

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Милован Г. Ковач

**МОДЕЛИРАЊЕ ОДРЖИВИХ СИСТЕМА
ЛОГИСТИКЕ**

докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Milovan G. Kovač

**SUSTAINABLE LOGISTICS SYSTEMS
MODELLING**

Doctoral Dissertation

Beograd, 2022.

Ментор:

Др Снежана Тадић, ванредни професор

Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Чланови комисије:

Др Слободан Зечевић, редовни професор

Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Др Младен Крстић, доцент

Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Др Виолета Росо, ванредни професор

Chalmers University of Technology, Гетеборг, Шведска

Датум одбране: _____

МОДЕЛИРАЊЕ ОДРЖИВИХ СИСТЕМА ЛОГИСТИКЕ

Сажетак: Питање одрживости и одрживог развоја у последњим деценијама привлачи све више пажње у стручним и научним круговима. У области логистике, посебно питање јесте како достићи одрживу реализацију робних токова. Реализација робних токова одвија се уз помоћ низа логистичких активности и процеса (транспорт, претовар, складиштење, прерада робе, комисионирање итд.) чије неприкладно планирање може имати озбиљне негативне последице по одрживост. Транспорт је логистичка активност са највише негативних утицаја на економску, еколошку и друштвену одрживост логистичких система. Планирање одрживих логистичких система је предуслов одрживој реализацији робних токова и постизању одрживог развоја на регионалном и локалном нивоу. Ово је био главни мотив за избор теме ове дисертације која се бави моделирањем одрживих система логистике на макро (регионалном) и микро (локалном) нивоу. Циљ дисертације је био: идентификација кључних критеријума одрживости логистичких система на макро и микро нивоу; концептуализација и моделирање *Dry Port* (DP) концепта за речне контејнерске терминале као потенцијално одрживог правца развоја система интермодалног транспорта (ИМТ); оцена одрживости основних категорија иницијатива *city* логистике (CL); концептуализација и моделирање CL концепције засноване на развоју *city*-DP терминала у функцији речних претоварних станица; идентификација кључних критеријума/фактора/циљних функција које је потребно узети у обзир приликом моделирања/оцене одрживих логистичких система; развој адекватних модела уз помоћ којих ће системи бити моделирани/оцењени и примена развијених модела над инстанцама реалних димензија.

У дисертацији су описани проблеми одрживог развоја и улога планирања одрживих логистичких система у његовом достизању. Указано је на значај ИМТ у постизању регионалне, макро одрживости, као и на значај CL у постизању локалне, микро одрживости. На макро нивоу су дефинисани потенцијално

одрживи сценарији развоја ИМТ система кроз DP концепт, међу којима је описан сценарио који до сада није истражен у литератури - DP концепт у функцији речних контејнерских терминала. Овај концепт је детаљно разрађен, а проблем његовог моделирања је математички формулисан. За решавање је развијен оригинални хибридни модел заснована на метахеуристици оптимизације колонијом пчела (BCO, енгл. *Bee Colony Optimization*) и MARCOS (енгл. *Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution*) методи вишекритеријумског одлучивања (ВКО). На микро нивоу је спроведена оцена одрживости основних категорија иницијатива CL. За њихову оцену је развијен хибридни модел ВКО заснован на АНП (енгл. *Analytic Hierarchy Process*) и MARCOS методама у *fuzzy* окружењу. На основу резултата су утврђени потенцијално одрживи правци развоја система CL и дефинисане потенцијално одрживе концепције. По први пут је детаљно разрађена и описана концепција CL заснована на развоју *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица, а проблем моделирања таквог система је математички формулисан и решен применом развијеног BCO-MARCOS хибридног метахеуристичког модела.

У дисертацији су потврђене постављене хипотезе чиме су испуњени основни циљеви. Главни доприноси дисертације су: отварање новог простора истраживања одрживости логистичких система дефинисањем иновативних и креативних решења у области ИМТ и CL; описани су проблеми и дефинисани приступи моделирања одрживих логистичких система на макро и микро нивоу који на свеобухватан начин третирају вишекритеријумску природу проблема; дефинисан је DP концепт у функцији речних контејнерских терминала; описан је и математички формулисан проблем моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала; дефинисана је концепција CL заснована на примени *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица; описан је и математички формулисан проблем моделирања ове концепције CL; развијен је оригинални хибридни модел заснован на метахеуристици BCO и MARCOS методи ВКО који је примењен за решавање проблема моделирања DP концепта у

функцији речних контејнерских терминала, као и за решавање проблема моделирања концепције засноване на *city-DP* терминалима у функцији речних претоварних станица; представљена је студија случаја за дунавски регион за који је решен проблем моделирања система DP терминала у функцији речних контејнерских терминала; генерисана је инстанца инспирисана делом мреже града Београда за коју је моделирана CL концепција заснована на на *city-DP* терминалима у функцији речних претоварних станица; развијен је оригинални хибридни модел ВКО заснован на АНП и MARCOS методама у *fuzzy* окружењу за оцену одрживости категорија иницијатива CL; одрживост основних категорија иницијатива CL је оцењена на примеру града Београда.

Кључне речи: одрживост, одрживи развој, логистички систем, интермодални транспорт, *city* логистика, *Dry Port*

Научна област: Саобраћајно инжењерство

Ужа научна област: Интермодални транспорт, логистички центри и *city* логистика

УДК број:

SUSTAINABLE LOGISTICS SYSTEMS MODELLING

Abstract: In the last decades, the issues of sustainability and sustainable development attract much attention in expert and scientific domains. In the field of logistics, a specific issue is how to achieve sustainable goods flow realization. The realization of goods flows is supported by numerous logistics activities (transportation, transshipment, warehousing, goods processing, order picking, etc.) whose inadequate planning can lead to serious unsustainable effects. Transport is a logistics activity with the most unsustainable effects that challenge the economic, environmental and social sustainability of logistics systems and processes. The planning of sustainable logistics systems is a prerequisite for the sustainable realization of goods flows and the achievement of sustainable regional and local development. This was the main motive for the topic selection of this dissertation which focuses on the modelling of sustainable logistics systems at the macro (regional) and micro (local) levels. The goal of this dissertation was: the identification of key sustainability criteria of logistics systems at macro and micro levels, conceptualization and modelling of a Dry Port (DP) concept for inland waterway container terminals as a potentially sustainable development direction for intermodal transportation (IMT) systems; sustainability assessment of city logistics (CL) initiatives categories; conceptualization and modelling of a CL concept based on the development of city-DP terminals in the function of inland waterway transshipment stations; identification of key criteria/factors/objective functions that need to be considered when modelling/assessing sustainable logistics systems; development of adequate models for the modelling/assessment of systems and their application upon instances with realistic dimensions.

In this dissertation, the problems of sustainable development and the role of planning sustainable logistics systems in its achievement are explained. The importance of IMT in achieving regional, macro sustainability, as well as the significance of CL in achieving local, micro sustainability, are highlighted. On the macro level, potentially sustainable development scenarios of IMT systems through the DP concept are defined. A novel

scenario, not explored in the literature, is defined - the DP concept in the function of inland waterway container terminals. This concept is explained in detail, and the problem of its modelling is mathematically formulated. For solving the problem, an original hybrid model, based on the *Bee Colony Optimization* (BCO) metaheuristic and MARCOS (*Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution*) multi-criteria decision-making (MCDM) method. On the micro-level, the sustainability of CL initiatives categories is assessed. For the assessment, a hybrid MCDM model, based on the AHP (*Analytic Hierarchy Process*) and MARCOS methods in the fuzzy environment, is developed. Based on the results, potentially sustainable development directions of CL systems are highlighted, and potentially sustainable CL concepts are defined. For the first time, a novel CL concept, based on the development of city-DP terminals in the function of inland waterway transshipment stations is defined. The problem of modelling such a system is mathematically formulated and solved with the developed BCO-MARCOS hybrid metaheuristic model.

The set hypotheses are proven in the dissertation, which fulfilled its main goals. The main contributions of the dissertation are: opening of new research areas of logistics systems' sustainability by defining innovative and creative solutions in the fields of IMT and CL; the problems of modelling sustainable logistics systems at macro and micro levels are described, and the approaches for their solving that encompass their multicriterial nature are defined; the DP concept in the function of inland waterway terminals is defined; the problem of modelling the DP concept in the function of inland waterway container terminals is explained and mathematically formulated; a CL concept, based on the application of city-DP terminals in the function of inland waterway transshipment stations, is defined; the problem of modelling such CL concept is explained and mathematically formulated; an original hybrid model, based on the BCO metaheuristic and MARCOS MCDM method, is developed; the hybrid model is used for solving the problem of modelling the DP concept in the function of inland waterway terminals, as well as for solving the problem of modelling the CL concept based on city-DP terminals in the function of inland waterway transshipment stations; a case study for

the Danube region is presented for which the modelling problem of the DP concept in the function of inland waterway container terminals is solved; an instance, inspired by a part of Belgrade network, is generated for which the modelling problem of the CL concept that applies city-DP terminals in the function of inland waterway transshipment stations is solved; an original hybrid MCDM model, based on the AHP and MARCOS methods in the fuzzy environment for assessing the sustainability of CL initiatives categories is developed; the sustainability of CL initiatives categories is assessed for the case of Belgrade.

Key words: sustainability, sustainable development, logistics system, intermodal transportation, city logistics, dry port

Scientific field: Transport and Traffic Engineering

Scientific subfield: Intermodal transportation, logistics centres, and city logistics

UDC number:

САДРЖАЈ

ЛИСТА СЛИКА.....	I
ЛИСТА ТАБЕЛА	III
СПИСАК СКРАЋЕНИЦА	V
1. УВОД.....	1
2. ОДРЖИВИ РАЗВОЈ И ОДРЖИВОСТ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА.....	8
3. ПРОБЛЕМИ И ПЛАНИРАЊЕ ОДРЖИВИХ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА НА МАКРО НИВОУ	14
3.1. Проблеми одрживости логистике на макро нивоу.....	14
3.2. Одрживост система ИМТ.....	16
3.3. DP концепт као правац развоја ИМТ система	19
3.4. Сценарији развоја ИМТ система кроз концепт DP.....	21
4. МОДЕЛИРАЊЕ DP КОНЦЕПТА У ФУНКЦИЈИ РЕЧНИХ КОНТЕЈНЕРСКИХ ТЕРМИНАЛА.....	30
4.1. Моделирање DP концепта у постојећој литератури.....	31
4.2. Преглед метода коришћених за решавање проблема у области DP и ИМТ	33
4.3. Примена BCO метахеуристике и MARCOS методе BCO у постојећој литератури.....	34
4.4. Формулација проблема моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала	35
4.5. Хибридни BCO - MARCOS метахеуристички модел.....	40
4.6. Примена модела за решавање дефинисаног проблема.....	49

5. ПРОБЛЕМИ И ПЛАНИРАЊЕ ОДРЖИВИХ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА НА МИКРО НИВОУ	58
5.1. Проблеми одрживости урбаних средина	58
5.2. Заинтересоване стране и критеријуми у CL	60
5.3. Иницијативе CL.....	62
5.4. Критеријуми за оцену категорија иницијатива CL	70
5.5. Преглед метода коришћених за решавање проблема у области CL.....	72
5.6. Хибридни <i>fuzzy</i> АНП - <i>fuzzy</i> MARCOS модел	73
5.7. Оцена категорија иницијатива CL применом хибридног <i>fuzzy</i> АНП – <i>fuzzy</i> MARCOS модела	80
6. МОДЕЛИРАЊЕ ОДРЖИВИХ КОНЦЕПЦИЈА <i>CITY</i> ЛОГИСТИКЕ	90
6.1. Преглед литературе	91
6.2. Дефинисање одрживих концепција CL заснованих на логистичким центрима, ИМТ и кооперацији.....	98
6.3. Моделирање CL концепција заснованих на примени <i>city-DR</i> терминала.....	107
7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	122
ЛИТЕРАТУРА.....	125

ЛИСТА СЛИКА

Слика 3.1. – Стање система ИМТ у земљама дунавског басена (преузето из [1]).....	125
Слика 3.2. Сценарио 1 развоја ИМТ система дунавског региона	23
Слика 3.3. Сценарио 2 развоја ИМТ система дунавског региона	24
Слика 3.4. Сценарио 3 развоја ИМТ система дунавског региона	25
Слика 3.5. Сценарио 4 развоја ИМТ система дунавског региона	26
Слика 3.6. Сценарио 5 развоја ИМТ система дунавског региона	27
Слика 3.7. Сценарио 6 развоја ИМТ система дунавског региона	28
Слика 4.1. Анализирани варијанте реализације контејнерских токова (преузето из [2])	36
Слика 4.2. Алгоритамски кораци хибридног BCO - MARCOS модела (преузето из [2])	41
Слика 4.3. Излазни резултат модела – најбоље пронађено решење за иницијални сценарио (преузето из [2])	54
Слика 5.1. Алгоритамски кораци хибридног <i>fuzzy</i> AHP - <i>fuzzy</i> MARCOS модела (преузето из [3])	75
Слика 5.2. Анализа осетљивости (преузето из [3])	88
Слика 6.1. CL концепција 1 за град Београд.....	125
Слика 6.2. CL концепција 2 за град Београд.....	125
Слика 6.3. CL концепција 3 за град Београд.....	125
Слика 6.4. CL концепција 4 за град Београд.....	125
Слика 6.5. CL концепција 5 за град Београд.....	125
Слика 6.6. CL концепција 6 за град Београд.....	125

Слика 6.7. CL концепција 7 за град Београд.....125

Слика 6.8. Генерисана тестна инстанца.....125

ЛИСТА ТАБЕЛА

Табела 3.1. Преглед критеријума из релевантне литературе у области ИМТ	125
Табела 3.2. Преглед географских подручја која су била предмет анализе DP концепта	20
Табела 4.1. Преглед скорашње литературе у области моделирања DP концепта (преузето из [2]).....	31
Табела 4.2. Посматране категорије робних токова, типични представници и њихове карактеристике (преузето из [2])	50
Табела 4.3. Преостали улазни параметри модела (преузето из [2])	51
Табела 4.4. Посматране категорије терминала (преузето из [2]).....	51
Табела 4.5. Резултати модела према инстанцама пуштања (преузето из [2]).....	52
Табела 4.6. Тежински коефицијенти циљних функција за посматране сценарије	55
Табела 4.7. Резултати модела за дефинисане сценарије.....	55
Табела 5.1. Преглед критеријума коришћених за решавање проблема у скоројој литератури из области CL (преузето из [3])	61
Табела 5.2. Преглед категорија иницијатива CL обрађених у скоројој литератури (преузето из [3]).....	125
Табела 5.3. Лингвистичке оцене и њима одговарајуће <i>fuzzy</i> вредности (преузето из [3]).....	76

Табела 5.4. Матрица поређења критеријума према интересним групама (пружаоци услуга, корисници услуга, локална администрација, становништво) (преузето из [3]).....	82
Табела 5.5. Оцена категорија иницијатива CL према критеријумима (преузето из [3]).....	125
Табела 5.6. Проширена <i>fuzzy</i> матрица одлучивања (преузето из [3]).....	125
Табела 5.7. Пондерисана матрица одлучивања (преузето из [3]).....	84
Табела 5.8. Добијени <i>fuzzy</i> параметри (преузето из [3]).....	84
Табела 5.9. Излазни резултат примене хибридног <i>fuzzy</i> АНП - <i>fuzzy</i> MARCOS модела(преузето из [3]).....	85
Табела 5.10. Рангирање категорија иницијатива CL у различитим сценаријима (преузето из [3]).....	87
Табела 6.1. Преглед литературе која се бави оценом/избором одрживих концепција CL.....	92
Табела 6.2. Доминантни елементи анализираних CL концепција у скоројој литератури.....	98
Табела 6.3. Дефинисани типови генератора робних токова.....	114
Табела 6.4. Дефинисане градске зоне.....	125
Табела 6.5. Остали улазни параметри.....	125
Табела 6.6. Излазни резултати модела.....	125
Табела 6.7. Излазни резултати за варијанту са две речне претоварне станице у зони испоруке.....	125
Табела 6.8. Излазни резултати за варијанту са једном речном претоварном станицом у зони испоруке.....	125

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

3PL	<i>Third Party Logistics</i> , Специјализован тип пружаоца логистичких услуга
ANP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
ANP	<i>Analytic Network Process</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
ARAS	<i>Additive Ratio Assessment</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
BKS	<i>Best Known Solution</i> , Најбоље познато решење
BWM	<i>Best-Worst Method</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
BKO	Вишекритеријумско одлучивање
CL	<i>City Logistics</i> , City Логистика
CoCoSo	<i>Combined Compromise Solution</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
CODAS	<i>Combinative Distance-based Assessment</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
CRITIC	<i>Criteria Importance through Intercriteria Correlation</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
DEMATEL	<i>Decision making trial and evaluation laboratory</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
DP	<i>Dry Port</i> , Специјализован тип интермодалног терминала
EDAS	<i>Evaluation based on Distance from Average Solution</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Translating Reality</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
FARE	<i>Factor Relationship</i> , Метода утврђивања тежинских коефицијената критеријума
FUCOM	<i>Full Consistency Method</i> , Метода утврђивања тежинских коефицијената критеријума
ИМТ	Интермодални транспорт

LFPP	<i>Logarithmic Fuzzy Preference Programming</i> , Метода утврђивања тежинских коефицијената критеријума
MABAC	<i>Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
MARCOS	<i>Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
NUTS2	<i>Nomenclature of Territorial Units for Statistics of Second Level</i> , Номенклатура територијалних јединица за статистику другог реда
PIPRECIA	<i>Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment</i> , Метода утврђивања тежинских коефицијената критеријума
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
SITC	<i>Standard International Trade Classification</i> , Стандардна међународна трговинска класификација
SWARA	<i>Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats analysis</i> , Метода квалитативне анализе
TEU	<i>Twenty Foot Equivalent Unit</i> , Јединица димензије једнака двадесетостопном контејнеру
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
VIKOR	<i>Višekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Rešenje</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
WASPAS	<i>Weighted Aggregated Sum Product Assessment</i> , Метода вишекритеријумског одлучивања
WCED	<i>World Commission on Environment and Development</i> , Светска комисија за животну средину и развој

1. УВОД

Питање одрживости и одрживог развоја у последњим деценијама привлачи све више пажње у стручним и научним круговима [4]. Под одрживим развојем се подразумева развој који задовољава потребе актуелне генерације без угрожавања могућности задовољавања потреба будућих нараштаја (WCED - The world commission on environment and development, 1987). Његово постизање почива на три основна стуба – економска, друштвена и еколошка одрживост [6–8]. У суштини, одрживи развој би требало да одговори на питања како друштво намерава да обезбеди ефикасно и равноправно задовољавање економских, друштвених и еколошких потреба истовремено минимизирајући непожељне утицаје, и то на дугорочном плану [9].

Логистички системи морају бити у стању одговорити актуелним трендовима на тржишту и друштву уопште [10] - развоју електронске трговине, растућем тренду светске робне размене, расту потрошачког друштва, промени парадигме производње која се базира на индивидуализацији, персонализацији и краћем животном веку производа, израженој конкуренцији итд. Осим тога, ефикасност пословања у свим сферама привреде у великој мери директно зависи од ефикасности логистичких процеса/активности који се реализују па се тако може тврдити и да савремен начин живота у великој мери зависи од ефикасности логистичких система. Са друге стране, постојећи логистички системи нису у стању да се на прави начин суоче са новонасталим захтевима [11] који су последица поменутих трендова.

Реализација робних токова одвија се уз помоћ низа логистичких активности (транспорт, претовар, складиштење, прерада робе, комисионирање итд.) чије неприкладно планирање може имати озбиљне негативне последице по одрживост. Транспорт је логистичка активност са највише негативних последица [12] и као таква највише доводи у питање економску, еколошку и друштвену одрживост логистичких система и процеса. Доминантна улога друмског

транспорта у постојећим логистичким ланцима већ деценијама има критичне ефекте по одрживост јер су негативне последице код њега најизраженије – неефикасно искоришћење превозних средстава, високи трошкови, емисије штетних гасова, стварање буке, саобраћајне гужве, безбедносни ризици итд.

Како би се смањила заступљеност друмског транспорта у укупном, неопходно је планирати и развијати системе интермодалног транспорта (ИМТ). “ИМТ се односи на транспорт робе у једној те истој товарној јединици или возилу уз примену више видова транспорта, при чему не долази до претовара робе при промени вида транспорта.” [13]. Основна идеја ИТ је употреба алтернативних видова транспорта (железничког, речног, поморског и ваздушног), примена стандардизованих товарних јединица и консолидација токова преко специјализованих логистичких центара (ИМТ терминала) како би се логистички систем учинио ефикаснијим кроз смањење трошкова и остваривање временских уштеда [14].

Посебно неодрживи утицаји реализације логистичких активности, а који су последица наведених трендова, су заступљени у урбаним срединама. Прва (енгл. *First Mile*) и последња миља (енгл. *Last Mile*) испоруке, које се односе на логистичке активности у почетној и крајњој фази реализације испоруке, се углавном одвијају на простору урбаних средина, а њихова реализација има низ негативних последица по одрживост [11,15,16]. Са порастом проблема логистике и одрживости урбаних средина, расло је и интересовање за научним истраживањима на ову тему [17]. Велики број радова, посебно у последње две деценије, је анализирао различите проблеме, решења, иницијативе, концепције, приступе у области *city* логистике (енгл. *City Logistics* - CL). “CL обухвата све стратегије, технологије и решења логистике која дају подршку свим учесницима и функцијама урбаног простора без обзира на њихову величину и број, простор и границе, а у складу са њиховим појединачним и општим интересима и циљевима.” [18]. Већина постојећих истраживања се слаже да је традиционалан приступ планирању логистике, посебно у градовима, неодржив [19]. Упркос

широком спектру анализираних иницијатива, концепција CL, разлог одсуства њихове практичне примене је неразумевање природе проблема и несагледавање дугорочних последица њихове примене [20].

Поред спорадичних случајева ефикасног планирања CL, у већини случајева је она потпуно запостављена од стране урбаних планера, при чему антагонистички ставови градских власти додатно компликују постојеће стање увођењем разних рестриктивних мера. Уместо што ограничавају логистичке активности на подручју урбане средине, градска управа би требало да игра улогу интегратора, да подстакне остале заинтересоване стране на сарадњу, и да подстакне планирање и развој одрживих логистичких система.

Планирање одрживих ИМТ и CL система је увек актуелна тема, вишеструко значајна и доприноси отварању нових питања и простора за истраживање у овој области. Комплексна структура проблема [21], постојање различитих заинтересованих страна са сукобљеним циљевима [18,22,23], комплексан однос између различитих фактора и критеријума [24–26] итд., чине планирање одрживих логистичких система у области ИМТ и CL веома сложеним процесом. Решавање проблема одрживости логистичких система захтева свеобухватан приступ који ће једновремено анализирати захтеве, ставове и критеријуме свих интересних група и пронаћи компромисно решење [27]. У стручној литератури постоји одређен број радова у области планирања одрживих логистичких система [28–30], али су она углавном у контексту постојећих решења/технологија/концепција логистике. Мали је број истраживања која се баве дефинисањем иновативних праваца развоја логистичких система [17,20,26,31] и анализом у вишекритеријумском окружењу са више интересних група [32,33]. Сходно томе, мотив за избор теме дисертације је дефинисање, планирање и моделирање одрживих логистичких система на макро и микро нивоу, узимајући у обзир интересне групе и вишекритеријумску природу проблема како би се направио оквир који би планерима и доносиоцима одлука

омогућио прикладан приступ дефинисању и планирању будућих логистичких система.

У складу са претходним, предмет дисертације биће моделирање одрживих логистичких система кроз иновативне, до сада неистражене, концепте, на макро и микро нивоу. На макро нивоу ће предмет дисертације бити моделирање *Dry Port* (DP) концепта у функцији речних контејнерских терминала, а у циљу ширења гравитационе зоне речних контејнерских терминала и ефикасне интеграције унутрашњих пловних путева у постојеће ИМТ системе. Веће учешће речног транспорта у реализацији контејнерских токова наговештава постизање одрживости логистичких система на макро нивоу.

На микро нивоу ће фокус дисертације бити на оцени категорија иницијатива CL и идентификацији оних које наговештавају одрживост. На основу оних потенцијално одрживих биће дефинисан и оцењен скуп реално изводљивих концепција CL. Развојем одговарајућих категорија логистичких центара, кооперацијом и консолидацијом робних токова се отвара пут развоју потенцијално одрживих концепција CL. Фокус ће бити на моделирању CL концепције која се заснива на развоју *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица и стимулише употребу речног вида транспорта у комбинацији са лаким доставним возилима на алтернативни погон у испоруци робе.

Научни циљеви дисертације су идентификација кључних критеријума одрживости логистичких система на макро и микро нивоу, концептуализација и моделирање DP концепта за речне контејнерске терминале, оцена основних категорија иницијатива CL, као и концептуализација и моделирање CL концепције засноване на развоју *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица. Уз наведено, циљ је идентификација кључних критеријума/фактора/циљних функција које је потребно узети у обзир приликом моделирања/оцене одрживих логистичких система, развој адекватних

модела уз помоћ којих ће системи бити моделирани/оцењени и примена развијених модела над инстанцама реалних димензија.

Израда дисертације је заснована на неколико хипотеза. Прва хипотеза је да се проблемима планирања одрживих логистичких система на макро и микро нивоу може приступити на свеобухватан начин, поштујући сва три стуба одрживости – економску, еколошку и друштвену. Из ове хипотезе проистичу остале које је могуће поделити у две групе – хипотезе на којима се заснива део дисертације који се бави моделирањем одрживих логистичких система на макро нивоу и хипотезе на којима се заснива део који се бави моделирањем одрживих логистичких система на микро нивоу. Прва од хипотеза из прве групе тврди да је развој DP концепта у функцији речних контејнерских терминала потенцијално одржив јер омогућава ефикасну интеграцију речног транспорта у постојећи ИМТ систем. Овакав систем уједно представља и ембрион даљег развоја одрживог ИМТ система. Из тога проистиче и хипотеза која тврди да је могуће дефинисати модел планирања DP концепта који ће на свеобухватан начин третирати вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости. Прва хипотеза из друге групе тврди да оцена основних категорија иницијатива CL представља добар полазни корак у дефинисању одрживих решења CL. Наредна хипотеза тврди да је могуће дефинисати модел оцене основних категорија иницијатива CL који ће на свеобухватан начин третирати вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости. Потом следи хипотеза да планирање и развој концепција CL заснованих на одрживим категоријама иницијатива CL у комбинацији са савременим технологијама наговештава одрживост. Наредна хипотеза тврди да је развој *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица потенцијално одржива концепција CL јер омогућава консолидацију робних токова на периферији града што отвара пут примени речног вида транспорта и лаких доставних возила на алтернативни погон у испоруци робе. Последња хипотеза тврди да је могуће дефинисати модел планирања CL концепције засноване на примени *city-DP* терминала који ће на свеобухватан

начин третирају вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости. Са циљем потврде постављених хипотеза се приступило опсежном истраживању у оквиру дисертације чија структура је описана у наставку.

Дисертација је структурирана у седам поглавља. У наредном (поглавље 2) су описани проблеми одрживог развоја. Идентификована је улога планирања одрживих логистичких система у циљу постизања одрживог развоја. Поглавље 3 ставља акценат на одрживост на макро нивоу и улози ИМТ као кључног елемента у њеном постизању. Дат је детаљан преглед истраживања у контексту планирања система ИМТ као и критеријума одрживости ИМТ система. У истом поглављу су дефинисани и описани потенцијални сценарији развоја ИМТ за подручје дунавског региона. Поглавље 4 се бави моделирањем DP концепта у функцији речних контејнерских терминала. Концепт је детаљно описан, математички формулисан, а за решавање проблема моделирања концепта је развијен и описан хибридни модел заснован на оптимизацији колонијом пчела (енгл. *Bee Colony Optimization* – BCO) метахеуристици и *Measurement of Alternatives and Ranking According to Compromise Solution* (MARCOS) методи вишекритеријумског одлучивања (ВКО). У истом поглављу је представљена студија случаја за дунавски регион за који је решен проблем моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала. Након тога следи део дисертације који се односи на моделирање одрживих логистичких система на микро нивоу. Детаљан опис проблема одрживости на микро нивоу, улози CL у њеном достизању, критеријума одрживости CL система и проблема моделирања одрживих логистичких система на микро нивоу су представљени у поглављу 5. У истом поглављу су идентификоване основне категорије иницијатива CL, а за оцену њихове одрживости и рангирање је развијен хибридни модел ВКО заснован на *Analytic Hierarchy Process* (АНП) и MARCOS методи у *fuzzy* окружењу. Оцена одрживости и рангирање категорија иницијатива је спроведена за случај града Београда. На основу добијених резултата су дефинисане потенцијално одрживе CL концепције за Београд. У поглављу 6 је детаљно разрађена и описана

концепција CL заснована на развоју *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица. Дефинисана је инстанца инспирисана Београдом, а за моделирање концепције је прилагођен и примењен хибридни VCO – MARCOS модел. На крају дисертације дата су закључна разматрања и дискусија о потврђености полазних хипотеза, као и главни доприноси и правци будућих истраживања и примене дефинисаних модела. .

2. ОДРЖИВИ РАЗВОЈ И ОДРЖИВОСТ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА

Под одрживим развојем се подразумева развој који задовољава потребе тренутне генерације без угрожавања могућности задовољавања потреба будућих нараштаја [5]. Одрживи развој је више *усмерено кретање ка променама* него што је прецизно дефинисана дестинација [34]. Друштво, окружење, као и њихове интеракције су предмет непрестаних промена, те стога одрживи развој није фиксно стање хармоније, већ непрестани еволутивни процес [35]. Одрживи развој би требало да успостави равнотежу између економских, еколошких и друштвених компоненти како би оне заиста представљале основне стубове тог развоја [36].

У циљу суочавања са проблемима одрживости на глобалном нивоу, Уједињене Нације су 2015. године дефинисале основне категорије одрживих циљева (енгл. *Sustainable Development Goals*) које је неопходно постићи до 2030. године [37]. Циљеве одрживог развоја је могуће класификовати у три основне групе [38]: основне потребе (храна, вода, ресурси, енергија, екосистем итд.), очекивани циљеви (здравство, једнакост, сиромаштво, безбедност, образовање итд.) и одрживо планирање и управљање (инфраструктуром, урбанизацијом, потрошњом и производњом, глобалним партнерствима итд.). Постизање појединачних циљева се показало као неодрживо, јер постоји комплексна међузависност између циљева, па често побољшање на једном од поља одрживости узрокује погоршање на неком другом [39].

Иако постоје извесна залагања ка постизању одрживости, свету и даље прети криза која је последица неодрживог развоја [40]. Упркос појединим позитивним примерима, тренутни напредак на том пољу је недовољан, и чини се да је постизање циљева одрживог развоја до 2030. године немогуће [41]. Скорији извештаји Уједињених Нација алармирају да је стопа глобалног загревања већа него што је било очекивано, деградација земљишта се наставља, многе врсте се

суочавају са истребљењем, неодржива потрошња и производња и даље присутне итд., што говори у прилог чињеници да је свет далеко од постизања одрживог развоја [42]. У 2019. години су емисије CO₂ за 50% биле веће него што је то био случај 2000. године, и готово три пута веће у односу на емисије 1970. године [43]. Одрживи развој је актуелна тема која ставља под притисак академску заједницу, привреду и друштво уопште [44]. Многобројна истраживања су у последњих неколико година покушала да скрену пажњу на неодрживи пут којим се креће друштво [45]. Ипак, истраживања су углавном изолована у засебним дисциплинама, институцијама, подручјима [46]. Свеобухватни и мултидисциплинарни приступи, који окупљају све заинтересоване стране, су неопходни како би се проблеми одрживости третирали на прави начин [47].

Са циљем постизања одрживе будућности, неопходно је извршити структурне трансформације у свим сегментима свакодневног живота [48]. Дефинисани циљеви одрживог развоја, посебно они који се тичу одрживе производње и потрошње, дају на значају питањима одрживости логистичких система [49] јер је логистика носилац реализације глобалних, регионалних и локалних ланаца снабдевања [50]. Логистика је сервис глобалној и локалној економији – значајно утиче на економски раст, али истовремено реализација логистичких активности ствара бројне негативне ефекте [51]. Негативни ефекти реализације логистичких активности, посебно активности из подсистема транспорта, увелико су део ризичног тренда неодрживог развоја који нарушава сва три стуба одрживости. Најочигледније последице по економски стуб одрживости су неефикасност и непотребно „расипање“ ресурса, мања поузданост и тачност испоруке, смањење квалитета услуге и губитак тржишног удела, успоравање даљег економског развоја, висока цена робе и услуга на тржишту итд. [9]. Са еколошког становишта, негативне последице реализације логистичких активности се огледају кроз емисије штетних гасова, употреба необновљивих ресурса (фосилних горива), уништавање екосистема и претња од изумирања појединих животињских врста, стварање отпада [9]. Транспортни сектор је други највећи извор ваздушних

загађења у Европској Унији, и једини чије емисије штетних гасова су у непрестаном расту [52]. Узроковање здравствених проблема услед загађења ваздуха, смањена безбедност учествовања у саобраћају, генерисање буке и вибрација, оштећења објеката и инфраструктуре, смањење атрактивности окружења, стварање саобраћајних гужви итд., су негативне последице реализације логистичких активности по друштвени стуб одрживости [9,53].

Узевши у обзир тренутно стање, један од императива је планирање и развој логистичких система који ће допринети одрживости на сва три поља – економском, еколошком и друштвеном. Одрживе логистичке системе је потребно планирати и развијати на макро и микро нивоу. На макро нивоу, кључну игру у одрживости има примена ИМТ [54], док се на микро нивоу питањима одрживости логистичких система бави CL [55].

Реорганизација постојећих и планирање нових логистичких система са циљем постизања одрживости није лак процес. Међутим, одрживост логистичких система може се постићи кроз спровођење иновација [56], интернизацију екстерних трошкова [57], правовремене субвенције јавног и приватног сектора [58] итд., и иста се може искористити за стварање додатне вредности (енгл. *Sustainable Logistics Value Creation*), што недвосмислено доводи до остваривања конкурентске предности [59].

Стручна литература у домену ИМТ је разноврсна [60], а најчешће обрађиване теме се односе на регулаторне оквире за подстицање развоја ИМТ [54,61], планирање ИМТ терминала [62] и мреже терминала [63,64], планирање мреже услуга [65,66], избор локације ИМТ терминала [67,68], рутирање у ИМТ [69,70], одвозно/довозне операције [71,72], иновације које би подржале развој ИМТ [73,74], избор технологија логистичких активности претовара [75] итд. Упркос разноврсној научној и стручној литератури, подручје ИМТ је углавном слабо третирано у пракси. Поједине државе, попут земаља западне Европе, увиђају значај ИМТ, те у својим развојним плановима дефинишу одговорна тела и институције, промовишу употребу ИМТ, дефинишу изворе финансирања

пројеката, анализирају сценарије даљег развоја ИМТ итд. [1,76]. Европска Унија је у последње две деценије, са циљем промовисања употребе ИМТ, финансирала више пројеката попут LOGIQ, PROMOTIQ, SULOGTRA, RECORDIT, PACT, Marco Polo I, Marco Polo II [77,78] итд. Упркос пројектима и великом броју дефинисаних мера подстицања употребе ИМТ, конкретни резултати у пракси и даље изостају [79]. Као један од узрока наводи се недовољно добра повезаност између железничког и речног вида транспорта као алтернатива друмском [65]. Иако је примена ИМТ до сада већином анализирана у контексту реализације токова на великим растојањима, неопходно је испитати могућности примене ИМТ на подручју СL, а у циљу планирања и развоја одрживих логистичких система [80].

ИМТ логистичке мреже су системи који се састоје од чворова (изворишта, преломних тачака и одредишта робних токова) и веза између тих чворова успостављених неким од видова транспорта [81]. Перформансе и одрживост ИМТ мрежа у највећој мери зависе од ефикасности њихових елемената [82], при чему кључну улогу у тим мрежама играју ИМТ терминали. Развоју и ширењу ИМТ мрежа/система мора претходити идентификација и приоритизација фактора развоја система [83], дефинисање правца тог развоја [84], идентификација одговарајућих типова ИМТ терминала [85], њихових елемената и структуре [86], локације [68] итд.

