0,021; 0,143)

Фази приоритет алтернатива S_i , $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$, добијен је на основу једначине (5.6). Он је затим дефазификован применом релације (5.7) и добијена је интегрисана оцењена средња вредност ($W(S_i)$) за сваку од алтернатива. Ове вредности приказане су у табели 5.15.

Табела 5.15. Фази и *crisp* приоритет алтернатива, интересна група академска заједница

Алтернатива	Сензорска технологија	Фази приоритет алтернатива S_i	<i>Crisp</i> вредност $W(S_i)$	Коначни ранг алтернативе
A_1	Индуктивна петља	(-0,0008; -0,0150; -0,1811)	-0,0403	5
A_2	Активни инфрацрвени	(0,0002; 0,0084; 0,1513)	0,0308	3
A_3	Пасивни инфрацрвени	(-0,0005; -0,0089; -0,1418)	-0,0297	4
A_4	Микроталасни радар	(-0,0001; 0,0038; 0,1994)	0,0357	2
A_5	Видео сензор	(0,0005; 0,0144; 0,2730)	0,0552	1

Коначни редослед рангирања сензорских технологија по избору интересне групе академске заједнице је: видео сензор, микроталасни радар, активни инфрацрвени сензор, пасивни инфрацрвени сензор, индуктивна петља.

Као најбоље рангирана технологија издваја се видео сензор, најсофистициранији уређај с највише додатних функција у поређењу са другим технологијама. Код две од пет алтернатива у коначном рангу укупна вредност алтернатива је негативна, што значи да су превагу однели чланови који у суптрактивној формули (5.6) имају негативан предзнак, а то су трошкови и ризици.

5.6.2. Анализа рангирања сензора, интересна група државна управа и локална самоуправа

За интересну групу државна управа и локална самоуправа, вредности тежина *BOCR* аспеката одлуке проистекле из анкете приказане су у табели 5.16, а вредности тежина критеријума према одговарајућим аспектима одлуке у табелама 5.17. до 5.20.

Табела 5.16. Фази поређење по паровима за *BOCR* аспекте одлуке, интересна група државна управа и локална самоуправа

	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>R</i>
<i>B</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,817; 4,217; 6,257)	(1,000; 1,671; 3,302)	(2,466; 4,718; 6,804)
<i>O</i>	(0,160; 0,237; 0,481)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,454; 0,747; 1,205)	(2,080; 2,924; 3,659)
<i>C</i>	(0,303; 0,598; 1,000)	(0,830; 1,339; 2,201)	(1,000; 1,000; 1,000)	(2,289; 3,915; 6,073)
<i>R</i>	(0,147; 0,212; 0,405)	(0,273; 0,342; 0,481)	(0,165; 0,255; 0,437)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.17. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, интересна група државна управа и локална самоуправа

<i>Користи Benefits</i>	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,000; 1,442; 1,710)	(1,587; 3,302; 5,429)	(2,466; 3,271; 3,979)
B_2	(0,585; 0,693; 1,000)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,442; 2,466; 3,271)	(2,520; 4,762; 6,840)
B_3	(0,184; 0,303; 0,630)	(0,306; 0,405; 0,693)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,442; 1,710; 1,913)
B_4	(0,251; 0,306; 0,405)	(0,146; 0,210; 0,397)	(0,306; 0,585; 1,186)	(1,000; 1,000; 1,000)
B_5	(0,271; 0,347; 0,550)	(0,281; 0,362; 0,585)	(0,168; 0,255; 0,550)	(0,342; 0,693; 1,710)
B_6	(0,523; 0,843; 1,186)	(0,585; 0,693; 1,000)	(0,585; 1,000; 1,710)	(1,442; 3,107; 5,192)
B_7	(0,347; 0,500; 0,794)	(0,630; 0,794; 1,000)	(1,145; 2,154; 3,476)	(1,587; 3,302; 5,429)

Табела 5.17. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, интересна група државна управа и локална самоуправа (наставак)

<i>Користи</i> <i>Benefits</i>	B_5	B_6	B_7
B_1	(1,817; 2,884; 3,684)	(0,843; 1,186; 1,913)	(1,260; 2,000; 2,884)
B_2	(1,710; 2,759; 3,557)	(1,000; 1,442; 1,710)	(1,000; 1,260; 1,587)
B_3	(1,817; 3,915; 5,944)	(0,585; 1,000; 1,710)	(0,288; 0,464; 0,874)
B_4	(0,585; 1,442; 2,924)	(0,193; 0,322; 0,693)	(0,184; 0,303; 0,630)
B_5	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,347; 0,500; 0,794)	(0,273; 0,342; 0,481)
B_6	(1,260; 2,000; 2,884)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,200; 0,333; 1,000)
B_7	(2,080; 2,924; 3,659)	(1,000; 3,000; 5,000)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.18. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Могућности*, интересна група државна управа и локална самоуправа

<i>Могућности</i> <i>Opportunities</i>	O_1	O_2	O_3
O_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,260; 3,302; 5,313)	(0,585; 1,000; 1,710)
O_2	(0,188; 0,303; 0,794)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,193; 0,322; 0,693)
O_3	(0,585; 1,000; 1,710)	(1,442; 3,107; 5,192)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.19. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Трошкови*, интересна група државна управа и локална самоуправа

<i>Трошак</i> <i>Costs</i>	C_1	C_2	C_3
C_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,909; 1,957; 3,271)	(1,817; 3,915; 5,944)
C_2	(0,306; 0,511; 1,101)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,659; 0,928; 1,260)
C_3	(0,168; 0,255; 0,550)	(0,794; 1,077; 1,518)	(1,000; 1,000; 1,000)
C_4	(0,306; 0,405; 0,693)	(0,843; 1,710; 3,271)	(1,000; 2,080; 2,924)
C_5	(0,630; 1,145; 1,710)	(2,466; 4,718; 6,804)	(3,302; 5,313; 7,319)
	C_4	C_5	
C_1	(1,442; 2,466; 3,271)	(0,585; 0,874; 1,587)	
C_2	(0,306; 0,585; 1,186)	(0,147; 0,212; 0,405)	
C_3	(0,342; 0,481; 1,000)	(0,137; 0,188; 0,303)	
C_4	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,160; 0,237; 0,481)	
C_5	(2,080; 4,217; 6,257)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.20. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Ризици*, интересна група државна управа и локална самоуправа

<i>Ризик</i> <i>Risks</i>	R_1	R_2
R_2	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,329; 0,669; 1,186)
R_2	(0,843; 1,494; 3,037)	(1,000; 1,000; 1,000)

Према поступку приказаном у поглављу 5.5, користећи формуле (5.2) до (5.4) добијене су вредности фази тежина $BOCR$ аспеката одлуке b , o , c , r , као и фази тежине критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке w_{M_j} . Ове вредности приказане су у табели 5.21.

Табела 5.21. Фази тежине *BOCR* аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група државна управа и локална самоуправа

Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке	Критеријуми		Фази тежине критеријума према надређеном <i>BOCR</i> аспекту одлуке $w_{M_j}, j=1, \dots, n$
B $b=(0,173; 0,461; 1,086)$	B_1	Тачност	(0,017; 0,101; 0,513)
	B_2	Поузданост	(0,016; 0,097; 0,473)
	B_3	Покривеност	(0,010; 0,059; 0,318)
	B_4	Знање и искуство	(0,005; 0,028; 0,180)
	B_5	Резолуција	(0,005; 0,024; 0,141)
	B_6	Компатибилност	(0,010; 0,060; 0,348)
	B_7	Трајност	(0,014; 0,092; 0,507)
O $o=(0,102; 0,195; 0,397)$	O_1	Функционалност	(0,016; 0,086; 0,439)
	O_2	Проширење зоне детекције	(0,008; 0,026; 0,136)
	O_3	Проширење примене	(0,017; 0,083; 0,433)
C $c=(0,122; 0,272; 0,643)$	C_1	Трошкови набавке	(0,013; 0,073; 0,414)
	C_2	Трошкови монтаже	(0,005; 0,023; 0,136)
	C_3	Трошкови енергије	(0,005; 0,021; 0,120)
	C_4	Трошкови комуникације	(0,007; 0,039; 0,230)
	C_5	Трошкови одржавања	(0,021; 0,117; 0,634)
R $r=(0,044; 0,072; 0,145)$	R_1	Отпорност на уништење	(0,009; 0,029; 0,100)
	R_2	Осетљивост на временске услове	(0,013; 0,043; 0,185)

Користећи матрице приказане у табели 5.16, као и матрице поређења критеријума према надређеним аспектима одлуке приказаним у табелама 5.17.-5.21, сагласно са формулом (5.5) израчунате су вредности фази оцена алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке. Ове вредности приказане су у табели 5.22.

Табела 5.22. Фази тежине алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке $w_{A_i}^M, M=B, O, C, R$, интересна група државна управа и локална самоуправа

	B	O	C	R
A_1	(0,007; 0,104; 1,354)	(0,003; 0,037; 0,476)	(0,009; 0,111; 1,297)	(0,003; 0,024; 0,212)
A_2	(0,007; 0,089; 1,014)	(0,002; 0,022; 0,314)	(0,002; 0,023; 0,295)	(0,002; 0,009; 0,089)
A_3	(0,006; 0,075; 0,926)	(0,003; 0,028; 0,326)	(0,004; 0,050; 0,693)	(0,002; 0,016; 0,139)
A_4	(0,007; 0,102; 1,365)	(0,003; 0,036; 0,466)	(0,003; 0,037; 0,495)	(0,002; 0,016; 0,139)
A_5	(0,007; 0,091; 1,098)	(0,005; 0,072; 0,893)	(0,004; 0,051; 0,734)	(0,001; 0,007; 0,052)

Фази приоритет алтернатива $S_i, S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$, добијен је на основу једначине (5.6). Он је затим дефазификован применом релације (5.7) и добијена је интегрисана оцењена средња вредност ($W(S_i)$) за сваку од алтернатива. Ове вредности приказане су у табели 5.23.

Табела 5.23. Фази и *crisp* приоритет алтернатива, интересна група државна управа и локална самоуправа

Алтернатива	Сензорска технологија	Фази приоритет алтернатива S_i	<i>Crisp</i> вредност $W(S_i)$	Коначни ранг алтернативе
A_1	Индуктивна петља	(0,0003; 0,0232; 0,7948)	0,1479	4
A_2	Активни инфрацрвени	(0,0010; 0,0386; 1,0231)	0,1964	3
A_3	Пасивни инфрацрвени	(0,0006; 0,0251; 0,6699)	0,1285	5
A_4	Микроталасни радар	(0,0010; 0,0430; 1,3291)	0,2504	1
A_5	Видео сензор	(0,0012; 0,0414; 1,0684)	0,2058	2

Коначни редослед рангирања сензорских технологија по избору интересне групе државне управе је: микроталасни радар, видео сензор, активни инфрацрвени сензор, индуктивна петља, пасивни инфрацрвени сензор.

5.6.3. Анализа рангирања сензора, интересна група управљач пута

За интересну групу управљач пута, вредности тежина *BOCR* аспеката одлуке проистекле из анкете приказане су у табели 5.24, а вредности тежина критеријума према одговарајућим аспектима одлуке у табелама 5.25. до 5.28.

Табела 5.24. Фази поређење по паровима за *BOCR* аспекте одлуке, интересна група управљач пута

	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>R</i>
<i>B</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,435; 0,944; 1,821)	(0,803; 1,807; 2,809)	(1,217; 2,148; 3,134)
<i>O</i>	(0,549; 1,059; 2,297)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,699; 1,825; 3,155)	(1,197; 2,108; 3,005)
<i>C</i>	(0,356; 0,553; 1,246)	(0,317; 0,548; 1,431)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,725; 1,552; 2,297)
<i>R</i>	(0,319; 0,466; 0,822)	(0,333; 0,474; 0,836)	(0,435; 0,822; 1,380)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.25. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, интересна група управљач пута

<i>Користи Benefits</i>	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,000; 2,551; 4,573)	(1,431; 2,862; 5,024)	(2,169; 4,000; 6,128)
B_2	(0,219; 0,392; 1,000)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,435; 0,944; 1,821)	(1,431; 2,297; 3,641)
B_3	(0,199; 0,349; 0,699)	(0,549; 1,059; 2,297)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,476; 2,352; 3,711)
B_4	(0,163; 0,250; 0,461)	(0,275; 0,435; 0,699)	(0,269; 0,435; 0,678)	(1,000; 1,000; 1,000)
B_5	(0,133; 0,182; 0,290)	(0,187; 0,301; 0,803)	(0,258; 0,375; 0,803)	(0,358; 0,636; 1,118)
B_6	(0,631; 0,660; 0,699)	(0,631; 1,275; 1,835)	(0,631; 1,275; 1,605)	(1,000; 1,933; 2,627)
B_7	(0,211; 0,276; 0,517)	(0,258; 0,375; 0,803)	(0,231; 0,315; 0,530)	(0,414; 0,694; 1,171)

Табела 5.25. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, интересна група управљач пута (наставак)

<i>Користи</i> <i>Benefits</i>	B_5	B_6	B_7
B_1	(3,000; 5,493; 7,518)	(1,431; 1,516; 1,585)	(2,408; 3,624; 4,743)
B_2	(1,246; 3,323; 5,348)	(0,545; 0,784; 1,585)	(1,246; 2,667; 3,876)
B_3	(1,246; 2,667; 3,876)	(0,623; 1,000; 1,585)	(1,888; 3,170; 4,324)
B_4	(0,894; 1,572; 2,795)	(0,381; 0,517; 1,000)	(0,854; 1,441; 2,416)
B_5	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,488; 0,660; 1,046)	(1,149; 2,000; 3,288)
B_6	(0,956; 1,516; 2,048)	(1,000; 1,000; 1,000)	(3,554; 5,624; 7,662)
B_7	(0,304; 0,500; 0,871)	(0,131; 0,178; 0,281)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.26. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Могућности*, интересна група управљач пута

<i>Могућности</i> <i>Opportunities</i>	O_1	O_2	O_3
O_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,246; 1,719; 2,036)	(0,894; 1,037; 1,217)
O_2	(0,491; 0,582; 0,803)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,740; 0,894; 1,037)
O_3	(0,822; 0,964; 1,118)	(0,964; 1,118; 1,351)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.27. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Трошкови*, интересна група управљач пута

<i>Трошак</i> <i>Costs</i>	C_1	C_2	C_3
C_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,320; 2,766; 3,981)	(1,933; 3,272; 4,435)
C_2	(0,251; 0,361; 0,758)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,514; 1,220; 2,108)
C_3	(0,226; 0,306; 0,517)	(0,474; 0,820; 1,947)	(1,000; 1,000; 1,000)
C_4	(0,276; 0,477; 1,320)	(0,800; 1,413; 2,384)	(1,000; 1,516; 2,297)
C_5	(1,476; 2,352; 3,711)	(1,947; 4,293; 6,431)	(2,766; 3,981; 5,094)
	C_4	C_5	
C_1	(0,758; 2,096; 3,624)	(0,269; 0,425; 0,678)	
C_2	(0,419; 0,708; 1,250)	(0,155; 0,233; 0,514)	
C_3	(0,435; 0,660; 1,000)	(0,196; 0,251; 0,699)	
C_4	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,215; 0,287; 0,461)	
C_5	(2,169; 3,482; 4,644)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.28. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Ризици*, интересна група управљач пута

<i>Ризик</i> <i>Risks</i>	R_1	R_2
R_2	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,282; 0,463; 1,037)
R_2	(0,964; 2,162; 3,548)	(1,000; 1,000; 1,000)

Према поступку приказаном у поглављу 5.5, користећи формуле (5.2) до (5.4) добијене су вредности фази тежина *BOCR* аспеката одлуке b , o , c , r , као и фази тежине критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке w_{M_j} . Ове вредности приказане су у табели 5.29.

Табела 5.29. Фази тежине *BOCR* аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, интересна група управљач пута

Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке	Критеријуми		Фази тежине критеријума према надређеном <i>BOCR</i> аспекту одлуке $w_{M_j}, j=1, \dots, n$
B $b=(0,122; 0,322; 0,770)$	B_1	Тачност	(0,014; 0,095; 0,536)
	B_2	Поузданост	(0,007; 0,051; 0,320)
	B_3	Покривеност	(0,008; 0,052; 0,307)
	B_4	Знање и искуство	(0,004; 0,025; 0,159)
	B_5	Резолуција	(0,004; 0,023; 0,146)
	B_6	Компатибилност	(0,010; 0,060; 0,306)
	B_7	Трајност	(0,003; 0,015; 0,091)
O $o=(0,122; 0,327; 0,831)$	O_1	Функционалност	(0,036; 0,132; 0,433)
	O_2	Проширење зоне детекције	(0,026; 0,087; 0,289)
	O_3	Проширење примене	(0,032; 0,108; 0,353)
C $c=(0,085; 0,200; 0,525)$	C_1	Трошкови набавке	(0,008; 0,053; 0,318)
	C_2	Трошкови монтаже	(0,004; 0,020; 0,131)
	C_3	Трошкови енергије	(0,004; 0,017; 0,120)
	C_4	Трошкови комуникације	(0,005; 0,026; 0,173)
	C_5	Трошкови одржавања	(0,015; 0,084; 0,485)
R $r=(0,074; 0,151; 0,355)$	R_1	Отпорност на уништење	(0,014; 0,048; 0,223)
	R_2	Осетљивост на временске услове	(0,022; 0,103; 0,497)

Користећи матрице приказане у табели 5.24, као и матрице поређења критеријума према надређеним аспектима одлуке приказаним у табелама 5.25.-5.28, сагласно са формулом (5.5) израчунате су вредности фази оцена алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке. Ове вредности приказане су у табели 5.30.

Табела 5.30. Фази тежине алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке $w_{A_i}^M$, $M=B, O, C, R$, интересна група управљач пута

	B	O	C	R
A ₁	(0,005; 0,076; 1,066)	(0,008; 0,066; 0,524)	(0,007; 0,080; 1,007)	(0,004; 0,049; 0,526)
A ₂	(0,004; 0,059; 0,713)	(0,005; 0,035; 0,315)	(0,002; 0,017; 0,251)	(0,003; 0,018; 0,229)
A ₃	(0,004; 0,054; 0,734)	(0,007; 0,050; 0,351)	(0,003; 0,038; 0,584)	(0,004; 0,035; 0,362)
A ₄	(0,005; 0,074; 1,078)	(0,007; 0,058; 0,459)	(0,002; 0,028; 0,418)	(0,004; 0,035; 0,362)
A ₅	(0,004; 0,059; 0,801)	(0,013; 0,118; 0,911)	(0,003; 0,037; 0,575)	(0,002; 0,013; 0,129)

Фази приоритет алтернатива S_i , $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$, добијен је на основу једначине (5.6). Он је затим дефазификован применом релације (5.7) и добијена је интегрисана оцењена средња вредност ($W(S_i)$) за сваку од алтернатива. Ове вредности приказане су у табели 5.31.

Табела 5.31. Фази и *crisp* приоритет алтернатива, интересна група управљач пута

Алтернатива	Сензорска технологија	Фази приоритет алтернатива S_i	<i>Crisp</i> вредност $W(S_i)$	Коначни ранг алтернативе
A_1	Индуктивна петља	(0,0007; 0,0231; 0,5414)	0,1058	4
A_2	Активни инфрацрвени	(0,0008; 0,0243; 0,5970)	0,1158	3
A_3	Пасивни инфрацрвени	(0,0008; 0,0208; 0,4223)	0,0844	5
A_4	Микроталасни радар	(0,0010; 0,0319; 0,8629)	0,1652	2
A_5	Видео сензор	(0,0017; 0,0484; 1,0256)	0,2035	1

Коначни редослед рангирања сензорских технологија по избору интересне групе државне управе је: видео сензор, микроталасни радар, активни инфрацрвени сензор, индуктивна петља, пасивни инфрацрвени сензор.

5.6.4. Анализа рангирања сензора, сви експерти

У овом поглављу су сви анкетирани експерти посматрани заједно, без обзира на њихову интересну групу. Резултати су описани у наставку. Вредности тежина *BOCR* аспеката одлуке проистекле из анкете приказане су у табели 5.32, а вредности тежина критеријума према одговарајућим аспектима одлуке у табелама 5.33. до 5.36.