Посебна пажња литературе у области развоја ИМТ система у залеђу поморских контејнерских терминала је посвећена концепту *Dry Port*-а (DP). DP је подсистем поморског контејнерског терминала, физички измештен у унутрашњост континента, који има успостављену редовну (енг. *shuttle*) везу (најчешће железничку) са матичним поморским терминалом и пружа готово све услуге тог терминала, само у његовом залеђу [87]. Концепт DP побољшава перформансе поморских контејнерских терминала, обезбеђује им потребне капацитете, повећава обим услуга које поморски терминали могу понудити тржишту и тако значајно утиче на њихову конкурентност, што као последицу има привлачење већег обима контејнерских токова [88] и повећање ефикасности целокупног ИМТ

система у залеђу. Прегледом литературе уочено је да су се досадашња истраживања бавила анализом DP концепта за различита подручја, за све насељене континенте [21,82,89–93], али искључиво у функцији поморских контејнерских терминала. У раду [84] је наговештена потенцијална одрживост DP концепта у функцији речних контејнерских терминала као концепта ефикасне интеграције унутрашњих пловних путева у постојеће ИМТ системе, али до сада се ниједно истраживање није бавило детаљнијом анализом и моделирањем таквог система.

Као што је то случај код ИМТ, на подручју CL постоји веома разноврстан скуп научних истраживања. Велики број иницијатива, мера, технологија, и концепција CL је био предмет анализе. Истраживања су претежно фокусирана на концепције кооперације [94] и консолидације токова [95], примени алтернативних видова транспорта [96,97], аутономних возила [98] и друмских возила на алтернативни погон [99] у испоруци робе, развоју интелигентних система и софтверских решења [100], оцени иницијатива CL [32,101], укључивању обичних људи [102] и јавног градског превоза путника [103] у реализацију испоруке робе итд.

У пракси је такође примењен велики број решења CL, али су њихови ефекти углавном били краткотрајни и ограничени, па су она углавном бивала напуштена након одређеног времена [104]. Главни разлог овоме је неразумевање суштине проблема CL, непотпуно планирање, недостатак сарадње између заинтересованих страна, и одсуство потребних јавних субвенција [9,20]. Међутим, иако је подручје CL у пракси углавном третирано на погрешан начин, разноврсност литературе на ову тему омогућава дефинисање нових, потенцијално одрживих решења. Решења CL дефинишу се на основу различитих иницијатива, мера, технологија, концепција, приступа итд., а чак и у оквиру једног решења је могуће дефинисати више различитих сценарија, варијанти [105].

Примена ИМТ на подручју CL, иако релативно истражена тема у постојећој литератури [80,106], је у пракси присутна у свега неколико појединачних

примера. Један од разлога слабије заступљености алтернативних видова транспорта (железничког и речног) на подручју CL је неконкурентност са друмским на кратким релацијама [96], али и недовољно ангажовање јавног сектора у финансирању и правној подршци [107]. Међутим, конкурентност алтернативних видова транспорта може бити остварена управо кроз концепције консолидације токова преко логистичких центара [108]. Консолидација токова доприноси остваривању већег обима токова што може створити предуслов ефикасној употреби ИМТ у CL, трансформисањем постојећих система у вишешалонске. Код вишешалонских система се реализација токова врши кроз више различитих фаза, нивоа (ешалона) међусобно (физички и организационо) повезаних логистичким центрима [109]. Комбиновање вишешалонских система са другим иницијативама/технологијама потенцијално представља одрживу категорију решења CL [98].

3. ПРОБЛЕМИ И ПЛАНИРАЊЕ ОДРЖИВИХ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА НА МАКРО НИВОУ

У овом поглављу је пажња усмерена ка значају планирања и развоја одрживих логистичких система на макро нивоу. На почетку су описани проблеми одрживости логистике на макро нивоу (потпоглавље 3.1.), а након тога, улога ИМТ у постизању одрживости (потпоглавље 3.2.). Веома значајан корак приликом решавања проблема планирања одрживих логистичких система је дефинисање критеријума који ће обухватити све ставове, циљеве и интересе заинтересованих страна и омогућити долазак до свима прихватљивог решења. Због тога је у истом делу поглавља дат и преглед критеријума из постојеће литературе који су узети у обзир приликом анализе и планирања одрживих ИМТ система. У циљу већег учешћа ИМТ у реализацији токова и ефикасније везе залеђа са поморским контејнерским терминалима, развија се концепт DP. Концепт DP као потенцијални правац развоја ИМТ система је описан у потпоглављу 3.3. Уз то је дат и кратак преглед литературе са фокусом на анализираним географским подручјима примене DP концепта и очекиваним ефектима примене. У четвртом делу (потпоглавље 3.4.) су дефинисани потенцијални правци његовог развоја засновани на DP концепту (потпоглавље 3.5.).

3.1. Проблеми одрживости логистике на макро нивоу

Постизање одрживости глобалних ланаца снабдевања није само циљ, већ и путовање током којег логистички системи пролазе кроз различите еволутивне фазе спровођењем иновација [110]. Под иновацијама се мисли на решења тренутних и проблема који нису лако уочљиви [111]. Иако је постизање одрживости логистичких система на макро нивоу актуелна тема, у свету и даље не постоји довољно интензивна атмосфера по питању глобалне сарадње на том пољу [112]. Неопходно је формирати стабилна, дугорочна и

мултидисциплинарна партнерства како би се радило на достизању одрживости [113].

Очекује се да ће обим интерконтиненталних робних токова који су предмет међународне трговинске размене, у односу на 2017. годину, бити дуплиран до 2025. године [114]. С обзиром да се највећи део ових токова реализује применом технологије контејнерског транспорта, у истом односу се може очекивати и раст обима интерконтиненталних контејнерских токова. Логистички системи суочавају са низом проблема који су проузроковани потребом за проширивањем капацитета и обима услуга како би испратили пораст захтева за реализацијом контејнерских токова. Због недостатка потребне логистичке инфраструктуре која ће бити у стању да опслужи те токове, јављају се уска грла [115]. Осим тога, технолошке, структурне и организационе промене су неопходне како би се обезбедила њихова ефикасна реализација [82]. Са растом обима интерконтиненталних контејнерских токова, а у циљу смањења трошкова поморског транспорта, присутан је и тренд развоја теретних бродова све већих капацитета, што ствара додатни притисак на поморске терминале који нису у стању физички да опслуже таква пловила [116]. Поморски контејнерски терминали као главна чворишта интерконтиненталних токова трпе највеће изазове у реализацији растућег обима контејнерских токова [117], а са неефикасним операцијама у поморским терминалима опада и ефикасност реализације ланаца у њиховом залеђу. Лоша модална прерасподела у корист друмског вида транспорта проузрокује свакодневно покретање великог броја друмских теретних возила, а тиме и све негативне утицаје на окружење (раст емисије штетних гасова, буке, вибрација, саобраћајних незгода итд.). Према званичним подацима EUROSTAT-а, у 2019. години је удео друмског вида транспорта у реализацији робних токова на подручју Европе чак 76.3%, железничког 17.6%, а речног свега 6.1% [118]. Последица тога је емисија огромне количине ваздушних загађења, буке, вибрација, а раст броја друмских теретних возила на путевима, посебно у лучким градовима, ствара саобраћајне гужве и

угрожава безбедност [119], повећава време путовања и потрошњу енергије. Емисије CO₂ транспортног сектора учествују са преко 25% у укупним глобалним емисијама. Од тога, за 72% емисија је заслужан друмски вид транспорта [120], а 30% је последица употребе тешких друмских теретних возила [121]. Друмска теретна возила су у 2019. години учествовала у 4.9% свих саобраћајних незгода на путевима Европске уније, али истовремено у 14.2% свих саобраћајних незгода са смртним исходом [122]. Развојем ИМТ система би се омогућила боља модална прерасподела а тиме и ублажили негативни ефекти реализације робних токова што би омогућило одржив развој.

Сматра се да ће се са достизањем и развојем одрживих логистичких система појавити нови специјализовани тип пружаоца логистичких услуга – пружаоци одрживих логистичких услуга [123]. Одрживи логистички системи комбинују све видове транспорта и њима на прави начин структуриране логистичке услуге кроз примену ИМТ. Како би се постигла глобална одрживост логистичких ланаца, неопходно је дефинисати сценарије развоја нових, одрживих логистичких система, али и стратегије њихове примене [123].

3.2. Одрживост система ИМТ

Постизање одрживости логистичких система на макро нивоу је могуће једино кроз интензивно планирање и развој система/мрежа ИМТ. Међутим, то није једноставан процес јер укључује велики број интересних група [124], сложену структуру проблема [125], и мноштво критеријума [126] на основу којих интересне групе потенцирају правац деловања. Развоју система ИМТ мора претходити дефинисање и избор одговарајућег сценарија у складу са конкретним приликама и интересима свих заинтересованих страна, а у циљу прихватљивости и одрживости [84]. Избор сценарија развоја ИМТ система мора бити спроведен у вишекритеријумском окружењу, уз решавање сукобљених циљева.

Недостатак регулаторних оквира, одговорних институција, међународне хармонизације и неопходне сарадње између заинтересованих страна су и даље

највеће препреке интензивнијем развоју система ИМТ [127]. Приликом планирања система ИМТ морају се узети у обзир постојећи терминали како развој нових не би угрозио њихову профитабилност и ефикасност стварањем додатног притиска конкуренције [64,128]. Осим за регионалне и интерконтиненталне робне токове, систем ИМТ би требало развијати и у циљу опслуге токова мањих интензитета и на краћим растојањима [129,130].

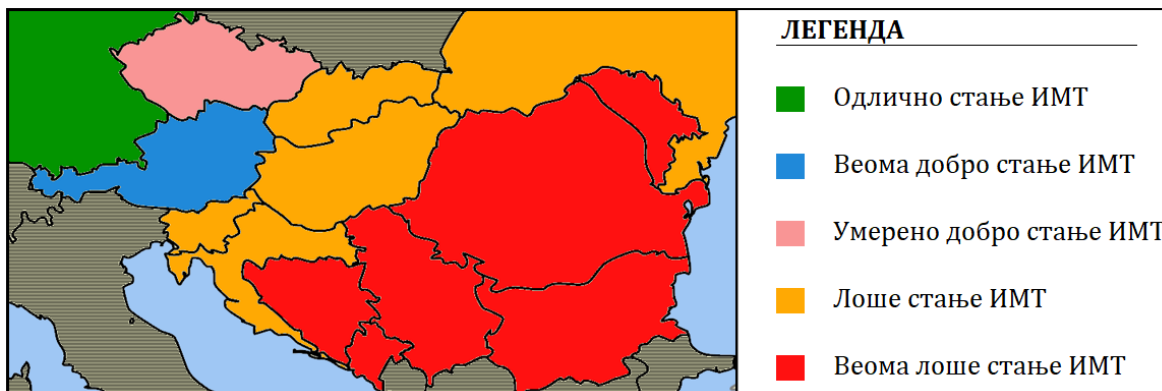
Правци развоја ИМТ система могу бити веома разноврсни [84], а разликују се према структури мреже, улози ИМТ терминала, примењеним технологијама, примењеним видовима транспорта, обухватности токова итд. У постојећој литератури, а у зависности од проблема који су решавани и приступа, разматран је широк скуп критеријума/параметара одрживости ИМТ система, а преглед најчешће коришћених дат је у Табели 3.1. Критеријуми су сврстани у пет основних група – технички, економски, друштвени, еколошки и регулаторни/политички. За сваку групу је приказан скуп најчешће анализираних критеријума уз позив на стручну литературу.

Табела 3.1. Преглед критеријума одрживости система ИМТ

<i>Група критеријума</i>	<i>Критеријум</i>	<i>Литература</i>	<i>Група критеријума</i>	<i>Критеријум</i>	<i>Литература</i>	
Технички критеријуми	<i>Ефикасност</i>	[1,3,33,131,132]	Економски критеријуми	<i>Трошкови примене и развоја/Извори финансирања</i>	[3,33,60,76,133-136]	
	<i>Време реализације тока</i>	[60,132,143,134,136-142]		<i>Оперативни трошкови</i>	[33,60,140-149,131,150-152,132-135,137-139]	
	<i>Обим и уједначеност робних токова</i>	[136,137]		<i>Трошкови набавке опреме</i>	[148]	
	<i>Расподела захтева за услугама</i>	[137]		<i>Тарифе терминала</i>	[137]	
	<i>Модална прерасподела</i>	[1,3,144]		<i>Економија обима</i>	[60,149]	
	<i>Флексибилност</i>	[33,60,132,145,150]		<i>Допринос економском развоју</i>	[3,33,136]	
	<i>Доступност</i>	[1,60,140]		<i>Безбедност</i>	[3,33,132,136,140,143,148,152]	
	<i>Квалитет услуге/Ниво услуге</i>	[1,60,132,140,142,147,153]		Друштвени критеријуми	<i>Бука/Вибрације</i>	[33,133,152]
	<i>Загушења у терминалима</i>	[143,148]			<i>Саобраћајне гужве</i>	[33,60,136,143,152]

Разноврсност	[33,136,140,149]	Конкуренција	[1,154]
Отпорност	[33,153]	Кооперација	[76,154,155]
Поузданост	[33,132,150]	Еколошки критеријуми	Емисије штетних гасова [3,33,146,147,150,60,132-134,136,138,141,144]
Просторне карактеристике	[136,151]		Очување/потрошња енергије [136]
Доступност инфраструктуре	[1,33,76,136,137]	Регулаторни/политички критеријуми	Регулативе, Закони, Институције [1,33,76,131,136,152]
Мogućност примене,	[3,33]		Међународна хармонизација [131,136,143]
Мogućност ширења и развоја			Интернализација екстерних трошкова [131,152]

Област ИМТ је различито третирана у различитим деловима света, па планирање одрживих ИМТ система/мрежа на регионалном нивоу представља велики изазов. У раду [1] је показано да квалитет ИМТ значајно варира у земљама дунавског басена (Слика 3.1). Немачка има најбољи третман и стање ИМТ, следи је Аустрија, а стање ИМТ у Чешкој и Мађарској је умерено добро. Следе Словенија и Словачка, док остале државе значајно заостају [1,76,156].



Слика 3.1. – Стање система ИМТ у земљама дунавског басена (преузето из [1])

Друмски вид транспорта је за посматрани регион доминантан, учешће железничког вида је ниско, док је употреба речног вида у ИМТ ланцима готово непостојећа. Како би се реализација регионалних робних токова у земљама дунавског басена учинила одрживом потребно је развити ИМТ систем који ће се више ослањати на железнички и речни вид транспорта. Развоју система ИМТ претходи избор правца/сценарија у којем ће се развој кретати. DP концепт је препознат у литератури као одржив правац развоја ИМТ система који повећава

учешће железничког вида транспорта у укупном. У наставку је описан DP концепт као потенцијално одржив правац развоја ИМТ система.

3.3. DP концепт као правац развоја ИМТ система

Терминали ИМТ представљају посебну врсту логистичких центара који су главни носиоци структуре ИМТ система. Могуће је дефинисати разноврстан скуп различитих категорија ИМТ терминала са становишта улоге, услуга, подсистема, технологија, димензија, обухватности токова, локације итд. [157]. Једна од најчешће разматраних категорија ИМТ терминала која је анализирана у контексту развоја ИМТ система су DP терминали. DP је подсистем поморског контејнерског терминала, физички измештен у унутрашњост континента, који има успостављену редовну (енг. *shuttle*) везу (најчешће железничку) са матичним поморским терминалом и пружа готово све услуге тог терминала, само у унутрашњости континента [87]. *Shuttle* везе су фиксних капацитета и саобраћају по устаљеним редовима вожње између DP терминала и поморских контејнерских терминала [158]. Концепт DP побољшава перформансе поморских контејнерских терминала, обезбеђује им потребне капацитете, повећава обим услуга које поморски терминали могу понудити тржишту и тако значајно утиче на њихову конкурентност, што као последицу има привлачење већег обима контејнерских токова [88]. DP концепт је стекао велику популарност у научној заједници [159] па је био предмет анализе у контексту регионалних и интерконтиненталних поморских контејнерских терминала широм света. У Табели 3.2 је дат сажет преглед скорије литературе која се бавила анализом DP концепта са акцентом на географском подручју за које је анализа спроведена. Из табеле се може видети да је највећи број истраживања концепта спроведен за земаље Европе и Азије.

Табела 3.2. Преглед географских подручја која су била предмет анализе DP концепта

Континент	Земља/ регион	Анализиране поморске луке	Литература	Континент	Земља/ регион	Анализиране поморске луке	Литература
Европа		Ђенова	[160]	Северна Америка	Сједињене Америчке Државе	луке САД-а	[93]
	Италија	луке на северу Италије	[158]		Мајами, Евергледс, Џексонвил, Савана, Чарлстон	[161]	
	Бари		[162]		Мексико	Верacruz	[163]
	Пиринејско полуострво	португалске луке	[164]	Јужна Америка	Бразил	луке у провинцији Пернамбуко	[165]
	Шпанија	шпанске луке	[166]			бразилске луке	[92]
	Финска	финске луке	[167]			Далиан	[90]
	Шведска	Готенбург	[168]		Кина	луке у провинцији Хенан	[30]
	Северна Европа	Готенбург, Хамина Котка	[169]			луке у провинцији Шандонг	[170]
	Холандија	Ротердам	[171]	Азија	Малезија	малезијске луке	[172]
	Јужни Балкан	Солун	[173]		Вијетнам	вијетнамске луке	[174]
	Србија	балканске луке	[175]		Индија	луке северозападне Индије	[176]
	Русија	руске луке	[177]		Иран	Бандар Абас	[91]
	Хрватска	Ријека	[178]		Турска	Алиага, Алсанчак	[179]
	Северни Јадран	луке северног Јадрана	[180]	Африка	Нигерија	луке источне Нигерије	[89]
	Западни Балкан	јадранске луке	[136,181]		Египат	Александрија, Декеила	[182]
Централна и Југоисточна Европа	балканске луке	[82]	Етиопија		етиопске луке	[183]	
Аустралија	Аустралија	Сиднеј	[21,184]		Того	Ломе	[185]
	Нови Зеланд	Тауранга, Оукланд	[186]		Мароко	Казабланка	[187]

Ефекти примене DP концепта се првенствено односе на повећавање ефикасности реализације контејнерских токова што доводи до смањења логистичких трошкова система и смањења негативног утицаја транспорта на животну средину [167]. Развојем DP терминала у залеђу поморског контејнерског терминала повећава се атрактивност луке, а тиме и обим контејнерских токова који ће пролазити кроз регион у ком се терминал налази. Самим тиме, може се

тврдити да је DP концепт ефикасан катализатор одрживог регионалног развоја [176].

Упркос бројним предностима и позитивним ефектима примене DP концепта, и даље постоје значајне препреке које успоравају његову ширу примену. Фактори који у највећој мери утичу и усмеравају примену DP концепта у систем ИМТ су инфраструктура, правна подршка, власништво над земљиштем и окружење [184]. Како би примена била успешна и одржива, DP концепту је потребна инфраструктурна, регулаторна, институционална и планерска подршка, као и укљученост приватног и јавног сектора [184].

Примена DP концепта није универзална и разликује се по регионима. Зависно од стања ИМТ система, проблема, структуре и обима робних токова, као и стања свих поменутих фактора који усмеравају примену концепта, правци развоја ИМТ система кроз концепт DP могу бити веома разноврсни. Однос DP терминала и осталих ентитета у ИМТ систему значајно утиче на дефинисање правца развоја. Овде се првенствено мисли на однос DP терминала и матичног поморског контејнерског терминала [188], DP терминала и осталих карика у ланцу снабдевања [93], и на однос DP терминала и региона на административном плану [189].

3.4. Сценарији развоја ИМТ система кроз концепт DP

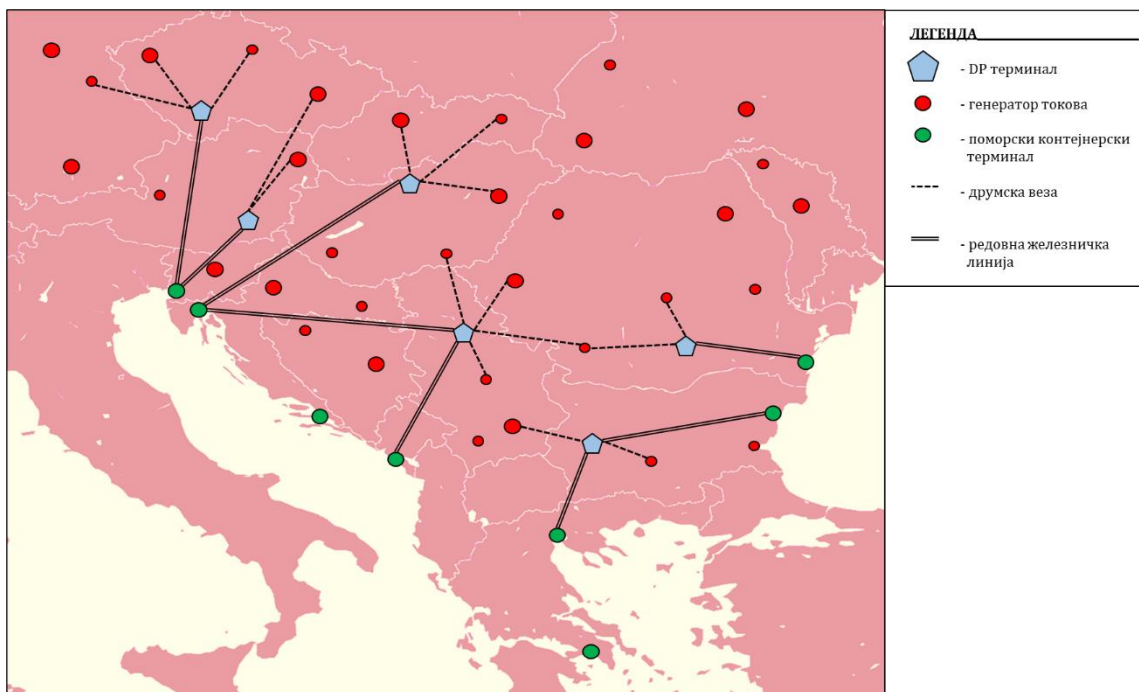
Дефинисање правца развоја ИМТ система је један од главних задатака на стратешком нивоу планирања који је неопходно решити [84]. С обзиром да ИМТ системи засновани на DP концепту могу имати различиту структуру, неопходно је дефинисати правце развоја. У наставку је дефинисано шест потенцијалних сценарија развоја ИМТ система кроз концепт DP за подручје земаља дунавског басена. Сценарији се разликују према структури мреже, улози различитих категорија терминала, нивоу потребног развоја логистичке инфраструктуре, укључености различитих видова транспорта, степену трансформације робних токова, обухватности робних токова итд. Сва већа чворишта робних токова

(регионални економски центри – градови) из посматраног региона су илустрована као генератори токова.

Сценарио 1 – Трансформација постојећих ИМТ терминала у локалне DP терминале за поморске контејнерске терминале

Идеја ***сценарија 1*** је ревитализација постојећих ИМТ терминала и њихова трансформација у локалне DP терминале за балканске поморске контејнерске терминале (Слика 3.2). Овај сценарио захтева само модернизацију и реорганизацију постојећих ИМТ терминала и успостављање железничких *shuttle* веза са поморским контејнерским терминалима. Такође, сценарио подразумева проширивање капацитета постојећих ИМТ терминала како би били у могућности опслуживања већег обима контејнерских токова. У овом сценарију су у употреби друмски и железнички вид транспорта.

Предности сценарија су ниски трошкови реализације и релативно једноставна примена. Недостаци су усмереност искључиво ка интерконтиненталним робним токовима, недовољна повезаност и синергија мреже, мала могућност кооперације између учесника и карика ланца, мала гравитациона зона система, изражена конкуренција између DP терминала итд. Недостатак сценарија је и само делимично задовољење захтева за реализацију контејнерских токова због ограничене могућности ширења капацитета постојеће инфраструктуре. Осим тога, велики број мањих, накнадно трансформисаних, DP терминала не даје оптималну конфигурацију ИМТ мреже.

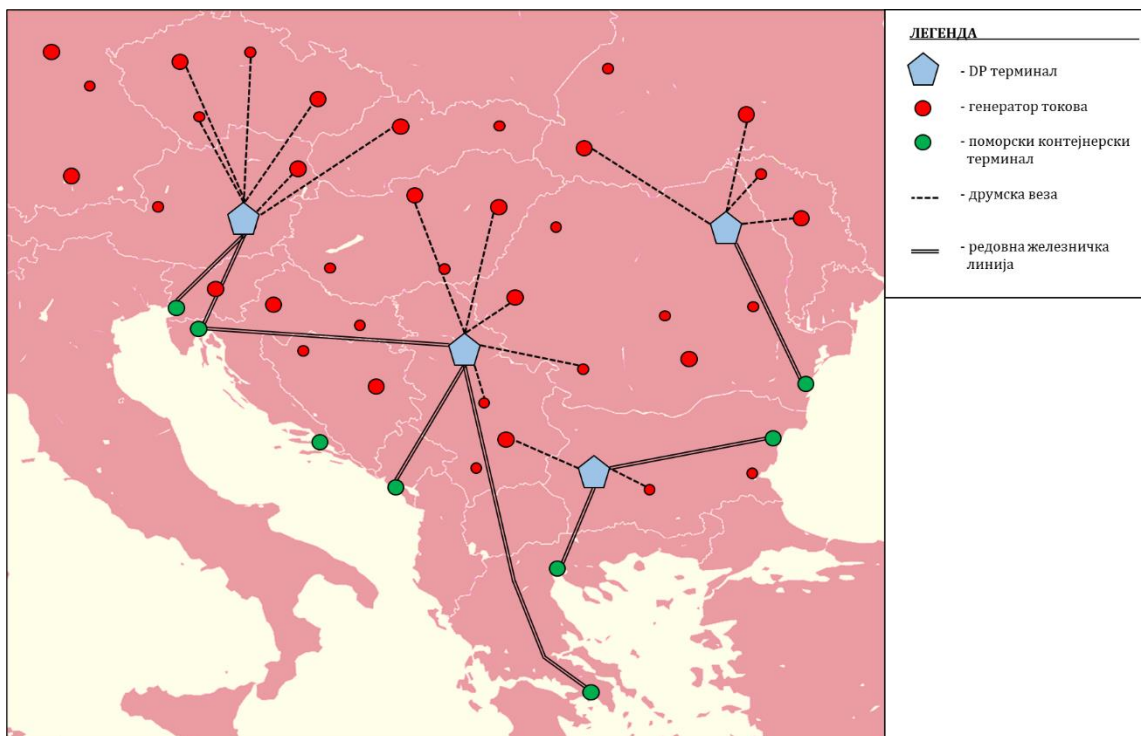


Слика 3.2. Сценарио 1 развоја ИМТ система дунавског региона

Сценарио 2 – Развој регионалних DP терминала за поморске контејнерске терминале

Сценарио 2 се односи на до сада веома истражен концепт DP-а (Слика 3.3). Сценарио подразумева развој нових, регионалних DP терминала за балканске поморске контејнерске терминале [181,190]. DP терминали би играли улогу регионалних хабова/консолидационих центара и они би били главне карике мреже. На релацији DP-поморска лука би биле успостављене железничке *shuttle* линије.

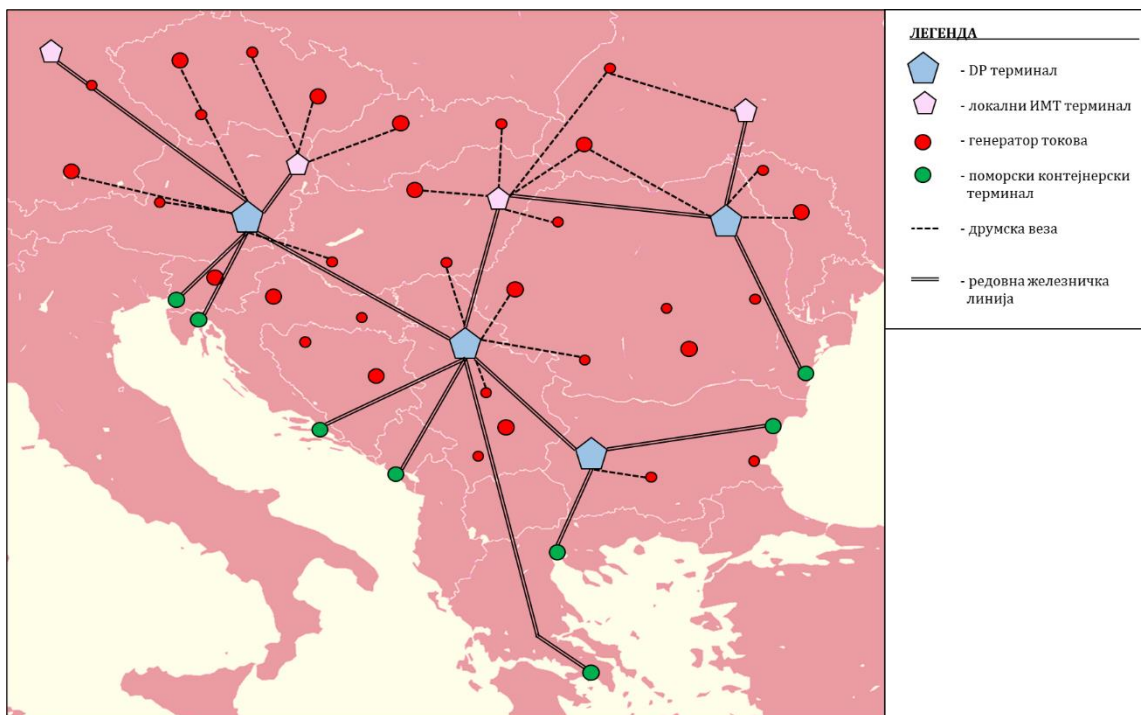
Предност сценарија је могућност задовољавања растућих захтева за реализацијом контејнерских токова развојем нове ИМТ инфраструктуре и одговарајуће укључивање у реализацију интерконтиненталних робних токова. Недостатак сценарија је примарна усмереност ка интерконтиненталним токовима тако да није погодан за реализацију регионалних робних токова. Осим тога, развој нових DP терминала не доприноси бољој повезаности регионалне ИМТ мреже и кооперацији.



Слика 3.3. Сценарио 2 развоја ИМТ система дунавског региона

Сценарио 3 – Развој мреже DP терминала за поморске контејнерске терминале

Сценарио 3 се односи на развој повезане мреже DP терминала у којој постојећи ИМТ терминали играју улогу локалних консолидационих центара за новоразвијене DP терминале [82]. Овај сценарио је надградња претходног. *Shuttle* железничке линије би постојале на релацији ИМТ терминали - DP терминали, као и на релацији DP терминали - поморски контејнерски терминали (Слика 3.4). Предност овог сценарија је боља повезаност мреже и могућност интеграције дела регионалних токова. Недостатак је и даље доминантан фокус на интерконтиненталне токове, сложенија структура мреже и сложена реализација регионалних токова.



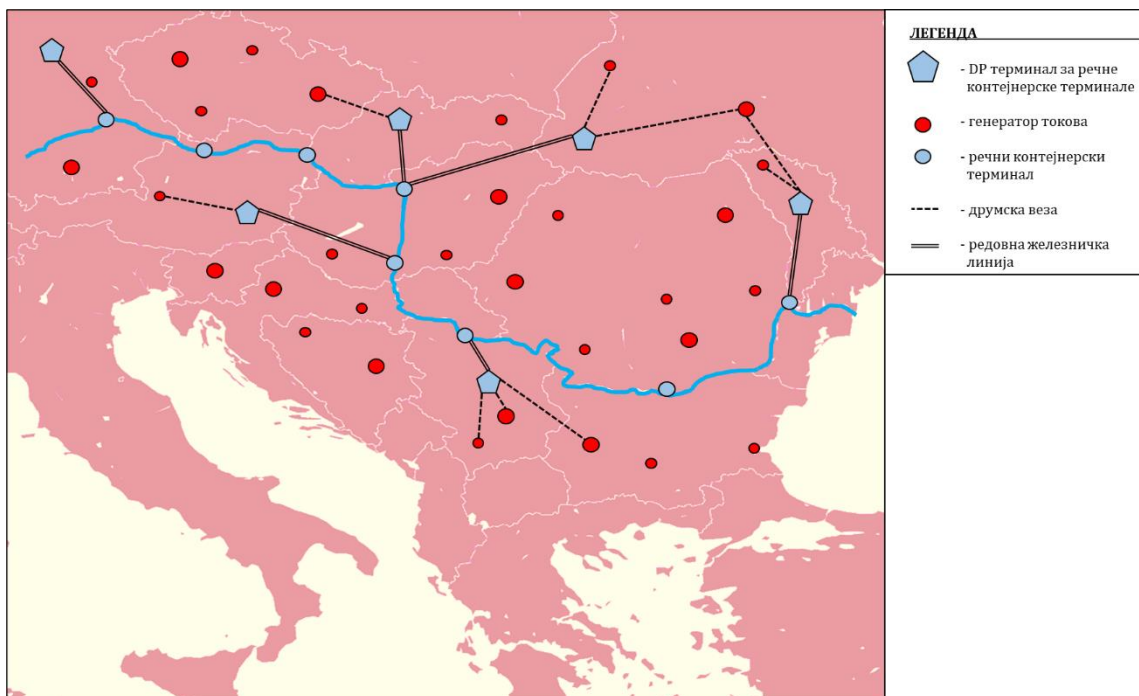
Слика 3.4. Сценарио 3 развоја ИМТ система дунавског региона

Сценарио 4 – Трансформација постојећих ИМТ терминала у локалне DP терминале за дунавске речне контејнерске терминале

Фокус **сценарија 4** је на реализацији регионалних робних токова и интеграцији речног вида транспорта у њиховој реализацији (Слика 3.5). Сценарио 4 се односи на ревитализацију постојећих ИМТ терминала и њихову трансформацију у локалне DP терминале за речне контејнерске терминале. Између DP терминала и речних контејнерских терминала успостављале би се *shuttle* железничке линије. Овај сценарио није усмерен ка реализацији интерконтиненталних токова јер нема одговарајуће везе поморских контејнерских терминала са развијеном ИМТ мрежом.

Предност сценарија 4 су ниски трошкови развоја и интеграција речног вида транспорта у реализацију регионалних робних токова. Недостатак су ограничени капацитети постојећих ИМТ терминала, недостатак повезаности између речних DP терминала, доминантна улога речног транспорта што представља

нефлексибилност сценарија и спречава привлачење већег обима различитих категорија робних токова.

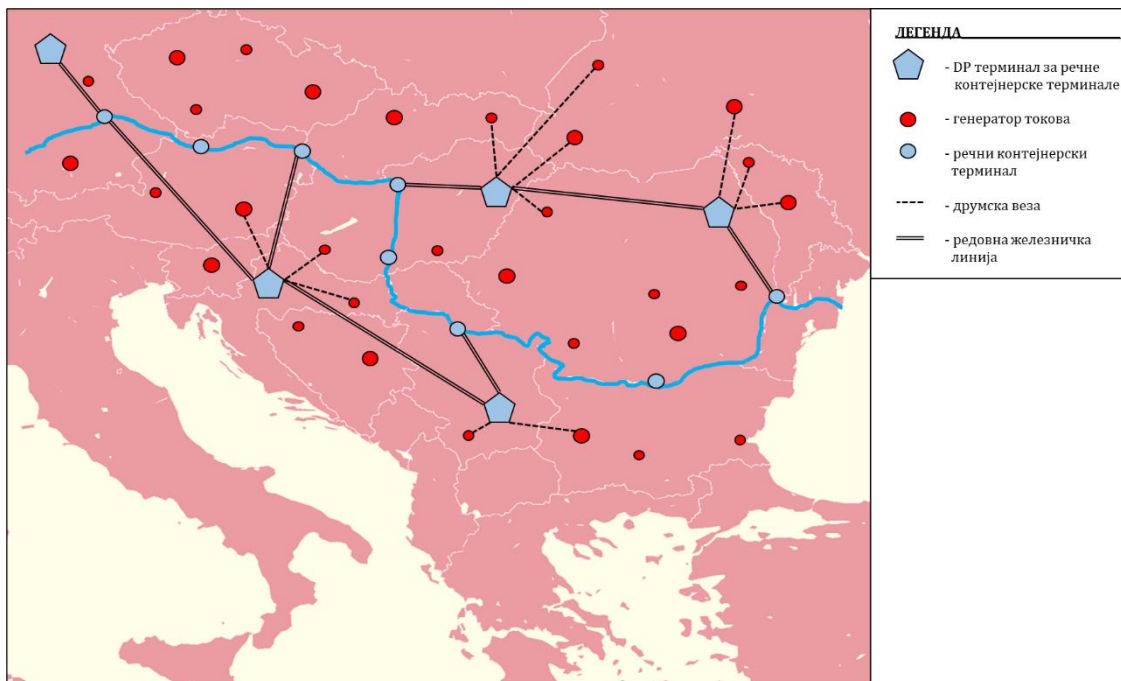


Слика 3.5. Сценарио 4 развоја ИМТ система дунавског региона

Сценарио 5 – Развој мреже регионалних DP терминала за дунавске контејнерске терминале

Сценарио 5 се односи на развој нове мреже регионалних DP терминала у функцији речних контејнерских терминала [84]. Развијени терминали имају регионални карактер и већих су капацитета. Постојање одговарајућих железничких веза између развијених DP терминала као резултат има ширу гравитациону зону система и могућност привлачења већег обима регионалних контејнерских токова. У овом сценарију би се успостављале *shuttle* железничке линије између DP терминала и речних лука, као и између самих DP терминала (Слика 3.6). Као и претходни сценарио, због одсуства одговарајуће везе поморских контејнерских терминала и развијене ИМТ мреже, сценарио није погодан за реализацију интерконтиненталних робних токова.

Предности сценарија су висок степен модалне прерасподеле на железнички и речни вид транспорта и фокус на регионални развој ИМТ система. Недостатак сценарија су релативно високи трошкови развоја нових DP терминала и сложеност примене због потребе за развојем сложене структуре система.



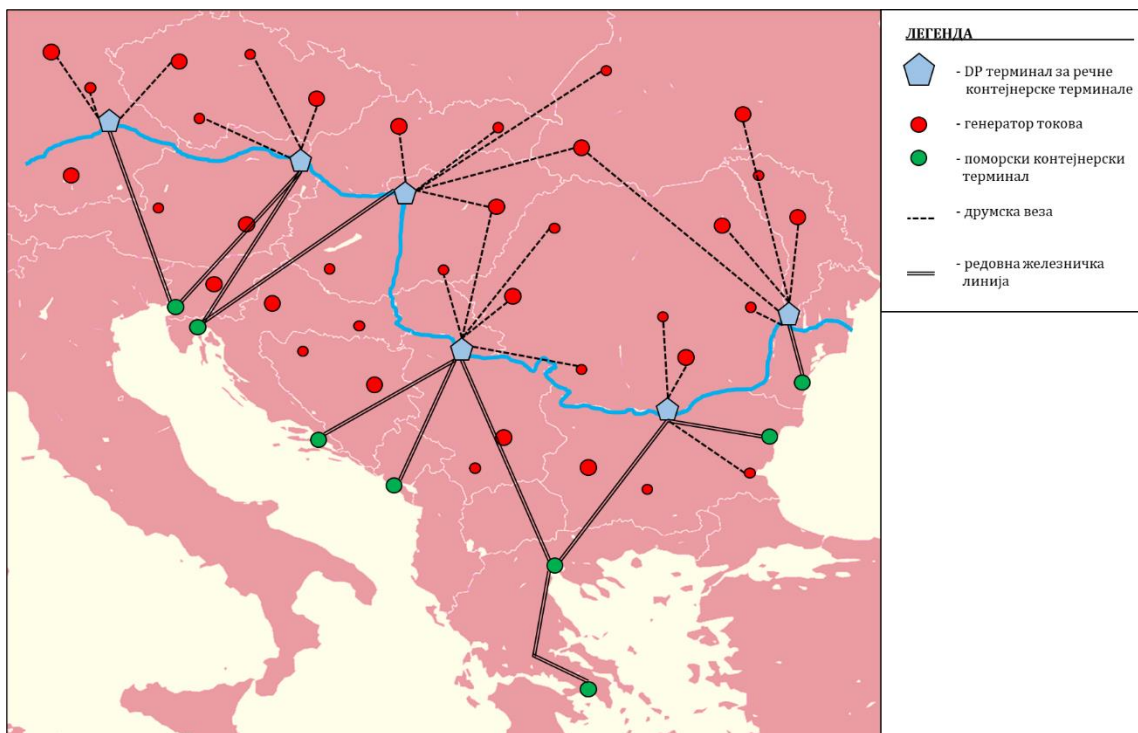
Слика 3.6. Сценарио 5 развоја ИМТ система дунавског региона

Сценарио 6 – Трансформација речних контејнерских терминала у DP терминале за поморске контејнерске терминале

Сценарио 6 представља до сада неистражен концепт у литератури – рехабилитација постојећих речних контејнерских терминала и њихова трансформација у DP терминале за поморске контејнерске терминале (Слика 3.7). Овим би се обезбедила интеграција речног вида транспорта у реализацију интерконтиненталних робних токова. Shuttle железничке линије би у овом сценарију повезале речни вид транспорта са поморским, на релацији поморски контејнерски терминали - речни контејнерски терминали.

Предност сценарија су релативно ниски трошкови развоја јер не захтева изградњу нових терминала. Недостатак је доминантан фокус на реализацију

интерконтиненталних и мања атрактивност за реализацију регионалних робних токова.



Слика 3.7. Сценарио 6 развоја ИМТ система дунавског региона

Дефинисани сценарији развоја ИМТ система су различити али постоје и неке заједничке карактеристике. Сценарији 1, 2 и 6 су примарно оријентисани према интерконтиненталним робним токовима, сценарији 4 и 5 су усмерени ка опслуживању регионалних робних токова, док сценарио 3, иако такође доминантно оријентисан ка интерконтиненталним токовима, може ефикасно опслуживати и регионалне робне токове. Сценарији 1, 4 и 6 не захтевају значајна инфраструктурна улагања јер не подразумевају изградњу нових терминала као што је то случај у сценаријима 2, 3 и 5. Што се тиче могућности модалне прерасподеле транспортног рада, сценарији 1, 2, 3 примењују само железнички и друмски вид транспорта (не рачунајући поморски вид транспорта до/од поморских контејнерских терминала), док сценарији 4, 5 и 6 подразумевају и примену речног вида транспорта.

Све наведене сценарије карактеришу различити проблеми планирања на свим нивоима и сваки заслужује посебну пажњу и анализе. У овој дисертацији ће детаљније бити анализиран сценарио који подразумева развој DP терминала за речне контејнерске терминале јер промовише интермодалност на најбољи могући начин – укључивањем друмског, железничког и речног вида транспорта. Осим тога, овакви сценарији заслужују посебну пажњу јер је неопходно извршити интеграцију регионалних робних токова у постојећи ИМТ систем Европе, а то је најбоље извести развојем регионалног ИМТ система/мреже који је максимално флексибилан са становишта расположивих видова транспорта.

4. МОДЕЛИРАЊЕ DP КОНЦЕПТА У ФУНКЦИЈИ РЕЧНИХ КОНТЕЈНЕРСКИХ ТЕРМИНАЛА

Једна од недостајућих карика ИМТ система у Европи је подстицање употребе унутрашњих пловних путева у реализацији ИМТ ланаца. Могућност достизања економије обима у речном виду транспорта је велика што би као последицу имало трошковну конкурентност у односу на друмски вид транспорта [191]. Осим тога, речни транспорт има ниже екстерне трошкове у односу на остале видове транспорта [192]. Упркос очигледним предностима, његова употреба, осим у северозападној Европи [193], деценијама стагнира [194]. Као основни проблем интеграције речног вида транспорта са постојећим ИМТ системом се наводи лоша повезаност са железничким видом транспорта [65]. Последица тога је релативно уска гравитациона зона речних контејнерских терминала, недовољна за привлачење већег обима токова.

У овом поглављу ће бити разматран DP концепт у функцији речних контејнерских терминала. Идеја је да би се развојем DP терминала за постојеће речне контејнерске терминале проширила њихова гравитациона зона, а успостављањем редовних железничких линија на релацији DP терминал – речни контејнерски терминал омогућила ефикасна интеграција речног вида транспорта у постојећи ИМТ систем.

Фокус поглавља је на решавању проблема моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала. Поглавље је организовано у шест целина. Наредно потпоглавље садржи преглед литературе која се бавила моделирањем DP концепта. Потпоглавље 4.2. садржи преглед метода коришћених за решавање планерских проблема у литератури која се односи на DP концепт. Након тога (потпоглавље 4.3) је дат преглед радова који су користили BCO метахеуристику и радова који су користили MARCOS методу ВКО. У потпоглављу 4.4 је детаљно описан и математички формулисан проблем моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала. Посматрани проблем је решен

помоћу хибридног BCO - MARCOS метахеуристичког модела чији кораци примене су описани у потпоглављу 4.5. Примена развијеног модела је демонстрирана над проблемом реалних димензија у поглављу 4.6.

4.1. Моделирање DP концепта у постојећој литератури

У постојећој литератури постоји велики број истраживања која се баве моделирањем DP концепта. Кратак преглед скорашњих истраживања у области са истакнутим карактеристикама, укљученим критеријумима и примењеним методама решавања је приказан у Табели 4.1.

Табела 4.1. Преглед скорашње литературе у области моделирања DP концепта (преузето из [2])

Литература	Подручје	Јединствена карактеристика	Критеријуми	Метода
[195]	Кина	Укључени трошкови одржавања линија на релацији DP терминал-поморски контејнерски терминал.	трошкови транспорта, трошкови претовара, трошкови развоја DP терминала, трошкови одржавања линија, трошкови одржавања инфраструктуре	Генетски алгоритам
[160]	Италија	Могућност раздвајања реализације једног тока на више DP терминала.	трошкови транспорта, трошкови претовара, трошкови развоја DP терминала	Егзактан приступ
[158]	Италија	Тактичко планирање железничких <i>shuttle</i> линија.	оперативни трошкови, трошкови у вези са услугама додатне вредности, царинско заступање и инспекција безбедности	Егзактан приступ
[90]	Кина	Идентификација потенцијалних локација DP терминала применом <i>Fuzzy C-Means</i> приступа.	трошкови развоја DP терминала, трошкови складиштења, трошкови транспорта	Fuzzy C-Means clustering - генетски алгоритам
[30]	Кина	Концесија трошкова између поморских контејнерских терминала и DP терминала.	логистички трошкови, емисије штетних гасова	Ordered Weighted Averaging - Егзактан приступ
[180]	Северни Јадран	DP као алат за достизање конкурентности поморских контејнерских терминала.	трошкови транспорта, гравитациона зона	Егзактан приступ - ANP
[91]	Иран	Идентификација потенцијалних локација DP терминала применом GIS и ANP.	трошкови транспорта, трошкови претовара, емисије штетних гасова	GIS - ANP - Егзактан приступ
[196]	Хипотетички пример	Укључивање DP, поморских контејнерских терминала и превозника као интересних група.	оперативни трошкови, екстерни трошкови, трошкови складиштења	Континуална апроксимација - Теорије игара
[197]	Кина	Укључивање неизвесности потражње и трошкова.	трошкови транспорта, трошкови претовара,	Егзактан приступ

			трошкови развоја, утицај на животну средину, утицај на друштво	
[175]	Србија	Анализа континенталне земље као подручја за развој DP терминала за регионалне поморске контејнерске терминале.	трошкови транспорта, трошкови развоја и експлоатације DP терминала	Егзактан приступ
[190]	Јадранске луке	Регионални аспект.	трошкови транспорта, трошкови развоја и експлоатације DP терминала	Егзактан приступ
[181]	Западни Балкан	Регионални аспект.	трошкови транспорта, трошкови развоја и експлоатације DP терминала	Егзактан приступ
[198]	Северна Каролина	Стохастичка природа захтева.	трошкови транспорта, трошкови складиштења, трошкови изнајмљивања контејнера, трошкови претовара, развоја и експлоатације DP терминала	Стохастичко програмирање
[82]	Југоисточна Европа	Регионални аспект. DP концепт заснован на групацијама терминала и међусобним везама између DP терминала.	трошкови транспорта, трошкови развоја и експлоатације DP терминала	Егзактан приступ
[2]	дунавски регион	DP концепт у функцији речних контејнерских терминала.	трошкови транспорта, трошкови претовара, трошкови развоја DP терминала, екстерни трошкови, временски трошкови робе, обим робних токова	BCO - MARCOS хибридни метахеуристички модел

Из Табеле 4.1 се види разноликост у начину третирања проблема моделирања DP концепта међутим, могуће је уочити неке заједничке карактеристике. Сва истраживања приликом моделирања DP концепта у обзир узимају некакву структуру трошкова, најчешће оперативних и трошкова изградње DP терминала. Поједини радови у обзир узимају и екстерне трошкове, попут [30,91,196,197]. Постојећа литература указује да развојем DP терминала поморски контејнерски терминали шире своју гравитациону зону и постају конкурентнији. У раду [180] је анализирано у којој мери развој DP терминала за поморске контејнерске терминале северног Јадрана утиче на њихову гравитациону зону и конкурентност у односу на северноевропске поморске контејнерске терминале. Већина радова у постојећој литератури разматра DP концепт у оквиру једне државе, док су радови који анализирају DP концепт у регионалном контексту

малобројни [2,82,180,181,190]. У овој дисертацији је проблем моделирања DP концепта за речне контејнерске терминале спроведен у регионалном контексту подунавља узимајући у обзир вишекритеријумску природу проблема [199]. У обзир су узети оперативни трошкови, екстерни трошкови, трошкови изградње DP терминала, временски трошкови робе, и обим токова који су привучени DP концептом [2].

4.2. Преглед метода коришћених за решавање проблема у области DP и ИМТ

Разноликост проблема који се односе на примену DP концепта, али и ИМТ генерално, је условила примену различитих метода за њихово решавање. Најчешће примењиване методе и приступи за решавање проблема су симулациони модели [200,201], методе ВКО [136,202], егзактне методе [82,158,160], метахеуристички алгоритми [90,171,195] итд.

Код комплексних комбинаторних проблема који се односе на поједине аспекте ИМТ, метахеуристички алгоритми су се показали као добар алат за решавање. Од познатих метахеуристичких алгоритама у литератури из области ИМТ су примењивани генетски алгоритам [195], имитациони алгоритам [203], симулирано каљење [204,205], табу претрага [206], адаптивна претрага широке околине (енгл. *Adaptive Large Neighborhood Search*) [207], оптимизација групом честица [208], прождрљива насумична адаптивна претрага (енгл. *Greedy Randomized Adaptive Search*) [209,210] итд. Рад [2] представља јединствен случај примене ВСО метахеуристике за решавање проблема у домену ИМТ. Метахеуристика је искомбинована са MARCOS методом ВКО како би се на одговарајући начин третирао вишекритеријумска природа проблема моделирања DP концепта за речне контејнерске терминале.

4.3. Примена ВСО метахеуристике и MARCOS методе ВКО у постојећој литератури

ВСО метахеустика је инспирисана понашањем пчела у природи и спада у групу метахеуристичких алгоритама заснованих на интелигенцији групе [211]. ВСО се показала као компетентна метахеустика за решавање проблема комбинаторне оптимизације пружајући квалитетна решења комплексних проблема за прихватљиво време рада рачунара [212]. Различите класе проблема су успешно решаване применом ВСО метахеуристике, попут проблема р центара [213], *anticovering* локацијског проблема [214], рутирања возила [215], пројектовања транзитне мреже [216], утврђивања мера временских ограничења у CL [217] итд. Постоје бројне технике решавања проблема вишекритеријумске оптимизације, а њихов основни задатак је дефинисати приступ оптимизацији више циљних функција одједном. Неке од најпопуларнијих метода решавања оваквих проблема су лексикографска метода [218], метода тежинских коефицијената [219], метода ε -ограничења [220], метода растојања [221] итд. Проблем код лексикографске и методе ε -ограничења је што се у суштини губи димензија вишекритеријалности. Како би се вишекритеријалност проблема третирао на најбољи могући начин, у овој дисертацији се вредновање решења врши помоћу комбинације идеја метода тежинских коефицијената и методе растојања кроз примену MARCOS методе ВКО, по узору на рад [2].

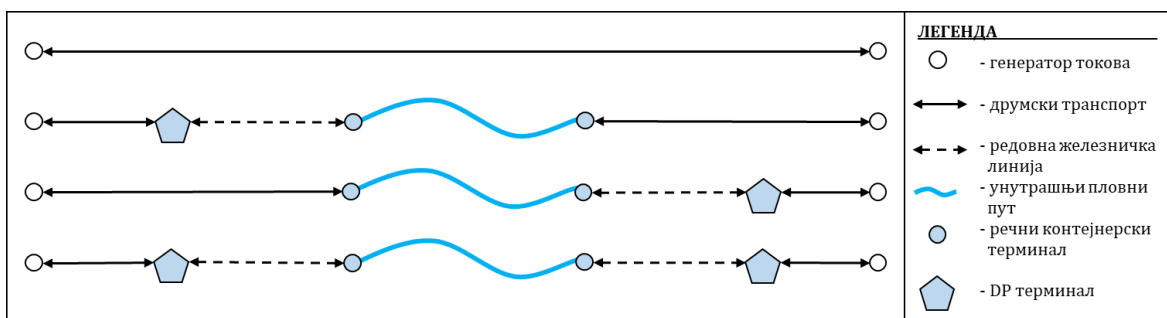
MARCOS метода ВКО дефинише однос посматраних алтернатива (у овом случају допустивих решења) у односу на идеално и анти-идеално решење [222] на основу чега се одређује степен корисности (квалитет) посматраних алтернатива (решења) [223]. MARCOS метода показала као стабилна у динамичком окружењу и неосетљива на промене у мерним скалама јер комбинује концепте односа и сортирања референтних величина [223]. Поређењем са другим ВКО методама, попут TOPSIS, EDAS, MABAC, SAW, ARAS и WASPAS методе, је показано да MARCOS методу одликују ефикасност, обухватност и стабилност [223].

MARCOS метода, иако релативно нова у литератури, је пронашла своју примену како у стандардној форми [223], *fuzzy* окружењу [224], *grey* окружењу [225], сферичном *fuzzy* окружењу [226] и *q-rung orthopair fuzzy* окружењу [227]. Осим самосталне примене, MARCOS метода је комбинована са другим методама попут FUCOM [222], *fuzzy* FARE [84], *fuzzy* AHP [228], *fuzzy* SWARA [1], CRITIC [229], PIPRECIA [230], BWM [231] итд. У раду [2] је MARCOS метода искоришћена у оквиру метахеуристичког алгоритма BCO за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације. Компетентност MARCOS методе у домену ВКО као и њена једноставна интеграција са другим методама су основни разлози укључивања у оквиру метахеуристичке методе.

4.4. Формулација проблема моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала

У овом делу је описан проблем моделирања DP концепта у функцији речних контејнерских терминала. Посматрана мрежа се састоји од генератора робних токова и речних контејнерских терминала. Генератори су покретачи робних токова, а између парова генератора постоји одређен обим робне размене према различитим категоријама добара. Почетна претпоставка је да се сви токови реализују друмским видом транспорта. Испитује се могућност развоја DP терминала за речне контејнерске терминале и омогућавање комбинованог друмско-железничко-речног вида транспорта за посматране контејнерске токове са циљем постизања одрживости ИМТ система. Развијени DP терминали играју улогу локалних/регионалних консолидационих центара и омогућавају промену модалитета транспорта са друмског на железнички вид на релацији DP терминал – речни контејнерски терминал, након чега се ток пребацује на речни транспорт. Начини комбиновања видова транспорта у ИМТ системима су бројни, али за потребе дисертације су сведени на неколико најлогичнијих и најизводљивијих варијанти (Слика 4.1.) [2]. С обзиром да је фокус на испитивању могућности развоја DP терминала за речне контејнерске терминале, како би се

реализација токова алоцирала на речни вид транспорта, није узета у обзир могућност реализације робних токова друмско-железничким видом транспорта.



Слика 4.1. Анализиране варијанте реализације контејнерских токова (преузето из [2])

Проблем се састоји од одређивања броја и локације DP терминала, дефинисања њихових капацитета и алокације контејнерских токова. У обзир су узете различите категорије капацитета DP терминала због нелинеарне везе између капацитета и трошкова развоја терминала [232]. Формулација је инспирисана постојећим формулацијама за моделирање DP концепта [30,82,160], али је прилагођена проблему развоја DP концепта за речне контејнерске терминале укључујући више функција циља како би се проблем третирао на што реалнији начин [2].

Нека је F скуп свих контејнерских токова који се реализују, при чему је сваки контејнерски ток f дефинисан извориштем (f_o), одредиштем (f_d), врстом робе (f_c), обимом контејнерских токова за ту врсту робе израженим у TEU (енгл. *Twenty Foot Equivalent Unit*) (q_f), као и просечном масом једног TEU за посматрану врсту робе (q_{f_c}). Нека је D скуп потенцијалних локација развоја DP терминала, а L скуп речних контејнерских терминала. Нека је $C_{f_o f_d}^{tran}$ јединични трошак директног транспорта између изворишта и одредишта посматраног тока. Нека су $C_{f_o l_1 l_2 f_d}^{tran}$, $C_{f_o d_1 l_1 l_2 f_d}^{tran}$, $C_{f_o d_1 l_1 l_2 d_2 f_d}^{tran}$ јединични трошкови транспорта посматраног тока f у случају његове реализације преламањем преко речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , DP терминала d_1 и речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , или DP терминала d_1 и d_2 и речних контејнерских терминала l_1 и l_2 . Нека су $C_{f_o f_d}^{ext}$,

$C_{f_0 l_1 l_2 f d}^{ext}$, $C_{f_0 d_1 l_1 l_2 f d}^{ext}$, $C_{f_0 l_1 l_2 d_1 f d}^{ext}$ и $C_{f_0 d_1 l_1 l_2 d_2 f d}^{ext}$ јединични екстерни трошкови, а $t_{f_0 f d}$, $t_{f_0 l_1 l_2 f d}$, $t_{f_0 d_1 l_1 l_2 f d}$, $t_{f_0 l_1 l_2 d_1 f d}$ и $t_{f_0 d_1 l_1 l_2 d_2 f d}$ јединични трошкови времена за посматрану категорију робе тока f , а у зависности од алокације тока у односу на посматране речне контејнерске терминале l_1 и l_2 , као и DP терминале d_1 и d_2 . Нека бинарна променљива X^f износи 1 у случају да се контејнерски ток f реализује искључиво друмским видом транспорта, 0 у супротном, и нека бинарна променљива $X_{l_1 l_2}^f$ износи 1 уколико се ток f реализује комбинованим друмско-речним видом транспорта преко речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , 0 у супротном. У случају да се ток f реализује преко DP терминала d_1 , а потом преко речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , бинарна променљива $X_{d_1 l_1 l_2}^f$ износи 1, 0 у супротном. Исто тако, бинарна променљива $X_{l_1 l_2 d_1}^f$ износи 1 уколико се ток f реализује прво преко речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , а потом преко DP терминала d_1 , 0 у супротном. На крају, уколико се ток f реализује преко DP терминала d_1 , потом речних контејнерских терминала l_1 и l_2 , а потом преко DP терминала d_2 , бинарна променљива $X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f$ износи 1, 0 у супротном. Нека променљива L_{ld} означава са колико DP терминала речни контејнерски терминал l има везу. Скуп посматраних категорија терминала са становишта капацитета је обележен са G . Бинарна променљива Y_d износи 1 уколико је DP терминал лоциран у d , 0 у супротном, док бинарна променљива W_{dg} износи 1 уколико је лоцирани DP терминал d категорије g . Променљива Q_d се односи на број TEU који се прелама преко терминала d , при чему је $C_g^{transhipment}$ јединични трошак претовара једног TEU за категорију терминала g . Нека је $C_g^{category}$ трошак изградње DP терминала категорије g , а C_g^Q максимални обим контејнерских токова који могу бити алоцирани на терминал категорије g . Променљива Q_l се односи на број TEU који се преламају преко речног контејнерског терминала l , при чему су трошкови претовара у речном контејнерском терминалу l обележени са $C_l^{transhipment}$. Са

овако дефинисаним параметрима и променљивим одлучивања, проблем је математички могуће формулисати на следећи начин:

$$\min: \sum_f q_f \cdot f_c \cdot \left(X^f \cdot C_{fofd}^{tran} + \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{l_1 l_2}^f \cdot C_{fo l_1 l_2 f d}^{tran} + \sum_{d_1}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l_1 l_2}^f \cdot C_{fo d_1 l_1 l_2 f d}^{tran} + X_{l_1 l_2 d_1}^f \cdot C_{fo l_1 l_2 d_1 f d}^{tran}) \right. \\ \left. + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f \cdot C_{fo d_1 l_1 l_2 d_2 f d}^{tran} \right) + \sum_d^D \sum_g^G W_{dg} \cdot Q_d \cdot C_g^{transshipment} + \sum_l^L Q_l \cdot C_l^{transshipment} \quad (1)$$

$$\min: \sum_f q_f \cdot f_c \cdot \left(X^f \cdot C_{fofd}^{ext} + \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{l_1 l_2}^f \cdot C_{fo l_1 l_2 f d}^{ext} + \sum_{d_1}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l_1 l_2}^f \cdot C_{fo d_1 l_1 l_2 f d}^{ext} + X_{l_1 l_2 d_1}^f \cdot C_{fo l_1 l_2 d_1 f d}^{ext}) \right. \\ \left. + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f \cdot C_{fo d_1 l_1 l_2 d_2 f d}^{ext} \right) \quad (2)$$

$$\min: \sum_f q_f \cdot C_f^{time} \cdot \left(X^f \cdot t_{fofd} + \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{l_1 l_2}^f \cdot t_{fo l_1 l_2 f d} + \sum_{d_1}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l_1 l_2}^f \cdot t_{fo d_1 l_1 l_2 f d} + X_{l_1 l_2 d_1}^f \cdot t_{fo l_1 l_2 d_1 f d}) \right. \\ \left. + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f \cdot t_{fo d_1 l_1 l_2 d_2 f d} \right) \quad (3)$$

$$\min: \sum_d^D \sum_g^G W_{dg} \cdot C_g^{category} \quad (4)$$

$$\max: \sum_f q_f \cdot \left(\sum_{d_1}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l_1 l_2}^f + X_{l_1 l_2 d_1}^f) + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f \right) \quad (5)$$

поштујући ограничења:

$$X^f + \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{l_1 l_2}^f + \sum_{d_1}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2}^f + \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{l_1 l_2 d_2}^f + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L X_{d_1 l_1 l_2 d_2}^f = 1 \quad \forall f \in F \quad (6)$$

$$Y_d \geq X_{d l_1 l_2}^f + X_{l_1 l_2 d}^f + X_{d l_1 l_2 d_2}^f + X_{d_2 l_1 l_2 d}^f \quad \forall d, d_2 \in D; \\ d \neq d_2; \\ f \in F; l_1, l_2 \in L; \\ l_1 \neq l_2 \quad (7)$$

$$L_{ld} \geq X_{d l l_2}^f + X_{d l_2 l}^f + X_{d l l_2 d_2}^f + X_{d l_2 l d_2}^f \quad \forall d, d_2 \in D; \\ d \neq d_2; \\ f \in F; l, l_2 \in L; \\ l \neq l_2 \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} L_{ld} \leq 1; \quad \forall l \in L \quad (9)$$

$$Q_d \geq \sum_f \left(q_f \cdot \left(\sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d l_1 l_2}^f + X_{l_1 l_2 d}^f) + \sum_{d_2}^D \sum_{l_1}^L \sum_{l_2}^L (X_{d l_1 l_2 d_2}^f + X_{d_2 l_1 l_2 d}^f) \right) \right) \quad \forall d \in D \quad (10)$$

$$Q_l \geq \sum_f \left(q_f \cdot \left(\sum_{l_2}^L (X_{l l_2}^f + X_{l_2 l}^f) + \sum_{d_1}^D \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l l_2}^f + X_{l l_2 d_1}^f) + \sum_{d_1}^D \sum_{d_2}^D \sum_{l_2}^L (X_{d_1 l l_2 d_2}^f + X_{d_2 l l_2 d_1}^f) \right) \right) \quad \forall l \in L \quad (11)$$

$$Q_d \leq \sum_g^G W_{dg} \cdot C_g^Q \quad \forall d \in D \quad (12)$$

$$\sum_{g \in G} W_{dg} = 1 \quad \forall d \in D \quad (13)$$

$$C_l^{\text{transshipment}} \geq C_{l-\text{basic}}^{\text{transshipment}} + \sum_{d_1 \in D} \sum_g (W_{dg} \cdot C_g^{\text{transshipment}} \cdot L_{ld_1} - C_{l-\text{basic}}^{\text{transshipment}}) \quad \forall l \in L \quad (14)$$

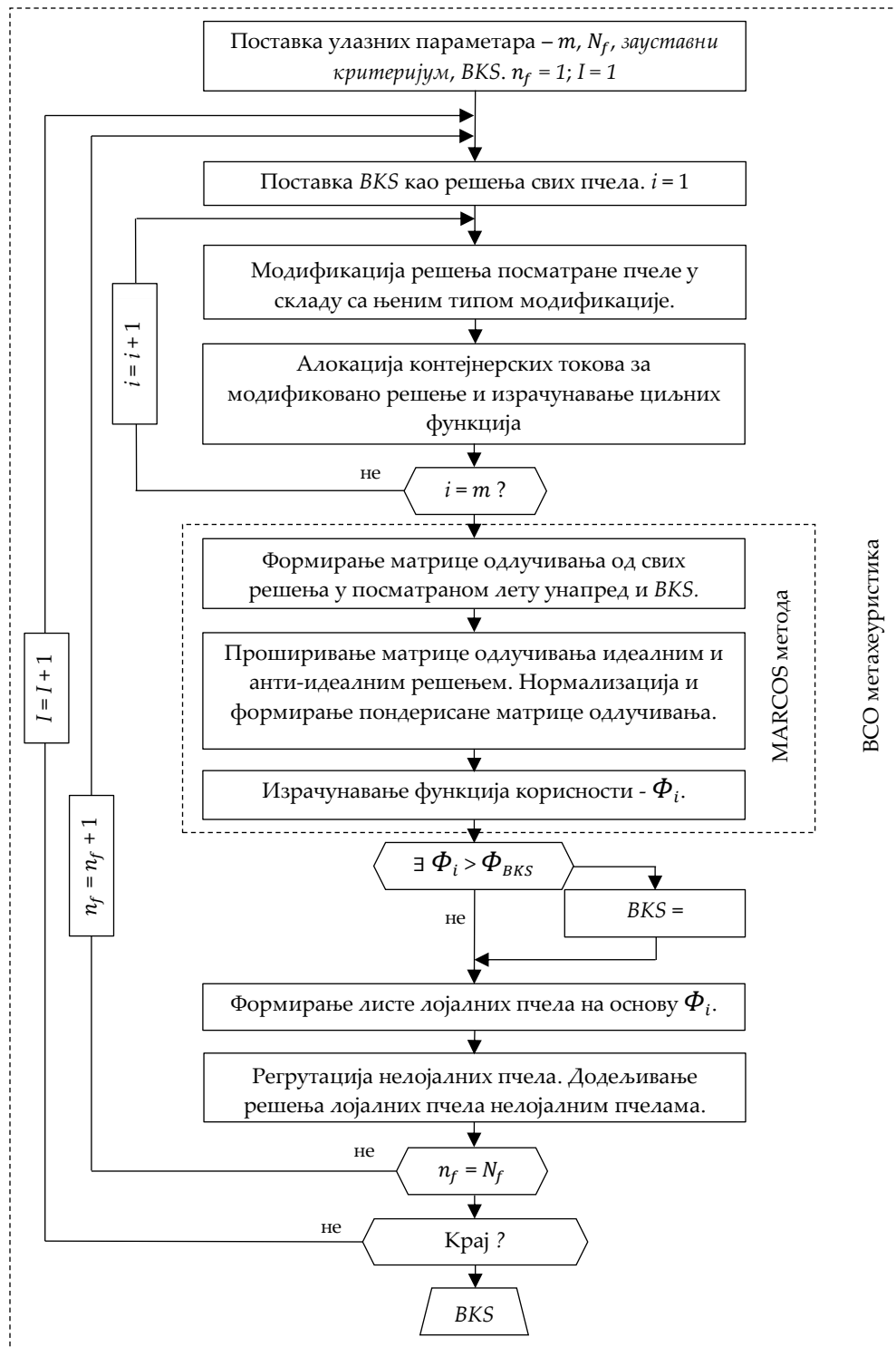
Функција циља (1) минимизира укупне оперативне трошкове система који се састоје од трошкова транспорта, трошкова претовара у DP терминалима и трошкова претовара у речним контејнерским терминалима. Функција циља (2) минимизира екстерне трошкове система, док функција циља (3) минимизира временске трошкове робе. Временски трошкови робе су третирани као засебна функција циља како би се истакао различит степен компатибилности појединих врста роба са речним видом транспорта и ИМТ генерално. Функцијом циља (4) се минимизирају трошкови изградње DP терминала, док се функцијом циља (5) максимизира обим контејнерских токова у гравитационој зони DP терминала. Циљ је развој система који ће имати што већу гравитациону зону, што је предуслов за регионалну одрживост.

Ограничење (6) води рачуна да се сваки ток може реализовати на само један начин. Неједнакост (7) прати на којим локацијама су развијени DP терминали. Неједнакост (8) прати са којим DP терминалима речни контејнерски терминали имају везу, при чему се ограничењем (9) не допушта веза са више од једним DP терминалом. Неједнакошћу (10) се прати обим контејнерских токова који се преламају преко DP терминала, а неједнакост (11) прати исти параметар за речне контејнерске терминале. Ограничењем (12) се обезбеђује да обим контејнерских токова који се преламају преко DP терминала не премашују њихове капацитете. С намером је изостављено ограничење капацитета речних контејнерских терминала јер је циљ развој новог система који ће привући већи обим интермодалних токова и неће бити ограничен и условљен постојећим капацитетима речних контејнерских терминала. Постојећи капацитети су углавном мали, али и такви углавном неискоришћени, што потврђује чињеницу да тренутни систем није третиран на најбољи начин. Ограничењем (13) се води рачуна да се лоцираним DP терминалима може доделити максимално једна

категорија терминала према капацитету. Ограничење (14) за претоварне тарифе у речним контејнерским терминалима поставља претоварну тарифу њима додељених DP терминала. У случају да речни контејнерски терминал није повезан ни са једним DP терминалом, усваја се базна тарифа претовара $C_{l-basic}^{transshipment}$.

4.5. Хибридни VCO - MARCOS метахеуристички модел

У овом потпоглављу је представљен хибридни VCO - MARCOS метахеуристички модел за решавање проблема моделирања DP концепта за дунавске контејнерске терминале. Због комбинаторне комплексности проблема се приступило решавању помоћу метахеуристичког алгоритма, а интеграција VCO методе у оцене квалитета решења је оправдана због присуства више критеријумских функција. Улога VCO алгоритма је претрага поља допустивих решења, док се MARCOS метода користи приликом оцене њиховог квалитета. Модел је развијен у фебруару 2021. године за потребе рада [2]. Уопштени алгоритамски кораци VCO - MARCOS модела су приказани на Слици 4.2. У наставку су детаљно описане VCO метахеуристика и MARCOS метода VCO.



Слика 4.2. Алгоритамски кораци хибридног VCO - MARCOS модела (преузето из [2])

BCO метахеуристика

Понашање пчела у природи, приликом потраге хране, се оквирно може свести на неколико фаза. На почетку, пчеле врше лет до изабраних извора хране и прикупљају нектар. Након тога, пчеле се враћају у кошницу и деле између себе информације о квалитету/количини хране коју су пронашле током свог лета. Након извршене комуникације између пчела, свака пчела одлучује да ли ће у наредној потрази за храном остати при свом извору или ће пратити неку другу пчелу до њеног извора хране. На основу оваквог понашања пчела, дефинисани су основни кораци BCO метахеуристике.

Првобитна варијанта BCO алгоритма се односила на конструктиван приступ решавању проблема [211], а касније је развијена и варијанта која функционише по принципу побољшавања решења [213] која је искоришћена и у овој дисертацији. Алгоритамски кораци BCO засноване на побољшавању решења су следећи [211,213]:

Корак 1. Иницијализација улазних параметара – броја пчела (m), броја летова унапред по итерацији (N_f), и зауставног критеријума. Дефинисање почетног решења.

Корак 2. У свакој итерацији, свака пчела врши N_f летова унапред. На почетку итерације, свим пчелама се додељује најбоље познато решење (енгл. *Best Known Solution* – BKS). Приликом сваког лета унапред, пчела врши модификацију свог решења на основу дефинисаних оператора модификације. Након сваке модификације решења следи лет уназад - натраг у кошницу.