Табела 5.32. Фази поређење по паровима за *BOCR* аспекте одлуке, укупно

	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>R</i>
<i>B</i>	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,879; 1,836; 3,091)	(0,941; 1,708; 2,627)	(1,166; 2,025; 3,061)
<i>O</i>	(0,324; 0,545; 1,102)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,573; 1,117; 1,849)	(0,915; 1,410; 2,084)
<i>C</i>	(0,381; 0,586; 1,063)	(0,541; 0,895; 1,744)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,128; 2,223; 3,428)
<i>R</i>	(0,363; 0,550; 0,954)	(0,480; 0,709; 1,093)	(0,292; 0,494; 0,886)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.33. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Користи*, укупно

<i>Користи Benefits</i>	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,000; 1,560; 2,031)	(1,306; 2,659; 4,460)	(2,089; 3,400; 4,800)
B_2	(0,492; 0,641; 1,000)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,887; 1,771; 2,901)	(1,947; 3,116; 4,569)
B_3	(0,224; 0,376; 0,766)	(0,345; 0,565; 1,227)	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,557; 2,401; 3,545)
B_4	(0,208; 0,294; 0,479)	(0,219; 0,321; 0,514)	(0,249; 0,420; 0,727)	(1,000; 1,000; 1,000)
B_5	(0,197; 0,269; 0,461)	(0,219; 0,312; 0,616)	(0,227; 0,363; 0,707)	(0,533; 0,894; 1,575)
B_6	(0,409; 0,573; 0,863)	(0,407; 0,669; 1,020)	(0,454; 0,852; 1,248)	(0,983; 1,904; 2,793)
B_7	(0,228; 0,303; 0,493)	(0,281; 0,375; 0,609)	(0,384; 0,569; 0,912)	(0,653; 1,075; 1,802)
	B_5	B_6	B_7	
B_1	(2,055; 3,718; 5,064)	(1,201; 1,746; 2,443)	(2,255; 3,304; 4,379)	
B_2	(1,622; 3,209; 4,576)	(0,981; 1,494; 2,459)	(1,642; 2,664; 3,556)	
B_3	(1,414; 2,756; 4,409)	(0,801; 1,289; 2,200)	(1,097; 1,756; 2,601)	
B_4	(0,635; 1,119; 1,876)	(0,358; 0,525; 0,935)	(0,555; 0,930; 1,532)	
B_5	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,627; 1,009; 1,578)	(0,968; 1,527; 2,296)	
B_6	(0,634; 0,991; 1,595)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,993; 1,641; 2,803)	
B_7	(0,436; 0,655; 1,033)	(0,357; 0,609; 1,008)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.34. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Могућности*, укупно

<i>Могућности</i> <i>Opportunities</i>	O_1	O_2	O_3
O_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,211; 2,137; 2,842)	(0,921; 1,317; 1,785)
O_2	(0,352; 0,468; 0,826)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,463; 0,651; 0,969)
O_3	(0,567; 0,759; 1,120)	(1,032; 1,535; 2,158)	(1,000; 1,000; 1,000)

Табела 5.35. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Трошкови*, укупно

<i>Трошак</i> <i>Costs</i>	C_1	C_2	C_3
C_1	(1,000; 1,000; 1,000)	(1,340; 2,470; 3,481)	(1,766; 2,932; 4,094)
C_2	(0,287; 0,405; 0,746)	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,518; 0,937; 1,598)
C_3	(0,244; 0,341; 0,566)	(0,626; 1,067; 1,930)	(1,000; 1,000; 1,000)
C_4	(0,245; 0,386; 0,770)	(0,647; 1,083; 1,716)	(0,808; 1,249; 1,764)
C_5	(0,689; 1,164; 1,808)	(1,483; 3,199; 5,209)	(2,205; 3,409; 4,619)
	C_4	C_5	
C_1	(1,299; 2,592; 4,074)	(0,469; 0,859; 1,260)	
C_2	(0,625; 0,924; 1,544)	(0,191; 0,313; 0,652)	
C_3	(0,567; 0,801; 1,238)	(0,221; 0,293; 0,592)	
C_4	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,208; 0,281; 0,479)	
C_5	(2,082; 3,560; 4,890)	(1,000; 1,000; 1,000)	

Табела 5.36. Фази поређење по паровима за критеријуме према аспекту одлуке *Ризици*, укупно

<i>Ризик</i> <i>Risks</i>	R_1	R_2
R_2	(1,000; 1,000; 1,000)	(0,317; 0,510; 1,017)
R_2	(1,070; 1,960; 3,290)	(1,000; 1,000; 1,000)

Према поступку приказаном у поглављу 5.5, користећи формуле (5.2) до (5.4) добијене су вредности фази тежина *BOCR* аспеката одлуке b , o , c , r , као и фази тежине критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке w_{M_j} . Ове вредности приказане су у табели 5.37.

Табела 5.37. Фази тежине *BOCR* аспеката одлуке и критеријума у односу на одговарајући надређени аспект одлуке, укупно

Фази тежине <i>BOCR</i> аспеката одлуке	Критеријуми		Фази тежине критеријума према надређеном <i>BOCR</i> аспекту одлуке $w_{M_j}, j=1, \dots, n$
B $b=(0,148; 0,363; 0,816)$	B_1	Тачност	(0,017; 0,099; 0,480)
	B_2	Поузданост	(0,014; 0,079; 0,398)
	B_3	Покривеност	(0,010; 0,058; 0,313)
	B_4	Знање и искуство	(0,005; 0,026; 0,140)
	B_5	Резолуција	(0,006; 0,031; 0,163)
	B_6	Компатибилност	(0,008; 0,044; 0,225)
	B_7	Трајност	(0,005; 0,026; 0,136)
O $o=(0,104; 0,225; 0,504)$	O_1	Функционалност	(0,026; 0,101; 0,373)
	O_2	Проширење зоне детекције	(0,015; 0,048; 0,186)
	O_3	Проширење примене	(0,021; 0,076; 0,285)
C $c=(0,113; 0,260; 0,604)$	C_1	Трошкови набавке	(0,014; 0,077; 0,389)
	C_2	Трошкови монтаже	(0,006; 0,028; 0,157)
	C_3	Трошкови енергије	(0,006; 0,027; 0,150)
	C_4	Трошкови комуникације	(0,007; 0,031; 0,161)
	C_5	Трошкови одржавања	(0,018; 0,097; 0,493)
R $r=(0,079; 0,152; 0,328)$	R_1	Отпорност на уништење	(0,017; 0,051; 0,196)
	R_2	Осетљивост на временске услове	(0,026; 0,101; 0,416)

Користећи матрице приказане у табели 5.32, као и матрице поређења критеријума према надређеним аспектима одлуке приказаним у табелама 5.33.-5.36, сагласно са формулом (5.5) израчунате су вредности фази оцена алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке. Ове вредности приказане су у табели 5.38.

Табела 5.38. Фази тежине алтернатива према *BOCR* аспектима одлуке $w_{A_i}^M$, $M=B, O, C, R$, укупно

	B	O	C	R
A_1	(0,006; 0,083; 1,032)	(0,005; 0,044; 0,408)	(0,009; 0,099; 1,078)	(0,005; 0,050; 0,449)
A_2	(0,006; 0,067; 0,713)	(0,003; 0,025; 0,259)	(0,002; 0,023; 0,289)	(0,003; 0,018; 0,194)
A_3	(0,005; 0,061; 0,740)	(0,004; 0,033; 0,269)	(0,004; 0,054; 0,695)	(0,005; 0,035; 0,305)
A_4	(0,006; 0,081; 1,063)	(0,005; 0,039; 0,358)	(0,003; 0,037; 0,472)	(0,005; 0,035; 0,305)
A_5	(0,006; 0,071; 0,832)	(0,009; 0,083; 0,735)	(0,004; 0,047; 0,622)	(0,003; 0,014; 0,110)

Фази приоритет алтернатива S_i , $S_i = (S_{il}, S_{is}, S_{id})$, добијен је на основу једначине (5.6). Он је затим дефазификован применом релације (5.7) и добијена је интегрисана оцењена средња вредност ($W(S_i)$) за сваку од алтернатива. Ове вредности приказане су у табели 5.39.

Табела 5.39. Фази приоритет алтернатива, укупно

Алтернатива	Сензорска технологија	Фази приоритет алтернатива S_i	<i>Crisp</i> вредност $W(S_i)$	Коначни ранг алтернативе
A_1	Индуктивна петља	(0,0001; 0,0070; 0,2496)	0,0463	4
A_2	Активни инфрацрвени	(0,0007; 0,0210; 0,4746)	0,0932	3
A_3	Пасивни инфрацрвени	(0,0003; 0,0100; 0,2197)	0,0433	5
A_4	Микроталасни радар	(0,0006; 0,0234; 0,6627)	0,1262	2
A_5	Видео сензор	(0,0011; 0,0303; 0,6377)	0,1266	1

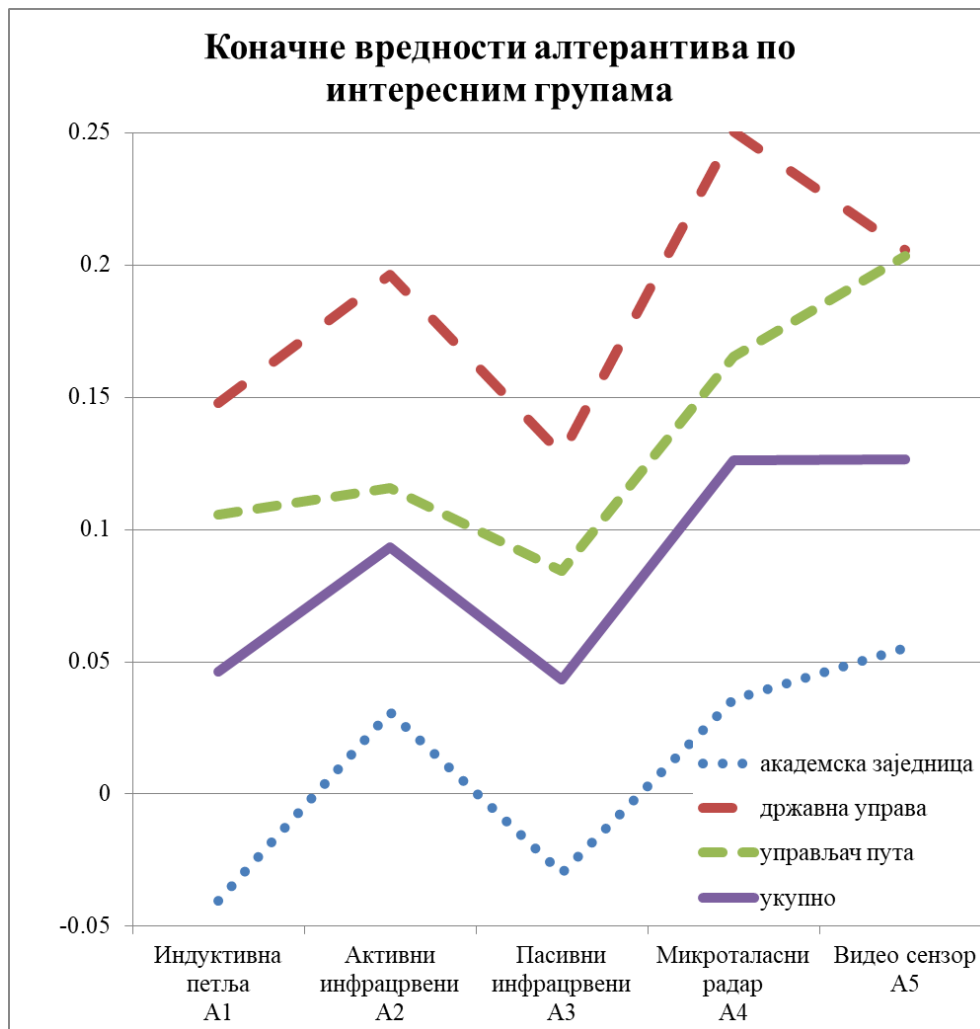
Коначни редослед рангирања сензорских технологија по избору свих експерата је: видео сензор, микроталасни радар, активни инфрацрвени сензор, индуктивна петља, пасивни инфрацрвени сензор.

5.6.5. Поређење коначних вредности избора алтернатива

У наставку је приказан упоредни преглед коначних вредности избора алтернатива сензорских технологија, са становишта различитих интересних група. У табели 5.40 и на слици 5.8. приказане су дискретне (*crisp*) вредности приоритета алтернатива.

Табела 5.40. Упоредни преглед коначних вредности алтернатива за различите интересне групе

Алтернатива	Сензорска технологија	<i>Crisp</i> вредност $W(S_i)$			укупно
		академска заједница	државна управа	управљач пута	
A_1	Индуктивна петља	-0,0403	0,1479	0,1058	0,0463
A_2	Активни инфрацрвени	0,0308	0,1964	0,1158	0,0932
A_3	Пасивни инфрацрвени	-0,0297	0,1285	0,0844	0,0433
A_4	Микроталасни радар	0,0357	0,2504	0,1652	0,1262
A_5	Видео сензор	0,0552	0,2058	0,2035	0,1266

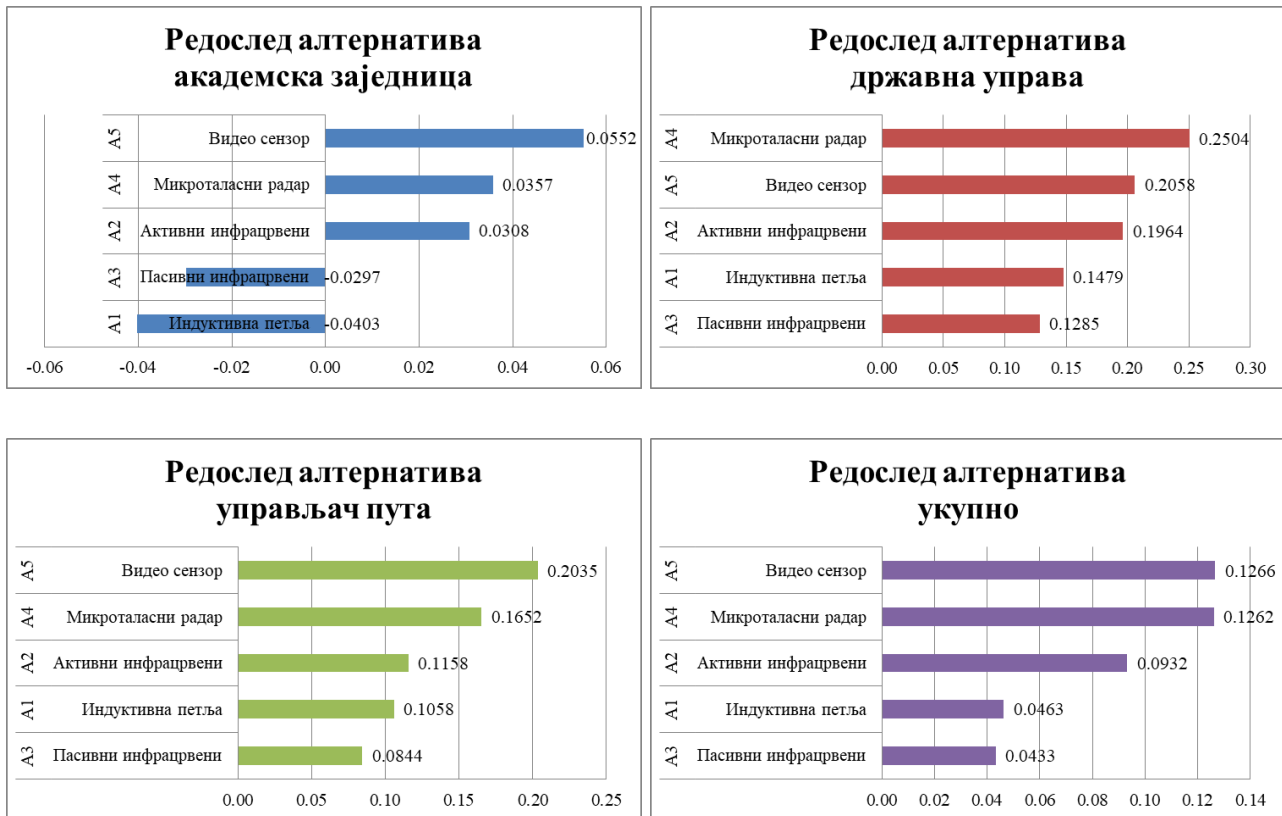


Слика 5.8. Упоредни приказ вредности алтернатива по интересним групама

Редослед алтернатива за појединачне интересне групе приказан је у табели 5.41 и на слици 5.9.

Табела 5.41. Редослед алтернатива за поједине интересне групе

ранг	академска заједница		државна управа		управљач пута		укупно	
	алт.	Сензорска технологија	алт.	Сензорска технологија	алт.	Сензорска технологија	алт.	Сензорска технологија
1	A ₅	Видео сензор	A ₄	Микроталасни радар	A ₅	Видео сензор	A ₅	Видео сензор
2	A ₄	Микроталасни радар	A ₅	Видео сензор	A ₄	Микроталасни радар	A ₄	Микроталасни радар
3	A ₂	Активни инфрацрвени	A ₂	Активни инфрацрвени	A ₂	Активни инфрацрвени	A ₂	Активни инфрацрвени
4	A ₃	Пасивни инфрацрвени	A ₁	Индуктивна петља	A ₁	Индуктивна петља	A ₁	Индуктивна петља
5	A ₁	Индуктивна петља	A ₃	Пасивни инфрацрвени	A ₃	Пасивни инфрацрвени	A ₃	Пасивни инфрацрвени



Слика 5.9. Редослед алтернатива за појединачне интересне групе

Анализом резултата може се закључити да се код свих интересних група на прва два места налазе технологије видео сензора и микроталасних радарских сензора, и притом је овај редослед код три од четири разматране групе такав да је видео сензор на првом месту. Такође, на последње две позиције налазе се индуктивна петља и пасивни инфрацрвени сензор, као две најлошије рангиране алтернативе. Пасивни инфрацрвени сензор је најлошије рангирана технологија код три од четири разматране групе стручњака.

6. ЛОЦИРАЊЕ СЕНЗОРА ЗА МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА САОБРАЋАЈНОГ ТОКА

6.1. Опис проблема

Планирање, пројектовање и управљање саобраћајним системима пред стручњаке поставља веома сложене задатке. Управљање саобраћајем на путевима, управљање на рампама аутопута, управљање путем светлосних сигнала, системи избора руте (енгл. *route guidance*), планирање саобраћаја, расподела саобраћаја на мрежи, рутирање возила, израда редова возње, главни су проблеми која утичу на нормални ток саобраћаја. Комплексни саобраћајни и транспортни проблеми захтевају развој и примену савремених интелигентних система који обједињују знања, технике и методологије из различитих научних области. Подаци о саобраћају, који се односе на проток и брзину, веома су важни улазни подаци за такве интелигентне системе. Најподеснији начин добијања ових података јесте помоћу сензора инсталираних дуж транспортне мреже. Подаци прикупљени помоћу сензора могу да се користе у различите сврхе: брзо и успешно откривање саобраћајних незгода и загушења која оне изазивају, процену времена путовања или прецизно мерење брзине возила. Квалитет прикупљених података у великој мери зависи од локација сензора на транспортној мрежи. Сензори морају да буду постављени тако да могу успешно да опонашају услове саобраћаја на делу мреже, деоници пута или аутопута.

Оптимално лоцирање сензора за мерење саобраћајног тока спада у класу комбинаторних проблема, те је у дисертацији коришћена метахеуристика Оптимизација колонијом пчела (енгл. *Bee Colony Optimization - BCO*). Алгоритам је инспирисан понашањем пчела у природи и појављује се у литератури у две верзије: конструктивној (*Teodorović* и сар, 2010; *Šelmić* и сар, 2010; *Dimitrijević* и сар, 2012) и *improvement* верзији (*Davidović* и сар, 2011; *Nikolić* и *Teodorović* 2013b, 2014, 2015). Конструктивна варијанта *BCO* алгоритма, примењена на проблем одређивања локација детектора, представљена је у (*Teodorović* и сар, 2010). У тој варијанти пчеле граде решења итеративно кроз кораке алгоритма. Наиме, у сваком лету унапред пчеле додају нове локације детектора парцијалним решењима, и кроз кораке се конструишу комплетна решења. За разлику од конструктивне варијанте, у *BCOi* варијанти алгоритма, пчелама се на почетку додељују комплетна решења која се модификују кроз итерације. *BCOi* концепт раније није био коришћен за одређивање оптималних локација сензора. Обе варијанте *BCO* алгоритма детаљно су описане у поглављу 4. Како би се решење добијено *BCOi* метахеуристичком валидирало, у дисертацији је примењено и Симулирано каљење, као један од познатијих алата из групе техника Рачунарске интелигенције.