Корак 3. Приликом лета уназад, свака пчела врши оцену квалитета свог решења у односу на решења осталих пчела. Код проблема максимизационе природе, нормализована вредност решења (O_i) пчеле i се израчунава на основу:

$$O_i = \frac{\Phi_i - \Phi_{min}}{\Phi_{max} - \Phi_{min}} \quad (15)$$

где је Φ_i агрегирана вредност квалитета решења i -те пчеле према свим циљним функцијама, а Φ_{max} и Φ_{min} представљају највећу и најмању агрегирану вредност квалитета решења за све пчеле у посматраном лету. У овом случају, Φ_i је уствари

излазна величина MARCOS методе ВКО чији су алгоритамски корази објашњени у наредном делу овог потпоглавља.

Корак 4. На основу квалитета решења се за сваку пчелу i израчунава вероватноћа да ће остати лојална свом решењу (p_i^{loyal}) на основу:

$$p_i^{loyal} = e^{-\frac{O_{max}-O_i}{n_f}} \quad (16)$$

где је O_{max} највећа нормализована вредност функција циља пчела у посматраном лету n_f . За сваку пчелу се генерише случајан број на интервалу између 0 и 1, и у случају да је тај број мањи од вероватноће p_i^{loyal} , пчела ће остати лојална свом решењу.

Корак 5. Након повратка у кошницу се врши регрутација нелојалних пчела од стране оних које су остале лојалне свом решењу. Вероватноћа да ће лојална пчела k бити праћена ($p_k^{following}$) се израчунава на основу:

$$p_k^{following} = \frac{O_k}{\sum_{q \in L_k} O_q} \quad (17)$$

где O_k представља нормализовану вредност функције циља лојалне пчеле k , L_k скуп свих лојалних пчела, а $\sum_{q \in L_k} O_q$ збир нормализованих вредности функција циља свих лојалних пчела.

Корак 6. На основу методе рулета се за сваку нелојалну пчелу утврђује коју од лојалних пчела ће она пратити у следећем лету унапред.

Корак 7. Итерације понављати док се не испуни услов заустављања алгоритма. У случају да се у било ком тренутку пронађе решење боље од BKS извршити његово ажурирање.

MARCOS метода ВКО

Улазне величине MARCOS методе су скуп алтернатива (R) – у овом случају скуп решења свих пчела у посматраном лету, скуп критеријума (C) - у овом случају посматраних функција (1)-(5), тежински коефицијенти функција циља (w_j) и матрица одлучивања Δ . Матрица одлучивања Δ се састоји од вредности решења пчела према функцијама циља у посматраном лету, при чему x_{ij} представља

вредност решења i -те пчеле према j -ој функцији циља за посматрани лет унапред. Нека m представља укупан број пчела, а n укупан број функција циља. У оквиру развјеног хибридног метахеуристичког модела, MARCOS метода се примењује у трећем кораку извршавања VCO метахеуристике (једначина 15). Како би се испитало да ли су решења пчела у посматраном лету боља од BKS, приликом њихове оцене применом MARCOS методе се у обзир узима и до тада BKS.

Алгоритамски кораци MARCOS методе су преузети из рада [222] и прилагођени су у контексту њене примене у оквиру метахеуристичке методе VCO:

Корак 1. За оцену решења пчела у посматраном лету унапред, у матрицу одлучивања се укључује и BKS. Формирати проширену матрицу одлучивања. Проширивање се врши дефинисањем идеалног (R_{id}) и анти-идеалног (R_{ai}) решења:

$$\Delta = \begin{matrix} R_{ai} \\ R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \\ BKS \\ R_{id} \end{matrix} \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ x_{ai1} & x_{ai2} & \cdots & x_{ain} \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \\ x_{BKS1} & x_{BKS2} & \cdots & x_{BKSn} \\ x_{id1} & x_{id2} & \cdots & x_{idn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Корак 2. Нека је C^{max} скуп свих максимизационих функција циља и C^{min} скуп свих минимизационих функција циља. R_{id} и R_{ai} се дефинишу на основу:

$$R_{ai} = \min_{1 \leq i \leq m+1} x_{ij}, j \in C^{max} \text{ and } \max_{1 \leq i \leq m+1} x_{ij}, j \in C^{min} \quad (19)$$

$$R_{id} = \max_{1 \leq i \leq m+1} x_{ij}, j \in C^{max} \text{ and } \min_{1 \leq i \leq m+1} x_{ij}, j \in C^{min} \quad (20)$$

Корак 3. Формирати нормализовану матрицу одлучивања $U = [u_{ij}]_{m+1 \times n}$ на основу:

$$u_{ij} = \frac{x_{id}}{x_{ij}}, j \in C^{min} \quad (21)$$

$$u_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{id}}, j \in C^{max} \quad (22)$$

Корак 4. Формирати пондерисану матрицу одлучивања $V = [v_{ij}]_{m+1 \times n}$ множењем елемената матрице U са одговарајућим тежинским коефицијентима циљних функција:

$$v_{ij} = u_{ij} \cdot w_j \quad (23)$$

Корак 5. Израчунати степен корисности решења пчела у односу на R_{id} (K_i^+) и R_{ai} решења (K_i^-):

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{id}} \quad (24)$$

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (25)$$

где представља S_i представља збир свих елемената пондерисане матрице V за i -то решење пчела:

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (26)$$

Корак 6. Одредити вредност функције корисности Φ_i за свако посматрано решење пчела на основу:

$$\Phi_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (27)$$

где $f(K_i^+)$ представља функцију корисности у односу на R_{id} , а $f(K_i^-)$ представља функцију користности у односу на R_{ai} , које се израчунавају на основу:

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (28)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (29)$$

Корак 7. Рангирање решења пчела на основу Φ_i . Решења са већом вредности Φ_i су уједно и боља. Уколико постоји решење пчеле које је према Φ_i параметру боље од ВКС и осталих решења у посматраном лету унапред, то решење се усваја као ново ВКС. Вредности Φ_i параметра представљају основу по којој се у оквиру трећег корака извршавања ВСО вреднује квалитет решења пчела за посматрани лет унапред.

Оцена квалитета и модификација решења пчела

Код решавања проблема моделирања ИМТ мрежа, временски најзахтевнији део процеса јесте оцена вредности циљних функција. Разлог је потреба за алоцирањем посматраних токова за дату структуру мреже. Алоцирање токова у ИМТ мрежама је посебан проблем обрађен у великом броју радова [233,234]. Алокација токова је само једна компонента много сложенијег проблема који се односи и на утврђивање броја DP терминала, лоцирање DP терминала, дефинисања са којим речним контејнерским терминалима ти терминали имају везу, и дефинисања категорије и капацитета DP терминала. У приступу из ове дисертације, након модификације решења од стране пчела, потребно је изнова алоцирати контејнерске токове за посматрану структуру система како би било могуће оценити то решење са аспекта свих посматраних циљних функција. Дакле, алокација контејнерских токова се врши сваки пут када пчела модификује своје решење, и врши се према истом принципу за све пчеле [2].

Алокација токова за посматрану структуру ИМТ мреже је спроведена кроз примену хеуристичког приступа инспирисаног идејом из рада [209]. Идеја на којој се заснива хеуристика за алокацију токова је утврђивање приоритета алоцирања токова на основу користи/трошкова те алокације. Њена примена даје приоритет алоцирању оних токова који највише доприносе побољшавању посматраних циљних функција. Због вишекритеријумске природе посматраног проблема, при утврђивању приоритета алоцирања токова су у обзир узети оперативни трошкови, екстерни трошкови, као и временски трошкови који би уследили алокацији посматраног тока на неки од DP терминала. Приоритет алоцирања посматраног тока f ($f \in F$ према формулацији) на DP терминал d ($Priority_f^d$), при чему је $d \in D$ се одређује према:

$$Priority_f^d = Q_f \cdot \frac{w_{op} \cdot S_{op}^{f,d} + w_e \cdot S_e^{f,d} - w_t \cdot S_t^{f,d}}{\max\{w_{op}, w_e, w_t\}} \quad (30)$$

при чему Q_f представља обим тока f (изражен у TEU), $S_{op}^{f,d}$, $S_e^{f,d}$ и $S_t^{f,d}$ оперативне уштеде, уштеде екстерних трошкова и временске трошкове реализације тока f преко терминала d , а w_{op} , w_e , и w_t тежинске коефицијенте тих циљних функција.

За сваку оцењену структуру ИМТ мреже се формира листа која се састоји од вредности $Priority_f^d$ за све токове, и све могуће начине реализације истих у посматраној структури мреже. Листа се сортира у опадајућем поретку, након чега се токови редом алоцирају према вредностима $Priority_f^d$ поштујући ограничења капацитета лоцираних DP терминала. Оваквим приступом се даје предност токовима који највише утичу на побољшање решења према посматраним циљним функцијама.

Због сложености структуре проблема, за његово ефикасно решавање од кључног је значаја начин модификације постојећег решења од стране пчела. Хетерогена структура пчела се показала као добар начин заобилажења локалног оптимума код сложених комбинаторних проблема [216]. Дефинисана су три типа пчела који се разликују према начину модификације решења. Код сваког типа пчела, приликом модификације решења постоји одређен ниво стохастичности како би се обезбедила разноликост приликом претраге допустивих решења.

Tun 1 пчела модификује решење отварањем нових DP терминала или затварањем неких од постојећих. Одлука о отварању новог DP терминала d ($d \in D$) за насумично одабрани речни контејнерски терминал l ($l \in L$) се доноси на основу параметра $Potential_d^l$ који представља максималне могуће користи од отварања тог терминала у односу на збир елемената $Priority_f^d$ на релацији $d-l$:

$$Potential_d^l = \sum_{f=1}^F Priority_f^{d-l} \quad (31)$$

Приликом отварања DP терминала за речни контејнерски терминал l , пчела у обзир узима z најближих локација посматраном речном контејнерском терминалу ($z \in D$). Вероватноћа да ће се DP терминал лоцирати на локацији d се израчунава на основу:

$$p_d^{locating} = \frac{Potential_d^l}{\sum_{q=1}^z Potential_q^l} \quad (32)$$

У односу на вероватноће $p_d^{locating}$ се бира локација отварања новог DP терминала помоћу методе рулета. Капацитет новоотвореног DP терминала се бира на случајан начин из скупа расположивих категорија терминала.

У случају затварања DP терминала, избор терминала за затварање се врши у односу на искоришћења капацитета постојећих DP терминала. Вероватноћа затварања DP терминала d ($d \in \{\forall d \in D | Y_d = 1\}$) се израчунава на основу:

$$p_d^{closing} = \frac{\left(1 - \frac{Q_d}{Q_d^{max}}\right)}{\sum_{q=1}^{n_d} \left(1 - \frac{Q_q}{Q_q^{max}}\right)} \quad (33)$$

где Q_d означава обим контејнерских токова који се реализују преко терминала d , Q_d^{max} капацитет терминала d , а n_d укупан број лоцираних DP терминала. Оваквим приступом се приликом затварања DP терминала даје предност терминалима који слабије искоришћавају своје капацитете. Методом рулета се у односу на вероватноће затварања терминала врши избор терминала за затварање, где $p_d^{closing}$ означава вероватноћу затварања DP терминала d . У случају да сви лоцирани терминали у потпуности искоришћавају своје капацитете, на случајан начин се бира терминал за затварање. С обзиром да отварање и затварање DP терминала реализује исти тип пчела, у моделу је подешено да се у 70% случајева тај тип пчела определи на корак отварања новог терминала.

Тун 2 пчела модификује решење променом категорије капацитета неког од постојећих DP терминала. Овај тип пчеле на случајан начин бира неки од лоцираних DP терминала и на основу његовог промета TEU утврђује које су две суседне (мања и већа) категорија капацитета терминала. Пчеле овог типа на случајан начин бирају једну од суседних категорија за посматрани терминал.

Тун 3 пчела модификује решење променом локације отворених DP терминала. Вероватноћа да ће терминалу d ($d \in \{\forall d \in D | Y_d = 1\}$) бити промењена локација се утврђује на основу:

$$p_d^{relocating} = 1 - \frac{Potential_d^{l_d}}{\sum_{q=1}^{n_d} Potential_q^{l_q}} \quad (34)$$

где l_d представља речни контејнерски терминал којем је DP терминал d претходно додељен. Након избора терминала за промену локације, утврђује се z најближих локација терминалу, након чега се нова локација терминала утврђује на основу вероватноћа из једнакости (32), применом методе рулета.

Низом експеримената је утврђено да најбоље резултате даје поставка са пет пчела, од чега су по једна типа 1 и типа 2, а 3 пчеле припадају типу 3. За број летова унапред у једној итерацији је усвојена вредност 5. За параметар z је усвојена вредност 5. Зауставни критеријум алгоритма је 10 узастопних итерација без побољшања решења већег од 0.005 према параметру Φ_i у односу на претходно ВКС. Експеримент је спроведен на рачунару следећих карактеристика: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz са 8 GB RAM меморије.

4.6. Примена модела за решавање дефинисаног проблема

У овом делу је демонстрирана примена развијеног метахеуристичког модела над инстанцом из реалности. Потпоглавље је подељено на три целине. У првој су описани улазни параметри и начин њиховог апроксимирања у моделу. У другој су приказани резултати примене модела, а у трећој дискусија добијених резултата.

Улазни параметри

Генератори робних токова су у овом примеру представљени као регионални чворови дефинисани на основу званичне номенклатуре територијалних јединица за статистику другог реда (енгл. *Nomenclature of Territorial Units for Statistics of Second Level - NUTS2*) као и просторно-географских карактеристика региона. За анализу су узете у обзир основне категорије робних токова према Стандардној међународној трговинској класификацији (енгл. *Standard International Trade Classification - SITC*) [235]. Свака категорија роба је подељена на сврсисходне поткатегије, а за сваку поткатегију је утврђен типичан представник, његове карактеристике, просечна количина робе по контејнеру и њена вредност на тржишту (Табела 4.2.). Временска вредност робе је одређена на основу рада [81].

Табела 4.2. Посматране категорије робних токова, типични представници и њихове карактеристике (преузето из [2])

Категорија токова	Поткатегорија	Типичан представник	Количина робе у једном 20ft контејнеру (kg)	Просечна вредност на тржишту (€/kg)	Просечна вредност робе у једном контејнеру (€/TEU)	Временска вредност робе (€/TEU*h)
Храна и живе животиње	зачини, кафа, чајеви итд.	кафа	~ 16250	3.00	48750	1.11
	свеже воће, поврће, месо, риба итд.	јабукe	~ 11000	5.00	55000	0.32
Дуван и пића	производи од дувана	цигарете	~ 2000	11.00	22000	0.73
	пића	пиво	~ 8670	0.76	6589	0.23
Сирови материјали	дрво, гума, папир, текстил итд.	дрвна грађа	~ 25000	0.19	4750	0.16
	метал	сировине од метала	~ 25000	0.27	6750	0.24
Минерална горива и лубриканти	фосилна чврста горива	угаљ	~ 25000	0.20	5000	0.17
	фосилна течна горива	бензин	~ 16800	0.41	6888	0.24
	гас	пропан	~ 10353	0.18	1864	0.06
	електрична енергија	-	-	-	-	-
Животињска и биљна уља	-	уља	~ 19000	0.91	17289	0.59
Хемикалије	хемијски производи	вештачка ђубрива	~ 21500	2.57	55255	1.89
	органске и неорганске хемикалије	течне и гасовите хемикалије	~ 15750	0.67	10552.5	0.36
Готови производи	-	цемент	~ 24500	1.50	36750	1.25
Машине и транспортна опрема	канцеларијске машине и електрични уређаји	PC рачунар	~ 5500	20.00	110000	3.85
	индустријске машине и возила	-	-	-	-	-
Остала произведена добра	остали производи	намештај	~ 12500	9.70	121250	4.15
	индустријска постројења и префабриковане грађевине	-	-	-	-	-

На основу званичних статистика EUROSTAT-а и националних влада држава подунавског региона је утврђен обим размене између земаља према свим поткатегоријама токова. Контејнерски токови између парова генератора су распоређени у пропорцији са бројем становника региона у којима се ти генератори налазе. Анализа укључује генераторе са простора 14 држава/региона – Јужна Немачка, Аустрија, Чешка Република, Словачка, Мађарска, Румунија, Молдавија, Западна Украјина, Словенија, Хрватска, Србија, Босна и Херцеговина, Црна Гора и Бугарска. У обзир је узето осам речних контејнерских терминала лоцираних на стратешки значајним локацијама – Дегендорф, Линц, Беч, Будимпешта, Баја, Београд, Русе и Гиургулешти.

У Табели 4.3 су приказани остали улазни параметри – јединични транспортни и емисиони трошкови различитих видова транспорта, њихове просечне брзине, базне претоварне тарифе у речним контејнерским терминалима и просечно време задржавања робе у терминалима. На основу постојеће литературе [1,26,33,136], искуства аутора у области и карактеристика проблема, усвојени су следећи тежински коефицијенти циљних функција: оперативни трошкови – 0.25, екстерни трошкови – 0.22, трошкови времена – 0.16, трошкови изградње терминала – 0.13, обим обухваћених контејнерских токова – 0.24. Према [232], посматрано је девет различитих категорија DP терминала према капацитету (Табела 4.4). Терминали већих капацитета имају веће трошкове развоја, али мање јединичне трошкове претовара.

Табела 4.3. Преостали улазни параметри модела (преузето из [2])

<i>Величина</i>	<i>Вредност</i>	<i>Мерна јединица</i>	<i>Извор</i>
Јединични трошкови друског транспорта	0.110	€/t*km	[31]
Јединични трошкови железничког транспорта	0.050	€/t*km	[31]
Јединични трошкови речног транспорта	0.015	€/t*km	[31]
Екстерни трошкови друског транспорта	1.65	€/t*km	[192]
Екстерни трошкови железничког транспорта	1.10	€/t*km	[192]
Екстерни трошкови речног транспорта	0.26	€/t*km	[192]
Базна претоварна тарифа у речним контејнерским терминалима	50	€/TEU	апроксимирано
Просечна брзина друмских теретних возила	60	km/h	емпиријска вредност
Просечна брзина железничких састава	40	km/h	емпиријска вредност
Просечна брзина речног пловила	13	km/h	[236]
Просечно време задржавања робе у ИМТ терминалу	12	h	апроксимирано

Табела 4.4. Посматране категорије терминала (преузето из [2])

<i>Категорија терминала (TEU)</i>	<i>Трошкови изградње (€)</i>	<i>Јединични трошкови претовара (€/TEU)</i>
10000	3500000	70
30000	9500000	65
50000	15000000	60
100000	47000000	55
150000	60000000	52.5
250000	90000000	50
500000	138000000	45
1000000	210000000	43
1500000	260000000	41.5

Резултати

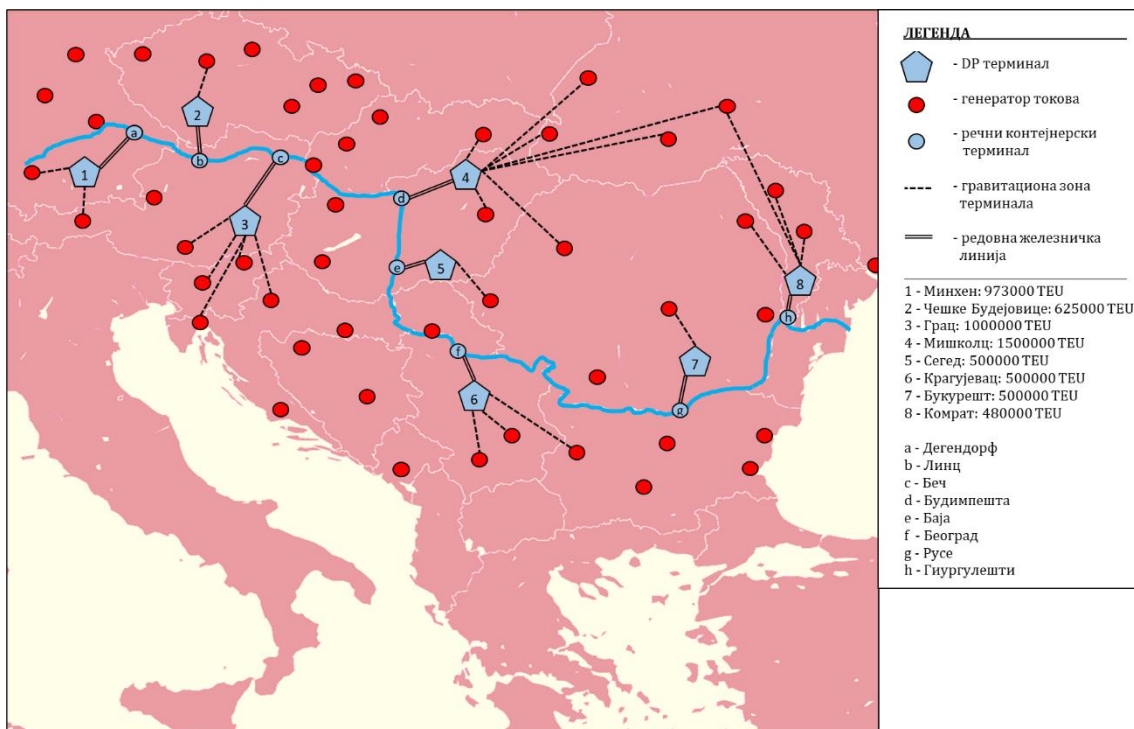
У овом делу су описани резултати примене развијеног хибридног метахеуристичког модела за решавање проблема моделирања DP концепта за речне контејнерске терминале. За улазне величине из претходног дела поглавља, и Табела 4.2, 4.3 и 4.4, решаван је оптимизациони проблем дефинисан функцијама циља (1) – (5) уз поштовање ограничења (6) – (14). Примена BCO метахеуристике је спроведена кроз кораке описане у потпоглављу 4.1. у складу са изразима (15)-(17) и модификацијама решења описаних у потпоглављу 4.3. и једначинама (30)-(34). Приликом сваке оцене решења на крају трећег корака извршавања BCO, примењена је MARCOS метода кроз кораке (18)-(29). Посматрани оптимизациони проблем је решаван кроз 15 инстанци пуштања како би се утврдила стабилност развијеног BCO - MARCOS модела. За почетно решење у свакој инстанци пуштања генерисано је решење са једним DP терминалом лоцираним према модификацији првог типа пчела за насумично одабрани речни контејнерски терминал. Вредности циљних функција најбољих пронађених решења, за свако пуштање модела, су приказане у Табели 4.5.

Табела 4.5. Резултати модела према инстанцама пуштања (преузето из [2])

Инстанца пуштања	Оперативне уштеде (мил. €)	Уштеде екстерних трошкова (мил. €)	Временски губици (мил. €)	Трошкови изградње (мил. €)	Обим TEU	Φ_i	Време рада рачунара (s)	Број итерација
1	5896	88326	572	1758	6058617	0.674	2636	33
2	5480	81762	532	1372	5630294	0.665	3353	50
3	5729	85557	567	1442	6081757	0.681	3501	46
4	5597	83684	551	1636	5917551	0.662	3024	38
5	5746	86184	533	1708	5631766	0.662	1535	20
6	5860	87357	567	1586	5993636	0.678	2210	28
7	5448	81786	554	1564	5833154	0.655	1939	26
8	5591	83936	565	1758	6020022	0.657	4121	62
9	5513	82437	538	1492	5816484	0.664	3869	55
10	5847	87228	564	1686	5921603	0.671	2431	32
11	5542	82682	538	1558	5811220	0.661	1618	23
12	5332	80199	521	1595	5539550	0.644	1594	23
13	5427	81569	525	1536	5539934	0.652	2095	26
14	5598	83684	551	1564	5917551	0.665	2997	40
15	5782	86176	553	1564	5925203	0.675	3007	34
Просек	5626	84171	549	1588	5842556	0.664	2662	36
Просечно одступање	2.62%	2.50%	2.59%	5.15%	2.50%	1.17%	26.24%	28.58%

У свим инстанцама пуштања модела је као резултат добијено осам DP терминала, с тим да у појединим случајевима постоје варијације у локацији тих терминала и њиховом капацитету, што је последица једновремене оптимизације пет циљних функција. На основу резултата из Табеле 4.5. може се видети да је одступање модела у различитим инстанцама пуштања према свим критеријумским функцијама мало (2.62%, 2.50%, 2.59%, 5.15%, 2.50%). Ово указује на добру конвергенцију модела, што је потврђено и одступањем параметра Φ_i од свега 1.17% приликом међусобног поређења најбољих решења добијених у инстанцама пуштања. Просечно време рада рачунара приликом пуштања модела износи 2662 секунде, а просечан број итерација износи 36, што се може сматрати кратким временом добијања решења узевши у обзир изузетну сложеност проблема.

Најбоље пронађено решење (итерација пуштања 3) се односи на развој по једног DP терминала за сваки од анализираних речних контејнерских терминала (Слика 4.3.). Три лоцирана DP терминала су милионских капацитета (Минхен за речни контејнерски терминал у Дегендорфу са прометом од 937000 TEU, Грац за речни контејнерски терминал у Бечу са прометом од 1000000 TEU, и Мишколц за речни контејнерски терминал у Будимпешти са прометом од 1500000 TEU редом), DP терминал за речни контејнерски терминал Линц (Чешке Будејовице) има промет од 625000 TEU, док су преостали терминали (Сегед за речни контејнерски терминал у Баји, Крагујевац за речни контејнерски терминал у Београду, Букурешт за речни контејнерски терминал Русе, Комрат за речни контејнерски терминал Гиургулешти) капацитета 500000 TEU.



Слика 4.3. Излазни резултат модела – најбоље пронађено решење за иницијални сценарио (преузето из [2])

У циљу спровођења анализе осетљивости решења, дефинисано је 11 сценарија. Сценарији се разликују према поставци тежинских коефицијената циљних функција (Табела 4.6). У првом сценарију (Sc. 1) су све циљне функције подједнако значајне, у сценаријима Sc. 2 – Sc. 6 је за сваку појединачну циљну функцију усвојен тежински коефицијент од 0.350 док је за тежинске коефицијенте осталих циљних функција усвојена вредност 0.165. У преосталим сценаријима (Sc. 7 – Sc. 11) је елиминисана по једна циљна функција, док је за тежинске коефицијенте осталих усвојена вредност 0.250.

Табела 4.6. Тежински коефицијенти циљних функција за посматране сценарије

Сценарији	Тежински коефицијенти циљних функција				
	w1	w2	w3	w4	w5
Sc. 1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Sc. 2	0.350	0.165	0.165	0.165	0.165
Sc. 3	0.165	0.350	0.165	0.165	0.165
Sc. 4	0.165	0.165	0.350	0.165	0.165
Sc. 5	0.165	0.165	0.165	0.350	0.163
Sc. 6	0.165	0.165	0.165	0.165	0.350
Sc. 7	0.000	0.250	0.250	0.250	0.250
Sc. 8	0.250	0.000	0.250	0.250	0.250
Sc. 9	0.250	0.250	0.000	0.250	0.250
Sc. 10	0.250	0.250	0.250	0.000	0.250
Sc. 11	0.250	0.250	0.250	0.250	0.000

Примена модела над дефинисаним сценаријима је показала да се решења разликују у зависности од поставке тежинских коефицијената циљних функција. У сценаријима Sc. 1, Sc. 2, Sc. 3, Sc. 6, Sc. 9 и Sc. 10 се као резултат добија да је оправдан развој DP терминала за све речне контејнерске терминале. У сценаријима Sc. 7 и Sc. 8 је оправдан развој седам DP терминала, док је у сценаријима Sc. 4, Sc. 5 и Sc. 11 према резултатима оправдан развој шест DP терминала. У зависности од сценарија, локације и капацитети DP терминала се разликују (Табела 4.7).

Табела 4.7. Резултати модела за дефинисане сценарије

Сценарио	DP терминали	Капацитет (TEU)	Промет (TEU)	Речна лука	Оперативне уштеде (мил. €)	Уштеде екстерних трошкова (мил. €)	Временски губици (мил. €)	Обим токова (TEU)	Просечан капацитет DP терминала
Sc. 1	Букурешт	500000	500000	Русе					
	Комрат	500000	498934	Гиургулешти					
	Крагујевац	500000	488042	Београд					
	Минхен	1000000	979570	Дегендорф	5774	86112	503	5833668	812500
	Клагенфурт	500000	500000	Линц					
	Осијек	1000000	637184	Баја					
	Грац	1000000	729938	Беч					
	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта					
Sc. 2	Комрат	1000000	598247	Гиургулешти					
	Чешке								
	Будејовице	1000000	897212	Линц					
	Велика								
	Канижа	1000000	946517	Баја					
	Букурешт	500000	500000	Русе	4833	72135	436	5041976	700000
	Крагујевац	500000	500000	Београд					
	Гјор	100000	100000	Будимпешта					
Sc. 3	Минхен	1000000	1000000	Дегендорф					
	Осијек	1000000	632299	Баја	5852	87231	540	6218759	1000000
	Комрат	500000	500000	Гиургулешти					
	Крагујевац	1000000	483870	Београд					
	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта					
	Букурешт	500000	500000	Русе					
	Минхен	1000000	971746	Дегендорф					
	Осијек	1000000	632299	Баја					

Докторска дисертација: „Моделирање одрживих система логистике“

	Грац	1000000	1000000	Беч					
	Чешке								
	Будејовице	1500000	630844	Линц					
Sc. 4	Мишколц	1000000	1000000	Будимпешта					
	Грац	1000000	1000000	Беч					
	Минхен	250000	250000	Линц	2831	41811	145	2950000	491667
	Комрат	500000	500000	Гиургулешти					
	Ансбах	150000	150000	Дегендорф					
Темишвар	50000	50000	Баја						
Sc. 5	Минхен	1000000	1000000	Дегендорф					
	Комрат	250000	250000	Гиургулешти					
	Чешке								
	Будејовице	30000	30000	Линц	2513	37244	191	2300000	383333
	Букурешт	10000	10000	Русе					
Грац	1000000	1000000	Беч						
Загреб	10000	10000	Баја						
Sc. 6	Минхен	1000000	1000000	Дегендорф					
	Гјор	500000	365561	Будимпешта					
	Букурешт	500000	489289	Русе					
	Сарајево	250000	250000	Београд					
	Велика Канижа	1000000	950689	Баја	4617	68859	440	5151698	718750
Чешке									
Будејовице	1000000	888568	Линц						
Комрат	500000	441159	Гиургулешти						
Брно	1000000	766432	Беч						
Sc. 7	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта					
	Букурешт	250000	250000	Русе					
	Минхен	1000000	1000000	Дегендорф					
	Грац	500000	500000	Беч	3485	52179	271	3440000	491429
	Кишињев	150000	150000	Гиургулешти					
Софија	30000	30000	Београд						
Чешке									
Будејовице	10000	10000	Линц						
Sc. 8	Минхен	1000000	870626	Дегендорф					
	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта					
	Марибор	1000000	1000000	Линц, Беч					
	Комрат	1000000	675004	Гиургулешти	4575	68703	246	4275630	675714
	Букурешт	150000	150000	Русе					
Приштина	50000	50000	Београд						
Осијек	30000	30000	Баја						
Sc. 9	Велика Канижа	1000000	806730	Баја					
	Букурешт	500000	500000	Русе					
	Комрат	500000	500000	Гиургулешти					
	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта	5334	79617	508	5671328	831250
	Салцбург	150000	150000	Линц					
Минхен	1000000	1000000	Дегендорф						
Крагујевац	500000	500000	Београд						
Братислава	1500000	714598	Беч						
Sc. 10	Мишколц	1500000	1500000	Будимпешта					
	Крагујевац	1000000	488111	Београд					
	Минхен	1500000	969926	Дегендорф					
	Букурешт	1500000	543157	Русе					
	Грац	1500000	1011918	Беч	5945	88733	539	6255092	1312500
Осијек	1500000	632114	Баја						
Чешке									
Будејовице	1500000	629656	Линц						
Комрат	500000	480210	Гиургулешти						
Sc. 11	Минхен	500000	500000	Дегендорф					
	Салцбург	50000	50000	Линц					
	Комрат	500000	500000	Гиургулешти	2505	37159	147	2130000	355000
	Грац	1000000	1000000	Беч					
	Тренцин	30000	30000	Будимпешта					
Темишвар	50000	50000	Баја						

Дискусија

Излазни резултат је посебно интересантан с обзиром да је посматрано релативно уско подручје, а према моделу, оправдан је развој чак 8 DP терминала. Ово указује првенствено на оправданост примене DP концепта за речне контејнерске терминале, а са анализом ширег географског подручја оправданост би била све већа.

Сврха овог поглавља је првенствено на могућностима примене DP концепта за речне контејнерске терминале чиме би се омогућила ефикасна интеграција речног транспорта у ИМТ систем. Развој таквог концепта би као последицу имао значајне позитивне ефекте по одрживост логистичког система и региона. У контексту економске одрживости, концепт доприноси смањењу оперативних трошкова реализације контејнерских токова, повећава могућност интеграције региона у континенталну ИМТ мрежу и тиме повећава његову тржишну конкурентност, што позитивно утиче на регионални економски развој. У контексту еколошке одрживости, концепт доприноси смањењу екстерних трошкова реализације контејнерских токова, док са друштвеног становишта концепт доприноси одрживости смањењем удела друмског транспорта чиме се смањују бука, вибрација и саобраћајне гужве.

Иако резултати указују на одрживост, потребно је дубље испитати могућности и ефекте примене DP концепта за речне контејнерске терминале. Потребно је спровести детаљније анализе у стохастичко-динамичком окружењу, развити одговарајуће аналитичке моделе, и испитати применљивост концепта на различитим географским подручјима. Посматрани концепт представља ембрион развоја ИМТ система и на прави начин интегрише речни вид транспорта у ИМТ систем. Даљи развој оваквог ИМТ система би се могао кретати у успостављању железничких веза између DP терминала како би се повећала гравитациона зона система и повећао обим робних токова.

5. ПРОБЛЕМИ И ПЛАНИРАЊЕ ОДРЖИВИХ ЛОГИСТИЧКИХ СИСТЕМА НА МИКРО НИВОУ

У овом поглављу је пажња посвећена одрживости на микро нивоу и улози логистике у њеном достизању у урбаним срединама. Сврха поглавља је оцена одрживости категорија иницијатива CL и дефинисање потенцијално одрживих праваца развоја система CL. На почетку су описани проблеми одрживости урбаних средина (потпоглавље 5.1.). У потпоглављу 5.2. су описане заинтересоване стране, учесници CL, њихови ставови и циљеви, и представљен је кратак преглед скорашње литературе која се тиче критеријума узетих у обзир у истраживањима на пољу CL. Након тога (потпоглавље 5.3.), описане су иницијативе CL које су биле предмет истраживања у литератури. Критеријуми на основу којих су оцењене категорије иницијатива CL су описани у потпоглављу 5.4, док је у потпоглављу 5.5. дат кратак преглед метода коришћених у стручној литератури за решавање проблема CL. У потпоглављу 5.6. је приказан хибридни *fuzzy* АНР - *fuzzy* MARCOS модел ВКО чија примена је демонстрирана на оцени одрживости посматраних категорија иницијатива CL у потпоглављу 5.7.

5.1. Проблеми одрживости урбаних средина

Раст свести о проблемима одрживости, урбанизација и технолошке иновације указују да је потребно преиспитати и ускладити ставове друштва по питању планирања и развоја градова [237]. Убрзана урбанизација током прошлог века је ставила градове под велики притисак јер се нису успели прилагодити надолазећим променама. Данас, одрживост градова је угрожена на свим пољима, а неефикасна потрошња енергије, велике емисије штетних гасова, саобраћајне гужве, загађење воде и земљишта, губитак биодиверзитета, неприступачност и лоша мобилност, угрожена безбедност итд. су само неке од највидљивијих последица досадашњег, неодрживог развоја [238].

Градови заузимају 3% светског земљишта, али су одговорни за 75% светске енергетске потрошње и емисија штетних гасова [239]. На основу овога, очигледно је да од третмана проблема који се јављају у градовима у највећој мери зависи да ли ће се свет и друштво кретати у правцу одрживе будућности [37,239]. Одрживост градова је препозната од стране Европске уније као горућа тема међутим, само се за поједине градове северне и западне Европе (попут Хелсинкија, Стокхолма, Берлина итд.) и Блиског (Масдара у Уједињеним Арапским Емиратима) и Далеког Истока (Сонгдо у Јужној Кореји) може рећи да су на путу одрживог развоја [240].

Иако логистика није једини кривац, реализација логистичких активности, посебно транспорта, је значајан узрочник негативних ефекта по одрживост у градовима [55]. Саобраћајне гужве, загађења ваздуха, неефикасна реализација логистичких процеса, повећавање логистичких трошкова, бука итд., су само неке од последица игнорисања и погрешног приступа планирању CL.