Предложени модел минимизира грешку у процени времена путовања, узимајући у обзир ограничења расположивог капитала. Приказана методологија може да се примени на путевима без претходно постављених сензора, као и на путевима на којима већ постоје инсталирани сензори. Методологија, такође, идентификује критичне локације сензора чије је редовно одржавање кључно са становишта тачног прикупљања података за потребе прецизног оцењивања времена путовања. Изведени нумерички експерименти показују ефикасност предложеног алата. Приказани модел је општи и може се применити у различитим саобраћајним мрежама. За нумеричку процену и тестирање коришћена је студија случаја о карактеристикама саобраћајног тока на саобраћајној деоници Ибарске магистрале (Државни пут ИБ 22) у близини Београда.

6.2 Преглед релевантне литературе

„Време путовања, као параметар саобраћајног тока, представља средњу вредност времена путовања свих возила посматраног саобраћајног тока преко посматраног одсека пута” (Кузовић, 1987). Време путовања је време потребно да се неким видом превоза, дуж одређене путање, дође из једне у другу тачку. С друге стране, време путовања је једноставан термин који разуме широк спектар публике, од стручњака као што су саобраћајни инжењери и планери, државна администрација, па до корисника транспортног система као што су пословни људи, путници, представници медија, потрошачи итд.

Саобраћајни инжењери проучавају време путовања и временске губитке још од краја 1920-их година (Turner и сар, 1998). У новије време, проучавање времена путовања постаје посебно значајно из потребе за подацима у реалном времену, за управљање саобраћајним загушењима, њиховим предвиђањем, информисањем корисника, вођењем корисника по мрежи како би избегли евентуално загушење итд.

Два главна питања која су у вези с временом путовања јесу његова процена и прогноза. Ова два термина у литератури се међусобно разликују. Алгоритми израчунавају процене времена путовања дуж неке руте, за путовања која су се већ завршила, користећи прикупљене податке. С друге стране, у алгоритмима прогнозе (предвиђања) укључена је временска променљива, па се користе подаци из прошлости и садашњости, да се предвиди време путовања у будућности (Mori и сар, 2015).

Процена, као и предвиђање времена путовања, веома су корисни за напредне системе управљања саобраћајем и информисања корисника, и веома детаљно проучавани у литератури.

Многе студије бавиле су се техникама и алгоритмима процене времена путовања на деоницама путева. Уочавају се три основна приступа процени времена путовања.

Прва група метода користи податке прикупљене помоћу разних врста уређаја. Технологија је напредовала, па многи уређаји могу директно да мере времена путовања, као што су нпр. паметни телефони, АVI читачи, или други слични уређаји (Deniz и сар, 2013). Недостатак ове групе метода је шум у подацима услед грешке у геолоцирању, проблем приватности због коришћења информација с приватних паметних телефона, и високи трошкови.

Друга група метода обухвата моделе засноване на теорији саобраћајног тока (Nam и Drew, 1996; Paterson и Rose, 2008; Celikoglu, 2013a; 2013b; 2014). Предност ових метода је у томе што могу да забележе динамичке карактеристике саобраћајног тока (промене основних показатеља саобраћајног тока: брзина, густина, проток током времена). Основни недостатак ових метода је потреба за калибрацијом параметара, како би могле да се користе теоријске основе. Како би се то постигло, потребан је висок ниво знања из области теорије саобраћајног тока, што у локалним срединама није увек присутно.

Трећа група метода јесу модели засновани на трајекторијама, који користе тренутне брзине на пресеку пута како би се израчунало време путовања (Sun и сар, 2008; Li и сар, 2006; Kianfar и Edara, 2010). Метода процене времена путовања која се користи у дисертацији спада у трећу групу метода за процену времена путовања.

Добар преглед техника за мерење, процену и предвиђање времена путовања дат је у раду Mori и сар, (2015). Детаљно су описани сензори и други уређаји који се користе за директно мерење времена путовања, као и остали уређаји који прикупљају друге врсте информација на основу

којих се може проценити време путовања. Такође су приказане и методе за предвиђање времена путовања.

Проблем одређивања локација сензора на транспортној мрежи припада проблемима Теорије локације. Основни проблем Теорије локације представља избор једне или више локација у простору, под условом да се задовоље неки критеријуми који су унапред дефинисани. Последње четири деценије објављени су бројни радови који решавају проблеме лоцирања објеката на транспортној мрежи. Решавање ових локацијских проблема представља помоћ приликом доношења стратешких одлука када су потребна улагања значајних, а притом ограничених финансијских средстава, водећи рачуна и о другим ограничењима, као што су географска, урбанистичка, или друга. Теорија локације покушава да пронађе одговоре на следећа питања (Teodorović, 2007): (1) Колики треба да буде укупан број објеката на мрежи; (2) Где треба да буду лоцирани објекти; (3) Како извршити алокацију клијената по појединачним објектима (одредити скуп клијената који ће бити опслужен на сваком конкретном објекту).

Инфраструктурни објекти од значаја за дисертацију јесу сензори саобраћајног тока. Са становишта примене техника операционих истраживања и вештачке интелигенције за лоцирање објеката на транспортним мрежама, у детаљном прегледу литературе нарочито су истражена следећа подручја примене: (1) лоцирање сензора за оцену И-Ц (извор-циљ) матрица кретања; (2) лоцирање AVI читача за потребе процене времена путовања и (3) лоцирање сензора за минимизацију одступања процењеног времена путовања и друштвених трошкова.

Проблем оптималних локација за бројање саобраћаја проучавали су, између осталих, Yang и Zhou (1998). Аутори су предложили модел заснован на целобројном програмирању и прождрљивом хеуристичком алгоритму (енгл. *heuristic greedy algorithm*) за одређивање оптималних локација бројача на мрежи, за добијање бољих И-Ц матрица путовања. Исти проблем истраживали су и Ehlert и сарадници (2006). Они су предложили два проширења претходне формулације, као и коришћење мешовитог целобројног програмирања за добијање оптималних локација бројача. Hu и сарадници (2009) идентификовали су најмањи подскуп линкова на мрежи на које је потребно поставити сензоре како би се добила тачна оцена протока на свим линковима на мрежи, у стабилним условима саобраћајног тока. Предложени приступ не захтева никакве друге претпоставке у смислу познавања И-Ц токова, путања кроз мрежу, понашања возача у вези с избором руте, правила расподеле саобраћаја на мрежу и слично. Аутори су детаљно изложили теоријску основу и математичке особине предложеног модела.

Teodorović и сарадници (2002) предложили су примену генетског алгоритма за добијање оптималних локација AVI читача за потребе добијања тачних информација о временима путовања на мрежи. Sherali и сарадници (2006) такође су изучавали проблем оптималних локација AVI читача. Аутори су проблем формулисали као квадратни 0-1 оптимизациони проблем и решили га користећи *reformulation-linearization* технику, у комбинацији са семидефинитним програмирањем (енгл. *semidefinite programming*).

Chan и Lam (2002) развили су модел са два нивоа, како би одредили густину сензора за мерење времена путовања, на мрежи на којој се возачима пружају информације путем система вођења по мрежи (енгл. *route guidance*). Први ниво представља пробит модел расподеле саобраћаја на мрежи, док се други ниво проблема односи на одређивање густине сензора како би се минимизирало одступање предвиђеног времена путовања као и друштвени трошак уградње сензора. За нумеричко тестирање овог модела коришћени су подаци с Tuен Mun коридора у Хонг Конгу.

Eisenman и сарадници (2006) користе процену и прогнозу саобраћаја на мрежи у реалном времену, добијену на основу симулације, како би проучили различите нивое детекције и различите локације сензора у саобраћајној мрежи. Коришћени систем заснован је на методологији динамичке расподеле саобраћаја на мрежи (енгл. *dynamic traffic assignment*) и примењен на делу *Chesapeake Highway Advisories Routing Traffic (CHART)* мреже између Вашингтона и Балтимора у САД. Аутори су извршили и анализу осетљивости квалитета процене и прогнозе помоћу *DYNASMART-X* система динамичке расподеле саобраћаја на мрежи у реалном времену.

Bianco и сарадници (2006) одредили су најмањи број сензора за бројање саобраћаја на чворовима мреже, како би се одредио проток на свим гранама мреже. Аутори су доказали да је овај проблем лоцирања сензора *NP*-комплетан проблем. *Fujito* и сарадници (2006) спровели су емпиријску студију утицаја растојања између сензора на прорачун времена путовања дуж коридора ауто-пута, на једном коридору у Синсинатију и четири коридора у Атланти у САД.

Bartin и сарадници (2007) су анализирали проблем проналажења оптималне конфигурације система за надзор на деоници пута, за потребе прецизне процене времена путовања. Аутори су предложили кластеровање података о трајекторијама на простор-време дијаграму. Још једна методологија, заснована на кластеровању, приказана је у раду *Kianfar* и *Edara* (2010) за одређивање локација сензора на ауто-путевима за процену времена. Деонице ауто-пута кластероване су на основу података о брзинама, и суседне деонице с истим профилима брзина груписане су у исти кластер. На реалним подацима с три деонице ауто-пута у Вирџинији примењен је *k-means* алгоритам кластеровања у спрези с хијерархијским кластеровањем.

Edara и сарадници (2008) истраживали су оптимално лоцирање сензора на ауто-путевима у Вирџинији. Користили су генетске алгоритме и добили веома охрабрујуће резултате. *Edara* и сарадници (2011) развили су методологију за подршку одлучивању приликом одабира оптималних локација сензора на коридору ауто-пута, како би се минимизирала грешка у предвиђању времена путовања. У овом раду је такође коришћена хеуристичка техника претраживања заснована на генетским алгоритмима, која се показала ефикасном у одређивању пожељних локација сензора за изабрани циљ.

Van и сарадници (2009) представили су оквир и алгоритам за добијање полиномног решења за одређивање оптималних локација сензора који се користе за израчунавање времена путовања на ауто-путу. Аутори су увели функцију циља која минимизира одступање процењеног и стварног времена путовања на свим појединачним деоницама ауто-пута. Проблем је формулисан као модел динамичког програмирања и решен проналажењем најкраћег пута у ацикличном графу.

Teodorović и сарадници (2010) проширили су резултате *Edara* и сар, (2008) и тестирали су конструктивну варијанту *BCO* на истом скупу података. Делови ових резултата објављени су у докторској дисертацији др Шелмић „Лоцирање објеката на транспортним мрежама применом метода рачунарске интелигенције” (2011).

Liu и *Danczyk* (2009) предложили су модел нелинеарног целобројног програмирања за одређивање локација тачкастих сензора (као што су индуктивне петље) на једносмерној деоници ауто-пута, с циљем оптимизације тачности идентификације уских грла у зависности од расположивих ресурса и новчаних ограничења. Из разлога нелинеарности, за решавање проблема коришћени су генетски алгоритми. У свом каснијем раду, аутори *Danczyk* и *Liu* (2011) трансформисали су модел нелинеарног програмирања у модел мешовитог целобројног линеарног програмирања. Показало се да овај линеаризовани модел има графичку интерпретацију и да може да се реши алгоритмима за налажење најкраћег пута с ограниченим

ресурсима. Аутори су предложили прилагођену технику гранања и ограничења (енгл. *Branch-and-Bound*) за решавање проблема најкраћег пута с ограниченим ресурсима.

Kim и сарадници (2011) предложили су приступ којим се оптимизирају локације сензора на ауто-путу, а који подржава већу прецизност прогнозе времена путовања од оне која се, конвенционално добија путем фиксних тачкастих сензора. Аутори су користили генетске алгоритме и под променљивим условима саобраћаја показали су да се предложеним приступом постиже просечна грешка предвиђања времена путовања испод 10% као и да се добијају много бољи резултати у односу на конвенционалну методу.

На основу овог прегледа литературе може се закључити да се бројни радови баве проблемом проналажења оптималних локација сензора на транспортним мрежама. Аутори су примењивали различите технике за решавање овог комбинаторног проблема. Може се приметити да коришћење метахеуристика није широко распрострањено, изузев генетских алгоритама (*Edara* и сар, 2008; *Liu* и *Danczyk* 2009; *Edara* и сар, 2011; *Kim* и сар, 2011) и конструктивне варијанте *BCO* (*Teodorović* и сар, 2010). Насупрот конструктивној варијанти *BCO* алгоритма коришћеној у раду *Teodorović* и сар, (2010), у дисертацији је предложена варијанта *BCO* алгоритма заснована на побољшању решења – *BCOi*.

Конструктивна варијанта *BCO* алгоритма, као прва предложена варијанта, примењивана је успешно на низу проблема комбинаторне оптимизације. Међутим, с повећањем димензија проблема, конструктивна варијанта није успевала да остане компетитивна с најбољим резултатима постигнутим у литератури (*Teodorović* и сар, 2010; *Davidović* и сар, 2011). Последњих година *BCOi* варијанта алгоритма упоређивана је са другим метахеуристичким приступима, као што су: генетски алгоритми, симулирано каљење, оптимизација групом честица, табу претраживање и претраживање засновано на променљивој околини. Добијени резултати показују да је *BCOi* конкурентна са другим методама, и надмашује их у следећим случајевима:

- Решавање проблема p -центра (у поређењу с конструктивном варијантом *BCO* – *Davidović* и сар, 2011);
- Решавање бенчмарк функција (у поређењу с генетским алгоритмима, табу претраживањем, оптимизацијом групом честица, диференцијалном еволуцијом, *Artificial Bee Colony* алгоритмом – *Nikolić* и *Teodorović*, 2013a);
- Проблем формирања мреже линија јавног превоза (у поређењу са генетским алгоритмима, табу претраживањем, симулираним каљењем – *Nikolić* и *Teodorović*, 2013b);
- Управљање поремећајима у јавном превозу (у поређењу са симулираним каљењем – *Nikolić* и сар, 2015);
- Управљање саобраћајем у градским зонама (у поређењу са симулираним каљењем – *Jovanović* и сар, 2017).

Један од основних мотива дисертације јесте да се истраже могућности *BCOi* за решавање проблема лоцирања сензора за мерење параметара саобраћајног тока, и да се модел тестира на реалним подацима прикупљеним на путу у Републици Србији.

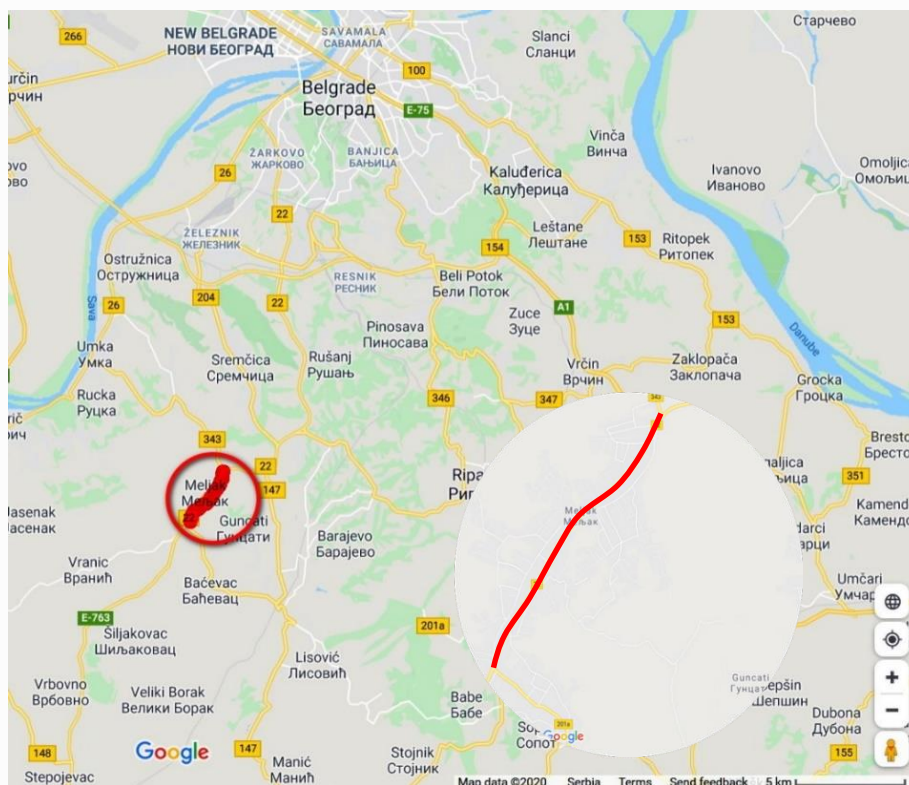
6.3 Прикупљање и обрада података

Последњих година *GPS* технологија постала је доступна широком кругу корисника, јер већина мобилних телефона поседује ову опцију. Основни подаци које бележи сваки *GPS* уређај су тренутна позиција у смислу географске ширине и дужине, као и времена када су исти подаци снимљени. Најчешће је интервал снимања једна секунда. На тај начин се, снимањем

узастопних података, сваке секунде, добија низ позиција на којима се *GPS* уређај налази. Из оваквог низа података могуће је добити вредности брзина. Ове брзине, блиске тренутним, заправо су просечне брзине на растојању које је *GPS* уређај прешао за временски интервал од једне секунде. Неки *GPS* уређаји имају могућност директног пружања и података о тренутним брзинама, где се за прорачун брзине користи Доплеров ефекат, и ове вредности очитаних брзина нису зависне од прорачуна тренутне позиције *GPS* уређаја (Vidas, 2017).

За потребе мерења брзина у оквиру истраживања коришћено је тест возило, опремљено *GPS* уређајем *Garmin GPSMAP 64s*. За мерење брзина, коришћена је метода плутајућег возила. Плутајуће возило се кроз саобраћајни ток креће опонашајући друга возила у саобраћајном току. У том смислу, возач се труди да претекне једнак број возила оном броју возила која су њега претекла. Возило се укључује у саобраћајни ток око $400m$ пре почетка деонице на којој се врши снимање, како би се обезбедило да пре започињања снимања возило достигне брзину саобраћајног тока. Током кретања бележе се подаци о позицији и брзини возила сваке секунде, све до завршетка деонице. Снимање је обављано у оба смера у времену вршног и ванвршног саобраћајног оптерећења. Од марта до априла 2015. године обављено је укупно 200 возњи, по 100 у сваком смеру. Како би се обезбедила слична прецизност *GPS* уређаја, снимања су вршена за сунчаних дана, како облаци не би утицали на смањену прецизност резултата мерења. Подаци коришћени у дисертацији прикупљени су за потребе израде докторске дисертације Vidas (2017).

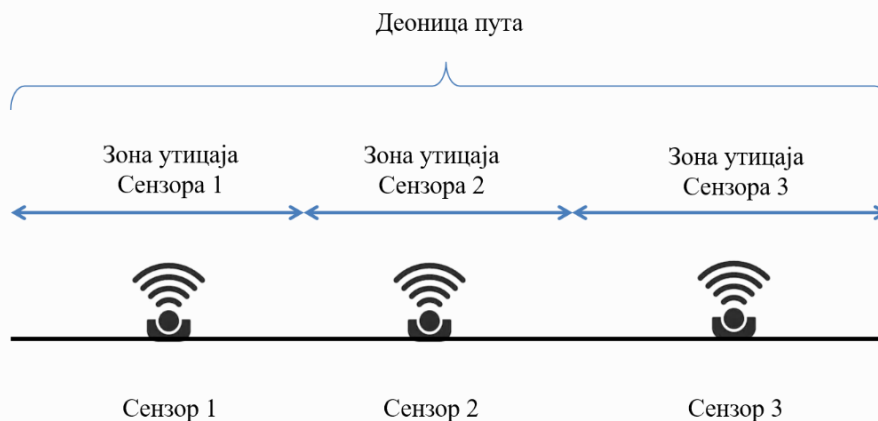
Подаци су прикупљани на деоници Ибарске магистрале у дужини од $3000m$. Ибарска магистрала је пут *IB* реда, и у референтном систему путева у Србији носи број 22. Ибарска магистрала спаја Београд са Чачком, и даље преко пута 23 са Републиком Црном Гором, део је европског пута *E-763*. Деоница од интереса за дисертацију је деоница која пролази кроз Мељак, од скретања за Велику Моштаницу до скретања за Баћевац. Деоница се налази у приградској београдској општини Барајево, и од центра Београда удаљена је око $20km$. Посматрана деоница приказана је на слици 6.1.