У CL је већ деценијама по среди све већа потражња за испорукама на кућну адресу, персонализација и индивидуализација у производњи и потрошњи и пораст фреквенције малих испорука [241,242]. Због све оштријих захтева крајњих корисника, логистички системи нису у стању да извршавају активности на ефикасан начин. Ниво консолидације робних токова је веома мали, што као последицу има ниску искоришћеност капацитета товарног простора доставних возила. Одсуство кооперације на подручју CL доводи и до тога да је велики број празних вожњи на територији градова [9,243], што свеукупно са претходним додатно утиче на стварање негативних ефеката по одрживост.

Основни проблем је недостатак планерских активности и свеобухватних, дугорочних политика CL [244]. Уместо да третирају логистику као сервис локалној економији, градске власти најчешће имају антагонистички став према реализацији логистичких активности, посебно транспорта. Градске власти, занемарујући стварну природу проблема CL углавном теже ограничавању и

драстичном регулисању логистичких активности на територији града [9,32,243,245].

5.2. Заинтересоване стране и критеријуми у CL

Приликом решавања проблема CL, неопходно је узети у обзир ставове, циљеве и интересе свих интересних група – пружаоца логистичких услуга, корисника логистичких услуга, локалног становништва и градске управе [246]. Односи између заинтересованих страна су комплексни, са углавном сукобљеним циљевима [22,243]. Циљ пружаоца логистичких услуга је смањење трошкова и повећање профита пружања логистичких услуга. Кориснике логистичких услуга (пошиљаоце и примаоце робе) интересује поуздана, квалитетна и приступачна логистичка услуга, са прихватљивом ценом. Интереси становништва се односе на смањење негативних утицаја реализације логистичких активности по животну средину, смањење буке, побољшање безбедности и повећавање мобилности у градовима. Локална (градска) управа тежи остварењу бољих животних услова и промовисању економског и еколошког напретка. Локална управа би требало да игра кључну улогу у решавању сукобљених циљева између учесника CL и да их подстиче на сарадњу [22,247,248]. Правац деловања у циљу решавања проблема CL који је идеалан, најприхватљивији са становишта једне заинтересоване стране често бива неприхватљив за остале. Свака заинтересована страна даје већи значај оној групи критеријума која је тесно повезана са њеним ставовима и циљевима. Различите перцепције значаја критеријума доводе до тога да је приликом решавања проблема CL потребно дефинисати довољно широк скуп критеријума како би се обухватили ставови свих заинтересованих страна. Потребно је испитати ставове заинтересованих страна према дефинисаним критеријумима и на основу тога извршити њихову приоритизацију. У литератури је анализиран широк скуп критеријума и параметара приликом решавања проблема CL, а кратак преглед скорије литературе на ту тему је приказан у Табели 5.1. У табели су критеријуми сврстани у четири основне групе – технички, економски,

друштвени и еколошки. За сваку групу је приказан скуп најчешће анализираних критеријума са позивом на литературу.

Табела 5.1. Преглед критеријума коришћених за решавање проблема у скоријој литератури из области CL (преузето из [3])

<i>Група критеријума</i>	<i>Критеријум</i>	<i>Литература</i>
Технички	* Ефикасност (фактор товарења, пређени пут, трајање транспорта, количина робе)	[101,249,258-262,250-257]
	* Поузданост, Флексибилност, Покривеност корисника	[32,251,255,261]
	* Квалитет услуге, Ниво услуге, Време испоруке	[26,32,101,244,253,262]
	* Могућност примене, Компатибилност са осталим мерама CL, Трајање примене	[26,80,108,249,258]
	* Модална прерасподела транспортног рада	[26,263]
	* Степен трансформације робних токова	[26,244,263]
	* Деградација инфраструктуре	[108,264]
Економски	* Трошкови (оперативни, примене, претовара, куповине земљишта и опреме), Потребне субвенције	[26,32,258,259,265-272,94,273,274,101,244,249,251-253,255]
Друштвени	* Ослобађање јавног простора, Конзистентност са урбаним плановима, Атрактивност градске зоне	[26,32,101,244,258]
	* Саобраћајне гужве, Вибрације, Бука, Безбедност, Мобилност	[26,32,264,266,275,101,108,244,250,251,253,256,258]
	* Приступачност	[32]
Еколошки	* Загађење ваздуха, Потрошња енергије, Стварање отпада	[26,32,265,266,270,271,273-278,94,101,108,244,250,252,258,264]

Свака урбана средина има специфичне економске, демографске, и просторне карактеристике. Самим тиме, карактеристике генератора робних токова, самих робних токова, захтева за логистичким услугама, логистичких платформи и система, и пружаоца логистичких услуга значајно се разликују од града до града [279]. Различите друштвене, економске и еколошке околности стварају различите проблеме CL, али дефинишу и могуће (допустиве и изводљиве) правце њиховог решавања.

5.3. Иницијативе CL

Широк скуп иницијатива CL је био предмет анализе и практичне примене широм Европе, а резултати се разликују од града до града [280]. Упркос очекивањима да ће примењене иницијативе допринети урбаној одрживости, успех многих је био краткотрајан и ограничен, па је већина иницијатива бивала напуштена током времена. Главни разлог је недостатак разумевања суштине проблема CL, погрешан приступ планирању, недостатак сарадње између заинтересованих страна, као и недостатак јавног финансирања [9,20].

Иницијативе CL је могуће категорисати на више начина – на основу обухватности, покретача, укључености заинтересованих страна, предмета регулисања, приступа, обухваћених робних токова, очекиваних ефеката, подручја примене, временског хоризонта, и контекста урбане средине [281]. За потребе ове дисертације је усвојена категоризација иницијатива CL на основу контекста урбане средине – иницијативе које захтевају значајне промене контекста урбане средине и иницијативе које се примењују унутар постојећег контекста урбане средине [282,283]. Кратак преглед скорије литературе која анализира појединачне иницијативе CL је приказан у Табели 5.2.

Табела 5.2. Преглед категорија иницијатива CL обрађених у скоројој литератури (преузето из [3])

<i>CL категорија иницијатива</i>	<i>Литература</i>
<i>Логистички центри</i>	[26,95,101,244,255,277,282,284–286]
<i>Подземни логистички системи</i>	[249,256,258,272,275,282,287]
<i>Унапређење друмске саобраћајне инфраструктуре</i>	[257,282,288]
<i>Стандардизација товарних јединица</i>	[282,289]
<i>Транспортне берзе</i>	[250,253,259,282,290,291]
<i>Интермодални транспорт</i>	[26,80,108,244,260,264,273,282,292]
<i>Наплата путарина</i>	[32,101,251,270,276,283,293]
<i>Лиценце и дозволе</i>	[32,101,269,271,277,283]
<i>Паркинг и утоварно-истоварне зоне</i>	[261,262,267,283,294]
<i>Кооперација превозника</i>	[94,265,274,283]
<i>Рутирање возила</i>	[254,266,268,283,295–297]
<i>Технолошке иновације возила</i>	[26,244,278,283,298–300]

У постојећој литератури, најчешће анализирани категорије иницијатива CL су логистички центри. Потом следе технолошке иновације возила, подземни логистички системи, рутирање возила, паркинг и утоварно-истоварне зоне и интермодални транспорт. Бројни радови се баве лиценцама, дозволама, транспортним берзама и наплатом путарине док су иницијативе попут стандардизације товарних јединица слабо заступљене у постојећој литератури. Поједине иницијативе CL захтевају значајне промене контекста урбане средине, док су остале примењиве без потребе за великим и радикалним променама. Иницијативе CL које захтевају значајне промене урбане средине су комплексне, најчешће захтевају висока финансијска улагања, развој додатних инфраструктурних система, укључивање различитих заинтересованих страна, и тешке су за развој [282]. Ова група иницијатива CL се састоји од иницијатива које се односе на развој додатне инфраструктуре и иницијатива које се односе на промену и реорганизацију логистичких активности. За разлику од претходне групе, иницијативе које је могуће применити унутар постојећег контекста урбане средине не захтевају висока финансијска улагања и генерално су лакше за примену [283]. Зависно од главних учесника, ова група иницијатива се може

класификовати у две подгрупе – иницијативе покренуте од стране локалне администрације (градске управе) и иницијативе покренуте од стране приватних компанија (пружаоца логистичких услуга).

Инфраструктурне иницијативе се односе на унапређење постојећих и развој нових инфраструктурних система како би се реализација логистичких активности учинила одрживом. Постоје четири типичне категорије иницијатива СЛ које припадају овој групи – логистички центри, подземни логистички системи, унапређење друмске саобраћајне инфраструктуре, стандардизација товарних јединица.

Логистички центри (I_1) осим улоге у дистрибутивном ланцу, имају велики значај у планирању логистике и транспорта у урбаним срединама. Логистички центри се могу појавити у различитим формама са различитим улогама, а најзаступљенији у литератури су центри чија је основна функција консолидација робних токова. То се односи на консолидацију токова који долазе изван урбаних подручја са циљем да се рационализују логистичке активности (посебно транспорт) унутар градске зоне [282]. Консолидација се у просторном смислу може реализовати на периферији урбаних средина [95] – макроконсолидација, или у самој зони испоруке - микроконсолидација [285]. Преламањем токова преко логистичких центара се постојећи системи трансформишу у вишеешалонске. Раздвајањем реализације робних токова у више фаза, могуће је искористити предности великих транспортних састава на дужим релацијама и мањих доставних возила у последњој фази испоруке истовремено. Консолидација робних токова преко логистичких центара је била предмет многих истраживања, на пример [95,284,286] међутим, практична примена је ограничена на свега неколико делимично успешних примера [255,280].

Реализацијом логистичких активности испод површине тла, **подземни логистички системи** (I_2) могу остварити значајне позитивне ефекте који се односе на смањење саобраћајних гужви, повећање ефикасности реализације логистичких активности, ослобађање јавног простора, уштеде у потрошњи

енергије и ресурса, и смањење негативног утицаја по окружење [256,301]. Осим тога, подземни логистички системи могу обезбедити потребне услове за примену урбаног ИМТ [272]. Иако примена подземних логистичких система наговештава неке очигледне позитивне ефекте по одрживост [249], и даље изостају одговори на питања која се тичу укључивања свих заинтересованих страна, одговорности експлоатације система, и модела финансирања оваквог типа иницијатива CL [258]. Без обзира што су технологије потребне за развој и изградњу подземних логистичких система доступне, то и даље представља озбиљан инжењерски подухват [275].

Унапређење друмске саобраћајне инфраструктуре (I_3) се односи на унапређење постојеће и развој нове инфраструктуре, која може имати утицаја на економију града у целости. Проширивањем постојећих и изградњом нових саобраћајница, ефикасност друмског транспорта се побољшава, времена путовања се скраћују, а транспортни трошкови се смањују, што свеукупно доприноси остварењу економије обима и смањење укупних оперативних трошкова, а индиректно утиче и на смањење трошкова складиштења [257]. Самим тиме, региони са развијенијом саобраћајном инфраструктуром остварују конкурентску предност [288]. С обзиром да ова категорија иницијатива није првенствено оријентисана ка транспорту робе, потенцијални позитивни ефекти који прате њену примену су ограничени и краткорочни. Унапређење саобраћајне инфраструктуре најчешће узрокује већи обим саобраћаја, повећање неефикасности, и потребу за поновним унапређењем.

Стандардизација товарних јединица (I_4) смањује трошкове, унапређује активности руковања робом, и као таква иницира развој ефикасних логистичких система. Циљ ове категорије иницијатива је да дефинише стандардизоване логистичке јединице (контејнере, *mini-load* јединице, палете, модуларне јединице, *roll*-кавезе итд.) које ће бити прихваћене од стране свих учесника CL [282]. Упркос томе што развој стандардизованих товарних јединица није тежак задатак, њихова стандардизација и широка примена јесу [289].

Група иницијатива CL чија је сврха реорганизација логистичких активности се односи на реорганизацију логистичких, посебно транспортних, активности у урбаним срединама, са циљем да се оне учине одрживијим. Две основне категорије иницијатива CL из ове групе су транспортне берзе и ИМТ.

Транспортне берзе (I_5) за циљ имају побољшање ефикасности транспортних система смањењем празних вожњи и пређених километара [290]. Добра платформа берзи би требало да максимизира друштвену добробит и минимизира неуспеле трговине у условима неизвесности [253]. Применом платформи берзи, омогућава се транспарентност понуде и потражње, што узрокује значајне промене на тржишту логистичких услуга [259]. Терет за доставна возила, која би иначе имала празну повратну вожњу, се може пронаћи онлајн. Проблеми попут остваривања критичне количине робе, дељења поверљивих информација и поверења према оваквим системима представљају највеће препреке у њиховој примени [291]. У литератури постоје такође и идеје укључивања обичних људи у реализацију испоруке кроз *online* платформе [250].

Интермодални транспорт (I_6), као категорија иницијатива CL, подразумева комбиновану примену еколошки прихватљивих модалитета транспорта у градовима [282]. Најчешће анализирани варијанте у литератури се односе на примену теретних трамваја за транспорт робе у урбаним срединама [108,264]. Поједина истраживања се фокусирају на комбиновање система транспорта робе и путника [260], могућност примене речног вида транспорта у урбаној дистрибуцији [273], као и мултимодална решења која комбинују велика доставна возила (аутобусе, камионе, трамваје, барже итд.) са мањим еко-возилима [292]. Примена ИМТ је оправдана само у случајевима када је он конкурентан друмском транспорту [80]. Оправданост примене ИМТ је могуће постићи развојем ИМТ технологија и инфраструктуре, које несумњиво захтевају финансијско учешће јавног сектора [282] и различите форме јавно-приватних партнерстава [302].

Иницијативе покренуте од стране градских власти су политичке природе, при чему је јавни сектор главни актер и доносилац одлука [283]. Ова група

иницијатива CL се односи на три категорије – наплата путарине, лиценце и дозволе, паркинг и утоварно-истоварне зоне.

Наплата путарине (I_7) за циљ има да се капацитети саобраћајне инфраструктуре подвргну тржишном функционисању како би се саобраћај боље распоредио са временског аспекта [283]. Примена ових иницијатива ретко утиче на понашање превозника, с тим да корисници услуга сnose последице наплате путарине кроз већу цену логистичких услуга [293], док временска прерасподела теретног саобраћаја остаје неприметна [303]. У појединим случајевима превозници се опредељују за коришћење алтернативних рута/путева како би избегли саобраћајнице на којима се наплаћује путарина [251]. Последица тога је повећање пређеног пута доставних возила, веће емисије штетних гасова и стварање буке и саобраћајних гужви на тим деоницама [251,276].

Увођењем **лиценци и дозвола** (I_8) градске власти приморавају пружаоце логистичких услуга да учине своје активности одрживијим. Многи градови контролишу приступ доставним возилима у зависности од њихове носивости и димензија. То се најчешће спроводи контролом фактора товарења доставних возила, дефинисањем зона ниских емисија, применом мера временских ограничења или резервисањем инфраструктуре. Ефекти који следе примену ових иницијатива су углавном веома другачији од очекиваних и углавном негативни. Примена мера временских ограничења и ограничења приступа возилима у зависности од носивости и димензија као последицу има повећање броја мањих доставних возила, саобраћајне гужве остају присутне, оперативни трошкови дистрибуције робе расту, а утицај на животну средину може бити и гори у односу на стање пре примене тих иницијатива [269,271]. Присиљавање логистике у урбаним срединама да се прилагоди ригорозним мерама проузрокује пораст логистичких трошкова, с тим да ефикасност логистичких процеса опада. Контрола фактора товарења возила и примена зона ниских емисија може имати позитивне ефекте, али се поставља питање како подстаћи превознике да се прилагоде тим мерама [283].

Паркинг и утоварно-истоварне зоне (I_9) су иницијативе CL које се релативно лако примењују а могу проузроковати многобројне позитивне ефекте. Решавањем проблема паркирања за доставна возила, ометање осталих учесника у саобраћају проузроковано непрописним паркирањем се смањује, при чему дистрибуција робе постаје једноставнија и ефикаснија [261,262,267]. Превозници добровољно учествују у овим иницијативама с обзиром да им оне решавају неке од свакодневних проблема [32]. Иницијативе из ове категорије захтевају примену система контроле паркинга како би се пратили расположиви капацитети паркинга током доставе [294].

Иницијативе CL покренуте од стране пружаоца логистичких услуга су резултат ангажовања приватних компанија са циљем остварења профита. Постизање одрживости је често успутни ефекат који прати њихову практичну примену. Категорије иницијатива из ове групе су кооперација превозника, рутирање возила и технолошке иновације [283].

Кооперација превозника (I_{10}) захтева међусобну сарадњу како би се остварила већа ефикасност логистичких активности. Мотивација коопераната за сарадњу проистиче из економских разлога [283] с обзиром да тако могу остварити боље искоришћење капацитета, што доводи до смањења логистичких трошкова и негативног утицаја на животну средину [94]. Кооперацијом се побољшава конкурентност логистичких услуга међутим, препрека њеној примени су неповерење између коопераната и неспремност дељења података међу конкурентима [265,274].

Рутирање возила (I_{11}) и проблеми у вези са тим су били предмет широког скупа истраживања [295,296]. Упркос томе, рутирање возила у пракси је најчешће неефикасно и непрецизно. Планирану руту је најчешће немогуће реализовати, тако да је потребно узети у обзир динамичке карактеристике окружења приликом њеног планирања. Алата и методе за практичну примену постоје [297] међутим, једна од главних препрека за практичну примену је недостатак неопходних база података у реалном времену. Строги временски прозори [266],

различите категорије возила [268], синхронизација између возила [254] итд., су неки од аспеката које доприносе сложености проблема рутирања возила у реалности.

Технолошке иновације возила (I_{12}) за циљ имају допринос концепту одрживости кроз примену возила која се покрећу помоћу алтернативних извора енергије. Ове иницијативе показују задовољавајуће ефекте са становишта еколошке одрживости и не захтевају значајне промене логистичких активности у урбаним срединама [283]. Иако је њихова примена еколошки оправдана, техничка ограничења возила на алтернативни погон их чине одбојним за пружаоце логистичких услуга [278]. Узак скуп доступних типова возила, нижи капацитети, мање брзине кретања у поређењу са традиционалним доставним возилима итд., су главне препреке њиховој широј примени и прихватању.

Досадашња истраживања су углавном анализирала појединачне иницијативе CL, попут примене интелигентних система [254], мера временских ограничења [217], урбаних консолидационих центара [95], подземних логистичких система [301], примене алтернативних видова транспорта [273], кооперације [94] итд. Поједина истраживања анализирају мање групе иницијатива - резервисана инфраструктура, мере временских ограничења и консолидација робе [277]; ограничења приступа појединим категоријама возила, наплата путарине, консолидација токова и мере временских ограничења [101], зоне ниских емисија, мере временских ограничења, ограничења приступа појединим категоријама возила, наплата путарине [270], контрола фактора товарења возила, рутирање возилима и кооперација превозника [304] итд. Већина досадашњих радова се фокусира на ужи скуп параметара/критеријума, при чему је број истраживања који укључују критеријуме различитих заинтересованих страна и комплексне односе између њих веома мали.

Истраживања [26,244] и [243] се баве избором најпогоднијег решења CL логистике, заснованих на комбинацији различитих иницијатива и технологија, узимајући у обзир сукобљене циљеве заинтересованих страна. У раду [32] је

извршена оцена и избор најпогодније иницијативе CL из категорије политичких иницијатива, док је у раду [245] дата оквирна оцена иницијатива са еколошког аспекта одрживости. Рад [305] се бави оценом стања CL у појединим европским градовима, анализирајући примењене иницијативе у тим градовима и шири скуп критеријума. Иницијативе и мере попут јавно-приватних партнерстава, примене еко-возила, примене напредних информационо-комуникационих технологија, развој додатне инфраструктуре итд., су у раду [306] анализирани у економском контексту.

5.4. Критеријуми за оцену категорија иницијатива CL

Узевши у обзир да се различити измеритељи урбане одрживости могу дефинисати [307], очигледно је могуће дефинисати и широк скуп критеријума за оцену иницијатива CL. Осим тога, свака интересна група, у складу са својим ставовима и циљевима, има различито схватање значаја критеријума. У раду [3] је оцена категорија иницијатива CL спроведена у односу на 10 критеријума. Критеријуми су дефинисани у складу са постојећом литературом [32,101,244,282] и искуством аутора у области CL, а са циљем покривања свих стубова одрживости – економског, друштвеног и еколошког и диференцијације иницијатива.

Могућност примене (C_1) иницијатива се односи на сложеност административних и регулаторних питања који прате њихову примену. Исто тако, критеријум се односи на физичку и техничку изводљивост иницијатива у датим околностима.

Подстицај економског раста (C_2) се односи на позитивне ефекте примене иницијативе на регионалну конкурентност. Овај критеријум оцењује до које мере посматрана иницијатива може допринети укључивању урбане средине у регионалне логистичке системе, што омогућава приступ новим тржиштима, стварању нових радних места, јачању локалне економије итд.

Потребне инвестиције (C_3) се односе на неопходна финансијска средства за примену и спровођење иницијативе СЛ. Високи трошкови улагања су често једна од највећих препрека развоју и примени напредних решења СЛ.

Ефикасност процеса (C_4) описује степен рационализације логистичких процеса и активности у урбаној средини као последице примене иницијативе. Из претходног прегледа литературе је очигледно да поједине иницијативе значајно унапређују ефикасност процеса, док неке друге стварају додатна ограничења и тиме погоршавају ефикасност логистике.

Модална прерасподела транспортног рада (C_5) оцењује ефекте иницијатива СЛ на подстицање употребе алтернативних видова транспорта. Са развојем квалитетних логистичких система и савремених логистичких услуга, градови/региони су у стању привући већи обим робних токова. У том случају, примена алтернативних видова транспорта и технологија у испоруци робе постаје оправдана.

Сложеност реализације логистичких ланаца (C_6) у урбаној средини зависи од примењене иницијативе СЛ. Поједине иницијативе СЛ трансформишу дистрибутивне ланце у вишешалонске, чиме они постају сложенији за реализацију.

Мобилност (C_7) се односи на промене у окружењу које утичу на кретање путничких и доставних возила у градовима. Са побољшањем мобилности побољшава се и квалитет живота у граду.

Еколошки аспект (C_8) је фокусиран на смањење негативних утицаја реализације логистичких активности по окружење као последице примене иницијативе СЛ. Критеријум се првенствено односи на смањење емисије штетних гасова и честица од стране доставних возила.

Ослобађање јавног простора (C_9) се односи на могућност ослобађања јавних површина за атрактивније садржаје. Под јавним површинама се мисли на тротоаре, шеталишта, тргове, травњаке, паркове итд.

Аспект безбедности (C_{10}) као критеријум се односи на побољшање саобраћајних услова као директне последице смањења броја доставних возила у граду. Смањењем броја доставних возила се смањују и саобраћајне гужве и повећава безбедност учествовања у саобраћају.

5.5. Преглед метода коришћених за решавање проблема у области CL

У постојећој литератури, проблеми CL су решавани са различитим техникама попут метахеуристика [217,308], оптимизационих модела [260,309], симулационих модела [274,310], а међу њима су посебну популарност стекле методе ВКО.

Методе ВКО су посебно погодне за решавање проблема сложене структуре, са сложеним односима између заинтересованих страна и сукобљеним циљевима. Осим тога, методе ВКО се често развијају у окружењу *fuzzy* бројева [311] како би се третирале непрецизне и непотпуне интерпретације критеријума и алтернатива од стране доносиоца одлука. ВКО методе су успешно примењене за решавање разних проблема CL: избор концепције CL за град [26], за централну градску зону [244], избор локације CL центра [312], избор 3PL (енгл. *Third Party Logistics*) пружаоца услуга [313,314], рангирање иницијатива CL [32,101] итд.

Постојећа литература која се бавила избором концепција CL се ослањала првенствено на примену хибридних ВКО модела: *fuzzy Delphi* - АНП - SWARA [32], *Affinity Diagram* - АНП - *fuzzy TOPSIS* [101], *picture fuzzy R-norm CoCoSo* [315], *fuzzy DEMATEL* - АНП - VIKOR [26], *grey BWM* - CODAS [316], *fuzzy Delphi* - FARE - VIKOR [263] итд. У овом поглављу је представљен хибридни модел ВКО заснован на АНП и MARCOS методама у *fuzzy* окружењу [3] како би се решио проблем избора најбоље категорије иницијатива CL.

АНП метода [317] је пронашла примену у решавању многих проблема логистике, како у стандардној форми [318], тако и у *fuzzy* окружењу [319]. Метода често проналази примену у комбинацији са другим методама, на пример TOPSIS

[314,320], *Affinity Diagram* [101], вештачким неуронским мрежама [321], SWOT [322], ELECTRE [323], MARCOS [3,228] итд. Преглед примене MARCOS методе ВКО је детаљно представљен у потпоглављу 4.3.

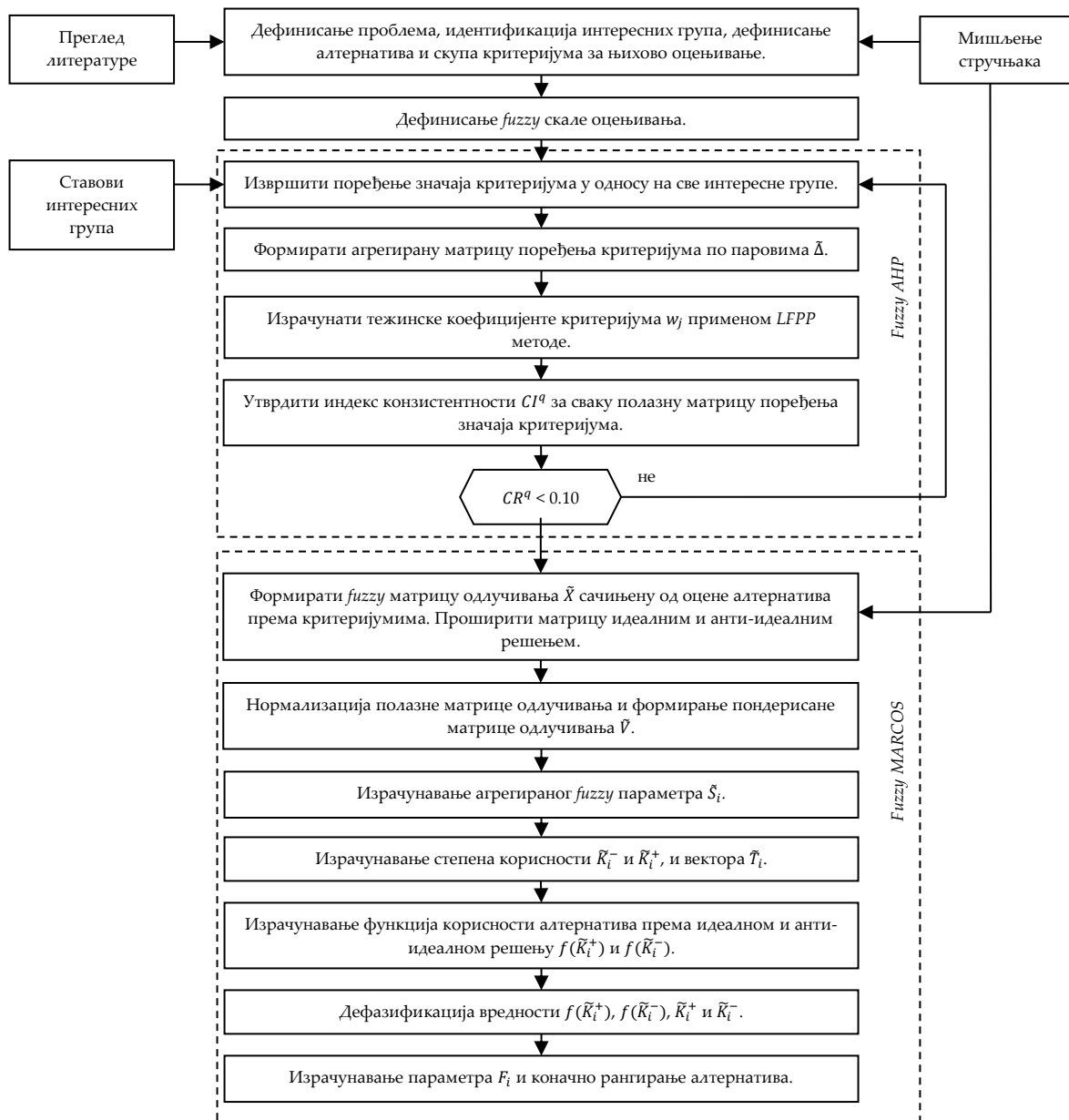
5.6. Хибридни *fuzzy* АНР - *fuzzy* MARCOS модел

У овој дисертацији, проблем избора најпогодније категорије иницијатива CL је решен применом хибридног *fuzzy* АНР - *fuzzy* MARCOS модела. Модел је први пут развијен у мају 2020. године за потребе рада [3]. АНР метода се показала као једноставна али ефикасна за решавање вишекритеријумских проблема који укључују више заинтересованих страна, без обзира на број елемената проблема [324]. Основне предности АНР методе је да она организује критеријуме на систематичан начин и пружа структурирано и једноставно решење посматраног проблема [101]. Метода смањује пристрасност и неконзистентности током доношења одлука [324]. Остале предности методе су једноставна примена, флексибилност, могућност укључивања квалитативних и квантитативних вредности, чини доношење одлука систематичним, омогућава анализу сложених проблема са сукобљеним критеријумима итд. [324–326]. Упркос томе што АНР метода може бити осетљива на промене у мерним скалама, често је коришћена за утврђивање тежинских коефицијената критеријума, при чему се оцена и рангирање алтернатива врши неким другим методама [314,320,323]. Узевши претходно поменуто, АНР метода је у развијеном моделу искоришћена за утврђивање тежинских коефицијената критеријума, док је MARCOS метода (описана у делу 4.5) искоришћена за оцену и рангирање алтернатива. Како би се потенцијална непрецизност и нејасноћа у информацијама третирали на прави начин, хибридни модел је развијен у *fuzzy* окружењу.

Алгоритамски кораци хибридног fuzzy АНР - fuzzy MARCOS модела

Први део модела се односи на примену *fuzzy* АНР методе за утврђивање тежинских коефицијената критеријума, што представља улазну величину у други део модела који се односи на примену *fuzzy* MARCOS методе за оцену

категорија иницијатива CL. Примени модела претходи дефинисање хијерархијске структуре проблема са циљем на врху, критеријумима на нивоу испод и алтернативама на дну структуре. Улазни параметри модела су матрица поређења парова критеријума од стране заинтересованих страна као и матрица која садржи оцене категорија иницијатива CL према критеријумима. Примена хибридног *fuzzy* АHP - *fuzzy* MARCOS модела је детаљно објашњена у наставку, док су алгоритамски кораци модела илустровани на Слици 5.1.



Слика 5.1. Алгоритамски кораци хибридног fuzzy AHP - fuzzy MARCOS модела (преузето из [3])

Корак 1. Примена fuzzy AHP методе за утврђивање тежинских коефицијената критеријума. Кораци примене fuzzy AHP методе су описани у наставку.

Корак 1.1. Извршити поређење свих парова критеријума према заинтересованим странама и формирати матрицу поређења критеријума за сваку интересну страну. Лингвистичка скала, погодна за претварање у fuzzy вредности је

коришћена за поређење парова критеријума и оцену алтернатива (категорија иницијатива CL) према критеријумима (Табела 5.3).

Табела 5.3. Лингвистичке оцене и њима одговарајуће *fuzzy* вредности (преузето из [3])

Преференција критеријума	Скраћеница	Оцена алтернатива	Скраћеница	Fuzzy вредност
Подједнако значајни	ПЗ	Изузетно лоша	ИЛ	(1, 2, 3)
Веома ниска	ВН	Веома лоша	ВЛ	(2, 3, 4)
Ниска	Н	Лоша	Л	(3, 4, 5)
Делимично ниска	ДН	Умерено лоша	УЛ	(4, 5, 6)
Умерено ниска	УН	Осредња	О	(5, 6, 7)
Умерена	У	Умерено добра	УД	(6, 7, 8)
Умерено висока	УВ	Добра	Д	(7, 8, 9)
Делимично висока	ДВ	Веома добра	ВД	(8, 9, 10)
Висока	В	Изузетно добра	ИД	(9, 10, 10)
Веома висока	ВВ			

Корак 1.2. Агрегирати све матрице поређења критеријума у једну матрицу. Нека је Q број заинтересованих страна, и нека је $\tilde{\psi}_{ij}^q = (\alpha_{ij}^q, \beta_{ij}^q, \gamma_{ij}^q)$ *fuzzy* вредност која представља однос значаја критеријума l у односу на критеријум j , чији чланови $\alpha_{ij}^q, \beta_{ij}^q$, и γ_{ij}^q задовољавају $\alpha_{ij}^q \leq \beta_{ij}^q \leq \gamma_{ij}^q$. У том случају, агрегирана *fuzzy* вредност $\tilde{\delta}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$ се утврђује на основу [327]:

$$\alpha_{ij} = \min_q \alpha_{ij}^q \quad (35)$$

$$\beta_{ij} = \sqrt[q]{\prod_{q=1}^q \beta_{ij}^q}, \quad (36)$$

$$\gamma_{ij} = \max_q \gamma_{ij}^q, \quad (37)$$

при чему α_{ij}, β_{ij} и γ_{ij} представљају нижу, средњу и вишу вредност агрегираног *fuzzy* броја $\tilde{\delta}_{ij}$.

Корак 1.3. Формирати агрегирану матрицу поређења критеријума $\tilde{\Delta}$ на основу агрегираних вредности $\tilde{\delta}_{ij}$ на следећи начин:

$$\tilde{\Delta} = \begin{bmatrix} / & \tilde{\delta}_{12} & \cdots & \tilde{\delta}_{1n} \\ \tilde{\delta}_{21} & / & \cdots & \tilde{\delta}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\delta}_{n1} & \tilde{\delta}_{n2} & \cdots & / \end{bmatrix} \quad (38)$$

Корак 1.4. Утврдити вектор тежинских коефицијената критеријума на основу агрегиране матрице поређења $\tilde{\Delta}$ применом методе логаритамског *fuzzy* преферентног програмирања (енгл. *Logarithmic Fuzzy Preference Programming - LFPP*) [328], тако да важе $W = (w_1, \dots, w_n) > 0$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. Под претпоставком да чланови агрегиране матрице поређења критеријума задовољавају $\ln \tilde{\delta}_{lj} = (\ln \alpha_{lj}, \ln \beta_{lj}, \ln \gamma_{lj})$, $l, j = 1, 2, \dots, n$, при чему n представља број критеријума, тежински коефицијенти критеријума (w_j) се могу одредити применом следећег модела нелинеарног програмирања:

$$\begin{aligned} & \min: (1 - \lambda)^2 + M \cdot \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{j=l+1}^n (\varphi_{lj}^2 + \eta_{lj}^2) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} z_l - z_j - \lambda \ln \left(\frac{\beta_{lj}}{\alpha_{lj}} \right) + \varphi_{lj} \geq \ln \alpha_{lj}, l = 1, \dots, n-1; j = l+1, \dots, n; \\ -z_l + z_j - \lambda \ln \left(\frac{\gamma_{lj}}{\beta_{lj}} \right) + \eta_{lj} \geq -\ln \gamma_{lj}, l = 1, \dots, n-1; j = l+1, \dots, n; \\ \lambda, z_j \geq 0, j = 1, \dots, n; \\ \varphi_{lj}, \eta_{lj} \geq 0, l = 1, \dots, n-1; j = l+1, \dots, n; \end{cases} \end{aligned} \quad (39)$$

где важи $z_j = \ln w_j$, $j = 1, \dots, n$, M представља довољно велику константу (реда величине 10^3), при чему променљиве φ_{lj}, η_{lj} , $l = 1, \dots, n-1; j = l+1, \dots, n$ служе како би степен припадности (λ) увек био позитиван. Нека је $z^* = (z_1^*, \dots, z_n^*)$ оптимално решење модела (39). Нормализоване вредности тежинских коефицијената критеријума се могу утврдити на основу:

$$w_j = \frac{e^{z_j^*}}{\sum_{l=1}^n e^{z_l^*}}, j = 1, \dots, n \quad (40)$$

Како би се утврдила тачност свих улазних матрица *fuzzy* АНР методе, оне морају бити конзистентне. Коефицијент конзистентности матрице поређења критеријума (CR^q) према интересној групи q се утврђује на основу [317]:

$$CR^q = \frac{CI^q}{RI} \quad (41)$$

при чему се индекс конзистентности (CI^q) утврђује према:

$$CI^q = \frac{\lambda_{max}^q - n}{n-1} \quad (42)$$

Величина λ_{max}^q представља сопствену вредност улазне матрица поређења критеријума према интересној групи q . Улазне матрице поређења критеријума су веродостојне само у случају када су вредности CR^q мање од 0.10.