Слика 6.1. Деоница Велика Моштаница – Мељак

6.4 Формирање критеријумске функције (дефинисање математичког модела)

Edara и сарадници (2008) дефинисали су две ознаке за време путовања на деоници пута: стварно време путовања (енгл. *Ground Truth Travel Time - GTTT*) и оцењено време путовања (енгл. *Estimated Travel Time - ETT*). Израчунавање *GTTT* је једноставно. Разлика времена изласка и уласка на деоницу за појединачно плутајуће, тест, возило чини његово стварно време путовања *GTTT*. Оцењено време путовања израчунава се помоћу вредности брзина које мере сензори распоређени на деоници пута. Целокупна деоница је подељена на „зоне утицаја” појединачних сензора (енгл. *Zone of Influence - ZOI*). Оцењено време путовања за целокупну деоницу једнако је збиру оцењених времена путовања за сваку појединачну зону утицаја сензора. Зона утицаја једног сензора дефинише се као половина растојања до суседног детектора, како уз, тако и низ саобраћајни ток. Пример зона утицаја три сензора на деоници пута приказан је на слици 6.2.



Слика 6.2. Зоне утицаја сензора на деоници пута

У предложеном моделу претпостављено је да је брзина коју мери сензор приближно једнака просечној брзини унутар целе зоне утицаја једног сензора. Што је дужина зоне утицаја већа, то ће бити веће разлике у брзинама унутар зоне утицаја. Како би се поједноставио модел, претпостављено је да су брзине константне унутар релативно малог растојања које чини зона утицаја једног сензора, и за израчунавање се користи средња временска брзина (*Turner* и сар, 1998).

Брзина на локацији на којој се налази сензор рачуна се на начин описан у наставку. За сваку локацију сензора дефинише се одређени број *GPS* тачака. Брзине које је остварило тест возило у свим тачкама које се налазе унутар зоне утицаја сензора упросече се да би се добила просечна брзина за дати сензор за дато тест возило. Након тога брзине се упросече и за различита тест возила, како би се добила брзина за одговарајућу локацију сензора.

Када се вредност дужине зоне утицаја подели с одговарајућом просечном брзином, за ту зону утицаја добија се процењено време путовања за једну зону утицаја. Сабирањем процењених времена путовања на свим зонама утицаја које чине деоницу пута, добија се процењено време путовања на целој деоници.

Уведене су следеће ознаке:

- n – број сензора на деоници пута (једнак је броју зона утицаја)
- i – индекс i -тог сензора $i=1, \dots, n$
- x_{PLi} – потенцијална локација i -тог сензора, мерена од почетка деонице (променљива у функцији циља)
- L – дужина деонице
- k – индекс који броји тест вожње
- K – број тест вожњи, $k=1, \dots, K$
- ZOI_i – дужина зоне утицаја i -тог сензора ($\sum_{i=1}^n ZOI_i = L$)
- V_i – брзина одређена i -тим сензором
- TT_i – време путовања (од енгл. *travel time*) за сваку i -ту зону утицаја ZOI_i ($TT_i = \frac{ZOI_i}{V_i}$)
- ETT – процењено време путовања (од енгл. *estimated travel time*) за целу деоницу пута ($ETT = \sum_{i=1}^n TT_i$)
- $GTTT$ – стварно време путовања за целу деоницу пута
- ε – грешка процене времена путовања.

Дужина зоне утицаја i -тог сензора, ZOI_i , може да се изрази преко променљивих x_{PLi} на следећи начин:

$$ZOI_i = \begin{cases} \frac{x_{PL_1} + x_{PL_2}}{2} & \text{за } i = 1 \\ \frac{x_{PL_{i+1}} - x_{PL_{i-1}}}{2} & \text{за } i = 2, 3, \dots, n-1 \\ L - \frac{x_{PL_n} + x_{PL_{n-1}}}{2} & \text{за } i = n \end{cases} \quad (6.1)$$

Циљ је пронаћи потенцијалне локације сензора на деоници пута x_{PLi} , тако да се минимизира грешка процене времена путовања ε .

$$\varepsilon = |ETT - GTTT| = \left| \sum_{i=1}^n TT_i - GTTT \right| \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = \left| \sum_{i=1}^n \frac{ZOI_i}{V_i} - GTTT \right| \quad (6.3)$$

Релативна грешка износи:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{GTTT} \quad (6.4)$$

Кумулативна релативна грешка ε_{CRE} рачуна се као у изразу:

$$\varepsilon_{CRE} = \sum_{k=1}^K \frac{\varepsilon_k}{GTTT_k} \quad (6.5)$$

где је:

- ε_k – грешка процене времена путовања за k -ту тест вожњу,
- $GTTT_k$ – стварно време путовања дуж целе деонице пута, за k -ту тест вожњу.

Замењујући релације (6.1), (6.2), (6.3) и (6.4) у релацију (6.5) добија се коначни израз за кумулативну релативну грешку ε_{CRE} . Овако добијена функција циља приказана је релацијом (6.6).

Задатак оптимизације гласи (Edara и сар, 2008): минимизирати

$$\varepsilon_{CRE} = \sum_{k=1}^K \left| \frac{\left(\frac{x_{PL_1} + x_{PL_2}}{2V_{1k}} \right) + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{x_{PL_{i+1}} - x_{PL_{i-1}}}{2V_{ik}} \right) + \left(\frac{L - \frac{x_{PL_n} + x_{PL_{n-1}}}{2}}{V_{nk}} \right) - GTTT_k}{GTTT_k} \right| \quad (6.6)$$

под условом да је:

$$x_{PL_i} \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (6.7)$$

где је V_{ik} брзина одређена i -тим сензором за k -ту тест возњу. Кумулативна релативна грешка представља функцију циља.

У једначини (6.6), бројиоци прва три сабирка представљају линеарну комбинацију променљивих x_{PL_i} . У имениоцима ових сабирака фигуришу брзине V_{ik} , које зависе од растојања x_{PL_i} . То значи да је функција циља нелинеарна функција непознатог растојања x_{PL_i} .

Практично, функција циља представља кумулативну релативну грешку процене времена путовања, за целу деоницу пута, тј. за све позиције сензора и све возње тест возила. Ову вредност је потребно минимизирати, уз ограничење да су вредности потенцијалних локација сензора x_{PL_i} из скупа природних бројева.

Проблем описан релацијама (6.6) - (6.7), по својој природи представља проблем комбинаторне оптимизације.

6.5 Примена BCO_i на датом проблему

За решавање проблема лоцирања сензора на деоници пута у дисертацији је коришћена метахеуристика Оптимизација колонијом пчела, и то њена варијанта заснована на побољшању решења, BCO_i . У наставку ће бити описан начин на који је BCO_i метахеуристика прилагођена конкретном проблему. На почетку алгоритма потребно је генерисати почетно, комплетно, решење. Ово почетно решење пчеле модификују кроз итерације алгоритма. У оквиру сваке итерације пчеле обављају NP летова унапред и тада се врши модификација решења. Приликом лета уназад, пчеле доносе одлуке да ли ће остати лојалне сопственом решењу, или ће се придружити некој другој пчели. Детаљан опис примене BCO_i описан је у поглављу 4 дисертације (4.1.5.1.2).

Прилагођавање BCO_i алгоритма конкретном проблему захтева три корака (Jovanović и сар, 2019).

Први корак представља одређивање скупа потенцијалних локација сензора, као и одређивање вредности брзина у тим тачкама, а добијених на основу мерења тест возилима. Овај део

прорачуна који обухвата припрему података обавља се офлајн, како би се смањило *CPU* време потребно за извршавање самог алгорита у реалном времену.

Други корак представља генерисање почетног решења. Потребно је генерисати једно допустиво, комплетно решење које ће се касније модификовати кроз итерације. Ово је уобичајен корак код већине хеуристичких алгоритама, и представља формирање почетног решења од којег се алгоритам креће према најбољем могућем (потенцијално и оптималном) решењу.

Коначно, трећи корак представља формирање поступка модификације решења, које ће алгоритам довести до најбољег могућег решења. Други и трећи корак обављају се у реалном времену извршавања алгорита и улазе у обрачун укупног потребног *CPU* времена.

Структура улазних података приказана је у табели 6.1

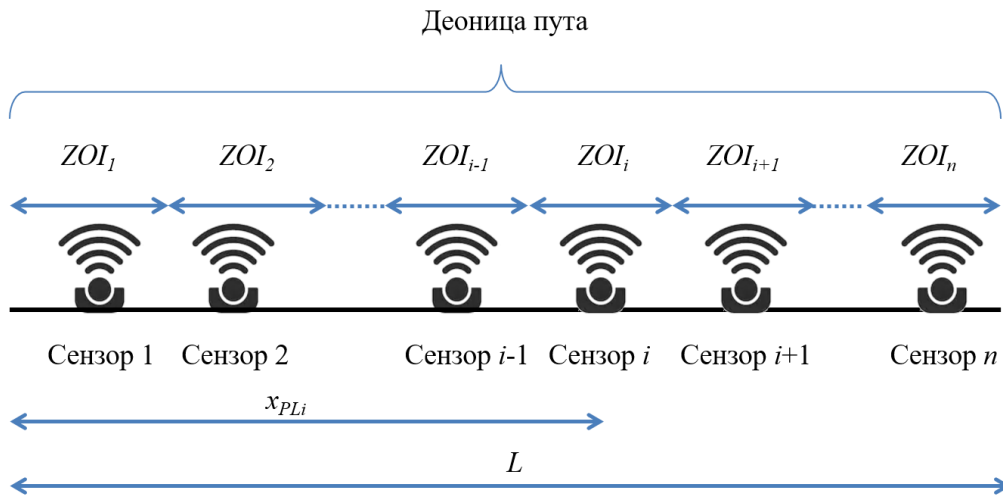
Табела 6.1. Структура улазних података

Ознака	Опис улазног податка
L	Дужина деонице
n	Број сензора које треба распоредити
m	Број потенцијалних локација сензора
PL_i	Потенцијална локација i -тог сензора
K	Број тест возњи
IT	Број итерација алгорита ВСО
NP	Број летова унапред у једној итерацији алгорита
NC	Број модификација решења у сваком лету унапред
B	Број пчела

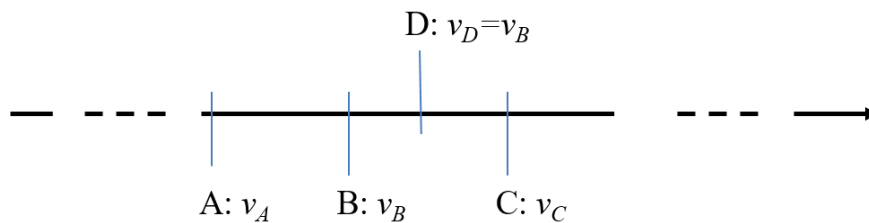
6.5.1 Одређивање потенцијалних локација сензора и вредности брзина у тим тачкама

На деоницу пута дужине L распоређује се n сензора. Они се могу поставити на неку од укупно m претходно одређених потенцијалних локација. На тај начин се деоница пута дискретизује, сензори се могу поставити само на унапред одређене тачке. У дисертацији је разматрано да се суседне потенцијалне локације сензора налазе на једнаком међусобном растојању. Ово практично значи да је размак између суседних потенцијалних локација константан и једнак $d=L/m$. Прва потенцијална локација сензора налази се на $x_{PLi} = d/2$ од почетка деонице. Преостали сензори се могу наћи на некој од тачака удаљених од почетка деонице за $x_{PLi} = x_{PLi-1} + d$ ($i = 2, \dots, m$). Приказ потенцијалних локација сензора, њихових удаљености од почетка деонице и зона утицаја приказани су на слици 6.3.

Након што се одреде потенцијалне локације сензора, потребно је одредити брзине у тим тачкама. Ови подаци добијају се из вредности брзина измерених дуж деонице пута, помоћу плутајућих, тест возила. Брзина у потенцијалној локацији сензора једнака је последњој измереној вредности брзине. На слици 6.4. је приказан пример одређивања брзина у појединим тачкама. Нека су познате брзине у тачкама A , B и C , у смеру од A према C , које су представљене, редом, вредностима v_A , v_B и v_C . Нека је у тачки D потенцијална локација сензора. Брзина у тачки D биће једнака последњој измереној вредности брзине, односно $v_D=v_B$.



Слика 6.3. Дискретизација деонице пута



Слика 6.4. Пример добијања брзине на потенцијалној локацији сензора (тачка D)

6.5.2 Одређивање почетног решења

За разлику од конструктивне варијанте *BCO* где се пчелама на почетку алгоритма додељује почетно решење које чини само једна компонента комплетног решења, код варијанте Оптимизације колонијом пчела, засноване на побољшању решења, пчелама је потребно доделити комплетно решење као почетно. У дисертацији је примењена *BCOi* варијанта алгоритма, и претпостављено је да су на почетку одвијања процеса сензори равномерно лоцирани дуж деонице пута, односно да су њихова међусобна растојања једнака. Имајући у виду да је деоница пута дискретизована (слика 6.3), позиција првог сензора одређује се према релацији:

$$PL_1 = \left\lfloor \frac{m}{2n} \right\rfloor \quad (6.8)$$

Локације осталих сензора одређују се према формули (Jovanović и сар, 2019):

$$PL_i = PL_{i-1} + \frac{m}{n}, i = 2, 3, \dots, n. \quad (6.9)$$

Уколико количник m/n није цео број, тада се израз за одређивање локација преосталих сензора модификује, и гласи:

$$PL_i = \begin{cases} PL_{i-1} + \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor + 1, & i = 2, 3, \dots, m - n \cdot \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor + 1 \\ PL_{i-1} + \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor, & i = m - n \cdot \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor + 2, \dots, n \end{cases} \quad (6.10)$$

6.5.3 Модификација решења

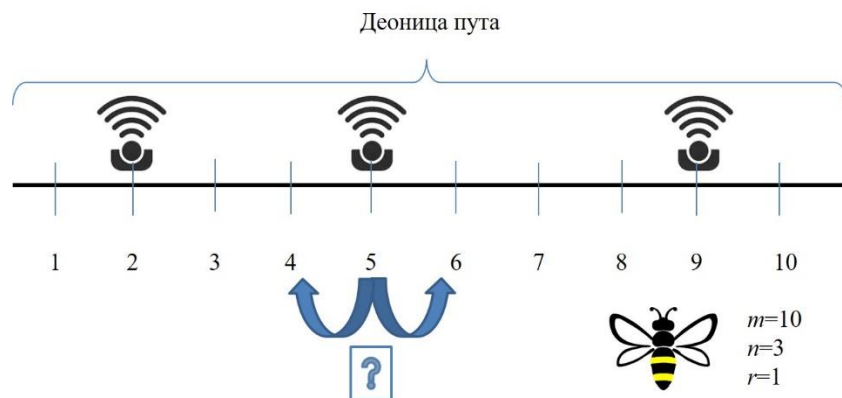
Важан корак у поступку добијању бољих решења јесте модификација решења која се спроводи у сваком лету унапред, у оквиру једне итерације BCO_i алгоритма. Врши се NC модификација решења у оквиру сваког од NP летова унапред, за време сваке од IT итерација алгоритма.

У дисертацији је разматрана модификација решења која подразумева да се мења локација само неких сензора, могуће је променити локације r сензора, од укупно n које је потребно лоцирати на деоници пута. Укупан број сензора чије је локације потребно променити рачуна се на случајан начин, као у релацији (Jovanović и сар, 2019):

$$r = rand(1, min\{k, n\}) \quad (6.11)$$

где је k максималан број сензора чије локације треба променити. У дисертацији је усвојено да је могуће променити максимално четири локације детектора ($k = 4$).

Када се за сваку пчелу одреди број сензора који треба да промене своје локације (r), потребно је да се одабере којих је то r сензора, и њихов одабир обавља се на случајан начин. У дисертацији је као начин промене локације усвојено да се она обавља тако што сензор може да заузме позицију која је суседна у односу на његову тренутну позицију, с једнаком вероватноћом. Овај поступак приказан је на слици 6.5.



Слика 6.5. Пример модификације комплетног решења

Приликом промене локације изабраног сензора, потребно је утврдити да ли је нова локација слободна или је евентуално на тој позицији већ лоциран други сензор. Уколико је нова потенцијална локација слободна, сензор се премешта на њу. Ако је нова локација заузета, не врши се премештање сензора, он остаје на својој тренутној позицији.

Када се премести свих r сензора завршава се лет унапред и све пчеле имају ново комплетно решење. Тада почиње лет уназад, који обухвата процес вредновања решења, новелирања до тада постигнутог најбољег решења, проверу лојалности пчела и регрутацију неопредељених пчела.

Предложени приступ може да се примени на мрежи путева на којој нема претходно уграђених сензора за мерење параметара саобраћајног тока, као и на мрежи на којој већ постоје уграђени сензори. У случају да на мрежи већ постоје уграђени сензори, BCO_i алгоритам имао би једно додатно ограничење. Локације свих инсталираних сензора биле би фиксне, не би било могуће променити их. Вештачке пчеле би кроз алгоритам могле да бирају преостале локације на мрежи на којима сензори нису инсталирани. Уколико би, на пример, пчела на случајан начин

одабрала већ заузету локацију, процес одабира понављао би се све док не буде изабрана слободна позиција.

6.5.4 Евалуација решења и провера лојалности

На почетку сваког лета уназад обавља се поређење решења које су пчеле генерисале у претходном лету унапред. Решења се у датом проблему вреднују на основу кумулативне релативне грешке процене времена путовања, израчунате према формули (6.6).

Ако са E_b ($b = 1, 2, \dots, B$) означимо кумулативну релативну грешку у случају комплетног решења пчеле b , тада се њена нормализована вредност O_b израчунава према формули:

$$O_b = \frac{E_{max} - E_b}{E_{max} - E_{min}}, \quad O_b \in [0,1] \quad b = \overline{1, B} \quad (6.12)$$

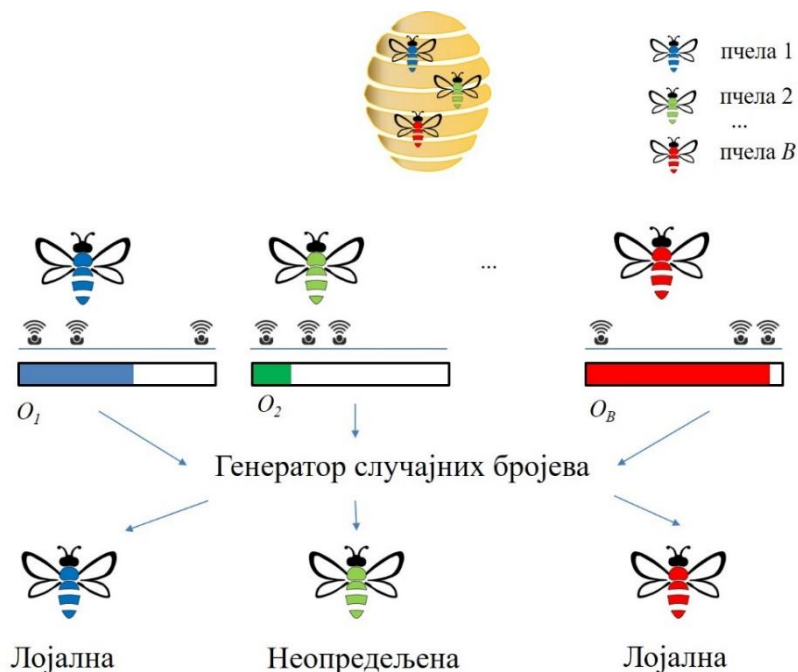
где су E_{min} и E_{max} најмања и највећа вредност кумулативне релативне грешке међу свим решењима свих пчела.

Вероватноћа да ће пчела b на почетку наредног лета унапред остати лојална свом комплетном решењу из претходног лета унапред ($u - 1$) израчунава се као у релацији:

$$p_b^{u-1} = e^{-(O_{max} - O_b)}, \quad b = 1, 2, \dots, B \quad (6.13)$$

где је O_{max} највећа вредност од свих нормализованих вредности O_b , односно, највећа нормализована вредност функције циља међу свим решењима свих пчела.

Сагласно релацији (6.13), што је боље генерисано решење и већа нормализована вредност O_b , већа је вероватноћа да ће пчела остати лојална свом решењу. Помоћу вредности израчунате релацијом (6.13) и случајног броја (као што је описано у поглављу 4.1.5.2. и приказано на слици 4.9) одлучује да ли ће, ако није задовољна својим решењем, да постане неопредељена и да следи друге пчеле, или ће да остане лојална свом решењу којим је задовољна и да од њега надаље настави претрагу простора допустивих решења.



Слика 6.6. Провера лојалности пчела

6.5.5 Процес регрутације неопредељених пчела

Ако пчела није задовољна својим решењем из претходног лета унапред, она постаје неопредељена, и напушта своје, до тада генерисано решење. У том случају мора да изабере решење неке друге пчеле које ће да следи, бирајући од оних пчела које су остале лојалне својим решењима. Одабир се врши на основу квалитета решења које су оствариле лојалне пчеле. Вероватноћа да ће решење лојалне пчеле b одабрати неопредељена пчела израчунава се према следећој релацији:

$$p_b = \frac{O_b}{\sum_{k=1}^R O_k}, \quad b = 1, 2, \dots, R \quad (6.14)$$

где је:

O_k – нормализована вредност функције циља k -те лојалне пчеле ($k = 1, \dots, R$), а R – број лојалних пчела.

Користећи релацију (6.14) и генератор случајних бројева (као што је објашњено у поглављу 4.1.5.3. и на слици 4.10) свака неопредељена пчела бира једну лојалну пчелу чије ће решење преузети на почетку наредног лета унапред. У наредном лету унапред све пчеле су слободне да праве сопствене модификације решења.

Једна итерација $BCOi$ алгоритма завршава се након што се обави NC летова унапред и уназад. Итерације се спроводе док се не задовољи критеријум заустављања. У дисертацији је као критеријум заустављања коришћен максималан број итерација IT .

6.6 Нумерички пример

Предложени модел тестиран је на стварним подацима прикупљеним на $L = 3km$ дугој деоници пута $E-763$ у Републици Србији, од Велике Моштанице до Мељака. На посматраној деоници у тренутку снимања нису постојали инсталирани сензори за мерење параметара саобраћајног тока.

Једно плутајуће, тест возило опремљено GPS уређајем прикупљало је податке о брзини у периодима вршног и ванвршног саобраћајног оптерећења, у периоду од 11. 3. 2015. до 30. 4. 2015. За време снимања обављено је укупно 200 возњи, по 100 возњи у сваком смеру. Смер A је означавао смер од Београда, а смер B ка Београду. Снимањем саобраћаја утврђено је да је период вршног оптерећења од 14 до 17 часова, а период ванвршног оптерећења од 10 до 14 и од 17 до 20 часова. Скуп прикупљених података састоји се од по 38 возњи по смеру у периоду вршног оптерећења и по 62 возње по смеру у периоду ванвршног оптерећења (Vidas, 2017).

За потребе примене $BCOi$ алгоритма и симулираног каљења за одређивање најбољих локација сензора на деоници пута, прво је урађена параметарска анализа обе метахеуристике. Она је приказана у наставку.

6.6.1 Анализа параметара $BCOi$

Како би се за примену $BCOi$ алгоритма усвојили одговарајући параметри, спроведена је анализа утицаја промене параметара на добијене вредности грешке у процени времена путовања. Одабран је један пример одређивања локација 5 сензора на деоници пута, и коришћени су подаци за вршни период. Алгоритам $BCOi$ понављан је 10 пута. За вредности параметра броја пчела B коришћене су вредности од 5 до 25, с инкрементом 5 и у исто време

број летова унапред, NP , вариран је од 5 до 20, такође с инкрементом 5. За сваки пролазак алгоритма бележене су вредности кумулативне релативне грешке по возњи. Резултати параметарске анализе приказани су у табели 6.2 (Jovanović и сар, 2019).

Табела 6.2. Минимална кумулативна релативна грешка по возњи за различите параметре BCO_i алгоритма

Број пчела (B)	Број летова унапред (NP)			
	5	10	15	20
5	2,570%	2,099%	1,995%	1,995%
10	2,264%	2,119%	1,995%	1,995%
15	2,264%	1,995%	1,995%	1,995%
20	2,264%	1,995%	1,995%	1,995%
25	2,264%	2,264%	1,995%	1,995%

Из приложених резултата може се видети да се најмања вредност кумулативне релативне грешке по возњи добија за број летова унапред $NP = 15$, и задржава се та најмања вредност (болдиране вредности у табели 6.2) кад овај параметар расте. За одабрану комбинацију параметара ($B=15$, $NP=15$) кумулативна релативна грешка по возњи једнака је овој најмањој вредности од 1,955%.

6.6.2 Анализа параметара Симулираног каљења

За потребе тестирања параметара алгоритма Симулираног каљења решаван је проблем лоцирања 5 сензора на посматраној деоници пута. Почетно решење добијено је на исти начин као код примене алгоритма BCO_i , сензори су лоцирани равномерно на деоници, што је детаљно описано у поглављу 6.5.2. Приликом тестирања параметри који су узимани у обзир су:

- Иницијална температура T : 100, 250 и 400 степени;
- Број понављања на једној температури $N(t)$: 10000, 20000 и 40000; и
- Параметар спуштања температуре α : 0,98; 0,95; 0,92.

За сваку комбинацију параметара алгоритам је пропуштан пет пута и бележене су најбоље вредности релативне кумулативне грешке по возњи. Критеријум заустављања било је укупно време рада рачунара, и оно је било подешено на 2 минута. Вредности релативне кумулативне грешке по возњи приказане су у табели 6.5.

Приликом решавања задатка лоцирања 5 сензора, није било разлике у добијеним резултатима за било коју комбинацију параметара. Због тога је решаван и задатак лоцирања 10 сензора на истој посматраној деоници. У овом случају је за вредност параметра спуштања температуре $\alpha = 0,98$ добијен низ најмањих једнаких вредности за све комбинације параметара $N(t)$ и T , те је урађен још један експеримент лоцирања, овог пута, 15 сензора на посматраној деоници мреже, само за ову комбинацију параметара.

Табела 6.3. Тестирање параметара алгоритма Симулираног каљења, кумулативна релативна грешка оцене времена путовања по возњи

5 сензора	$N(t)$	10000	20000	40000	10 сензора	$N(t)$	10000	20000	40000
	T					T			
$\alpha = 0,98$	100	2,518%	2,518%	2,518%	$\alpha = 0,98$	100	1,269%	1,269%	1,269%
	250	2,518%	2,518%	2,518%		250	1,269%	1,269%	1,269%
	400	2,518%	2,518%	2,518%		400	1,269%	1,269%	1,269%
$\alpha = 0,95$	100	2,518%	2,518%	2,518%	$\alpha = 0,95$	100	1,373%	1,362%	1,325%
	250	2,518%	2,518%	2,518%		250	1,459%	1,282%	1,321%
	400	2,518%	2,518%	2,518%		400	1,350%	1,269%	1,276%
$\alpha = 0,92$	100	2,518%	2,518%	2,518%	$\alpha = 0,92$	100	1,297%	1,277%	1,350%
	250	2,518%	2,518%	2,518%		250	1,390%	1,325%	1,276%
	400	2,518%	2,518%	2,518%		400	1,365%	1,350%	1,276%
15 сензора	$N(t)$	10000	20000	40000					
	T								
$\alpha = 0,98$	100	0,794%	0,765%	0,797%					
	250	0,794%	0,765%	0,794%					
	400	0,817%	0,817%	1,113%					

Сагласно с вредностима добијеним у табели 6.5 изабрана је следећа комбинација параметара: иницијална температура $T = 250$ степени, број понављања на једној температури $N(t) = 20000$ и параметар спуштања температуре $\alpha = 0,98$.

6.6.3 Добијени резултати применом BCO_i

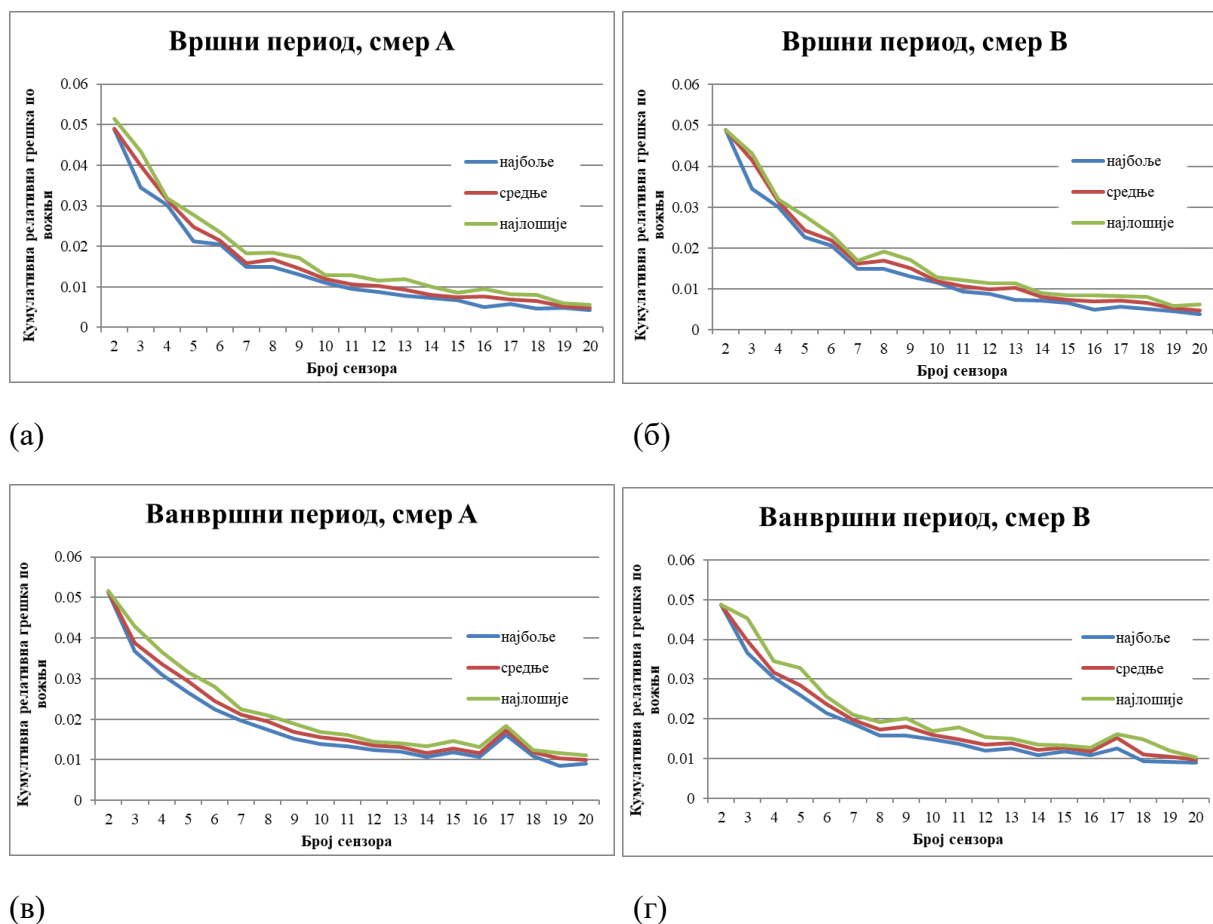
У нумеричком примеру деоница је дискретизована тако да нови сензор може бити лоциран на једној од 100 потенцијалних локација које су равномерно распоређене дуж деонице пута. Коначан број сензора које треба лоцирати (n) вариран је од 2 до 20. Како на деоници нема претходно инсталираних сензора, никаква ограничења за поједине локације нису узимана у обзир. На основу претходно урађене параметарске анализе усвојене су следеће вредности BCO_i параметара: 15 пчела (B), 15 летова унапред (NP), и једна модификација решења (NC) у сваком лету унапред. За критеријум заустављања усвојен је максималан број итерација (IT), конкретно $IT = 1000$.

Бележене су вредности кумулативне релативне грешке по возњи за десет пролазака кроз алгоритам, за оба смера A и B , за вршни и ванвршни период саобраћајног оптерећења. Резултати су приказани у табели 6.4. и на слици 6.7 (Jovanović и сар, 2019).

Табела 6.4. Кумулативна релативна грешка по возњи за десет пролазака кроз *BCO_i* алгоритам

Број сензора (<i>n</i>)	Вршни период							
	смер А				смер В			
	Најбоље	Просечно	Најлошије	Стандардно одступање	Најбоље	Просечно	Најлошије	Стандардно одступање
2	0,048819	0,049086	0,05149	0,084%	0,048819	0,049086	0,05149	0,084%
3	0,034549	0,035704	0,037672	0,152%	0,034549	0,035056	0,039616	0,160%
4	0,025513	0,028452	0,030123	0,209%	0,025513	0,029006	0,030123	0,190%
5	0,019948	0,023542	0,027716	0,243%	0,019948	0,024327	0,028116	0,326%
6	0,020566	0,020787	0,020812	0,008%	0,020566	0,020762	0,020812	0,010%
7	0,014944	0,015249	0,016382	0,060%	0,014944	0,015697	0,016467	0,076%
8	0,014849	0,015438	0,016554	0,076%	0,013556	0,01612	0,017208	0,121%
9	0,012761	0,01493	0,017778	0,195%	0,012053	0,013782	0,016005	0,120%
10	0,011655	0,011896	0,01277	0,034%	0,011655	0,011764	0,012064	0,012%
11	0,01042	0,010792	0,011924	0,061%	0,009458	0,010559	0,012334	0,082%
12	0,009273	0,010498	0,01121	0,063%	0,008404	0,010249	0,011177	0,090%
13	0,007361	0,008867	0,011575	0,141%	0,007361	0,009021	0,010896	0,143%
14	0,007202	0,007882	0,008447	0,046%	0,007188	0,007957	0,009185	0,061%
15	0,006822	0,007191	0,008038	0,037%	0,006822	0,007234	0,007651	0,026%
16	0,004986	0,006613	0,007838	0,081%	0,005144	0,007052	0,008461	0,102%
17	0,005782	0,00708	0,008525	0,093%	0,005833	0,006496	0,007209	0,048%
18	0,005286	0,00656	0,007704	0,082%	0,004721	0,006197	0,007913	0,114%
19	0,004919	0,005387	0,006157	0,046%	0,004171	0,005034	0,005838	0,053%
20	0,003856	0,00507	0,006233	0,072%	0,003988	0,005126	0,00619	0,070%

Број сензора (<i>n</i>)	Ванвршни период							
	смер А				смер В			
	Најбоље	Просечно	Најлошије	Стандардно одступање	Најбоље	Просечно	Најлошије	Стандардно одступање
2	0,083578	0,084089	0,084145	0,018%	0,079432	0,079432	0,079432	0,000%
3	0,060002	0,065181	0,077713	0,508%	0,059567	0,063945	0,073886	0,686%
4	0,052838	0,054263	0,055821	0,121%	0,050254	0,053071	0,056306	0,237%
5	0,043407	0,048626	0,051264	0,238%	0,042305	0,045428	0,051841	0,282%
6	0,035054	0,035965	0,038327	0,148%	0,035054	0,035889	0,038327	0,140%
7	0,030514	0,032033	0,032697	0,082%	0,030514	0,031991	0,033075	0,088%
8	0,025396	0,027664	0,029584	0,198%	0,025395	0,027688	0,029584	0,174%
9	0,026438	0,027021	0,028218	0,073%	0,024689	0,026944	0,028599	0,118%
10	0,020842	0,023611	0,025378	0,164%	0,020813	0,022894	0,026223	0,203%
11	0,019006	0,020761	0,021809	0,077%	0,020124	0,020843	0,022199	0,068%
12	0,017938	0,018238	0,018691	0,018%	0,017938	0,018547	0,020402	0,079%
13	0,016622	0,018505	0,020673	0,144%	0,017055	0,018288	0,021613	0,131%
14	0,01654	0,017531	0,018633	0,076%	0,016601	0,017544	0,018633	0,067%
15	0,01509	0,015873	0,017953	0,088%	0,01509	0,016257	0,017923	0,077%
16	0,014649	0,014991	0,015821	0,036%	0,013918	0,014837	0,015738	0,054%
17	0,013423	0,014047	0,015169	0,053%	0,013684	0,014602	0,015538	0,072%
18	0,013585	0,013916	0,014841	0,050%	0,013585	0,014144	0,015418	0,065%
19	0,012576	0,013389	0,014256	0,060%	0,011533	0,013534	0,015094	0,107%
20	0,011561	0,013089	0,015216	0,116%	0,012387	0,012947	0,014235	0,064%



Слика 6.7. Кумулативна релативна грешка по возњи
 (а) вршни период смер *A*; (б) вршни период смер *B*;
 (в) ванвршни период смер *A* и (г) ванвршни период смер *B*

Резултати показују да се најмања вредност кумулативне релативне грешке процене времена путовања по возњи остварује за 20 постављених сензора за вршни период за оба смера и за ванвршни период за смер *B* (ка Београду), док се за смер *B* за ванвршни период постиже за 19 постављених сензора.

Као што се види на слици 6.7, кумулативна релативна грешка оцене времена путовања и њено стандардно одступање, уз мале разлике, опадају с порастом броја постављених сензора. Апсолутно најмања вредност стандардне девијације износи 0,000% за два постављена сензора у смеру *B*, у ванвршном периоду саобраћајног оптерећења. Од вредности већих од нуле, најмања вредност постиже се за 6 лоцираних сензора у смеру *A*, у вршном периоду и износи 0,008%. Највећа вредност стандардног одступања износи 0.686% и добијена је за лоцирање 2 сензора у смеру *B*, у ванвршном периоду.



Слика 6.8. Стандардно одступање кумулативне релативне грешке по возњи

Док су вредности броја сензора које је потребно лоцирати вариране од 2 до 20, бележене су и позиције лоцираних сензора (PL_i). Позиције су нумерисане бројевима од 0 до 99, укупно 100 потенцијалних локација на посматраној деоници. Информација о фреквенцијама појављивања појединих локација у решењима издваја локације које су веома важне са становишта процене времена путовања. Исправност сензора који се налазе на овим локацијама мора бити на високом нивоу, и они треба да буду често контролисани. У табели 6.4 приказане су позиције које су се у решењима појављивале више од 5 пута и приказани су у опадајућем редоследу фреквенција (Јовановић и сар, 2019).

Табела 6.5. Позиције сензора (PL_i) с највећом учесталošћу појављивања у решењима

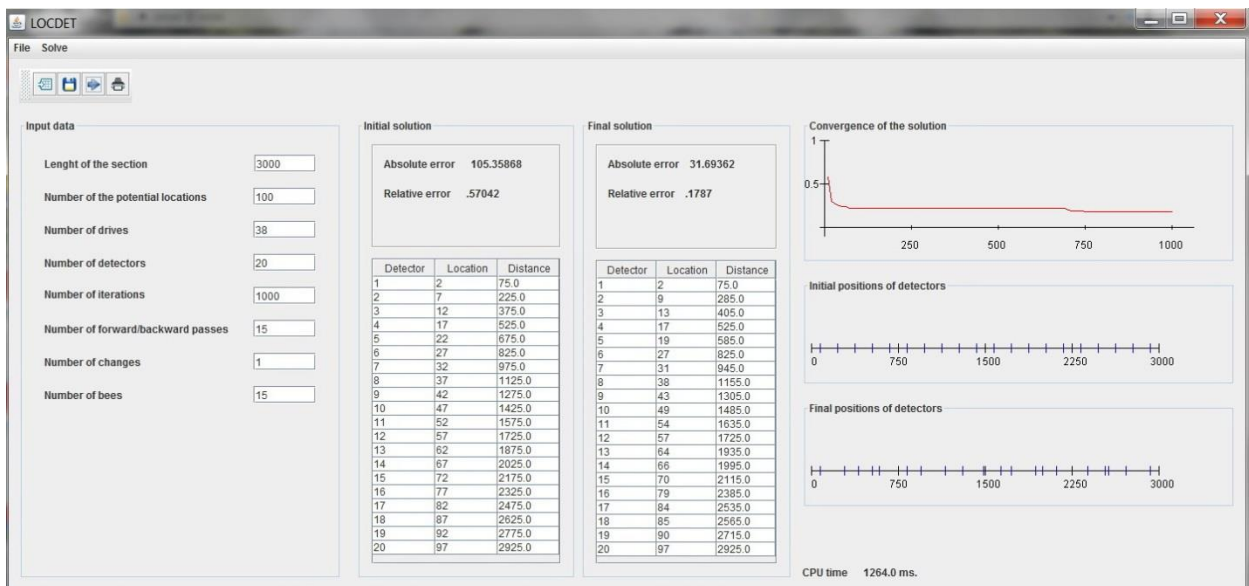
Вршни период				Ванвршни период			
смер А		смер В		смер А		смер В	
Позиција сензора (PL_i)	Фреквенција	Позиција сензора (PL_i)	Фреквенција	Позиција сензора (PL_i)	Фреквенција	Позиција сензора (PL_i)	Фреквенција
40	8	79	11	39	10	3	12
79	8	66	9	2	8	78	10
8	7	3	8	82	8	2	6
45	7	40	8	86	8	20	6
61	7	55	8	42	7	21	6
69	7	84	8	48	7	38	6
20	6	17	6	62	7	61	6
53	6	45	6	81	7	65	6
55	6	53	6				
66	6	64	6				
80	6						

Резултати из табеле 6.5. указују на то да се поједине позиције појављују с нешто већом фреквенцијом у ванвршном него у вршном периоду. У ванвршном периоду локација сензора 3 у смеру В појавила се 12 пута, док се локација сензора 39 у смеру А појавила 10 пута. У

вршном периоду се позиција 79 у смеру *B* појавила 11 пута, док су се у смеру *A* позиције 40 и 79 у решењима појавиле по 8 пута.