Корак 2. Примена *fuzzy* MARCOS методе за оцену и рангирање категорија иницијатива CL. Матрица одлучивања (\tilde{X}) код MARCOS методе се састоји од скупа алтернатива (I_i), критеријума (C_j), тежинских коефицијената критеријума (w_j), и вредности алтернатива према критеријумима. Нека је m број алтернатива и нека x_{ij} представља оцену алтернативе i у односу на критеријум j . Код *fuzzy* MARCOS методе се оцена алтернатива врши уз помоћ лингвистичких оцена које је могуће претворити у *fuzzy* вредности облика $\tilde{x}_{ij} = (x_{ij}^a, x_{ij}^b, x_{ij}^c)$. Кораци примене *fuzzy* MARCOS методе су преузети из [224] и детаљно објашњени у наставку.

Корак 2.1. Проширити матрицу одлучивања \tilde{X} *fuzzy* идеалним (A_{id}) и *fuzzy* анти-идеалним (A_{ai}) решењем:

$$\tilde{X} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_{ai} & \left[\begin{array}{cccc} \tilde{x}_{ai1} & \tilde{x}_{ai2} & \dots & \tilde{x}_{ain} \\ \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \\ \tilde{x}_{id1} & \tilde{x}_{id2} & \dots & \tilde{x}_{idn} \end{array} \right. \\ I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ A_{id} \end{matrix} \quad (43)$$

Нека је C^{max} скуп свих критеријума максимизационе природе и нека је C^{min} скуп свих критеријума минимизационе природе. A_{id} и A_{ai} се утврђују на основу:

$$A_{ai} = \min_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, j \in C^{max} \text{ and } \max_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, j \in C^{min} \quad (44)$$

$$A_{id} = \max_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, j \in C^{max} \text{ and } \min_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, j \in C^{min} \quad (45)$$

Корак 2.2. Формирати нормализовану *fuzzy* матрицу одлучивања $\tilde{U} = [\tilde{u}_{ij}]_{m \times n}$ на основу:

$$\tilde{u}_{ij} = (u_{ij}^a, u_{ij}^b, u_{ij}^c) = \begin{cases} \left(\frac{x_{id}^a}{x_{ij}^a}, \frac{x_{id}^a}{x_{ij}^b}, \frac{x_{id}^a}{x_{ij}^c} \right), j \in C^{min} \\ \left(\frac{x_{ij}^a}{x_{id}^a}, \frac{x_{ij}^b}{x_{id}^b}, \frac{x_{ij}^c}{x_{id}^c} \right), j \in C^{max} \end{cases} \quad (46)$$

Корак 2.3. Формирати пондерисану матрицу одлучивања $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}$ множењем чланова матрице U одговарајућим тежинским коефицијентима критеријума:

$$\tilde{v}_{ij} = (v_{ij}^a, v_{ij}^b, v_{ij}^c) = (w_j \cdot u_{ij}^a, w_j \cdot u_{ij}^b, w_j \cdot u_{ij}^c) \quad (47)$$

Корак 2.4. За сваку алтернативу, израчунати агрегирани *fuzzy* параметар \tilde{S}_i на основу:

$$\tilde{S}_i = (s_i^a, s_i^b, s_i^c) = (\sum_{j=1}^n v_{ij}^a, \sum_{j=1}^n v_{ij}^b, \sum_{j=1}^n v_{ij}^c) \quad (48)$$

Корак 2.5. Утврдити степен корисности алтернатива \tilde{K}_i^- и \tilde{K}_i^+ , при чему \tilde{S}_{id} и \tilde{S}_{ai} представљају вредности агрегираног параметра \tilde{S}_i за A_{id} и A_{ai} :

$$\tilde{K}_i^- = (k_i^{-a}, k_i^{-b}, k_i^{-c}) = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{ai}} = \left(\frac{s_i^a}{s_{ai}^a}, \frac{s_i^b}{s_{ai}^b}, \frac{s_i^c}{s_{ai}^c} \right) \quad (49)$$

$$\tilde{K}_i^+ = (k_i^{+a}, k_i^{+b}, k_i^{+c}) = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{id}} = \left(\frac{s_i^a}{s_{id}^a}, \frac{s_i^b}{s_{id}^b}, \frac{s_i^c}{s_{id}^c} \right) \quad (50)$$

Корак 2.6. Израчунати *fuzzy* вектор \tilde{T}_i и *fuzzy* вредност \tilde{G} на основу:

$$\tilde{T}_i = (t_i^a, t_i^b, t_i^c) = \tilde{K}_i^- \oplus \tilde{K}_i^+ = (k_i^{-a} + k_i^{+a}, k_i^{-b} + k_i^{+b}, k_i^{-c} + k_i^{+c}) \quad (51)$$

$$\tilde{G} = (g^a, g^b, g^c) = \max_{1 \leq i \leq m} \tilde{T}_i \quad (52)$$

при чему дефазификовану вредност G је могуће утврдити на основу [329]:

$$G = \frac{g^a + 4g^b + g^c}{6} \quad (53)$$

Корак 2.7. Израчунати функције корисности алтернатива у односу на A_{id} и A_{ai} :

$$f(\tilde{K}_i^+) = \frac{\tilde{K}_i^-}{G} = \left(\frac{k_i^{-a}}{G}, \frac{k_i^{-b}}{G}, \frac{k_i^{-c}}{G} \right) \quad (54)$$

$$f(\tilde{K}_i^-) = \frac{\tilde{K}_i^+}{G} = \left(\frac{k_i^{+a}}{G}, \frac{k_i^{+b}}{G}, \frac{k_i^{+c}}{G} \right) \quad (55)$$

Корак 2.8. Дефазификовати вредности \tilde{K}_i^- , \tilde{K}_i^+ , $f(\tilde{K}_i^-)$, и $f(\tilde{K}_i^+)$ применом једначине (53). Коначна оцена алтернатива на основу дефазификованих вредности K_i^- , K_i^+ , $f(K_i^-)$, и $f(K_i^+)$ применом следеће једначине:

$$F_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (56)$$

Корак 2.9. Рангирати алтернативе према параметру F_i . Алтернативе са већом вредности параметра F_i су уједно и боље.

5.7. Оцена категорија иницијатива CL применом хибридног *fuzzy* АНР – *fuzzy* MARCOS модела

У овом делу је решен проблем оцене и рангирања категорија иницијатива CL, за случај града Београда. Београд је европска метропола која се брзо развијала током прошлог века око историјског центра града. Развој стамбених делова града на периферији и концентрација пословних активности у градском центру нису испраћени правовременим и прикладним планирањем CL. Неусклађеност између захтева за логистичким услугама и капацитетима за њихову реализацију су довели до неефикасног и неодрживе реализације логистичких активности. Највидљивији показатељи тих неефикасности су некординисане испоруке, велики број доставних возила у граду, лоше искоришћење капацитета товарног простора доставних возила, саобраћајне гужве, загађење ваздуха итд. Београд има преко 40 хиљада објеката који генеришу логистичке операције и покрећу транспортне токове [18]. За преко 40% објеката се изврши једна или више испорука у току дана, док се остатак објеката опслужује на свака два или три дана [9]. Испоруке су углавном мале, при чему је око 75% испорука мање од 0.5 m^3 , а 45% свих испорука се изврши возилима носивости 1.5 t [9,18]. Ови подаци указују да су логистичке операције у Београду неорганизоване и да генеришу захтев за употребом много већег броја доставних возила него што је потребно. Тиме се узрокују негативни ефекти као што су саобраћајне гужве, саобраћајне незгоде, заузимање јавних површина, емисије штетних гасова, бука, вибрације итд. Неодржива реализација логистичких активности у Београду је присутна деценијама, али проблеми и даље расту и захтевају прикладан третман кроз одрживо планирање CL [9]. С обзиром на стање, неопходно је дефинисати правац развоја одрживог CL система. У наставку је детаљно описана примена хибридног *fuzzy* АНР – *fuzzy* MARCOS модела ВКО за решавање проблема избора одрживих категорија иницијатива CL за подручје Београда. Прво ће бити речи о утврђивању тежинских коефицијената критеријума у односу на ставове и циљеве

заинтересованих страна, а потом ће бити описан начин решавања проблема из конкретних улазних података.

Како би се утврдили тежински коефицијенти критеријума, извршено је поређење свих парова критеријума са становишта сваке интересне групе. Кроз комуникацију са представницима свих интересних група на подручју Београда, утврђени су њихови ставови и циљеви, на основу којих су формиране улазне матрице поређења критеријума. Циљ пружаоца логистичких услуга је минимизација трошкова и максимизација профита. Током примене нових решења логистике, пружаоце услуга највише интересују трошкови развоја и примене, процедуре које би се односиле на њих, као и сложеност реализације логистичких активности која би уследила применом тих решења. Имајући то у виду, пружаоци логистичких услуга највећи значај дају критеријумима попут **C1**, **C3**, **C4** и **C6**. Корисници логистичких услуга (пошиљаоци и примаоци) захтевају поуздану и тачну логистичку услугу, могућност економског раста и преферирају мање сложене логистичке ланце. Ова интересна група даје највећи значај критеријумима попут **C1**, **C2**, **C3** и **C4**. Локална администрација тежи постизању економског просперитета, безбедности и мобилности у граду, али такође даје значај трошковима примене и њеном трајању, тако да ова интересна група даје највише значаја критеријумима попут **C2**, **C3**, **C7**, **C8** и **C10**. Градско становништво не толерише присуство доставних возила и њима проузроковане саобраћајне гужве, загађење ваздуха, буку и вибрације, али истовремено захтевају расположивост робе и услуга у сваком моменту, па тако највећи значај дају критеријумима попут **C7**, **C8** и **C10**. Претпостављено је да су све интересне групе подједнако значајне приликом решавања посматраног проблема. Поређење парова критеријума, за све интересне групе, је приказано у Табели 5.4.

Табела 5.4. Матрица поређења критеријума према интересним групама (пружаоци логистичких услуга, корисници услуга, локална управа, становништво) (преузето из [3])

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
C ₁	./././	Н./././	ВН./././	ПЗ./,ВН,Н ДН,М,ПЗ,ВН	ВН,ВН,М,ДН	ДВ,Н././	ДВ,УН././	Н,М././	ДН,Н././	
C ₂	/,ВН,ДН,УН	./././	/,ПЗ,Н,Н	./,УН,УВ	ВН,УВ,ДН,М	/,Н,Н,ДВ	М,ДН,ВН./	М,М,ВН./	УВ,УВ,Н,ВН	ВН,ДН,ВН./
C ₃	/,ВН,ВН,Н	ВН,ПЗ././	./././	./,Н,УН	Н,УВ,ВН,ДН	ПЗ,Н,УВ,М	УВ,ДН././	УВ,М././	ДВ,УВ,ПЗ./	Н,ДН././
C ₄	ПЗ,Н././	Н,ВН././	ВН,ВН././	./././	ДН,ДВ././	ВН,ДН,УН,ВН	ДВ,УН././	ДВ,УВ././	Н,ДВ././	ДН,УН././
C ₅	./,ПЗ./	./././	./././	./,ВН,ВН	./././	./,М,Н	УН./././	УН./././	М,ПЗ././	ПЗ./././
C ₆	./././	ВН./././	ПЗ./././	./././	Н,УН././	./././	УВ,ВН././	УВ,ДН././	ДВ,УН././	Н,ВН././
C ₇	./,Н,М	././,ВН	./,ВН,ДН	./,ДН,ДВ	/,ДН,Н,УВ	./,ДВ,Н	./././	ПЗ,Н,ПЗ,ПЗ	ВН,ДН,ВН,Н	/,ПЗ,ПЗ,ПЗ
C ₈	./,Н,М	././,ВН	./,ВН,ДН	./,ДН,ДВ	/,ВН,Н,УВ	./,ДВ,Н	ПЗ./,ПЗ,ПЗ	./././	ВН,ВН,ВН,Н	./,ПЗ,ПЗ
C ₉	./,ВН,ДН	./././	./,ПЗ,ВН	./,Н,М	/,ПЗ,ВН,УН	./,УВ,УВ	./././	./././	./././	./././
C ₁₀	./,Н,М	././,ВН	./,ВН,ДН	./,ДН,ДВ	ПЗ,ДН,Н,УВ	./,ДВ,Н	УН,ПЗ,ПЗ,ПЗ	УН,Н,ПЗ,ПЗ	М,ДН,ВН,Н	./././

Одговарајуће *fuzzy* вредности су добијене на основу Табеле 5.3, па су потом агрегиране применом једначина (35), (36) и (37), на основу чега је формирана *fuzzy* агрегирана матрица поређења критеријума \tilde{D} . На основу LFPP модела (39), добијене су оптималне вредности за агрегирану матрицу \tilde{D} . Нормализацијом вредности оптималног решења модела применом једначине (40) су добијени следећи тежински коефицијенти критеријума: $w_1 = 0.116, w_2 = 0.167, w_3 = 0.147, w_4 = 0.106, w_5 = 0.057, w_6 = 0.047, w_7 = 0.100, w_8 = 0.081, w_9 = 0.045,$ и $w_{10} = 0.134$. На основу једнакости (41) и (42), потврђена је конзистентност свих матрица поређења критеријума ($CR^{providers} = 0.037, CR^{receivers} = 0.036, CR^{local authorities} = 0.032, CR^{residents} = 0.041$).

У наредном кораку, категорије иницијатива CL су оцењене на основу критеријума, а те оцене су трансформисане у троугласте *fuzzy* вредности на основу Табеле 5.3. Оцена категорија иницијатива CL је извршена од стране аутора на основу досадашњег искуства и постојеће литературе у области, на пример [3,26,32,244]. Лингвистичке оцене категорија иницијатива CL према критеријумима су приказане у Табели 5.5.

Табела 5.5. Оцена категорија иницијатива CL према критеријумима (преузето из [3])

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
I_1	УЛ	ВД	Л	ИД	Д	УЛ	ВД	Д	Д	ВД
I_2	ИЛ	О	ИЛ	ВД	ВД	ВЛ	ИД	ИД	ИД	Д
I_3	УД	УЛ	УЛ	ВЛ	ИЛ	ВД	ВЛ	ИЛ	ВЛ	УЛ
I_4	Л	О	Л	УД	УД	ВД	УЛ	О	О	О
I_5	Д	ВЛ	ВД	УЛ	УЛ	Д	Л	О	УЛ	О
I_6	ВЛ	ИД	ВЛ	Д	ИД	ВЛ	ИД	ВД	Д	ВД
I_7	ВД	ИЛ	Д	ИЛ	ВЛ	Д	ВЛ	Л	УЛ	ИЛ
I_8	ИД	ИЛ	ИД	ИЛ	Л	О	ИЛ	УЛ	Л	ВЛ
I_9	УД	УЛ	УД	УД	Л	УД	УД	УЛ	УД	О
I_{10}	Л	Д	Д	Д	О	О	Д	УД	Д	УД
I_{11}	ВД	ВЛ	ВД	О	ИЛ	Д	УЛ	О	УЛ	О
I_{12}	УД	ИЛ	УЛ	Л	ВЛ	О	ВЛ	ВД	О	УД

У наредном кораку, *fuzzy* матрица одлучивања, сачињена од троугластих *fuzzy* оцена иницијатива по критеријумима, је проширена додавањем *fuzzy* идеалног (A_{id}) и *fuzzy* анти-идеалног (A_{ai}) решења, применом једначина (43) и (44). Проширена *fuzzy* матрица одлучивања је приказана у Табели 5.6.

Табела 5.6. Проширена *fuzzy* матрица одлучивања (преузето из [3])

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
I_1	(4, 5, 6)	(8, 9, 10)	(3, 4, 5)	(9, 10, 10)	(7, 8, 9)	(4, 5, 6)	(8, 9, 10)	(7, 8, 9)	(7, 8, 9)	(8, 9, 10)
I_2	(1, 2, 3)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3)	(8, 9, 10)	(8, 9, 10)	(2, 3, 4)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(7, 8, 9)
I_3	(6, 7, 8)	(4, 5, 6)	(4, 5, 6)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(8, 9, 10)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)
I_4	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(6, 7, 8)	(8, 9, 10)	(4, 5, 6)	(5, 6, 7)	(5, 6, 7)	(5, 6, 7)
I_5	(7, 8, 9)	(2, 3, 4)	(8, 9, 10)	(4, 5, 6)	(4, 5, 6)	(7, 8, 9)	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)	(4, 5, 6)	(5, 6, 7)
I_6	(2, 3, 4)	(9, 10, 10)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(9, 10, 10)	(2, 3, 4)	(9, 10, 10)	(8, 9, 10)	(7, 8, 9)	(8, 9, 10)
I_7	(8, 9, 10)	(1, 2, 3)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(4, 5, 6)	(1, 2, 3)
I_8	(9, 10, 10)	(1, 2, 3)	(9, 10, 10)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3)	(4, 5, 6)	(3, 4, 5)	(2, 3, 4)
I_9	(6, 7, 8)	(4, 5, 6)	(6, 7, 8)	(6, 7, 8)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(6, 7, 8)	(4, 5, 6)	(6, 7, 8)	(5, 6, 7)
I_{10}	(3, 4, 5)	(7, 8, 9)	(7, 8, 9)	(7, 8, 9)	(5, 6, 7)	(5, 6, 7)	(7, 8, 9)	(6, 7, 8)	(7, 8, 9)	(6, 7, 8)
I_{11}	(8, 9, 10)	(2, 3, 4)	(8, 9, 10)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3)	(7, 8, 9)	(4, 5, 6)	(5, 6, 7)	(4, 5, 6)	(5, 6, 7)
I_{12}	(6, 7, 8)	(1, 2, 3)	(4, 5, 6)	(3, 4, 5)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(2, 3, 4)	(8, 9, 10)	(5, 6, 7)	(6, 7, 8)
A_{id}	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(8, 9, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(9, 10, 10)	(8, 9, 10)
A_{ai}	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)

Проширена матрица одлучивања је нормализована применом једнакости (45), на основу чега је добијена пондерисана матрица одлучивања (Табела 5.7) применом једнакости (46).

Табела 5.7. Пондерисана матрица одлучивања (преузето из [3])

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
I_1	[0.05, 0.06, 0.07]	[0.13, 0.15, 0.17]	[0.04, 0.06, 0.07]	[0.09, 0.11, 0.11]	[0.04, 0.04, 0.05]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.08, 0.09, 0.10]	[0.06, 0.06, 0.07]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.11, 0.12, 0.13]
I_2	[0.01, 0.02, 0.03]	[0.08, 0.10, 0.12]	[0.01, 0.03, 0.04]	[0.08, 0.09, 0.11]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.01, 0.01, 0.02]	[0.09, 0.10, 0.10]	[0.07, 0.08, 0.08]	[0.04, 0.04, 0.04]	[0.09, 0.11, 0.12]
I_3	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.07, 0.08, 0.10]	[0.06, 0.07, 0.09]	[0.02, 0.03, 0.04]	[0.01, 0.01, 0.02]	[0.04, 0.04, 0.05]	[0.02, 0.03, 0.04]	[0.01, 0.02, 0.02]	[0.01, 0.01, 0.02]	[0.05, 0.07, 0.08]
I_4	[0.03, 0.05, 0.06]	[0.08, 0.10, 0.12]	[0.04, 0.06, 0.07]	[0.06, 0.07, 0.08]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.04, 0.04, 0.05]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.07, 0.08, 0.09]
I_5	[0.08, 0.09, 0.10]	[0.03, 0.05, 0.07]	[0.12, 0.13, 0.15]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.03, 0.04, 0.05]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.07, 0.08, 0.09]
I_6	[0.02, 0.03, 0.05]	[0.15, 0.17, 0.17]	[0.03, 0.04, 0.06]	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.05, 0.06, 0.06]	[0.01, 0.01, 0.02]	[0.09, 0.10, 0.10]	[0.06, 0.07, 0.08]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.11, 0.12, 0.13]
I_7	[0.09, 0.10, 0.12]	[0.02, 0.03, 0.05]	[0.10, 0.12, 0.13]	[0.01, 0.02, 0.03]	[0.01, 0.02, 0.02]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.02, 0.03, 0.04]	[0.02, 0.03, 0.04]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.01, 0.03, 0.04]
I_8	[0.10, 0.12, 0.12]	[0.02, 0.03, 0.05]	[0.13, 0.15, 0.15]	[0.01, 0.02, 0.03]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.01, 0.02, 0.03]	[0.03, 0.04, 0.05]	[0.01, 0.02, 0.02]	[0.03, 0.04, 0.05]
I_9	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.07, 0.08, 0.10]	[0.09, 0.10, 0.12]	[0.06, 0.07, 0.08]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.03, 0.03, 0.04]	[0.06, 0.07, 0.08]	[0.03, 0.04, 0.05]	[0.03, 0.03, 0.04]	[0.07, 0.08, 0.09]
I_{10}	[0.03, 0.05, 0.06]	[0.12, 0.13, 0.15]	[0.10, 0.12, 0.13]	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.03, 0.03, 0.04]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.05, 0.06, 0.06]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.08, 0.09, 0.11]
I_{11}	[0.09, 0.10, 0.12]	[0.03, 0.05, 0.07]	[0.12, 0.13, 0.15]	[0.05, 0.06, 0.07]	[0.01, 0.01, 0.02]	[0.03, 0.04, 0.04]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.04, 0.05, 0.06]	[0.02, 0.02, 0.03]	[0.07, 0.08, 0.09]
I_{12}	[0.07, 0.08, 0.09]	[0.02, 0.03, 0.05]	[0.06, 0.07, 0.09]	[0.03, 0.04, 0.05]	[0.01, 0.02, 0.02]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.02, 0.03, 0.04]	[0.06, 0.07, 0.08]	[0.02, 0.03, 0.03]	[0.08, 0.09, 0.11]

Параметар \tilde{S}_i , као и вредности степена корисности \tilde{K}_i^- и \tilde{K}_i^+ су добијени за сваку алтернативу, након чега је утврђен fuzzy вектор \tilde{T}_i применом једначина (48)-(51). На основу fuzzy вектора \tilde{T}_i и једначина (52) и (53) су fuzzy вредност \tilde{G} ([2.77 4.37 8.68]) и њена дефазификована вредност G (4.820) добијене. Степени корисности \tilde{K}_i^- и \tilde{K}_i^+ као и функције корисности алтернатива $f(\tilde{K}_i^+)$ и $f(\tilde{K}_i^-)$ су добијене применом једначина (54) и (55) и приказане су у Табели 5.8.

Табела 5.8. Добијени fuzzy параметри (преузето из [3])

	S_i	T_i	K_i^+	K_i^-	$f(K_i^+)$	$f(K_i^-)$
I_1	[0.654 0.754 0.843]	[2.767 4.37 8.676]	[0.654,0.767,0.956]	[2.114,3.602,7.72]	[0.136,0.159,0.198]	[0.439,0.747,1.602]
I_2	[0.547 0.647 0.724]	[2.315 3.75 7.453]	[0.547,0.659,0.821]	[1.768,3.092,6.632]	[0.113,0.137,0.17]	[0.367,0.641,1.376]
I_3	[0.35 0.45 0.55]	[1.484 2.612 5.666]	[0.35,0.459,0.624]	[1.134,2.153,5.041]	[0.073,0.095,0.13]	[0.235,0.447,1.046]
I_4	[0.468 0.568 0.668]	[1.98 3.292 6.872]	[0.468,0.578,0.757]	[1.513,2.714,6.115]	[0.097,0.12,0.157]	[0.314,0.563,1.269]
I_5	[0.486 0.586 0.686]	[2.057 3.397 7.059]	[0.486,0.597,0.778]	[1.572,2.801,6.282]	[0.101,0.124,0.161]	[0.326,0.581,1.303]
I_6	[0.631 0.731 0.799]	[2.673 4.24 8.222]	[0.631,0.745,0.906]	[2.042,3.496,7.316]	[0.131,0.155,0.188]	[0.424,0.725,1.518]
I_7	[0.343 0.443 0.543]	[1.453 2.569 5.59]	[0.343,0.451,0.616]	[1.11,2.118,4.974]	[0.071,0.094,0.128]	[0.23,0.439,1.032]
I_8	[0.388 0.488 0.561]	[1.641 2.827 5.776]	[0.388,0.497,0.636]	[1.253,2.33,5.139]	[0.08,0.103,0.132]	[0.26,0.483,1.066]
I_9	[0.52 0.62 0.72]	[2.201 3.594 7.409]	[0.52,0.631,0.816]	[1.681,2.963,6.593]	[0.108,0.131,0.169]	[0.349,0.615,1.368]
I_{10}	[0.611 0.711 0.811]	[2.588 4.124 8.348]	[0.611,0.724,0.92]	[1.977,3.47,4.29]	[0.127,0.15,0.191]	[0.41,0.705,1.541]
I_{11}	[0.501 0.601 0.701]	[2.122 3.485 7.215]	[0.501,0.612,0.795]	[1.621,2.873,6.42]	[0.104,0.127,0.165]	[0.336,0.596,1.332]
I_{12}	[0.4 0.5 0.6]	[1.693 2.899 6.175]	[0.4,0.509,0.68]	[1.294,2.39,5.494]	[0.083,0.106,0.141]	[0.268,0.496,1.14]

Дефазификацијом параметара $\tilde{K}_i^-, \tilde{K}_i^+, f(\tilde{K}_i^-)$ и $f(\tilde{K}_i^+)$ су добијене улазне вредности за једначину (56), на основу које је утврђен параметар F_i за сваку алтернативу. Алтернативе су рангиране на основу коначних вредности параметра F_i .

Након примене друге фазе модела, кроз кораке *fuzzy* MARCOS методе, посматране категорије иницијатива CL су рангиране. На основу резултата (Табела 5.9), најбоље рангирана категорија иницијатива CL се односи на развој логистичких центара - I_1 .

Табела 5.9. Излазни резултат примене хибридног *fuzzy* AHP - *fuzzy* MARCOS модела (преузето из [3])

Категорија иницијатива CL	K_i^+	K_i^-	$f(K_i^+)$	$f(K_i^-)$	F_i	Ранг
I_1	0.780	4.040	0.162	0.838	0.756	1
I_2	0.667	3.461	0.138	0.718	0.542	4
I_3	0.468	2.465	0.097	0.511	0.261	11
I_4	0.590	3.080	0.122	0.639	0.420	8
I_5	0.608	3.176	0.126	0.659	0.448	7
I_6	0.753	3.890	0.156	0.807	0.699	2
I_7	0.461	2.426	0.096	0.503	0.252	12
I_8	0.502	2.619	0.104	0.543	0.299	10
I_9	0.644	3.354	0.134	0.696	0.504	5
I_{10}	0.738	3.834	0.153	0.795	0.673	3
I_{11}	0.624	3.256	0.129	0.675	0.473	6
I_{12}	0.519	2.725	0.108	0.565	0.323	9

Логистички центри су према резултатима примене модела најбоља категорија иницијатива CL ($F_1 = 0.758$) за подручје Београда. Развој адекватних логистичких центара омогућава просторну и временску консолидацију робних токова што као последицу има могућност ефикасније реализације логистичких активности, смањење логистичких трошкова и привлачење већег обима робних токова, а тиме би се допринело економској одрживости урбаних средина. То би даље утицало на економски развој града, повећање бруто друштвеног производа, стварање добре основе за страна улагања и привлачење других субјеката из различитих грана привреде [306]. Допринос еколошкој одрживости би био остварен кроз смањење емисија штетних гасова, смањење потрошње енергије, смањење буке и вибрација, па би тако развој логистичких центара послужио као добра основа за развој „зелених“, одрживих система логистике [330]. Осим тога, развој логистичких центара би побољшао мобилност и безбедност у урбаним срединама, допринео отварању нових радних места, ослободио јавне површине за привлачније садржаје, смањио број доставних возила у граду итд. и тиме

допринео друштвеној одрживости града [53]. Од свих иницијатива које мењају постојећи контекст урбане средине, логистички центри представљају најизводљивији сценарио за примену. Развој и примена ИМТ у Београду, као другорангирана категорија иницијатива CL ($F_6 = 0.700$), доприноси економској одрживости јер омогућава укључивање у регионалне/континенталне ИМТ системе, побољшава трговинску способност региона, смањује логистичке трошкове, достиже економију обима, омогућава приступ новим тржиштима итд. Модална прерасподела ка другим видовима транспорта смањује учешће друмског вида и доприноси еколошкој и друштвеној одрживости. Тиме се ублажавају негативни ефекти који прате примену друмског транспорта – загађење ваздуха, потрошња енергије, стварање буке и вибрација, велики број доставних возила, лоша мобилност итд. [144]. Међутим, због сложености примене и захтеваних финансијских улагања, ова категорија иницијатива није могла бити прворангирана. Што се тиче осталих категорија иницијатива CL, у коначном рангирању, кооперација превозника је добро рангирана јер ствара предуслове адекватном решавању проблема логистике и пружа могућност примени сложенијих CL иницијатива и решења ($F_{10} = 0.672$). Категорије иницијатива које се односе на мере градских власти су лоше рангиране јер им основни мотив није решавање проблема логистике у урбаним срединама ($F_i < 0.5$).

На основу добијених резултата могуће је дефинисати правац одрживог развоја логистичког система у Београду. Први корак би се односио на развој одговарајуће логистичке инфраструктуре – различитих категорија логистичких центара. Потом би биле успостављене редовне ИМТ везе између развијених логистичких центара, а кооперацијом између пружаоца логистичких услуга би се обезбедило да таква сложена решења остваре економску, еколошку и друштвену одрживост за све заинтересоване стране.

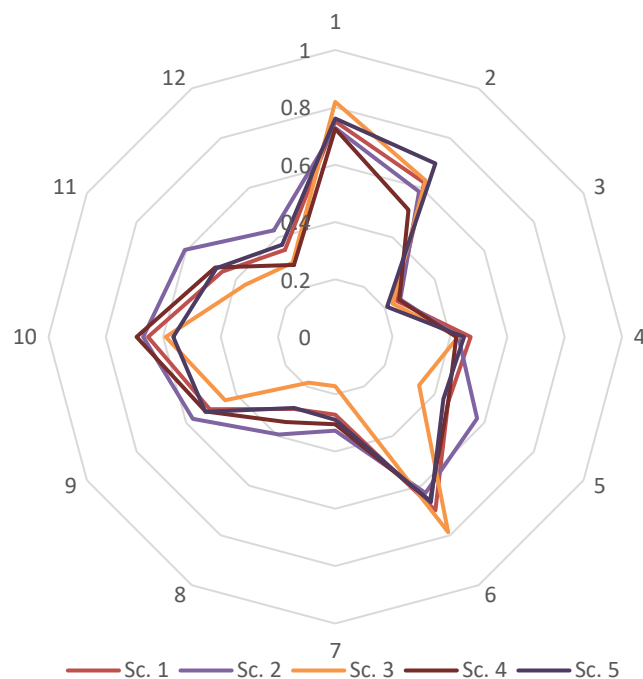
Како би се утврдила стабилност решења извршена је анализа његове осетљивости кроз различите поставке тежинских коефицијената критеријума.

Дефинисано је пет сценарија који се разликују према тежинским коефицијентима критеријума. У првом сценарију (Sc. 1), сви критеријуми су подједнако значајни ($w_j = 0.1$). У наредна три сценарија (Sc. 2, Sc. 3 и Sc. 4), сваки од три најзначајнија критеријума (C_2 , C_3 и C_{10} редом) је искључен из анализе. У последњем сценарију (Sc. 5) сва три најзначајнија критеријума су искључена из анализе. Рангирање категорија иницијатива CL за све сценарије је приказано у Табели 5.10.

Табела 5.10. Рангирање категорија иницијатива CL у различитим сценаријима (преузето из [3])

Категорија иницијатива CL	Sc. 1		Sc. 2		Sc. 3		Sc. 4		Sc. 5	
	F_i	Ранг	F_i	Ранг	F_i	Ранг	F_i	Ранг	F_i	Ранг
I_1	0.751	1	0.728	1	0.819	1	0.725	1	0.761	1
I_2	0.620	4	0.584	5	0.630	3	0.511	5	0.698	2
I_3	0.248	12	0.261	12	0.231	10	0.257	12	0.209	12
I_4	0.472	6	0.429	8	0.428	6	0.422	8	0.449	7
I_5	0.455	7	0.571	7	0.338	8	0.455	7	0.435	8
I_6	0.699	2	0.629	3	0.787	2	0.660	3	0.666	3
I_7	0.272	11	0.327	11	0.172	12	0.305	10	0.289	10
I_8	0.291	10	0.393	10	0.185	11	0.343	9	0.287	11
I_9	0.505	5	0.573	6	0.443	5	0.522	4	0.523	5
I_{10}	0.653	3	0.670	2	0.591	4	0.693	2	0.565	4
I_{11}	0.455	7	0.606	4	0.362	7	0.484	6	0.478	6
I_{12}	0.350	9	0.428	9	0.298	9	0.289	11	0.370	9

Анализа осетљивости (Слика 5.2) показује да постоје мање промене у рангирању категорија иницијатива CL, а у зависности од сценарија. I_1 је увек најбоље рангирана, I_6 и I_{10} су другорангиране у два сценарија, док је I_2 другорангирана у Sc. 5. Категорије иницијатива I_3 , I_7 и I_8 су према резултатима најгоре рангиране. Ове мале промене у рангу показују да је утврђивање тежинских коефицијената критеријума значајан корак приликом доношења одлука које се тичу одрживости у области CL. Анализа осетљивости такође показује да логистички центри могу највише допринети одрживом развоју урбаних средина (у овом случају Београда).



Слика 5.2. Анализа осетљивости (преузето из [3])

Узевши у обзир постојећу литературу, не постоји велики број радова који се баве анализом одрживости иницијатива CL. У раду [101], аутори наводе да су мере временских ограничења најбоља опција за доносиоце одлука у области CL, што је у огромном противречењу са генералном филозофијом истраживања CL узевши у обзир све негативне ефекте које проузрокује спровођење таквих мера. Рад [32] указује на добар приступ оцени одрживости иницијатива CL, али се ограничава само на иницијативе политичке природе. Истраживања [26,244] такође могу послужити као добар пример, с тим да су она окренута ка оцени одрживости конкретних концепција CL. Још један добар приступ квантификацији ефеката примене различитих иницијатива CL, конкретно на време путовања, пређени пут, загађење ваздуха и утицај на здравље становништва, је показан у раду [277], али исти не узима у обзир остале, посебно квалитативне, параметре. У овом поглављу је, по узору на рад [3], оцењена одрживост категорија иницијатива CL са становишта сва три стуба одрживости – економске, еколошке и друштвене. Резултати добијени у овом поглављу су засновани на практичним искуствима и доступној стручној литератури, међутим они не морају важити за све урбане

средине. С обзиром да се урбане средине разликују према економским, друштвеним и демографским карактеристикама и проблемима, могуће је дефинисати другачији скуп критеријума приликом решавања истог проблема.

Из резултата примене модела су дефинисани потенцијални одрживи правци развоја CL система. У наредном поглављу је показано да је на основу комбинација најбоље рангираних категорија иницијатива CL могуће дефинисати широк скуп потенцијално одрживих концепција CL.

6. МОДЕЛИРАЊЕ ОДРЖИВИХ КОНЦЕПЦИЈА CITY ЛОГИСТИКЕ

На основу претходног поглавља је очигледно да сабирање захтева у времену и простору, на основу неког аспекта хомогености, кроз консолидационе центре представља основу будућег планирања и развоја система CL. Уз то, примена ИМТ и кооперација између учесника (посебно носилаца логистичких активности) имају значајно место у планирању тих система. Развој одговарајућих категорија логистичких центара чини језгро *физичког интернета* (енгл. *Physical Internet*) и важан је предуслов постизања *хиперповезане* (енгл. *Hyper-connected*) CL [247]. Хиперповезана CL се ослања на међуповезане логистичке мреже, алтернативне видове транспорта, стандардизацију и свеобухватну кооперацију између свих учесника [331]. Физички интернет и хиперповезана CL су релативно нове идеје које представљају визију одрживих система CL [332], а њихова шира примена директно зависи од идентификације, развоја и примене одрживих решења/концепција CL.

Сврха овог поглавља је дефинисање потенцијално одрживих концепција CL заснованих на развоју различитих категорија логистичких центара, примени ИМТ и кооперацији између учесника. У наредном делу дат је преглед литературе која се односи на истраживања која су се бавила дефинисањем, анализом и оценом потенцијално одрживих концепција CL. Посебан осврт је на истраживањима која се односе на примени логистичких центара и ИМТ у CL, као и појединачних технологија транспорта чија оправданост примене постаје већа у комбинацији са консолидацијом токова преко логистичких центара. У другом делу поглавља је дефинисан скуп практично изводљивих концепција CL за подручје града Београда које се заснивају на кооперацији и консолидацији робних токова преко логистичких центара и примени ИМТ у CL. У трећем делу је моделирана концепција која се односи на примену речног вида транспорта и развоју МКС у функцији *city-DR* терминала за речне претоварне станице.

Концепција је моделирана на примеру инспирисаним градом Београдом. Након тога су представљени резултати моделирања који указују на потенцијалну одрживост посматране концепције.

6.1. Преглед литературе

На основу различитих иницијатива, мера, технологија, приступа, могуће је дефинисати широк скуп практичних решења/концепција CL, а чак и у оквиру једне концепције је могуће дефинисати већи број различитих сценарија [105]. Концепције CL нису универзалне – оне која су се показале добре за поједине урбане средине не морају бити добре и за остале [26,333].

У стручној литератури расте број истраживања која се баве дефинисањем, анализом и оценом потенцијално одрживих концепција CL (Табела 6.1). Рад [98] анализира шири скуп перформанси различитих концепција CL заснованих на примени дрoнова у испоруци робе, док су у раду [226] рангиране CL концепције испоруке робе дрoновима са становишта одрживости. CL концепције које узимају у обзир карактеристике града и окружења су анализирани у раду [26]. Циљ рада је био проналазак најбоље CL концепције за град Београд, за све интересне групе, узевши у обзир све факторе који описују урбану средину. Дефинисане су концепције на основу различитих комбинација логистичких центара, консолидације робних токова и примене еколошки прихватљивијих видова транспорта. У раду [244] је решен проблем избора концепције CL за централну градску зону Београда. Различити вишешалонски системи, са различитим нивоима консолидације токова и применом различитих технологија транспорта су узети у обзир. Примена технологија Индустрије 4.0 у дефинисању потенцијално одрживих, паметних концепција CL је анализирана у раду [316]. Рад [315] се бави избором одрживе CL концепције последње миље испоруке за подручје Пардубица у Чешкој, а у обзир су узети електрични скутери, ормарићи за испоруку, аутономна дрoмска возила, дрoнови и цевни транспорт.

Табела 6.1. Преглед литературе која се бави оценом/избором одрживих CL концепција

Литература	Јединствена карактеристика	Критеријуми	Метода
[26]	Оцена CL концепција узевши у обзир факторе који описују урбану средину и ставове заинтересованих страна	потребне инвестиције, могућност примене, квалитет логистичке услуге, трошкови испоруке, модална прерасподела, еколошки аспект, аспект безбедности, употреба земљишта, степен трансформације робних токова, утицај на атрактивност града	fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP - fuzzy VIKOR
[244]	Избор најпогодније CL концепције за централну градску зону	загушења саобраћаја, заузимање јавног простора, потребне инвестиције, трошкови испоруке, временски губици, квалитет логистичке услуге, еколошки аспект, аспект безбедности, сложеност логистичких ланаца, технолошка и визуелна интеграција са урбаном средином	fuzzy ANP - fuzzy TOPSIS
[334]	Анализа CL концепција заснованих на различитим конфигурацијама логистичких центара у комбинацији са различитим категоријама доставних возила и политичким иницијативама	профитабилност, временски губици, ниво услуге, мобилност, емисије, задовољство запослених у логистици	MAMCA приступ
[284]	Оцена одрживости логистичког центра са становишта различитих сценарија који се разликују према примењеним мерама и учешћу јавног сектора у финансирању	трошкови пружаоца логистичких услуга, трошкови примаоца рове, трошкови логистичког центра, екстерни трошкови, пређени пут возила, број покретања возила	симулациони модел
[95]	Избор модела хоризонталне кооперације између логистичких центара	временски губици, обухватност токова, емисије, број покретања возила, пређени пут	аналитички модел
[335]	Моделирање решења последње миље испоруке заснованих на ормарићима за испоруку и теретним бициклима са електричним погоном	оперативни трошкови, емисије, заузимање јавног простора, пређени пут	оптимизациони модел
[263]	Оцена и избор одрживе концепције последње миље испоруке	ефикасност, оперативна сложеност испоруке, флексибилност, поузданост, могућност примене, трошкови развоја, модална прерасподела, ослобађање јавног простора, мобилност, еколошки аспект	fuzzy Delphi, fuzzy FARE - fuzzy VIKOR
[316]	Оцена одрживости CL концепција заснованих на технологијама Индустрије 4.0	ефикасност, модална прерасподела, захтевани ниво реинжењеринга, захтеви за развојем додатне инфраструктуре, поузданост система, флексибилност, регулаторни оквири, мобилност, еколошки аспект, оперативна сложеност испоруке, прихватање од стране учесника	grey BWM - grey CODAS

[315]	Избор одрживе технологије транспорта у последњој миљи испоруке	трошкови обуке, трошкови набавке возила, трошкови осигурања и пореза, оперативни трошкови, трошкови развоја мреже, загађење ваздуха, саобраћајна загушења, бука, стварање отпада, прилагодљивост метеоролошким условима, доступност, трајање испоруке, употреба земљишта, мобилност, безбедност учесника у саобраћају, повезаност, флексибилност, фактор товарења, поузданост, безбедност робе	<i>picture fuzzy</i> COCOSO
[98]	Анализа ширег скупа перформанси CL концепција са дроновима	оперативни трошкови, пређени пут возила, број покретања возила, емисије, време завршетка задатка	Аналитички модел
[226]	Анализа ширег скупа CL концепција заснованих на примени дронева	ефикасност, захтеви за развојем додатне инфраструктуре, оперативна сложеност, екстерни трошкови, модална прерасподела, могућност примене, флексибилност, поузданост, регулаторни оквири, ослобађање јавног простора	сферични <i>fuzzy</i> MARCOS

Логистички центри, као прворангирана категорија иницијатива према резултатима из претходног поглавља, су често предмет анализе или барем једна од кључних карика решења анализираних у постојећој литератури. У просторном смислу, логистичке центре је могуће развијати на периферији урбаних средина и тиме омогућити макроконсолидацију робних токова [95] или у зони испоруке у циљу спровођења микроконсолидације робних токова [285]. Могућност дефинисања разноврсних структура система и подобност комбиновања са различитим технологијама транспорта и другим иницијативама CL оправдава место логистичких центара у стручној литератури као једне од најчешће анализираних категорија иницијатива. Рад [334] је фокусиран на избор најпогодније концепције CL за град Брисел, где су у обзир узете различите конфигурације логистичких центара и њихове комбинације са различитим категоријама доставних возила и различитим политичким иницијативама (наплатом путарине и мерама временских ограничења приступа). Избор најпогоднијег модела хоризонталне кооперације између периферних логистичких центара за град Букурешт је спроведен у раду [95], док се рад [284] бави одрживошћу логистичког центра на периферији Копенхагена са становишта различитих сценарија који се разликују према примењеним мерама и учешћу јавног сектора у финансирању. Рад [263] се бави избором најпогодније

концепције последње миље испоруке, при чему су концепције засноване на различитим категоријама логистичких центара, алтернативним видовима транспорта и савременим технологијама које су предмет анализе у новијој литератури. Код консолидације токова на периферији урбаних средина, приступе је могуће класификовати на оне који разматрају развој само једног логистичког центра [336,337] и на приступе који дефинишу сложеније структуре система засноване на више периферних логистичких центара [95,338,339]. Гравитациона зона микроконсолидационих центара (МКЦ) је по правилу ограничена на ужу зону испоруке (најчешће у централној градској зони). То значи да концепције CL које се заснивају на микроконсолидацији токова подразумевају развој већег броја МКЦ [98,285]. Посебна решења заснована на микроконсолидацији токова која су све чешће предмет анализе се односе на е-трговину, испоруку на кућну адресу и примену **ормарића за испоруку** у градовима [340]. Пружаоци логистичких услуга испоручују робу до ормарића, након чега обавештавају кориснике да је тражена роба расположива на локацији која је у непосредној близини [341]. Ормарићи су доступни корисницима 24/7, што елиминише појаву неуспеле испоруке која је чест случај у традиционалним моделима [342]. У раду [335] су анализирана решења последње миље испоруке заснована на ормарићима за испоруку и теретним бициклима са електричним погоном за град Хановер.

Развој логистичких центара и консолидација робних токова у више нивоа проширује скуп практично изводљивих концепција CL. Сабирањем токова у простору и времену оправдава примену мањих доставних возила и алтернативних видова транспорта у испоруци робе као конкурената друмском виду транспорта. Са подизањем свести о проблемима одрживости урбаних средина растао је и број истраживања алтернатива традиционалним доставним возилима.

Примена **малих доставних** и **возила без емисија** у испоруци робе представља један од кључних елемената за достизање одрживости у градовима. Анализирана су возила са алтернативним погоном – електрична [99], водоник [343], хибридна

[300] итд. Висока набавна цена и слабије перформансе у односу на традиционална возила су основни разлог зашто се пружаоци логистичких услуга ретко опредељују за примену доставних возила на алтернативни погон [99]. Ефикасна употреба ових возила захтева квалитетне, одрживе концепције CL [26], а то неизоставно подразумева неки облик консолидације токова преко логистичких центара. Све популарнија у научним истраживањима су мања доставна возила као део концепција CL – бицикли [344–347], мотори [348–350], рикше [299] итд.

Развој нових технологија омогућава дефинисање нових, потенцијално одрживих решења CL [98,263,351]. Технолошке иновације, посебно оне у 21. веку, су скренуле пажњу научних истраживања ка аутономним возилима као елементом потенцијалних концепција CL у будућности. Примена **аутономних возила**, друмских и ваздушних (дренова), у специфичним сценаријима последње миље испоруке може позитивно утицати на одрживост у градовима [352]. Иако постоји велики ентузијазам научне заједнице у вези са аутономним возилима, шира практична примена у највећој мери зависи од правне подршке која би тек требало да буде спроведена [353] али и од прихватања од стране јавности [354]. Истраживања која анализирају примену друмских аутономних возила у испоруци робе су и даље у ембрионалној фази [355], док су истраживања примене дренова значајно бројнија. Анализиране су концепције које подразумевају синхронизовану кооперацију дренова и друмских возила у испоруци [356–358], као и оне код којих друмска возила врше функцију покретних депоа [359,360]. Интересантан приступ је у раду [361] код којег дренови врше снабдевање друмских возила у испоруци робе. Осим поменутих, постоје и концепције које подразумевају да друмска возила врше снабдевање лансирних станица одакле дренови врше испоруку до крајњих корисника [98,362,363].

ИМТ у CL концепцијама је заснован на примени алтернативних видова транспорта, а основне карике таквих концепција су железнички и речни вид. Основни проблем са којим се суочава транспорт робе железницом у градовима је

некомпетентност са друмским транспортом на кратким растојањима [96] што се једино може превазићи консолидацијом токова [108] и успостављањем редовних теретних железничких линија између консолидационих центара и зоне испоруке. Поред успешних пројеката који користе железнички вид транспорта (теретне трамваје), попут оних у Дрездену и Цириху, поједини (на пример у Амстердаму и Бечу) су напуштени због недовољног укључивања јавног сектора у финансирању и правној подршци [107]. ИМТ у СЛ може бити веома ефикасан у интеграцији са **подземним логистичким системима** [275].

Због пораста потражње за услугама превоза људи и робе, поједини аутори истичу да је развој нових интегрисаних железничких система за превоз људи и робе у урбаним срединама оправдан [364]. Поједини радови анализирају могућност употребе постојећих система превоза путника за транспорт робе до зоне испоруке [103]. Решења која комбинују токове путника и робе у литератури су познати и под називом **cargo-hitching** [29].

Унутрашњи пловни путеви у реализацији последње миље испоруке су искоришћени у неколико градова западне Европе [97,273]. Концепција која наговештава ефикасност реализације логистичких активности и одрживост се односи на употребу речних пловила као покретних депоа [106] који са собом превозе мања доставна возила (бицикле, мотоцикле, дроне) за реализацију последње фазе испоруке.

Историјски гледано, већина европских и светских градова је настала управо на значајним рекама, тако да основни предуслови за развој одрживих концепција СЛ заснованих на унутрашњим пловним путевима постоје [365]. Иако се сматра да је успех оваквих концепција могућ само у градовима са густом мрежом унутрашњих пловних путева (попут Утрехта, Амстердама, Венеције итд.), постоје и примери њихове ефикасне примене и у подручјима са слабијом мрежом пловних путева, попут Париза и Лила [97].

Осим ангажовања пружаоца логистичких услуга у свим фазама испоруке, у литератури су све популарније концепције које се заснивају на укључивању

обичних људи у реализацију појединих логистичких активности (најчешће испоруке на кућну адресу, транспорта или складиштења робе) познате под називом *crowdsourcing* [366,367]. Предности *crowdsourcing* идеје су паралелизам (могућност једновременог извршавања већег броја задатака) и смањење негативног утицаја на животну средину (смањење потребног броја доставних возила) [368]. *Crowdsourcing* испорука пружа већу флексибилност и захтева мања капитална улагања у односу на традиционалне приступе у испоруци [369–371]. Значајну подршку *crowdsourcing* концепту пружају интелигентни транспортни системи и *multi-agent* модели [372].

Један од основних проблема *crowdsourcing* идеје је неизвесност која је последица аутономије *crowd* извршиоца са којима пружаоци логистичких услуга сарађују [102]. *Crowd* извршиоци самостално планирају своје активности у складу са личним ставовима, обавезама, циљевима, што ствара ризик да део тражње за логистичким услугама остане незадовољен. У складу са тим, пружаоци логистичких услуга и превозници ипак морају поседовати ресурсе у резерви како би покрили део тражње за услугама које *crowd* извршиоци нису реализовали, као и хитне испоруке. Кључ поузданости *crowdsourcing* идеје би био у дефинисању одговорности *crowd* извршиоца кроз регистрацију у систему пружаоца логистичких услуга, што најчешће представља проблем јер исти желе остати анонимни [373].

У литератури је присутан значајан број радова који се баве анализом појединачних концепција CL. Анализирани концепције се разликују према доминантним елементима (технологијама транспорта, приступима у испоруци, категоријама доставних возила итд.) које их ближе одређују (Табела 6.2). У наставку је дат кратак преглед доминантних елемената најчешће анализираних концепција CL.

Табела 6.2. Доминантни елементи анализираних CL концепција у новијој литератури

<i>Доминантни елемент CL концепције</i>	<i>Тип</i>	<i>Литература</i>
<i>Crowdsourcing</i>	-	[102,366–370,372,373]
<i>Речни вид транспорта</i>	-	[97,106,273,365]
<i>Железнички вид транспорта</i>	редовне трамвајске линије	[96,107,108]
	интегрисани железнички системи	[364]
	<i>cargo-hitching</i>	[29,103]
<i>Ормарићи за испоруку</i>	-	[335,340–342]
<i>Еко-возила</i>	електрична	[99]
	водонична	[343]
	хибридна	[300]
	теретни бицикли	[344–347]
<i>Аутономна возила</i>	теретни мотоцикли	[348,349]
	скутери	[350]
	рикше	[299]
	друмска аутономна возила	[352–355]
<i>Аутономна возила</i>	ваздушна аутономна возила (дронов)	[98,352,356–363]

6.2. Дефинисање одрживих концепција CL заснованих на логистичким центрима, ИМТ и кооперацији

Резултати претходног поглавља указују на то да би одржива решења CL требало да се заснивају на развоју адекватних логистичких центара, примени ИМТ и кооперацији међу учесницима. Узевши те три категорије иницијатива CL у обзир,

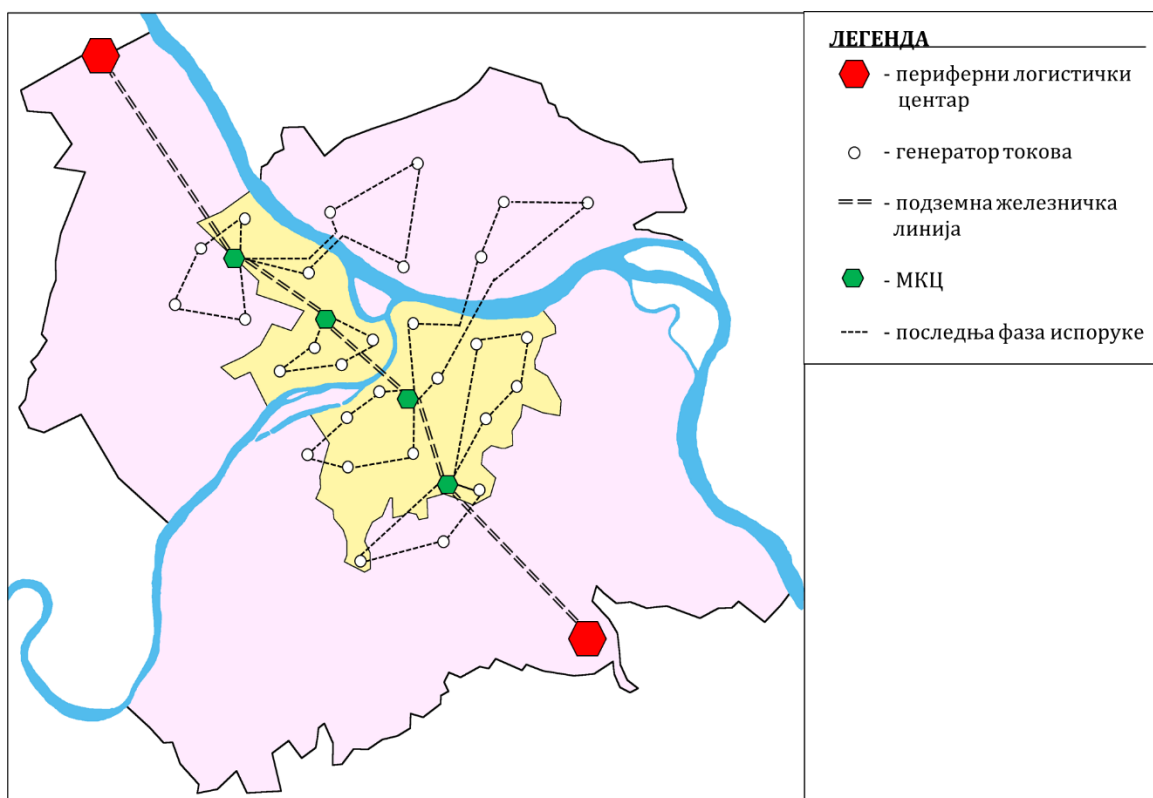
у комбинацији са различитим транспортним технологијама, могуће је дефинисати веома широк скуп практично изводљивих CL концепција.

За потребе дисертације, издвојено је и у наставку описано седам концепција. Концепције се разликују према врсти и улози логистичких центара, структури система, примењеним технологијама транспорта, нивоу трансформације логистичких токова, модалној прерасподели транспортног рада итд. Претпоставка је да у свим концепцијама постоји један или више логистичких центара на периферији урбане средине преко којих се врши консолидација робних токова и који омогућавају кооперацију међу учесницима у логистичким ланцима.

CL концепција 1 – Концепција CL се односи на развој подземних логистичких система преко којих би се вршило снабдевање генератора токова робом (Слика 6.1). Систем би се састојао од периферних логистичких центара који имају директан приступ подземним логистичким системима. Концепција подразумева развој адекватних МКЦ у зони испоруке како би се извршио претовар и трансфер робе из подземног система на површину. Развијени МКЦ омогућавају консолидацију токова у непосредној близини генератора и промену модалитета транспорта. Мања доставна возила се користе за реализацију последње фазе испоруке – од МКЦ до генератора. У зависности од примењене технологије у последњој фази, обухватности токова и носилаца реализације логистичких активности, могуће је дефинисати различите варијанте ове концепције. Сходно томе, последња фаза испоруке се може извршити применом различитих категорија еко-возила (теретних бицикала, мотоцикала, електричних возила итд.), или идеје *crowdsourcing*-а. Концепције CL засноване на примени подземних логистичких система су обрађене у радовима [258,301,374,375].

Предности концепције су могућност обухватања широког скупа робних токова, висока ефикасност логистичких процеса и изузетно смањење негативних ефеката реализације логистичких активности по окружење. Недостатак концепције су висока инвестициона улагања, дуг период изградње и развоја

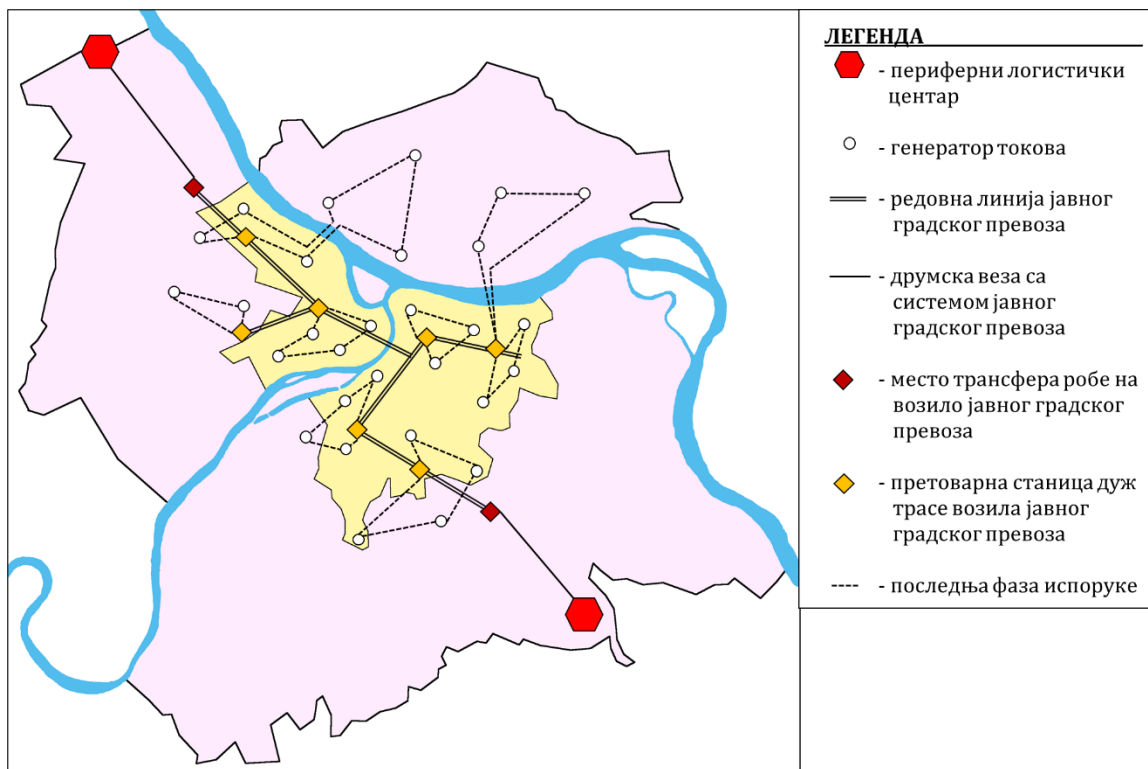
подземних система као и немогућност развоја таквих система у свим, посебно историјским деловима града.



Слика 6.1. CL концепција 1 за град Београд

CL концепција 2 – Примена *cargo-hitching*-а (Слика 6.2). У овој концепцији се логистички систем интегрише са системом превоза путника у граду. Концепција користи постојећу железничку инфраструктуру и редовне путничке трамвајске линије за транспорт робе до зоне испоруке. У зони испоруке су развијени МКЦ чиме је омогућена примена еко-возила и *crowdsourcing*-а у последњој фази испоруке. *Cargo-hitching* као концепција CL је обрађен у радовима [29,376].

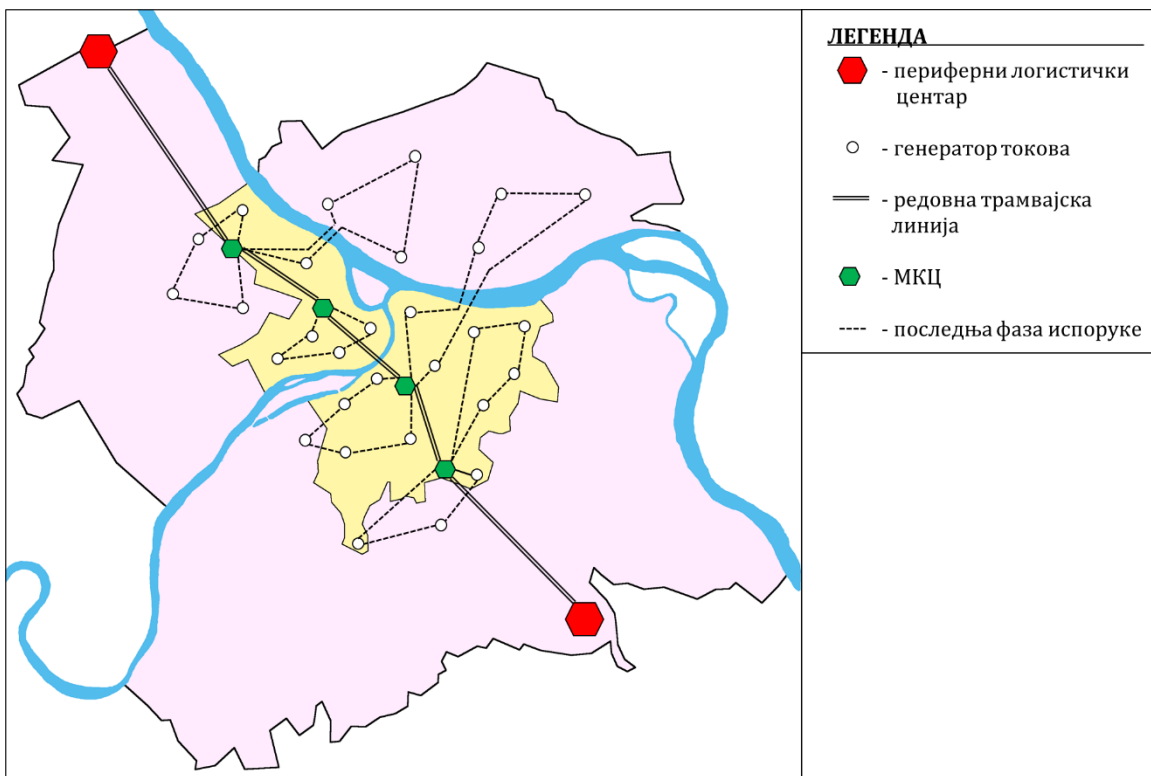
Предност концепције су релативно ниска улагања у инфраструктуру и релативно једноставна интеграција железничког вида за транспорт робе до зоне испоруке. Недостаци концепције су мешање токова робе и путника и ограниченост на постојеће редове линија јавног градског превоза путника.



Слика 6.2. CL концепција 2 за град Београд

CL концепција 3 – Примена редовних трамвајских линија (Слика 6.3). За разлику од претходне, у овој концепцији се уводе редовне теретне трамвајске линије за транспорт робе на релацији периферни логистички центри-МКЦ. У МКЦ се врши промена модалитета транспорта на еко-возила (или се омогућава примена идеје *crowdsourcing*-а) како би се извршила последња фаза испоруке (релација МКЦ-генератори токова). Примена теретних трамваја у концепцијама CL је обрађена у радовима [96,108].

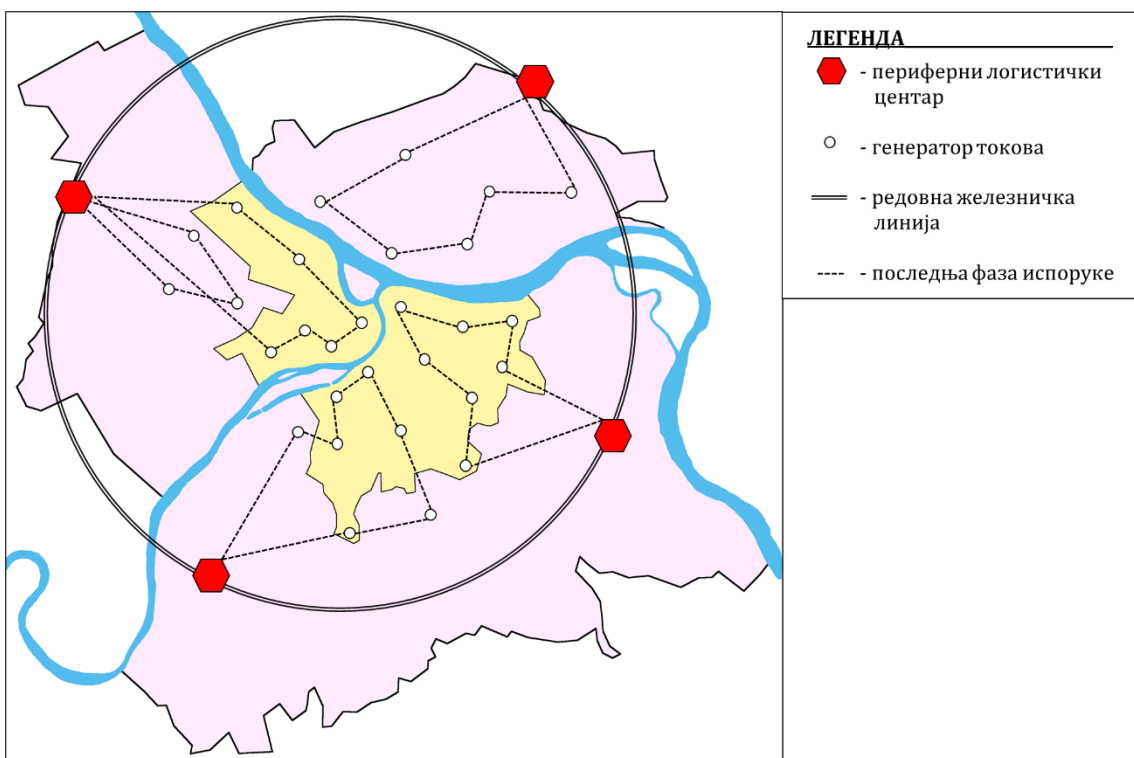
Предност концепције је раздвајање робних токова од токова путника што повећава њену поузданост и ефикасност. Недостатак концепције је потреба за развојем додатне трамвајске инфраструктуре у циљу повезивања периферних логистичких центара.



Слика 6.3. CL концепција 3 за град Београд

CL концепција 4 – Развој периферних логистичких центара међусобно повезаних железничким видом транспорта (Слика 6.4). Концепција подразумева развој већег броја логистичких центара на периферији града, међусобно повезаних редовним теретним железничким линијама који у таквој поставци дају спољном делу логистичке мреже структуру прстена. Генератори токова се опслужују директно из урбаних консолидационих центара применом еко-возила. Сваки логистички центар има своју зону опслуге, а железничким везама између логистичких центара је омогућен трансфер робе. CL концепције које се заснивају на међусобно повезаним логистичким центрима су обрађене у радовима [95,339]. Предност концепције су могућност боље прерасподеле транспортног рада у зонама додељених логистичким центрима што утиче на повећање ефикасности система, смањење трошкова и смањење емисија штетних гасова. Недостатак концепције је потреба за развојем железничке инфраструктуре у спољном

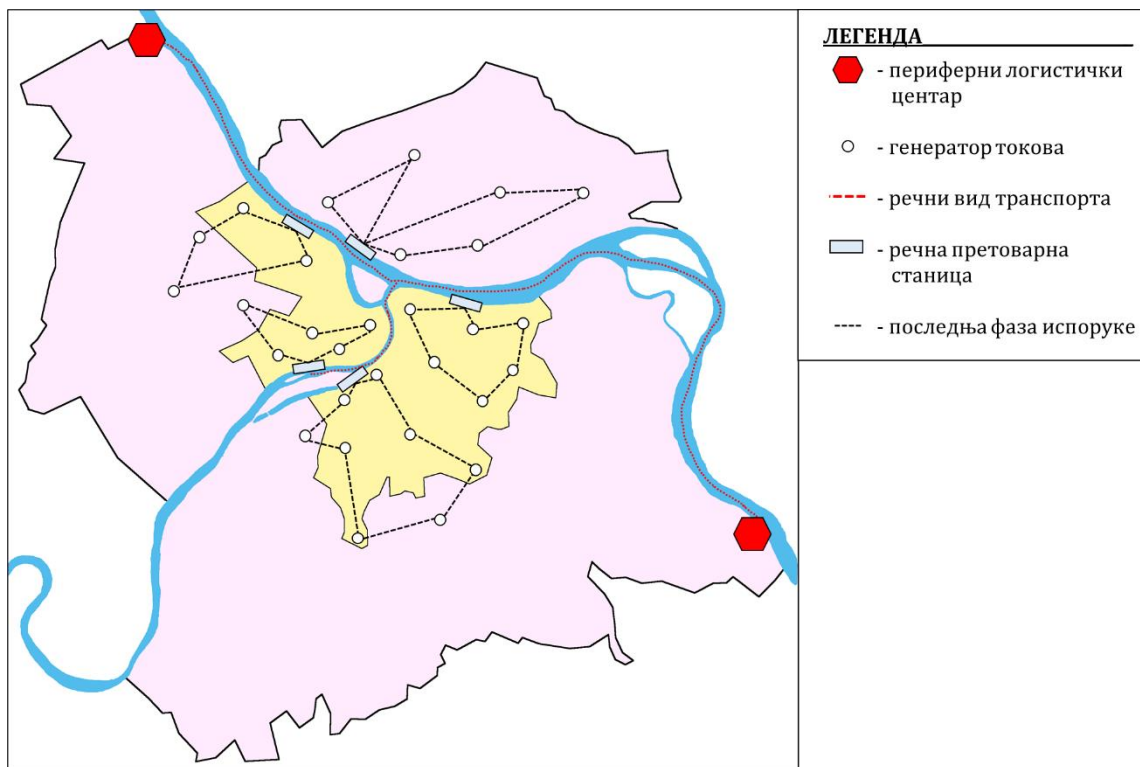
прстену мреже и потреба за развојем већег броја логистичких центара на периферији града.



Слика 6.4. CL концепција 4 за град Београд

CL концепција 5 – Примена речног вида транспорта (Слика 6.5). Развој логистичких центара на обали реке омогућава трансфер консолидованих робних токова на речни вид и транспорт робе до зоне испоруке применом унутрашњих пловних путева. Речне претоварне станице су развијене у зони испоруке, од којих се последња фаза испоруке извршава применом еко-возила. У радовима [97,273] је анализирана примена речног вида транспорта у концепцијама CL.

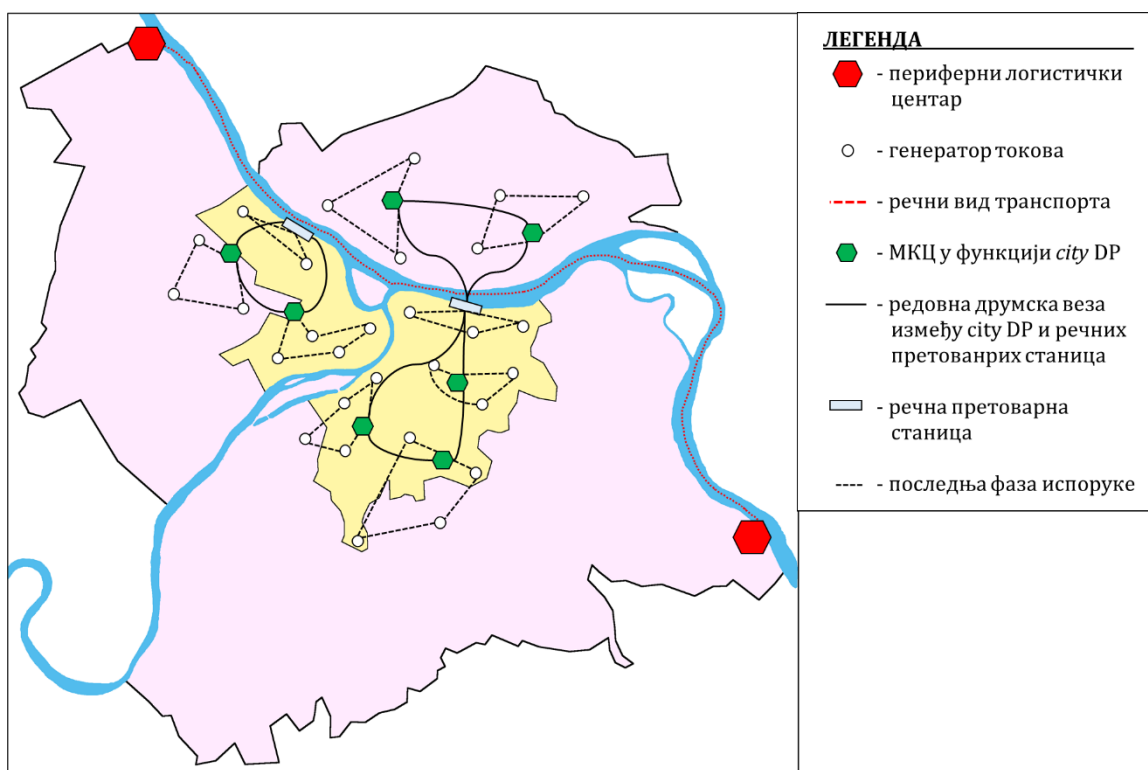
Предност концепције је добра модална прерасподела, ефикасност и смањење негативног утицаја по окружење. Недостатак концепције је ограниченост на речну инфраструктуру и релативно уска гравитациона зона речних претоварних станица. Осим тога, недостатак је и потреба за развојем већег броја речних претоварних станица, што може представљати изазов у туристичким и историјским деловима града који леже на обали реке.