Тестирано је и време рада рачунара. *CPU* време се кретало у опсегу од 0,187s за 2 лоцирана сензора до 1,127s за 20 лоцираних сензова за вршни период. За ванвршни период забележено је *CPU* време од 0,285s за 2 лоцирана сензора до 1,813s за 20 лоцираних сензора.

За потребе тестирања развијен је софтвер у *Java* програмском језику (едитор *NetBeans* 8.2) чији је прозор приказан на слици 6.9. Сви примери су решавани на лаптоп рачунару следећих карактеристика: *Intel(R) Core(TM) i3-4000M*, 2.40GHz, и 4.00GB RAM меморије (Jovanović и сар, 2019).



Слика 6.9. Приказ прозора програма

6.6.4 Поређење резултата остварених применом *BCO_i* и Симулираним каљењем

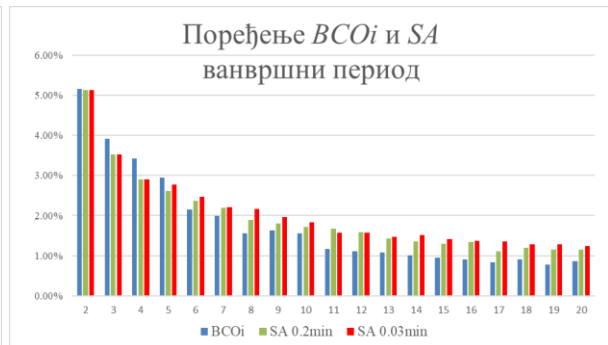
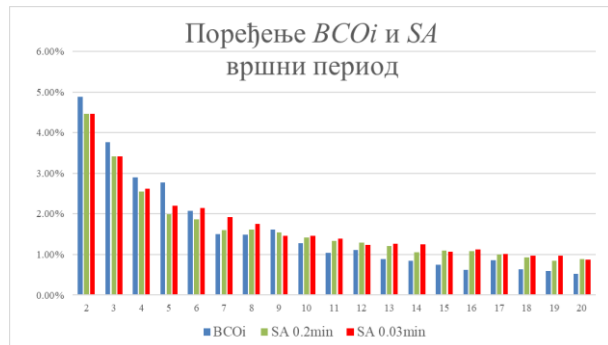
За потребе поређења резултата који се добијају решавањем проблема лоцирања сензора применом две метахеуристике *BCO_i* и Симулираним каљењем - *SA* било је потребно довести алгоритме на упоредив ниво. Алгоритмима су решавани исти проблеми, кренувши од истог почетног решења. Решавани су проблеми лоцирања од 2 до 20 сензора на посматраној деоници пута, у два периода: вршном са 38 возњи, и ванвршном са 62 возње.

Убедљиво најзначајнија разлика између ова два алгоритма јесте брзина добијања прихватљиво доброг решења. У поглављу 6.6.3. добијени резултати утрошка времена рада рачунара указују на то да је алгоритам *BCO_i* веома ефикасан, с обзиром на то да је за максимално око 1.8s *CPU* времена пронашао решење најкомплекснијег примера, лоцирања 20 сензора у ванвршном периоду, где податке сачињава низ од 62 тест возње. Време рада алгоритма Симулираног каљења у анализи параметара (поглавље 6.6.2.) било је дефинисано као многоструко већа вредност, износило је 2 минута. Како би и времена рада била упоредива, упоређивани су резултати које је постигао алгоритам *SA* за време рада 0,2 минута (12s) и 0,03 минута (1,8s, које је време постигао алгоритам *BCO_i*).

У табели 6.6 и на слици 6.10, приказани су резултати упоредне анализе два алгоритма. Поређене су вредности релативне кумулативне грешке процене времена путовања по возњи, изражене у процентима.

Табела 6.6. Релативна кумулативна грешка по возњи за алгоритме

Број сензора	Вршни период (38 возњи)			Ванвршни период (62 возње)		
	<i>BCO_i</i>	SA 0,2 мин	SA 0,03 мин	<i>BCO_i</i>	SA 0,2 мин	SA 0,03 мин
2	4,88%	4,47%	4,47%	5,16%	5,12%	5,12%
3	3,77%	3,42%	3,42%	3,91%	3,52%	3,52%
4	2,90%	2,55%	2,62%	3,42%	2,90%	2,90%
5	2,77%	1,99%	2,20%	2,95%	2,61%	2,77%
6	2,08%	1,87%	2,14%	2,15%	2,36%	2,47%
7	1,49%	1,59%	1,92%	2,00%	2,19%	2,21%
8	1,49%	1,62%	1,76%	1,56%	1,89%	2,16%
9	1,61%	1,54%	1,46%	1,64%	1,80%	1,96%
10	1,28%	1,41%	1,46%	1,56%	1,72%	1,84%
11	1,04%	1,34%	1,40%	1,16%	1,67%	1,57%
12	1,11%	1,29%	1,23%	1,12%	1,59%	1,57%
13	0,89%	1,21%	1,27%	1,08%	1,43%	1,47%
14	0,84%	1,05%	1,25%	1,01%	1,35%	1,52%
15	0,74%	1,09%	1,07%	0,95%	1,29%	1,41%
16	0,62%	1,09%	1,13%	0,90%	1,34%	1,37%
17	0,85%	1,00%	1,02%	0,84%	1,10%	1,35%
18	0,64%	0,93%	0,97%	0,91%	1,20%	1,29%
19	0,60%	0,85%	0,97%	0,77%	1,16%	1,29%
20	0,52%	0,89%	0,88%	0,87%	1,15%	1,24%



Слика 6.10. Поређење *BCO_i* и *SA* (релативна кумулативна грешка по возњи)

(а) вршни период

(б) ванвршни период

Упоредјујући податке у табели 6.6. може се закључити да алгоритам *SA* постиже боље резултате него *BCO_i* за мање димензије проблема, за вредности броја лоцираних сензора до 6 за вршни и до 7 за ванвршни период, за време рада рачунара од 12 s. За упоредиво време рада рачунара алгоритам *BCO_i* постиже боље резултате од алгоритма *SA*, почев од 6 лоцираних сензора и за вршни и за ванвршни период саобраћајног оптерећења.

7. ЗАКЉУЧАК

Интелигентни транспортни системи (ИТС) последњих деценија имају веома важну улогу у оптимизацији саобраћајних активности. За правилну примену и функционисање концепта ИТС-а неопходни су поуздани уређаји, који обезбеђују податке о саобраћајним показатељима. Без правовремених података у реалном времену није могуће доносити адекватне управљачке одлуке. У том смислу, сензори саобраћајног тока, као део система детекције, кључни су део ИТС-а.

Досадашња светска искуства показују да не постоји једна врста сензора која би задовољила све потребе за подацима који се примењују у оквиру ИТС-а. Доносиоци одлука имају могућност избора типа сензора из широког опсега технологија, од којих свака има предности, али и недостатке. Како би били у стању да донесу правилну одлуку о избору најпогоднијег типа сензора који ће бити инсталиран у пракси, доносиоци одлука морају да буду упознати с карактеристикама сваке расположиве сензорске технологије.

У дисертацији су анализирана два проблема у вези са сензорима саобраћајног тока. Први проблем који је разматран јесте *развој методолошког оквира за рангирање и избор конкретне сензорске технологије* за потребе прикупљања података о саобраћајном току.

Критеријуми на основу којих доносиоци одлуке треба да одаберу најбољу врсту сензора могу се сврстати кроз четири аспекта одлуке: користи (*Benefit*), трошкови (*Cost*), могућности (*Opportunity*) и ризици (*Risk*). С друге стране, доносиоци одлуке приликом вредновања често оцене критеријума и алтернатива по критеријумима исказују уз дозу непрецизности, користећи лингвистичке променљиве. Како одлука о избору врсте сензора подразумева улагања значајних финансијских средстава, доносиоци одлука могу бити из различитих интересних група као што су надлежни органи државне управе и локалне самоуправе, управљача пута, академских институција и сл.

Како би се поменуте непрецизности уврстиле у методолошки оквир, у дисертацији је представљен модел Фази вишеатрибутивног одлучивања (Фази Аналитичко хијерархијски процес), где је оцењивање елемената хијерархије представљено троугластим фази бројевима. Сврставање критеријума у четири аспекта одлуке приказано је кроз *BOCR (Benefit, Opportunity, Cost, Risk)* модел. Такође, уважавање мишљења и ставова свих интересних група инкорпорирано је у модел кроз групно доношење одлука. Коначно, поштујући све наведено, формулисан је методолошки оквир као групни Фази *AHP-BOCR* модел доношења одлуке.

Формиран методолошки оквир тестиран је кроз упоређивање пет потенцијалних технологија сензора за мерење брзине: индуктивне петље, микроталасног радара, активног и пасивног инфрацрвеног сензора и видео сензора. Аспекте одлуке према циљу и критеријуме према аспектима одлуке је кроз анкету евалуирала група од тринаест експерата из три интересне групе: државне управе и локалне самоуправе, управљача пута и академске заједнице. Вредности алтернатива по критеријума су преузете из литературе (*Skszek, 2001; Martin и сар, 2003; Jelušić, 2008*).

Као коначни резултат спровођења модела евалуације сваком сензору се придружује јединствена оцена која пружа меру квалитета сензора у односу на то колико је прихватљив од одређене интересне групе.

Резултати тестирања предложеног методолошког оквира указују на то да се код свих интересних група на прва два места налазе технологије видео сензора и микроталасних радарских сензора, и притом је овај редослед код три од четири разматране групе (три интересне групе и јединствени скуп експерата) такав да је видео сензор на првом месту. Такође, на последње две позиције налазе се индуктивна петља и пасивни инфрацрвени сензор, као две најлошије рангиране алтернативе. Пасивни инфрацрвени сензор је најлошије рангирана технологија код три од четири разматране групе стручњака.

Предложени Фази *AHP-BOCR* модел је општи и може бити примењен у различитим окружењима. У зависности од конкретне примене, модел је могуће прилагодити изменом структуре хијерархије, додавањем нових и мењањем постојећих критеријума, мењањем важности појединачних критеријума, разматрањем различитих алтернатива и слично.

Једном када се донесе одлука о томе коју сензорску технологију треба одабрати, поставља се питање на којим би локацијама требало поставити изабрану врсту сензора. Други проблем који је разматран у дисертацији јесте *одређивање најподобнијих локација сензора на транспортној мрежи* за потребе процене времена путовања.

Важност прецизне процене и прогнозе времена путовања огледа се у ефикасном управљању саобраћајем. Познавањем прецизних података о времену путовања на деоницама транспортне мреже могуће је брзо и правовремено реаговање на евентуалну појаву саобраћајне незгоде, превентивно деловање и преусмеравање на друге делове мреже, како не би дошло до појаве загушења, планирање будућих улагања у проширивање капацитета инфраструктуре и слично.

Број инсталираних сензора утиче на тачност процењеног времена путовања, с порастом броја сензора повећава се тачност процене. С друге стране, с порастом броја инсталираних сензора увећавају се и трошкови њихове набавке и експлоатације.

Модел одређивања локација сензора који је преузет из литературе (*Edara и сар, 2008*) минимизира кумулативну релативну грешку процене времена путовања, и узима у обзир финансијска ограничења која се огледају у броју постављених сензора на деоници пута. Овако постављен проблем представља проблем комбинаторне оптимизације. Такође, модел омогућава и да се установи које су локације сензора веома значајне са становишта оцене времена путовања, те је за њих неопходно често вршити проверу исправности, како не би дошло до одступања оцењених вредности времена путовања.

За решавање проблема лоцирања сензора на деоници пута у дисертацији је коришћена метахеуристика Оптимизација колонијом пчела, и то њена варијанта заснована на побољшању решења, *BCOi*. Проблем лоцирања сензора је у досадашњој литератури решаван конструктивном варијантом ове метахеуристике, *BCOc* (*Šelmić и сар, 2008*).

У оквиру *BCO* метахеуристике, претрагу простора допустивих решења врше вештачки агенти, инспирисани понашањем пчела у природи приликом потраге за храном. Пчеле (вештачки агенти) током процеса претраге међусобно комуницирају и користе колективно знање тражећи све боља решења у околини претходно пронађених добрих решења, напуштајући делове простора решења у којима решења нису била задовољавајућа.

У *BCOi* варијанти метахеуристике, пчеле кроз итерације мењају своје комплетно решење. На почетку алгоритма пчеле генеришу комплетно почетно решење које ће модификовати кроз

итерације. У оквиру сваке итерације пчеле обављају NP летова унапред и тада се врши NC модификација решења. Приликом лета уназад, пчеле доносе одлуке да ли ће остати лојалне сопственом решењу, или ће се придружити некој другој пчели. Након провере лојалности врши се процес регрутације, пчеле које су остале лојалне својим решењима регрутују пчеле које су своја решења напустиле. Решења свих лојалних пчела додељују се пчелама које су регрутовале, и започиње наредна итерација.

Већи број комплексних реалних проблема до сад је био решаван помоћу $BCOi$ метахеуристике, која је показала способност да у разумно кратком времену рада рачунара пронађе квалитетна решења. $BCOi$ метахеуристика је развијена како би се превазишли неки неповољни резултати добијени код неколико комбинаторних проблема на које је примењена конструктивна варијанта $BCOc$. Бољи резултати $BCOi$ били су мотив за коришћење ове метахеуристике приликом решавања проблема одређивања локација сензора на транспортним мрежама.

Решење проблема је тестирано на реалним подацима прикупљеним на деоници пута Е-763 у Републици Србији. Извршена је анализа осетљивости релативне грешке процене времена путовања и уложених новчаних средстава исказаних кроз број постављених сензора на деоници пута. Резултати, добијени коришћењем $BCOi$ метахеуристике, упоређени су затим с резултатима добијеним коришћењем метахеуристике Симулираног каљења.

Упоређујући две метахеуристике, $BCOi$ се показала компетитивном у поређењу са Симулираним каљењем. У погледу брзине извршавања алгорита $BCOi$ је надмашила алгоритам Симулираног каљења. У упоредивом времену рада алгорита, $BCOi$ је постигла боља решења за проблеме већих димензија.

7.1. Допринос дисертације

Доприноси дисертације у теоријском смислу могу се представити кроз:

- Моделирање поступка вишекритеријумске евалуације, као једног од елемената методолошког оквира, с циљем доделе јединствене оцене квалитета сензорске технологије за мерење брзине;
- Развој оригиналног методолошког оквира за проблем евалуације и избора сензорске технологије за потребе прикупљања података о саобраћајном току;
- Примена метахеуристике $BCOi$ на решавање проблема одређивања најподобнијих локација сензора на транспортним мрежама за потребе оцене времена путовања и тестирање модела на реалним подацима прикупљеним на деоници двотрачног пута у Републици Србији;
- Анализа утицаја броја и локација сензора на грешку у процени времена путовања на транспортним мрежама;
- Поређење резултата метахеуристике $BCOi$ са метахеуристичком Симулираног каљења.

Осим теоријског, практичан допринос дисертације огледа се у моделу који омогућава евалуацију сензора са аспекта највеће прецизности за посматрани параметар саобраћајног тока. Презентован модел би могао помоћи стручњацима из области саобраћаја и транспорта при избору најпогоднијег типа сензора за конкретну примену. Такође, практичан допринос дисертација била би имплементација у пракси решења проблема лоцирања фиксних сензора на деоници пута за потребе процене времена путовања.

7.2. Правци будућих истраживања

У дисертацији је обављена евалуација сензорских технологија према њиховој врсти. Појединачни уређаји који су доступни на тржишту у оквиру исте сензорске технологије, иако имају доста заједничких особина, ипак се веома међусобно разликују. Један од наредних задатака могао би бити поступак евалуације појединачних уређаја радије него целокупних сензорских технологија.

Подручје сензорских технологија за мерење параметара саобраћајног тока константно и брзо напредује, па би у будућности могао да се догоди помак с тренутно највише коришћених фиксних сензора према системима за даљинско мерење и позиционирање и све већој употреби савремених комуникационих технологија. Уколико се у будућности превазиђу проблеми приватности података с персоналних уређаја (пре свега мобилних телефона) то би могло отворити пут ка једноставном одређивању не само локације и брзине појединачних возила, него и добијања многих других показатеља саобраћајног тока, укључујући и неке које је до сад било веома тешко одредити, као што су И-Ц матрице кретања, густина саобраћајног тока итд.

BCO метахеуристика је досад показала значајне потенцијале у решавању широког низа сложених проблема комбинаторне оптимизације.

Наставак истраживања могао би да обухвати модификацију модела увођењем додатних ограничења. Решаваним проблемом је разматрано одређивање најпогоднијих локација сензора на деоници пута на којој нема претходно инсталираних сензора. Уколико би на анализираној деоници постојали већ лоцирани сензори, тада би било потребно у модел увести ограничења „заузетих” локација.

У будућем раду било би интересантно направити анализу осетљивости појединих параметара коришћених у предложеном моделу. Промена начина добијања почетног решења, варирање броја модификација решења или различити критеријуми заустављања би можда могли да допринесу бољим добијеним решењима или њиховим бржим постизањем.

Литература

- Abbass, H. A. (2001). Marriage in honey bees optimization (MBO): A haplometrosis polygynous swarming approach. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, CEC2001*, Seoul, Korea, May 2001, 207-214.
- Abualhaija, S., Zimmermann, K.-H. (2016). D-Bees: A novel method inspired by bee colony optimization for solving word sense disambiguation. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 188-195.
- Angel, A., Hickman, M., Mirchandani, P., Chandnani, D. (2003). Methods of Analyzing Traffic Imagery Collected From Aerial Platforms, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 99-107
- Arabnejad, V., Moeini, A., Moghadam, N. (2011). Using Bee Colony Optimization to Solve the Task Scheduling Problem in Homogenous Systems. *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 5, No 3, 348-353.
- Athol, P. (1965). Interdependence of Certain Operational Characteristics Within a Moving Traffic Stream. *Highway Research Record*, 72, pp. 58-87.
- Ban, X., Herring, R., Margulici, J. D., Bayen, A. M. (2009). Optimal sensor placement for freeway travel time estimation. In *Transportation and traffic theory 2009: golden jubilee*. Springer, Boston, MA pp. 697–721.
- Bartin, B., Ozbay, K., Iyigun, C. (2007). Clustering-based methodology for determining optimal roadway configuration of detectors for travel time estimation. *Transportation Research Record*, 2000: 98–105.
- Bellman, R. E., Zadeh, L. E. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science* 17: 212–223.
- Beni, G. (1988). The concept of cellular robotic system. In: *Proceedings of the 1988 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp. 57–62.
- Beni, G., Hackwood, S. (1992). Stationary waves in cyclic swarms. In: *Proceedings of the 1992 International Symposium on Intelligent Control*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp. 234–242.
- Beni, G., Wang, J. (1989). Swarm intelligence. In: *Proceedings of the Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan*. RSJ Press, Tokyo, pp. 425–428.
- Bianco, L., Confessore, G., Gentili, M. (2006). Combinatorial aspects of the sensor location problem. *Annals of Operations Research*, 144: 201–234.
- Blum, C., Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence*. Oxford University Press, New York. ISBN 978-0195131598

Brockfeld, E., Lorkowski, S., Mieth, P., Wagner, P. (2007). Benefits and limits of recent floating car technology – an evaluation study. In: *Proceedings of the 11th WCTR Conference*. Berkeley, USA.

Cai, Y. (2010). Artificial fish school algorithm applied in a combinatorial optimization problem. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, vol.2, no.1, pp.37-43.

Celikoglu, B. H. (2013a). Flow-based freeway travel-time estimation: A comparative evaluation within dynamic path loading, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14, 772–781.

Celikoglu, B. H. (2013b). Reconstructing freeway travel times with a simplified network flow model alternating the adopted fundamental diagram, *European Journal of Operational Research*, 228, 457–466.

Celikoglu, B. H. (2014). Dynamic classification of traffic flow patterns simulated by a switching multimode discrete cell transmission model, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15, 2539–2550.

Černý, V. (1985). Thermodynamic approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), pp.41-51.

Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 45, 41–51.

Chan, K. S., Lam, W. H. K. (2002). Optimal speed detector density for the network with travel time information. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36: 203–223.

Chang, D.-Y. (1992). Extent Analysis and Synthetic Decision, *Optimization Techniques and Applications*, Volume 1, World Scientific, Singapore, 1992, p. 352-355.

Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research* 95, 649-655.

Chen, S. H., Hsieh, C. H. (1998). Graded mean integration representation of generalized fuzzy number, In *Proceeding of 1998 Sixth Conference on Fuzzy Theory and its Application*, pp. 1-6, Chinese Fuzzy Systems Association, Taiwan.

Chou, C.C. (2003). The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers, *Computers and Mathematics with Applications*, 45, 1601–1610.

Ćurković, P., Jerbić, B. (2007). Honey-bees optimization algorithm applied to path planning problem. *International journal of simulation modelling*. 6 (3), 154-164

Danczyk, A., Liu, H. X. (2011). A mixed-integer linear program for optimizing sensor locations along freeway corridors. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1): 208–217.

Darwin, C. R. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, John Murray, London.

Das, S., Suganthan, P. N. (2011). Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1), 4–31.

Davidović, T., Ramljak, D., Šelmić, M., Teodorović, D. (2011). MPI Parallelization of Bee Colony Optimization. In *Proceedings of the 1st International Symposium & 10th Balkan Conference on Operational Research*, vol. 2, pp. 193–200.

Davidović, T., Ramljak, D., Šelmić, M., Teodorović, D. (2011). Bee colony optimization for the p-center problem. *Computers and Operations Research*, 38(10): 1367–1376.

Davidović, T., Šelmić, M., Teodorović, D. (2009). Scheduling Independent Tasks: Bee Colony Optimization Approach. In *Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control and Automation*, MED'09, pp. 1020–1025. Thessaloniki, Greece.

Davidović, T., Šelmić, M., Teodorović, D., Ramljak, D. (2012). Bee colony optimization for scheduling independent tasks to identical processors. *Journal of Heuristics*, vol. 18(4): pp. 549–569.

Davidović, T., Teodorović, D., Šelmić, M. (2015). Bee Colony Optimization Part I: The algorithm overview, *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25 (1), 33-56.

Deng, H. (1999). Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning*, 21, 215-231.

Deniz, O., Aksoy, G., Celikoglu, B. H. (2013). Analyzing freeway travel times within a case study: reliability of route traversal times, *Proceedings of the 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 195– 202.

Dimitrijević S. (1999). *Osnove GIS tehnologije - mogućnosti primene u drumskom saobraćaju*, Urbanistički zavod Republike Srpske, Banja Luka, ISBN 86-7440-003-5.

Dimitrijević, B. (2017). *Višeatributivno odlučivanje – primene u saobraćaju i transportu*. Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd. ISBN 978–86–7395–375–5

Dimitrijević, B., Teodorović, D., Simić, V., Šelmić, M. (2011). Bee Colony Optimization Approach to Solving the Anticovering Location Problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 26(6): pp. 759–768.

Dimitrijević, B., Teodorović, D., Simić, V., Šelmić, M. (2012). Bee colony optimization approach to solving the anticovering location problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(6): 759–768.

Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M., Gambardella, L. M. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1 (1): 53–66.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. (1991). *Positive Feedback as a Search Strategy*. Technical Report No. 91-016, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. (1996). Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B*, 26 (1): 29–41.

Edara, P., Guo, J., Smith, B. L., Mc Ghee, C. (2008). Optimal placement of point detectors on Virginia's highways: case studies of northern Virginia and Richmond. Report VTRC08-CR3. Virginia Transportation Research Council, Richmond, VA.

Edara, P., Smith, B., Guo, J., Babiceanu, S., McGhee, C. (2011). Methodology to identify optimal placement of point detectors for travel time estimation. *Journal of Transportation Engineering*, 137(3): 155–173.

Ehlert, A., Bell, M., Grosso, S. (2006). The optimisation of traffic count locations in road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40: 460–479.

Eisenman, S. M., Fei, X., Zhou, X. S., Mahmassani, H. (2006). Number and location of sensors for real-time network traffic estimation and prediction: sensitivity analysis. *Transportation Research Record*, 1964: 253–259.

Farmer, J. D., Packard, N. Perelson, A. (1986). The immune system, adaptation and machine learning. *Physica D*, 2:187–204.

Fišer-Popović, A., Mijušković V., Radoš J. (1992). *Englesko-srpski rečnik drumskog saobraćaja*, IŠP „Savremena administracija”, Beograd. ISBN 86-387-0299-X

Fogel, L. J. (1962). Toward inductive inference automata. In *Proceedings of the International Federation for Information Processing Congress*, Munich, pp.395–399.

Fogel, L. J., Owens, A. J., Walsh, M. J. (1966). *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. Wiley.

Forman, E., Penewati, K. (1998). Aggregating individual judgements and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 108:165–169.

Forsati, R., Keikha, A., Shamsfard, M. (2015). An improved bee colony optimization algorithm with an application to document clustering. *Neurocomputing*, 159, 9–26.

Fujito, I., Margiotta, R., Huang, W., Perez, W. A. (2006). Effect of sensor spacing on performance measure calculations. *Transportation Research Record*, 1945(1): 1–11.

Gandomi, A. H., Alavi, A. H. (2012). Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12), 4831–4845.

Gandomi, A. H., Alavi, A. H., Talatahari, S. (2013). Structural Optimization Using Krill Herd Algorithm. In *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, 335–349.

Gerlough, D. L., M. J. Huber (1975). *Traffic Flow Theory: a Monograph*. Special Report 165, Transportation Research Board (Washington DC: National Research Council).

Gil, S., Milanese, R., Pun, T. (1996). Comparing features for target tracking in traffic scenes. *Pattern Recognition*, 29(8), 1285–1296.

Greenshields, B. D. (1933). Photographic Method of Studying Traffic Behavior. *Highway Research Board Proceedings*, Vol.13 part I, pp. 382-396.

Greenshields, B. D. (1947). The Potential Use of Aerial Photographs in Traffic Analysis. *Highway Research Board Proceedings*, Vol.27, pp. 291-297.

- Haddad, O. B., Afshar, A., Marino, M. A. (2006). Honey-Bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization. *Water Resour. Manage*, 20, 661-680
- Hall, F. (1992). Traffic Stream Characteristics. In Gartner N., Messer C., Raiti A.K. (eds.) *Revised Monograph on Traffic Flow Theory* (Chapter 2) McLean, VA: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Hall, F. L. and Persaud B. N. (1989). Evaluation of Speed Estimates Made with Single-Detector Data from Freeway Traffic Management Systems. *Transportation Research Record* 1232, TRB, NRC, Washington, DC, pp. 9-16.
- Haugen, T., Levy, J. R., Aakre, E., Tello, M. E. P. (2016). Weigh-in-Motion Equipment – Experiences and Challenges. *Transportation Research Procedia*, 14, 1423–1432.
- Havens, T. C., Spain, C. J., Salmon, N. G., Keller, J. M. (2008). Roach infestation optimization. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, pp. 1-7.
- Highway Capacity Manual* (2000). Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA. ISBN 0-309-06681-6
- Hofmann, E. E., Haskell, A. G. E., Klinck, J. M., Lascara, C. M. (2004). Lagrangian modelling studies of Antarctic krill (*Euphasia superba*) swarm formation. *ICES Journal of Marine Science*, 61, 617–631.
- Holland, J. H. (1962). Outline for a logical theory of adaptive systems. *Journal of the ACM*, 3: 297–314.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Hu, S. R., Peeta, S., Chu, C. H. (2009). Identification of vehicle sensor locations for link-based network traffic applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43: 873–894.
- Jakšić Krüger, T. (2017). *Development, implementation and theoretical analysis of the bee colony optimization meta-heuristic method*, Doctoral dissertation, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad.
- Jakšić Krüger, T. (2013). O konvergenciji metaheurističke metode optimizacije kolonijom pčela, *IV matematički simpozijum „Matematika i primene”*, Matematički fakultet, Beograd.
- Jelušić, N. (2008). *Evaluacija senzorskih tehnologija u sustavu automatskog upravljanja cestovnim prometom*, Doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.
- Jelušić, N., Anžek, M., Mandžuka, S. (2009). Evaluation of Sensor Technologies for Intelligent Transport Systems. In *Proceedings of 16th ITS World Congress “ITS in Daily Life”*, Stockholm, Sweden, 5549-5561.
- Jiang Z. (2005). *Incorporating Image-Based Data in AADT Estimation: Methodology and Numerical Investigation of Increased Accuracy*, Doctoral dissertation, The Ohio State University
- Johnson, A. N. (1928). Maryland Aerial Survey of Highway Traffic between Baltimore and Washington. *Highway Research Board Proceedings*, Vol.8, pp. 106-115.

Jovanović, A. (2017) *Izbor signalnih planova za upravljanje saobraćajem primenom optimizacije kolonijom pčela*, doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.

Jovanović, A., Nikolić, M., Teodorović, D. (2017). Area-wide urban traffic control: a bee colony optimization approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77: 329–350.

Jovanović, I., Šelmić, M., Nikolić, M. (2019). Metaheuristic approach to optimize placement of detectors in transport networks – case study of Serbia. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(3): 176-187.

Karaboga D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*, Technical report TR06. Turkey: Erciyes University.

Karaboga D., Basturk B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimozation*, 39, pp. 459-471.

Karaboga D., Basturk B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8, pp. 687–697.

Karaboga D., Basturk, B., Akay B., Ozturk C. (2007). Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Training Feed-Forward Neural Networks. In: *LNCS: Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 318-319.

Karaboga, D., Akay, B. (2009). A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 31(1-4), 61–85.

Kennedy, J., Eberhart, R. C. (1997). A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, Piscataway (NJ), USA. 4104-4109.

Kianfar, J., Edara, P. (2010). Optimizing freeway traffic sensor locations by clustering global-positioning-system-derived speed patterns. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(3): 738–747.

Kim, J., Park, B., Lee, J., Won, J. (2011). Determining optimal sensor locations in freeway using genetic algorithm-based optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24: 318–324.

Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C.D., Vecchi, M.P. (1983) Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220 (4598), 671–680.

Klein L. A., Mills M. K., Gibson D. R. P. (2006). *Traffic Detector Handbook*, Third Edition, Volume I, Publication No. FHWA-HRT-06-108, Federal Highway Administration, Washington D.C., USA

Klein, L. A. (2001). *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*, Artech House ITS library, ISBN 1-58053-077-X.

Koç, E. (2010). *The Bees Algorithm Theory, Improvements and Applications*, Manufacturing Engineering Centre, doctoral thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff, United Kingdom

- Koza, J.R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Natural Selection*. MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- Krause, J., Cordeiro, J., Parpinelli, R. S., Lopes, H. S. (2013). A Survey of Swarm Algorithms Applied to Discrete Optimization Problems. *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, 169-191.
- Krishnanand, K. N., Ghose, D. (2005). Detection of multiple source locations using a glow-worm metaphor with applications to collective robotics. In: *Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Pasadena, CA, USA, pp. 84-91.
- Kumar, S., Ariss, O. E. (2018). Word Sense Disambiguation Using Swarm Intelligence: A Bee Colony Optimization Approach, In Alexander Gelbukh (Ed.) *Computational Linguistics and Intelligent Text Processing, 17th International Conference, CICLing 2016 Konya, Turkey, April 3–9, 2016 Revised Selected Papers, Part I*, Springer International Publishing AG, Lecture Notes in Computer Science 9623, pp. 479–495.
- Kuzović, Lj. (1987). *Teorija saobraćajnog toka*, IRO „Građevinska knjiga”, Beograd. ISBN 86-395-0090-8
- Lay, M. G., Vance, J. E. (1992). *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles that Used Them*, Rutgers University Press, ISBN 0-8135-2691-4.
- Leduc, G. (2008). *Road Traffic Data: Collection Methods and Applications*, Report No. JRC 47967, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Spain.
- Lee, A. H. I. (2009). A fuzzy AHP evaluation model for buyer–supplier relationships with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks. *International Journal of Production Research*, 47(15), 4255–4280.
- Lemmens, N., De Jong, S., Tuyls, K., Nowé, A. (2005). Bee behaviour in multi-agent systems: a bee foraging algorithm, In *Proceedings of the 5th, 6th and 7th European conference on Adaptive and learning agents and multi-agent systems: adaptation and multi-agent learning*, pp.145-156.
- Lemmens, N., De Jong, S., Tuyls, K., Nowé, A. (2007). A bee system with inhibition Pheromones. *European conference on complex systems (ECCS)*, Dresden, Germany.
- Levanova, T. V., Tkachuk, E. A. (2011). Development of a Bee Colony Optimization Algorithm for the Capacitated Plant Location Problem. In *Proceedings of the II International conference, Optimization and applications (OPTIMA-2011)*, pp. 25–09.
- Li, R., Rose, G., Sarvi, M. (2006). Evaluation of speed-based travel time estimation models. *Journal of Transportation Engineering*, 132, 540–547.
- Liu, H., Danczyk, A. (2009). Optimal sensor locations for freeway bottleneck identification. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24 (8): 535–550.
- Low, M. Y. H., Chandramohan, M., Choo, C. S. (2009). Application of multi-objective bee colony optimization algorithm to Automated Red Teaming. in *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1798-1808.

Lučić, P., Teodorović, D. (2001). Bee system: modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence. In: *Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Sao Miguel, Azores Islands, Portugal, pp. 441–445.

Lučić, P., Teodorović, D. (2002). Transportation modeling: an artificial life approach. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Washington, D.C., pp. 216–223.

Lučić, P., Teodorović, D. (2003a). Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems. *International Journal of Artificial Intelligence Tools*. 12, 375–394.

Lučić, P., Teodorović, D. (2003b). Vehicle routing problem with uncertain demand at nodes: the bee system and fuzzy logic approach. In: Verdegay, J.L. (eds) *Fuzzy Sets in Optimization*. Springer-Verlag, Heidelberg Berlin, pp. 67–82.

Maeterlinck, M. (1901). *La vie des abeilles*, Bibliothèque charpentier, Paris, France.

Marković, G. (2017a). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization. *Photonic Network Communications*, 34(3), 356-374.

Marković, G. (2017b). Wavelength Converters Placement in Optical Networks Using Bee Colony Optimization, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 16 (1), 3-10.

Marković, G., Teodorović, D., Aćimović-Raspopović, V. (2007). Routing and wavelength assignment in all-optical networks based on the bee colony optimization. *AI Communications*, vol. 20(4): pp. 273–285.

Martin, P. T., Feng, Y., Wang, X. (2003). *Detector Technology Evaluation*, Research Report No, MPC-03-154, University of Utah Traffic Lab.

Masutti, T. A. S., De Castro, L. N. (2017). Bee-Inspired Algorithms Applied to Vehicle Routing Problems: A Survey and a Proposal. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-20.

Menzel, R., Greggers, U., Smith, A., Berger, S., Brandt, R., Brunke, S., Bundrock, G., Hülse, S., Plümpe, T., Schaupp, F., Schüttler, E., Stach, S., Stindt, J., Stollhoff, N., Watzl, S. (2005). Honey bees navigate according to a map-like spatial memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(8), 3040–3045.

Middleton, D., Charara, H., Longmire, R. (2009). *Alternative Vehicle Detection Technologies For Traffic Signal Systems*, Technical Report, Report no. FHWA/TX-09/0-5845-1, Texas Department of Transportation, Austin, Texas, USA.

Mimbela, L. E. Y., Klein, L. A. (2000). *Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems*. Federal Highway Administration, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. Washington D.C., USA.

Mimbela, L. E. Y., Klein, L. A. (2007). *Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems*. Federal Highway Administration, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. Washington D.C., USA.

Minge, E., Kotzenmacher, J., Peterson, S. (2010). *Evaluation of Non- Intrusive Technologies for Traffic Detection*, Minnesota Department of Transportation, Report no. MN/RC 2010-36, Final report.

Mitrinović, D. S. (1986). *Matrice i determinante - zbornik zadataka i problema*, Naučna knjiga, Beograd.

Mori, U., Mendiburu, A., Alvarez, M., Lozano, A. J. (2015). A review of travel time estimation and forecasting for advanced traveller information systems. *Transportmetrica A—Transport Science*, 11, 119–157.

Mousavinasab, Z., Entezari-Maleki, R., Movaghar, A. (2011). A bee colony task scheduling algorithm in computational grids. In *Digital Information Processing and Communications, vol. 188 of Communications in Computer and Information Science*, pp. 200–210. Springer Berlin Heidelberg.

Nam, H. D., Drew, R. D. (1996). Traffic dynamics: Methods for estimating freeway travel times in real time from flow measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 122, 185–191.

Nikolić, M., Teodorović, D. (2013a). Empirical study of the bee colony optimization (BCO) algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40(11): 4609–4620.

Nikolić, M., Teodorović, D. (2013b). Transit network design by bee colony optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(15): 5945–5955.

Nikolić, M., Teodorović, D. (2014). A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees, *Expert Systems with Applications*, 41, 16, 7200-7209.

Nikolić, M., Teodorović, D. (2015). Vehicle rerouting in the case of unexpectedly high demand in distribution systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55: 535–545.

Nikolić, M., Teodorović, D. (2019). Mitigation of disruptions in public transit by Bee Colony Optimization. *Transportation Planning and Technology*, 42(6), 573–586.

Nikolić, M., Teodorović, D., Šelmić, M. (2013). Solving the Vehicle Routing Problem With Time Windows by Bee Colony Optimization Metaheuristic, In *Proceedings of the 1st LOGistics International Conference LOGIC*, Belgrade, Serbia, 44-48.

Nikolić, M., Teodorović, D., Vukadinović, K. (2015). Disruption management in public transit: the bee colony optimization approach, *Transportation Planning and Technology*, 38:2, 162-180.

Paska, E. P. (2009). *State-of-the-Art Remote Sensing Geospatial Technologies in Support of Transportation Monitoring and Management*, Doctoral dissertation, The Ohio State University.

Paunović, M., Karapandža, B. (2019). *Slepi miševi Leteće noćobdije*, Prirodnjački muzej u Beogradu, Društvo za očuvanje prirodnih životinja „Mustela”, Beograd. ISBN 978-86-82145-62-2

Paterson, D., Rose, G. (2008). A recursive, cell processing model for predicting freeway travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16, 432–453.

Peeta S., Zhang P. (2002). *Counting Device Selection and Reliability: Synthesis Study*, Indiana Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA/IN/JTRP-2002/1.

Pertiwi, A. P., Suyanto (2011). Globally evolved dynamic bee colony optimization. In *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, pp. 52–61. Springer.

Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M. (2006). The Bees Algorithm - A novel tool for complex optimisation problems, in *Proceedings 2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS)*. Elsevier, Cardiff, 454-459.

Pushkar, A., Hall, F., Acha-Daza, J. (1994). Estimation of speeds from single-loop freeway flow and occupancy data using Cusp Catastrophe Theory model, *Transportation Research Record*, No. 1457, pp.149-157.

Rao, R. V. (2007). Introduction to Multiple Attribute Decision-making (MADM) Methods. In: *Decision Making in the Manufacturing Environment*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London.

Rechenberg, I. (1965). *Cybernetic solution path of an experimental problem*. Technical Report, Royal Aircraft Establishment Library Translation No. 1112, Farnborough, UK.

Rechenberg, I. (1973). *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution*. Frommann-Holzboog, Stuttgart, Germany.

Sa'idi, M., Mostoufi, N., Sotudeh-Gharebagh, R. (2013). Modelling and optimisation of continuous catalytic regeneration process using bee colony algorithm. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 91(7): pp. 1256–1269.

Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process – what it is and how it is used, *Mathematical Modeling* 9, 161-176.

Saaty, R. W. (2003). *Decision making in complex environment: the analytic hierarchy process (AHP) for decision making and the analytic network process (ANP) for decision making with dependence and feedback*. Pittsburgh, PA: Super Decisions.

Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15, 59–62.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill International Book Company, New York.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, 83-98.

Saaty, T. L., Tran, L. T. (2007). On the Invalidity of Fuzzifying Numerical Judgments in the Analytic Hierarchy Process, *Mathematical and Computer Modelling* 46(7-8): 962-975.

Sato T., Hagiwara M. (1997). Bee System: Finding Solution by a Concentrated Search. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics "Computational Cybernetics and Simulation"*. Orlando, FL, USA pp. 3954-3959.

Schwefel, H.-P. (1965). *Kybernetische evolution als strategie der experimentellen forschung in der strömungstechnik*. Technical report, Diplomarbeit Hermann Fottinger Institut für Strömungstechnik, Technische universität, Berlin, Germany.

Šelmić, M., Edara, P., Teodorović, D. (2008). Bee colony optimization approach to optimize locations of traffic sensors on highways. *Tehnika*, vol. 6: pp. 9–15.

Šelmić, M., Teodorović, D., Vukadinović, K. (2010). Locating inspection facilities in traffic networks: an artificial intelligence approach. *Transportation planning and technology*, 33(6): 481–493.

SEMCOG Southeast Michigan Council of Governments (2008). *Travel Time Data Collection*, Technical Report, Midwestern Consulting, LLC, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University.

Sherali, H. D., Desai, J., Rakha, H. (2006). A discrete optimization approach for locating automatic vehicle identification readers for the provision of roadway travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40: 857–871.

Sobie, C. (2016). *Life Cycle Cost Analysis of Vehicle Detection Technologies and their Impact on Adaptive Traffic Control Systems*, ITE 2016 Western District Meeting, Albuquerque, New Mexico, USA

Sohi, M.F., Shirdel, M., Javidaneh, A. (2011). Applying BCO algorithm to solve the optimal DG placement and sizing problem. In *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2011 5th International, pp. 71–76. IEEE.

Stevenson, W. J. (1993). *Production/operations management*. (4th ed). Richard D. Irwin Inc., Homewood. ISBN 9780256105117

Stojanović, T., Davidović, T., Ognjanović, Z. (2015). Bee colony optimization for the satisfiability problem in probabilistic logic. *Applied Soft Computing*, vol. 31: pp. 339–347.

Storn, R., Price, K. (1995). *Differential Evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*. International Computer Science Institute, Berkeley, Technical report, CA, 1995, Tech. Rep. TR-95-012.

Stützle, T., Hoos, H.H. (2000). MAX-MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*. 16(8): 889-914.

Sun, L., Yang, J., Mahmassani, H. (2008). Travel time estimation based on piecewise truncated quadratic speed trajectory. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 173–186.

Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, ISBN 978-0-470-27858-1.

Teodorović, D. (2007). *Transportne mreže*, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd ISBN 978-86-7395-239-0

Teodorović, D., Dell’Orco, M. (2005). Bee colony optimization—a cooperative learning approach to complex transportation problems. In *Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proceedings of 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT* (13-16 September 2005).—Poznan: Publishing House of the Polish Operational and System Research, pp. 51–60.

Teodorović, D., Dell’Orco, M. (2008). Mitigating traffic congestion: solving the ride-matching problem by bee colony optimization. *Transportation Planning and Technology*, vol. 31(2): pp. 135–152.

Teodorović, D., Šelmić M. (2012). *Računarska inteligencija u saobraćaju*, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd ISBN 978-86-7395-295-6.

Teodorović, D., Šelmić, M. (2007). Rešavanje problema p-medijana primenom optimizacije kolonijom pčela. Zbornik radova XXXIV Simpozijuma o Operacionim istraživanjima SYMOPIS 2007, Zlatibor, 16-19. septembar, 2007, pp. 417-420.

Teodorović, D., Šelmić, M., Davidović, T. (2015). Bee Colony Optimization Part II: The Application Survey. *Yugoslav Journal of Operational Research*, vol. 25(2): pp. 185–2019.

Teodorović, D., Šelmić, M., Mijatović-Teodorović, Lj. (2013). Combining case-based reasoning with Bee Colony Optimization for dose planning in well differentiated thyroid cancer treatment. *Expert Systems with Applications*, vol. 40(6): pp. 2147–2155.

Teodorović, D., Šelmić, M., Praveen, E. (2010). Bee colony optimization approach to optimize placement of traffic sensors on highways. In *Proceedings of the 13th International Conference on Traffic Science*, 27.-28. maj 2010, Portoroz, Slovenia. Available from <http://www.fpp.edu/mzanne/ICTS2010/> приступљено новембра 2018.

Teodorović, D., Van Aerde, M., Zhu, F., Dion, F. (2002). Genetic algorithms approach to the problem of the automated vehicle identification equipment locations. *Journal of Advanced Transportation*, 36: 1–21.

Todorović, N., Petrović, S. (2013). Bee colony optimization algorithm for nurse rostering. *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, vol. 43(2), pp. 467–473.

Toth, C. K., Barsi, A., Lovas, T. (2003). Vehicle Recognition from LiDAR Data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, part 3/W13, pp. 163-166.

Traffic Monitoring Guide. (2016). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. (available at <https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/>)

Turner, S. M., Eisele, W. L., Benz, R. J., Holdener, D. J. (1998). *Travel Time Data Collection Handbook*, Report No FHWA-PL-98-035, Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, Texas.

Van Laarhoven, P. J. M., Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 11 Nos 1-3, pp. 229-241.

Van Leekwijck, W., Kerre, E. E. (1999). Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets and Systems*, 108(2), 159–178.

Vidas, M. (2017). *Uticaj kontrole pristupa na kapacitet i nivo usluge dvotračnih puteva*. doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.

Vincel, L. (2016). *The Man Who Invented Intelligent Traffic Control a Century Too Early*, IEEE Spectrum. (available at <https://spectrum.ieee.org/tech-history/dawn-of-electronics/the-man-who-invented-intelligent-traffic-control-a-century-too-early>)

Vukanović, S. (2010). Inteligentni transportni sistemi (ITS) i upravljanje saobraćajem – pregled, I deo, *Tehnika* 1/2010, str 11-18.

Wardrop, J. G. (1952). Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1 (3), 325–362. doi:10.1680/ipeds.1952.11259

Wedde H. F., Farooq M., Zhang Y. (2004). BeeHive: An efficient fault-tolerant routing algorithm inspired by honey bee behavior. In: Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence: 4th International Workshop, ANTS 2004, Brussels, Belgium, September 5-8, 2004. *Proceedings, Lecture Notes of Computer Science 3172*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 83–94.

Wedde, H. F., Farooq, M., Pannenbaecker, T., Vogel, B., Mueller, C., Meth, J., Jeruschkat, R. (2005a). BeeAdHoc: An Energy Efficient Routing Algorithm for Mobile AdHoc Networks Inspired by Bee Behaviour. *GECCO '05*, June 25-29.

Wedde, H. F., Farooq, M., Pannenbaecker, T., Vogel, B., Mueller, C., Meth J., Jeruschkat, R. (2005b). BeeAdHoc: An energy efficient routing algorithm for mobile Ad Hoc networks inspired by bee behaviour. *Proceedings of the conference on Genetic and evolutionary*. Washington DC, USA Pages: 153 - 160.

Wong, L.-P., Hean Low, M. Y. H, Chong C. S. (2010). Bee colony optimization with local search for traveling salesman problem. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 19(03): pp. 305–334, 2010.

Wong, L.-P., Low, M. Y. H, Chong C. S. (2009). An efficient bee colony optimization algorithm for traveling salesman problem using frequency-based pruning. In *Industrial Informatics, INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on*, pp. 775–782. IEEE.

Yang X.-S. (2005). Engineering Optimizations via Nature-inspired Virtual Bee Algorithms. In *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach*. IWINAC 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3562. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 317–323. ISBN 978-3-540-26319-7.

Yang, C., Chen, J., Tu, X. (2007). Algorithm of Fast Marriage in Honey Bees Optimization and Convergence Analysis. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, China, pp. 1794-1799.

Yang, H., Zhou, J. (1998). Optimal traffic counting locations for origindestination matrix estimation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32: 109–126.

Yang, J., Kim, S. H., Zuo, B. (2015). *Evaluation of Vehicle Detection Technologies for Applications in Georgia*, Kennesaw State University, Georgia Pavement and Traffic Research Center, Report number FHWA-GA-10-1326, Final report.

Yang, X.-S. (2008). Firefly algorithm. In: *Nature-inspired Metaheuristic Algorithms*, Chapter 8, pp. 79-90, Luniver Press, Bristol, UK. ISBN: 978-1-905986-10-1

Yang, X.S. (2010). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, Frome, United Kingdom. ISBN: 978-1-905986-28-6

Yang, X.-S., Deb, S. (2009). Cuckoo Search via Lévy Flights. In: *World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, pp. 210-214.

Yuce, B., Packianather, M. S., Mastrocinque, E., Pham, D. T., Lambiase, A. (2013). Honey Bees Inspired Optimization Method: The Bees Algorithm. *Insects*, 4, 646-662.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8, 338-353.

Zeng, F., Decraene, J., Low, M. Y. H., Hingston, P., Wentong, C., Suiping, Z., Chandramohan, M. (2010). Autonomous Bee Colony Optimization for multi-objective function. In: *Proceedings of the 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 18-23 July, Barcelona, Spain, 1–8.

Zhang, Y. (2005). *BeeHive*. PhD Thesis, University of Dortmund. Germany.

Вујаклија, М. (1954). *Лексикон страних речи и израза*, Просвета, Београд, Југославија.

Закон о Пuteвима (2018). *Службени гласник Републике Србије*, број 41/2018.

Јовановић, И. (1996). *Примена нових технологија у управљању саобраћајем на аутопуту*, дипломски рад, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд.

Кузмановић, Д., Васовић, Н., Костић, С., Симић, С., Франовић, И., Гроздановић, И., Тодоровић-Васовић, К., Ранковић Плазинић Б. (2013). *Увод у теорију хаоса*, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Рударско-геолошки факултет, Београд. ISBN 978-86-7395-317-5

Метерлинк, М. (1949) *Живот пчела*, Матица Српска, Нови Сад, Југославија.

Николић, М. (2015) *Ублажавање последица поремећаја у одвијању саобраћаја применом метахеуристике Оптимизација колонијом пчела*, докторска дисертација, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд.

Путеви Србије (2015). Карта: Мрежа државних путева, Распоред аутоматских бројача и наплатних станица у 2015. год. (расположиво на <http://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/brojanje/2015/mreza-drzavnih-puteva-raspored-brojaca-saobracaja-i-naplatnih-stanica-u-2015.pdf>, приступљено новембра 2018).

Шелмић, М. (2011). *Лоцирање објеката на транспортним мрежама применом метода рачунарске интелигенције*, докторска дисертација, Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду, Београд.

Прилог 1 Упитник за анкетирање експерата

Циљ анкете је упоређивање парова критеријума, који се односе на сензоре саобраћајног тока, посебно за примену мерења брзине возила.

Потребно је, заокруживањем одговарајућег броја, дати свој суд о узајамној важности критеријума. Што је заокружени број већи, већа је и важност једног критеријума у односу на други.

Код поређења једног пара критеријума потребно је **заокружити један број**.

Значење вредности поређења критеријума:

- 1 – критеријуми су једнаке важности
- 3 – умерена важност једног критеријума у односу на други
- 5 – велика важност једног критеријума у односу на други
- 7 – веома велика важност једног критеријума у односу на други
- 9 – екстремна важност једног критеријума у односу на други
- 2, 4, 6, 8 – Важност је између претходно дефинисаних.

Дефиниције критеријума

Користи (Benefit)		Критеријуми који означавају садашњу корист
V.1	Тачност мерења саобраћајних параметара	Степен слагања између стварних вредности и вредности добијених извором информација (мерењем)
V.2	Поузданост добијене информације	Способност извора информације за слање исправних података
V.3	Покривеност саобраћајне површине	Простор који обухвата сензор с ког је могуће добити податке, зона обухвата.
V.4	Постојеће технолошко знање и искуство	Знање особља о поједином сензору, у смислу експлоатације.
V.5	Резолуција (разазнавање, разликовање детаља)	Способност раздвајања детаља или појединих елемената, осетљивост сензора на величину објекта и/или растојања између посматраних објеката.
V.6	Компатибилност	Степен функцијске и техничке прилагођености постојећим уређајима.
V.7	Трајност	Животни век сензора.
Могућности (Opportunity)		Критеријуми који означавају потенцијалну корист у будућности
O.1	Доступност параметара саобраћајног тока	Могућност сензора за прикупљање више врста параметара (брзина, густина саобраћајног тока, итд).
O.2	Прилагодљивост зоне детекције	Могућност просторног проширења зоне детекције (снимање једне или више трака).
O.3	Могућност проширења примене	Примена сензора за друге сврхе (повезивање са ИТС-ом, надзор, детекција саобраћајних незгода, репресија прекршилаца).
Трошкови (Costs)		Критеријуми који означавају садашње трошкове
C.1	Трошкови набавке	Цена сензора и припадајуће опреме
C.2	Трошкови постављања и калибрације	Трошкови постављања (уградње) сензора на одређену локацију и његове калибрације, укључују материјал и рад.
C.3	Трошкови енергије (напајања)	Енергетски захтеви сензора, потрошња енергије.
C.4	Трошкови комуникације	Потребан капацитет у преносу информација између сензора и центра.
C.5	Трошкови одржавања	Трошкови потребни да би се сензор одржавао у исправном стању, време, средства и особље.
Ризици (Risks)		Критеријуми који означавају потенцијалне трошкове у будућности
R.1	Отпорност на уништавање	Отпорност на намерно уништавање, на саобраћајне незгоде.
R.2	Утицај временских услова	Утицај видљивости (дан/ноћ) и временских услова (киша, снег, ветар, магла, лед)

Поређење главних критеријума

Користи <i>Benefit</i>									Могућности <i>Opportunity</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Користи <i>Benefit</i>									Трошак <i>Cost</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Користи <i>Benefit</i>									Ризик <i>Risk</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Могућности <i>Opportunity</i>									Трошак <i>Cost</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Могућности <i>Opportunity</i>									Ризик <i>Risk</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошак <i>Cost</i>									Ризик <i>Risk</i>								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поређење подкритеријума у оквиру Користи (*Benefit*)

Тачност мерења саобраћајних параметара									Поузданост добијене информације								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Тачност мерења саобраћајних параметара									Покривеност саобраћајне површине								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Тачност мерења саобраћајних параметара									Постојеће технолошко знање и искуство								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Тачност мерења саобраћајних параметара									Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Тачност мерења саобраћајних параметара									Компатибилност								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Тачност мерења саобраћајних параметара									Трајност								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поузданост добијене информације									Покривеност саобраћајне површине								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поузданост добијене информације									Постојеће технолошко знање и искуство								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поузданост добијене информације									Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поузданост добијене информације									Компатибилност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Поузданост добијене информације									Трајност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Покривеност саобраћајне површине									Постојеће технолошко знање и искуство							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Покривеност саобраћајне површине									Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Покривеност саобраћајне површине									Компатибилност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Покривеност саобраћајне површине									Трајност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Постојеће технолошко знање и искуство									Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Постојеће технолошко знање и искуство									Компатибилност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Постојеће технолошко знање и искуство									Трајност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)									Компатибилност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Резолуција (разазнавање, разликовање, разлучивост)									Трајност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Компатибилност									Трајност							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Поређење подкритеријума у оквиру Могућности (Opportunity)

Доступност параметара саобраћајног тока									Прилагодљивост зоне детекције							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Доступност параметара саобраћајног тока									Могућност проширења примене							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Прилагодљивост зоне детекције									Могућност проширења примене							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Поређење подкритеријума у оквиру Трошкова (Costs)

Трошкови набавке									Трошкови постављања и калибрације								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови набавке									Трошкови енергије (напајања)								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови набавке									Трошкови комуникације								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови набавке									Трошкови одржавања								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови постављања и калибрације									Трошкови енергије (напајања)								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови постављања и калибрације									Трошкови комуникације								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови постављања и калибрације									Трошкови одржавања								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови енергије (напајања)									Трошкови комуникације								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови енергије (напајања)									Трошкови одржавања								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Трошкови комуникације									Трошкови одржавања								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Поређење подкритеријума у оквиру Ризика (Risks)

Отпорност на уништавање									Утицај временских услова								
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Ивана Јовановић, дипл. инж. саобраћаја, рођена је 25.5.1968. године у Београду. Основну школу „Жарко Зрењанин” завршила је као носилац Вукове дипломе, а средњу школу „Михаило Пупин” 1986. године у Београду. Дипломски рад под називом „Примена нових технологија у управљању саобраћајем на аутопуту” одбранила је децембра 1996. године на Одсеку за друмски и градски саобраћај и транспорт на Катедри за регулисање саобраћаја Саобраћајног факултета Универзитета у Београду. Докторске академске студије на студијском програму „Саобраћај” Саобраћајног факултета Универзитета у Београду уписала је 2011. године и положила све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом 9,33.

Од 1997. је запослена на Саобраћајном факултету прво као истраживач-таленат на Катедри за регулисање саобраћаја, као сарадник на пројектима и студијама, затим као асистент-приправник и од 2013. године као асистент за ужу научну област Операциона истраживања у саобраћају. Учествовала је у настави као демонстратор на предметима Регулисање саобраћајних токова и Саобраћајно пројектовање, касније на предметима Вероватноћа и статистика, Статистика за саобраћајне инжењере, Операциона истраживања, Операциона истраживања II и Основе статистичких истраживања на основним студијама, као и Квантитативне менаџмент методе на Мастер студијама Саобраћајног факултета у Београду. Од 2013. је ангажована на предметима на извођењу вежби на обавезном предмету Операциона истраживања, а до школске 2016/17. била је ангажована и на обавезном предмету Вероватноћа и статистика, као и на изборном предмету Основе статистичких истраживања. На Мастер академским студијама ангажована је у извођењу вежби на обавезном предмету Математичко моделирање транспортних мрежа и изборним предметима Детерминистички модели операционих истраживања, Квантитативне менаџмент методе у транспорту и комуникацијама и Метаклеуристички алгоритми инспирисани природом и примене у саобраћају.

Аутор је и коаутор више научних радова објављених у часописима од међународног значаја, саопштених на домаћим и међународним научним и стручним скуповима. Као члан ауторског тима је учествовала у више студија и пројеката у периоду од 1995-2009. године. Била је члан комисија за оцену и одбрану два завршна рада. Коаутор је помоћног уџбеника „Основе статистичких истраживања – практикум”. Положила је стручни испит и од 2001. године поседује лиценцу 370 Инжењерске коморе Србије за одговорног пројектанта саобраћаја и саобраћајне сигнализације. Била је члан организационог одбора саветовања са међународним учешћем ТЕС од 2000-2012. године као и члан Комисије за ревизију елабората „Саобраћајна студија Града Бањалука”, 2008.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Ивана Јовановић

Број индекса: DS11D010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

ИЗБОР И ЛОКАЦИЈА СЕНЗОРА НА ТРАНСПОРТНИМ МРЕЖАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДА ОПЕРАЦИОНИХ ИСТРАЖИВАЊА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Ивана Јовановић

Број индекса: DS11D010

Студијски програм: Саобраћај

Наслов рада: **ИЗБОР И ЛОКАЦИЈА СЕНЗОРА НА ТРАНСПОРТНИМ МРЕЖАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДА ОПЕРАЦИОНИХ ИСТРАЖИВАЊА**

Ментор: др Милица Шелмић, ванредни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ИЗБОР И ЛОКАЦИЈА СЕНЗОРА НА ТРАНСПОРТНИМ МРЕЖАМА ПРИМЕНОМ МЕТОДА ОПЕРАЦИОНИХ ИСТРАЖИВАЊА

која је моје ауторско дело. Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање. Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство –некомерцијално(CC BY-NC)
3. Ауторство –некомерцијално –без прерада(CC BY-NC-ND)
4. Ауторство –некомерцијално –делити под истим условима(CC BY-NC-SA)
5. Ауторство –без прерада(CC BY-ND)
6. Ауторство –делити под истим условима(CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. Ауторство. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прерада. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима. Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.