Слика 6.5. CL концепција 5 за град Београд

CL концепција 6 – Примена речног вида транспорта и МКЦ у функцији *city-DP* за речне претоварне станице (Слика 6.6). Ова концепција је надградња претходне у циљу повећавања гравитационе зоне система и могућности опслуге генератора на целој територији града. Развојем МКЦ у функцији *city-DP* за речне претоварне станице и успостављањем редовних линија на релацији речне претоварне станице-МКЦ се омогућава ефикасна трансформација система и примена мањих доставних средстава у последњој фази испоруке. Концепција подразумева примену електро возила као средстава транспорта на редовним линијама између речних претоварних станица и МКЦ (*city-DP*), док се последња фаза испоруке извршава применом мањих еко-возила. Концепција може представљати добро решење у ситуацијама када постоји врло ограничен број речних претоварних станица а широка зона опслуге. У литератури до сада није обрађивана CL концепција која се заснива на примени речног транспорта и развоју МКЦ у функцији DP за речне претоварне станице.

Предност концепције су одлични ефекти на смањење негативног утицаја по окружење, висока ефикасност реализације логистичких процеса и добра модална прерасподела. Предност концепције је и та што логистичким активностима не заузима додатну површину уз речну обалу која је углавном већ изграђена и намењена другим садржајима. Предност је и могућност привременог складиштења робе у *city-DP* терминалима како би се омогућила реализација већег броја испорука у току дана. Недостатак концепције је велика сложеност система и сложенији процес оперативног планирања испоруке.

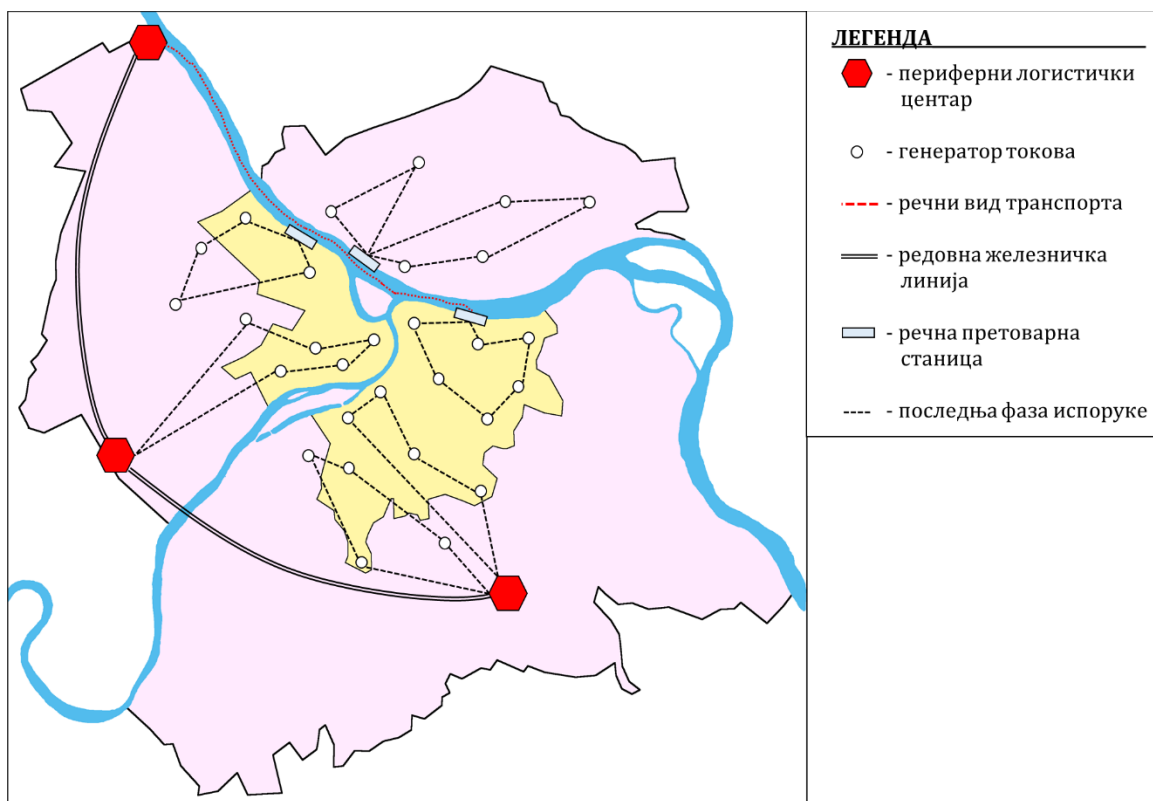


Слика 6.6. CL концепција 6 за град Београд

CL концепција 7 – Примена железничког и речног вида транспорта (Слика 6.7). Ова концепција подразумева комбинацију концепција 4 и 5. Концепција се односи на развој логистичких центара на кључним периферним локацијама, од којих поједине имају директан излаз на обалу реке. Између логистичких центара је успостављена железничка веза како би се омогућио трансфер робе. Део генератора који се налази у гравитационој зони реке се опслужује комбинованом

применом речног и друмског вида транспорта (мањих еко-возила), док се генератори који су изван гравитационе зоне речног дела система опслужују директно из најближег периферног логистичког центра (применом еко-возила већих капацитета). Ова концепција није истражена у постојећој литератури.

Предност концепције је примена сва три вида транспорта, добра повезаност система, висока ефикасност и смањење негативног утицаја по окружење применом алтернативних технологија транспорта. Недостатак концепције је потреба за развојем већег броја периферних логистичких центара и додатне железничке инфраструктуре, као и велика сложеност система.



Слика 6.7. CL концепција 7 за град Београд

Свака од дефинисаних концепција представља посебну врсту решења CL и заслужује пажњу у научним истраживањима. Првих пет концепција је анализирано у постојећој литератури, док су концепције 6 и 7 до сада неистражене. Сходно томе, а узевши у обзир и то да је предмет анализе у претходним поглављима био развој DP терминала за речне контејнерске

терминале у контексту регионалних робних токова, у наставку ће бити анализирана концепција б – развој *city-DP* терминала као потенцијално одрживог решења CL.

6.3. Моделирање CL концепција заснованих на примени *city-DP* терминала

Анализа и моделирање концепција CL захтева одговоре на широк скуп планерских питања на тактичком и оперативном нивоу планирања. Решавање проблема на тактичком нивоу планирања је изузетно важно јер та решења усмеравају у ком правцу ће се кретати експлоатација пројектованог система.

Код концепција CL које се заснивају на вишеешалонској структури система са различитим категоријама логистичких центара и примени различитих видова транспорта и категорија возила, неопходно је утврдити најпогоднију структуру мреже, број и локацију логистичких центара, алокацију генератора одговарајућим логистичким центрима, план оперативног извршавања задатка итд.

Приликом моделирања CL концепције засноване на развоју *city-DP* терминала (концепција б), дефинисано је пет циљних функција – оперативни трошкови, емисије штетних гасова, пређени пут возила, потребан број МКЦ и број покретања доставних возила, а главно питање је оправданост развоја МКЦ у функцији *city-DP* за речне претоварне станице.

Иако постоје радови који се баве планерским проблемима вишеешалонских система, већина се односи на двоешалонске системе, на пример [267,348,377]. Број радова који решава планерске проблеме сложенијих система је веома ограничен, на пример [109,378,379]. Математичка формулација проблема тактичко-оперативне природе за такве системе представља веома сложен задатак, па ће из тих разлога посматрани проблем моделирања CL концепције бити формулисан тако да обухвати све битне елементе, али без детаљне формулације оперативног нивоа.

Локацијско-алокацијски проблем који проистиче из концепције 5 је могуће описати на следећи начин. Нека је S скуп снабдевача који снабдева скуп генератора I у граду. Нека q_{is} означава количину робе коју сваки генератор i захтева од снабдевача s . Нека је L скуп расположивих речних претоварних станица, и нека је M скуп потенцијалних локација развоја МКЦ (*city-DP*). Потребно је пројектовати систем у којем се генератори токова опслужују мањим електричним доставним возилима из *city-DP* или речних претоварних станица. Сваки генератор токова може бити додељен само једном *city-DP* или једној речној претоварној станици, а сваки *city-DP* може бити додељен само једној речној претоварној станици. Снабдевачи применом теретних дизел возила већих капацитета робу транспортују до логистичког центра који се налази на обали реке на периферији посматраног подручја. Роба се потом речним видом транспортује до речних претоварних станица у градској зони. Генератори токова који су додељени речним претоварним станицама се директно из њих опслужују мањим електричним доставним возилима, док се остатак генератора опслужује истом категоријом возила али преко њима додељених *city-DP*. *City-DP* терминали се опслужују помоћу већих електричних возила из речних претоварних станица. Имајући у виду на који начин се врши снабдевање генератора токова додељених *city-DP* терминалима, очигледно је да је у питању троешалонска структура система (ако би се транспорт робе од снабдевача до речних претоварних станица третирао као једна фаза). Потребно је утврдити на којим локацијама је оправдан развој *city-DP* терминала, којим речним претоварним станицама доделити те *city-DP* и које генераторе токова алоцирати на развијене *city-DP*.

Уколико бинарна променљива x_{im}^k износи 1 уколико се генератор i опслужује преко *city-DP* m возилом k , 0 у супротном, и нека бинарна променљива x_{il}^k износи 1 уколико се генератор i опслужује директно преко речне претоварне станице l возилом k , 0 у супротном. Нека бинарна променљива Y_m износи 1 уколико је *city-DP* развијен на локацији m , 0 у супротном и нека бинарна променљива Y_l износи 1 уколико је речна претоварна станица l употребљена, 0 у супротном. Бинарна

променљива z_{ml}^k износи 1 уколико се *city*-DP m опслужује из речне претоварне станице l возилом k , 0 у супротном. Слично, бинарна променљива Z_{ml} износи 1 уколико се *city*-DP m опслужује из речне претоварне станице l , 0 у супротном. Нека бинарне променљиве R_l^k и R_m^k износе 1 уколико је употребљено возило k из речне претоварне станице l , односно *city*-DP m , 0 у супротном. Нека је у свакој речној претоварној станици расположив скуп доставних возила K_l , и нека је у свакој потенцијалној локацији *city*-DP m расположив скуп доставних возила K_m .

Величине Q_l^{max} , Q_{II}^{max} , Q_{III}^{max} редом означавају капацитете друмских превозних средстава у првом, другом и трећем нивоу система. Величине Q_m и Q_l означавају количину робе која пролази кроз *city*-DP m , односно речну претоварну станицу l . Локацијско-алокацијска формулација описаног проблема, фокусирана на оптимизацију свих посматраних циљних функција – оперативних трошкова ($C_{operational}$), емисија (E), пређеног пута доставних возила (D), броја *city*-DP терминала ($N_{centres}$), и броја покретања доставних возила (N_{trips}), би се могла представити на следећи начин:

$$\min C_{operational} \quad (57)$$

$$\min E \quad (58)$$

$$\min D \quad (59)$$

$$\min N_{centres} \quad (60)$$

$$\min N_{trips} \quad (61)$$

са ограничењима:

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K_m} x_{im}^k \cdot R_m^k + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} x_{il}^k \cdot R_l^k = 1 \quad \forall i \in I \quad (62)$$

$$Y_m \geq \sum_{k \in K_m} x_{im}^k \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (63)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \cdot R_l^k = Y_m \quad \forall m \in M \quad (64)$$

$$Z_{ml} \geq \sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \quad \forall m \in M, \forall l \in L \quad (65)$$

$$Y_l \geq \sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (66)$$

$$Y_l \geq \sum_{k \in K_l} x_{il}^k \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (67)$$

$$Q_m = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_m} x_{im}^k \cdot q_{is} \quad \forall l \in M \quad (68)$$

$$Q_l = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_l} x_{il}^k \cdot q_{is} + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \cdot q_{is} \quad \forall l \in L \quad (69)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{im}^k \cdot q_{is} \leq Q_{III}^{max} \quad \forall m \in M, \forall k \in K_m \quad (70)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} x_{il}^k \cdot q_{is} \leq Q_{ll}^{max} \quad \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (71)$$

$$N_{lm}^{full} = \left(\sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \cdot Q_m \right) / (Q_{ll}^{max}) \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (72)$$

$$Q_m^{remaining} = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} z_{ml}^k \cdot Q_m - N_{lm}^{full} \cdot Q_{ll}^{max} \quad \forall m \in M \quad (73)$$

$$\sum_{m \in M} z_{ml}^k \cdot Q_m^{remaining} \leq Q_{ll}^{max} \quad \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (74)$$

Ограничењем (62) се води рачуна да се један генератор мора доделити тачно једном *city-DP* терминалу, односно једној речној претоварној станици. Израз (63) води рачуна на којим локацијама су отворени *city-DP* терминали. Неједнакост (64) прати којим возилима се опслужују *city-DP* терминали, док се изразом (65) прати из којих речних станица се ти *city-DP* терминали опслужују. Слично томе, изразима (66) и (67) се прати које речне претоварне станице су употребљене. Изрази (68) и (69) прате које количине робе пролазе кроз *city-DP* терминале и речне претоварне станице. Ограничењима (70) и (71) се води рачуна да се приликом доделе генератора возилима не премаше њихова ограничења капацитета. Изразом (72) се прати колико пуних возњи (N_{lm}^{full}) између парова речних претоварних станица и *city-DP* терминала постоји. Остатак количине робе ($Q_m^{remaining}$) се утврђује изразом (73). Ограничењем (74) се води рачуна да се не премаше капацитети возила приликом опслуге *city-DP* терминала.

Како би се оценила одрживост описане CL концепције, неопходно је дефинисати оперативни план реализације опслуге генератора, који се састоји од проблема рутирања возила у свим посматраним нивоима система. За све нивое система је потребно узети у обзир расположиве категорије доставних возила, и у складу са њиховим техно-експлоатационим карактеристикама и капацитетима моделирати систем.

Са циљем моделирања CL концепције у светлу одрживог развоја, решавању проблема је потребно приступити узевши у обзир његову вишекритеријумску природу. Оперативни трошкови ($C_{operational}$) (75) су у функцији оперативних трошкова доставних возила у свим нивоима ($C_{vehicles}$) и трошкова претовара робе у логистичким центрима ($C_{transhipment}$). Код ($C_{vehicles}$) (76), трошкови C_{im}^k се

односе на оперативне трошкове снабдевања оних генератора који су додељени *city-DP* терминалима, C_{il}^k се односи на оперативне трошкове опслуге генератора који се снабдевају директно из речних претоварних станица, C_{sl_0} се односи на оперативне трошкове транспорта робе од снабдевача до периферног логистичког центра (места трансфера на речни вид транспорта), док се C_{ml} односи на оперативне трошкове транспорта робе између речних претоварних станица и *city-DP* терминалима. У оперативне трошкове доставних возила су укључени и оперативни трошкови речног транспорта (C_{l_0l}) и трошкови радног времена возача (t). Претоварни трошкови ($C_{transshipment}$) (77) су сразмерни количини претоварене робе у свим логистичким центрима, и израчунавају се на основу јединичних трошкова претовара ($C_{handling}$).

$$C_{operational} = C_{vehicles} + C_{transshipment} \quad (75)$$

$$C_{vehicles} = \sum_{k \in K_m} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{im}^k \cdot C_{im}^k + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_m} x_{il}^k \cdot C_{il}^k + \sum_{s \in S} C_{sl_0} + \sum_{l \in L} C_{l_0l} \cdot Y_l + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} Z_{ml} \cdot C_{ml} \quad (76)$$

$$C_{transshipment} = \left(\sum_{l \in L} Q_l + \sum_{m \in M} Q_m + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is} \right) \cdot C_{handling} \quad (77)$$

$$C_{im}^k = f \left(d, \sum_{s \in S} q_{is}, t, k \right) \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (78)$$

$$C_{il}^k = f \left(d, \sum_{s \in S} q_{is}, t, k \right) \quad \forall i \in I, \forall l \in L \quad (79)$$

$$C_{sl_0} = f \left(d, \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is}, t \right) \quad \forall s \in S \quad (80)$$

$$C_{l_0l} = f \left(d, \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is}, t \right) \quad \forall l \in L \quad (81)$$

$$C_{ml} = f \left(d, \sum_{m \in M} Q_m, t, k, N_{im}^{full} \right) \quad \forall m \in M, \forall l \in L \quad (82)$$

Изразима (78)-(82) се указује на то да су оперативни трошкови сваког нивоа система у функцији пређеног пута (d), превезене количине робе ($\sum_{s \in S} q_{is}$ и $\sum_{m \in M} Q_m$), категорије искоришћених превозних средстава (k), радног времена возача (t), а уз то се у обзир узимају и трошкови претовара робе ($C_{transshipment}$).

Емисије (E) (83) су у функцији експлоатације свих транспортних средстава и зависе од пређеног пута (d) и специфичних јединичних емисија за посматране категорије возила. Величина E_{im} се односи на емисије које су последица

снабдевања генератора из *city*-DP терминала, величина E_{il} на емисије снабдевања генератора из речних претоварних станица, величина E_{sl_0} на емисије које су последица транспорта робе од снабдевача до периферног логистичког центра, E_{l_0l} се односи на емисије речног транспорта, док се величина E_{ml} односи на емисије транспорта робе између речних претоварних станица и *city*-DP терминала. Изразима (84)-(88) се указује да емисије сваког нивоа система зависе од пређеног пута (d), количине превезене робе ($\sum_{s \in S} q_{is}$ и $\sum_{m \in M} Q_m$) и употребљених транспортних средстава (k).

$$E = \sum_{k \in K_m} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{im}^k \cdot E_{im}^k + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_m} x_{il}^k \cdot E_{il}^k + \sum_{s \in S} E_{sl_0} + \sum_{l \in L} E_{l_0l} \cdot Y_l + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} Z_{mi} \cdot E_{mi} \quad (83)$$

$$E_{im}^k = f\left(d, \sum_{s \in S} q_{is}, k\right) \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (84)$$

$$E_{il}^k = f\left(d, \sum_{s \in S} q_{is}, k\right) \quad \forall i \in I, \forall l \in L \quad (85)$$

$$E_{sl_0} = f\left(d, \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is}\right) \quad \forall s \in S \quad (86)$$

$$E_{l_0l} = f\left(d, \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is}\right) \quad \forall l \in L \quad (87)$$

$$E_{mi} = f\left(d, \sum_{m \in M} Q_m, k, N_{lm}^{full}\right) \quad \forall m \in M, \forall l \in L \quad (88)$$

Укупан пређени пут (D) и број лоцираних *city*-DP ($N_{centres}$) су једноставни показатељи који се мере, док је број покретања возила у градској зони (N_{trips}) једнак броју оперативних задатака за друмска транспортна средства у свим нивоима система.

$$N_{centres} = \sum_{m \in M} Y_m \quad (89)$$

$$N_{trips} = \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} N_{lm}^{full} + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K_m} R_m^k + \sum_{l \in L} \sum_{i \in K_l} R_l^k + f\left(\left(\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{is}\right) / Q_i^{max}\right) \quad \forall m \in M, \forall l \in L \quad (90)$$

Пошто је очигледно да дефинисани проблем спада у групу тешких проблема комбинаторне вишекритеријумске оптимизације, за његово ефикасно решавање је потребно развити одговарајући метахеуристички алгоритам. У ту сврху је описани метахеуристички BCO - MARCOS модел [2] из поглавља 3 модификован како би се оспособио за решавање посматраног проблема.

Структура модела је иста као и у поглављу 3 – VCO метахеуристика се користи за претрагу поља допустивих решења, док се за оцену њиховог квалитета користи MARCOS метода ВКО. Дефинисана су два типа пчела. **Tun 1** пчела модификује постојеће решење укидањем насумично изабраног *city-DP*, док **Tun 2** пчела модификује постојеће решење отварањем *city-DP* терминала на насумично одабраној локацији. Приликом сваког лета унапред, пчеле врше модификацију решења у складу са својим типом, а води се рачуна да нова решења увек буду у домену допустивих, поштујући сва ограничења (62)-(74). Након сваке модификације решења врши се израчунавање посматраних циљних функција (57)-(61), у складу са правилима постављеним изразима (75)-(90). Применом MARCOS методе се врши агрегирано оцењивање решења пчела узевши у обзир вредности по циљним функцијама и њихове тежинске коефицијенте чиме се добија вредност квалитета решења пчела (Φ_i). Вредности Φ_i даље утичу на одређивање лојалних и нелојалних пчела у складу са (15)-(16) након чега се нелојалне пчеле додељују лојалним према (17). Понављајући основне кораке VCO метахеуристике се долази до коначног решења након задовољавања услова зауставног критеријума.

Низом експеримената је утврђено да најбоље резултате даје поставка модела са пет пчела, од чега су 2 пчеле типа 1 и 3 пчеле типа 2. За број летова унапред у једној итерацији је усвојена вредност 5. Зауставни критеријум алгоритма је 25 узастопних итерација без побољшања решења већег од 0.01 према параметру Φ_i у односу на претходно VKS као и максималан број итерација - 250. Поред VKS приликом оцене квалитета решења се у обзир узима и до тада најгоре познато решење, јер се тако показало да за посматрани проблем модел боље конвергира. За почетно решење у сваком сценарију се усваја решење са једним, на случајан начин одабраним, *city-DP* терминалом. Рутирање доставних возила у другом и трећем нивоу је извршено помоћу алгоритма најближег суседа [380]. Идеја алгоритма најближег суседа је да на сукцесиван начин укључује најближе локације у постојеће руте, а прилагођен је да поштује ограничења капацитета

возила. Експеримент је спроведен на рачунару следећих карактеристика: Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz са 8 GM RAM меморије.

Улазни параметри

Део саобраћајне мреже Београда (са приближном површином од 250 km², од које је целокупна зона испоруке 150 km²) је искоришћен приликом дефинисања тестног примера окружења у оквиру којег ће бити анализирана посматрана CL концепција. Мрежа је учитана помоћу OSMnx библиотеке [381] у Python 3.9 окружењу. Дефинисано је 5 различитих типова генератора токова који се разликују према величини испоруке и потенцијалном броју снабдевача (Табела 6.3). Имајући у виду да је глобални тренд у CL пораст фреквенције малих испорука [241,242] које стварају највише проблема у планирању и реализацији логистичких активности [22,382], у обзир су узете релативно мале испоруке по маси и запремини.

Табела 6.3. Дефинисани типови генератора робних токова

Тип генератора	Опсег запремине испоруке (m ³)		Опсег масе испоруке (kg)		Расподела броја снабдевача
	min	max	min	max	број: вероватноћа
	<i>Tun 1</i>	0.0005	0.001	0.01	0.5
<i>Tun 2</i>	0.001	0.005	0.5	2.0	1: 0.65; 2: 0.35
<i>Tun 3</i>	0.005	0.01	2.0	5.0	1: 0.2; 2: 0.8
<i>Tun 4</i>	0.01	0.1	5.0	20.0	1: 0.2; 2: 0.65; 3: 0.15
<i>Tun 5</i>	0.1	0.5	20.0	50.0	1: 0.1; 2: 0.5; 3: 0.4

Дефинисане су четири подручја, зоне које описују урбану средину – субурбана зона, урбана зона, централна градска зона и пешачка зона. За сваку зону је дефинисана типична структура генератора токова (Табела 6.4).

Табела 6.4. Дефинисане градске зоне

Тип зоне	Процентуално учешће генератора				
	<i>Tun 1</i>	<i>Tun 2</i>	<i>Tun 3</i>	<i>Tun 4</i>	<i>Tun 5</i>
Субурбана зона	0 %	0 %	15 %	40 %	45 %
Урбана зона	5 %	10 %	20 %	45 %	20 %
Централна градска зона	25 %	35 %	20 %	10 %	10 %
Пешачка зона	35 %	25 %	25 %	7.5 %	7.5 %

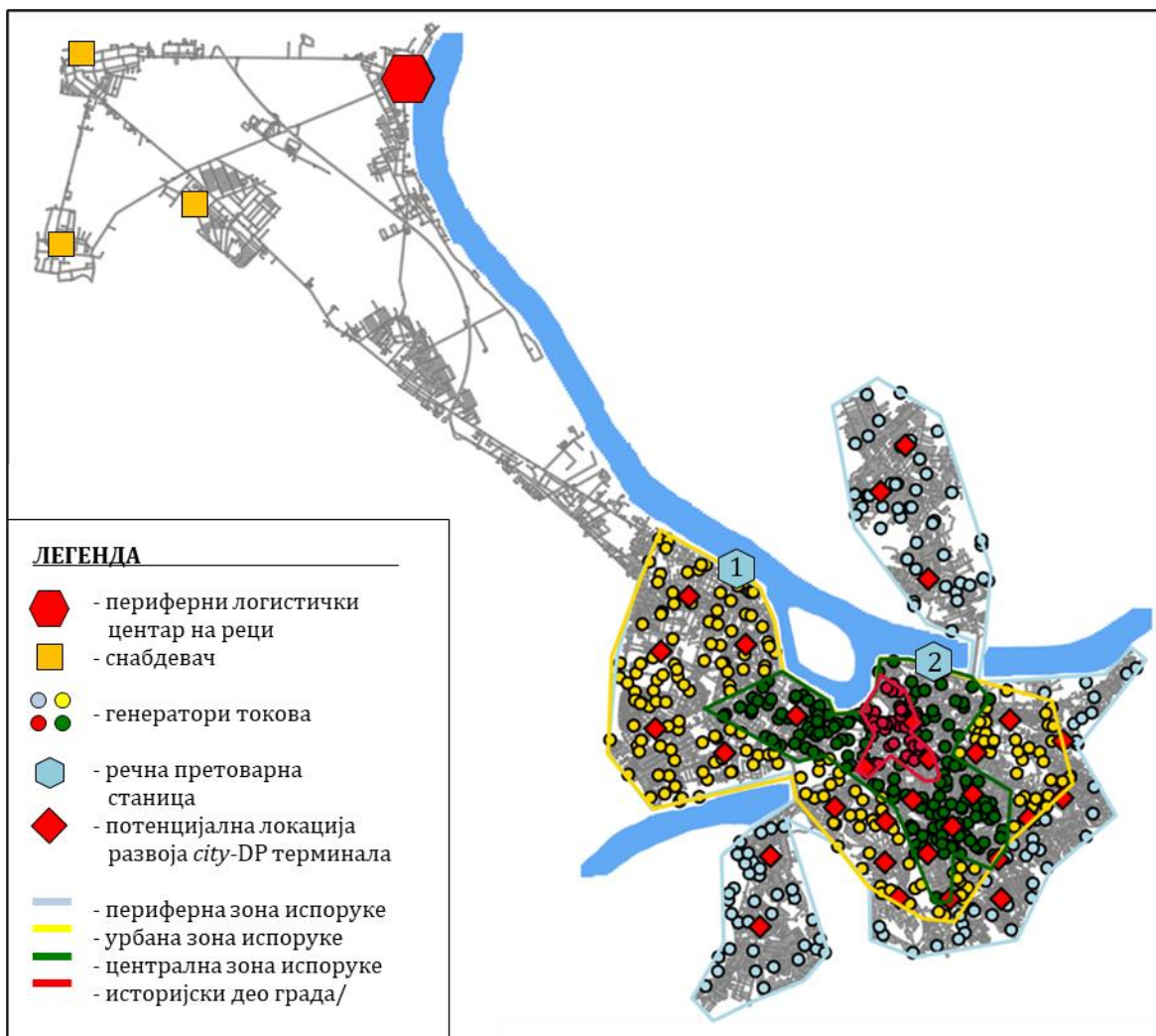
Укупно 500 генератора је на случајан начин распоређено на простору, а у зависности од зоне у којој би се генератори лоцирали, бивале би утврђене карактеристике испоруке.

Остали улазни параметри модела (техничке карактеристике возила, трошкови и емисије различитих видова транспорта) су приказани у Табели 6.5.

Табела 6.5. Остали улазни параметри

Параметар	Вредност	Мерна јединица	Извор
Потрошња енергије електричних доставних возила	0.36	kWh/km	[383]
Емисија CO ₂ за потрошену електричну енергију	0.3773	kg CO ₂ /kWh	[384]
Потрошња горива	13.4	l/100 km	[383]
Емисија CO ₂ за потрошено дизел гориво	2.62	kg CO ₂ /l	[385]
Капацитет товарног простора већег електричног доставног возила	6	m ³	емпиријски податак
Носивост већег електричног доставног возила	1.5	t	емпиријски податак
Маса празног већег електричног доставног возила	1000	kg	емпиријски податак
Капацитет товарног простора мањег електричног доставног возила	2	m ³	емпиријски податак
Носивост мањег електричног доставног возила	200	kg	емпиријски податак
Маса празног мањег електричног доставног возила	1000	kg	емпиријски податак
Домет електричног доставног возила	110	km	емпиријски податак
Носивост традиционалног доставног дизел возила	3.5	t	емпиријски податак
Маса празног традиционалног доставног дизел возила	1.5	t	емпиријски податак
Капацитет товарног простора традиционалног доставног дизел возила	8	m ³	емпиријски податак
Оперативни трошкови дизел возила	0.2	€/t*km	емпиријски податак
Оперативни трошкови електричних возила	0.054	€/t*km	емпиријски податак
Трошкови рада возача	5	€/h	емпиријски податак
Оперативни трошкови речног вида транспорта	0.015	€/t*km	[31]
Емисија CO ₂ за речни вид транспорта	0.06	kg CO ₂ /t*km	[192]
Трошкови претовара робе	1.25	€/m ³	апроксимирано
Просечно време трајања претовара	75	s/m ³	апроксимирано
Просечно време трајања испоруке	3	min	апроксимирано

У обзир су узета три снабдевача робом на периферији посматраног подручја. У њиховој близини налази се периферни логистички центар на обали реке. Две речне претоварне станице у зони испоруке су дефинисане. На случајан начин је дефинисано 30 потенцијалних локација погодних за развој city-DR терминала. Изглед генерисане инстанце је приказан на Слици 6.8.



Слика 6.8. Генерисана тестна инстанца

Резултати и анализа осетљивости

Хибридни VCO - MARCOS модел [2] је подешен за решавање посматраног проблема моделирања CL концепције засноване на *city-DP* терминалима у функцији речних претоварних станица. За улазне величине из Табеле 6.5 и инстанцу генерисану на основу Табела 6.4 и 6.3, решаван је оптимизациони проблем дефинисан функцијама циља (57) – (61) уз поштовање ограничења (62)-(74). Примена VCO метахеуристике је спроведена кроз кораке описане у потпоглављу 4.1. у складу са изразима (15)-(17) и модификацијама решења

описаним у потпоглављу 6.3. Приликом сваке оцене решења на крају трећег корака извршавања BCO, примењена је MARCOS метода кроз кораке (18)-(29).

Решавање посматраног проблема подразумева дефинисање тежинских коефицијената циљних функција као улазних података за модел. У складу са потпоглављима 5.4 и 5.7 су циљне функције доведене у везу са критеријумима дефинисаним за оцену категорија иницијатива CL. Ефикасност процеса (C_4) и сложеност реализације ланаца (C_6) имају везе са оперативним трошковима ($C_{operational}$), еколошки аспект (C_8) је поистовећен са емисијама CO_2 (E), пређени пут (D) је повезан са критеријумима модална прерасподела транспортног рада (C_5) и мобилност (C_7). Број *city-DP* терминала ($N_{centres}$) је поистовећен са потребним инвестицијама (C_3), а број покретања возила (N_{trips}) са модалном прерасподелом транспортног рада (C_5), ослобађањем јавног простора (C_9) и аспектом безбедности (C_{10}). Сабирањем тежинских коефицијената критеријума који су повезани са посматраним циљним функцијама и нормализацијом њихових збирова су добијени следећи тежински коефицијенти циљних функција:

- $C_{operational}$: 0.213
- E : 0.113
- D : 0.179
- $N_{centres}$: 0.205
- N_{trips} : 0.289

Посматране су две варијанте броја расположивих речних претоварних станица у зони испоруке. У првој варијанти су у оптицају обе претоварне станице, док је у другој варијанти у оптицају само једна претоварна станица (станица 2). За обе варијанте броја речних претоварних станица је примена модела је поновљена 25 пута, па су најбољи резултати сваке инстанце пуштања поново оцењени применом MARCOS методе и прворангирани резултат је усвојен као најбољи. Резултати примене хибридног BCO - MARCOS модела су приказани у Табели 6.6.

Табела 6.6. Излазни резултати модела

<i>Број речних претоварних станица</i>	<i>Трошкови (€)</i>	<i>Емисије (kg CO₂)</i>	<i>Пређени пут (km)</i>	<i>Број city-DP терминала</i>	<i>Број покретања возила</i>
2	740	236	1466	7	36
1	674	203	1257	10	34

Из резултата се види да за посматрану поставку тежинских коефицијената циљних функција развој *city-DP* терминала бива оправдан. У случају две речне претоварне станице, према моделу, је оправдан развој 7 *city-DP* терминала, док је у случају једне речне претоварне станице оправдан развој 10 *city-DP* терминала. У циљу спровођења анализе осетљивости, дефинисано је 11 различитих сценарија који се разликују према тежинским коефицијентима посматраних циљних функција. У првом сценарију је усвојено да су све функције циља једнако значајне. У сценаријима Sc. 2 – Sc. 6 је за сваки појединачни критеријум усвојен тежински коефицијент 0.3, док је преосталих 0.7 равномерно распоређено на остале циљне функције (по 0.175). У сценаријима Sc. 7 – Sc. 11 је искључиван по један критеријум, док је осталима додељен тежински коефицијент од 0.25. Као у случају са иницијалном поставком тежинских коефицијената циљних функција, посматране су две варијанте. У првој варијанти су у оптицају обе речне претоварне станице, док је у другој варијанти у оптицају само једна претоварна станица (станица 2).

За сваки сценарио је експеримент је поновљен по 25 пута, па су најбољи резултати сваке инстанце понављања експеримента поново оцењени применом MARCOS методе и прворангирани резултат је усвојен као најбољи за тај сценарио. Резултати примене хибридног BCO - MARCOS модела за све сценарије су представљени у Табелама 6.7. и 6.8.

Табела 6.7. Излазни резултати за варијанту са две речне претоварне станице у зони испоруке

Сценарио	Тежински коефицијенти циљних функција					2 речне претоварне станице				
	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	Трошкови (€)	Емисије (kg CO ₂)	Пређени пут (km)	Број city-DP терминала	Број покретања возила
Sc. 1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	721	234	1368	8	36
Sc. 2	0.3	0.175	0.175	0.175	0.175	666	218	1128	13	34
Sc. 3	0.175	0.3	0.175	0.175	0.175	701	230	1276	9	35
Sc. 4	0.175	0.175	0.3	0.175	0.175	661	217	1108	14	35
Sc. 5	0.175	0.175	0.175	0.3	0.175	1012	305	2798	1	50
Sc. 6	0.175	0.175	0.175	0.175	0.3	689	223	1231	10	34
Sc. 7	0	0.25	0.25	0.25	0.25	996	308	2701	1	49
Sc. 8	0.25	0	0.25	0.25	0.25	657	216	1090	15	34
Sc. 9	0.25	0.25	0	0.25	0.25	996	308	2701	1	49
Sc. 10	0.25	0.25	0.25	0	0.25	635	206	1001	21	36
Sc. 11	0.25	0.25	0.25	0.25	0	617	201	919	30	46

Табела 6.8. Излазни резултати за варијанту са једном речном претоварном станицом у зони испоруке

Сценарио	Тежински коефицијенти циљних функција					1 речна претоварна станица				
	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄	w ₅	Трошкови (€)	Емисије (kg CO ₂)	Пређени пут (km)	Број city-DP терминала	Број покретања возила
Sc. 1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	663	200	1217	12	35
Sc. 2	0.3	0.175	0.175	0.175	0.175	623	190	1024	18	34
Sc. 3	0.175	0.3	0.175	0.175	0.175	623	189	1025	19	34
Sc. 4	0.175	0.175	0.3	0.175	0.175	627	191	1050	17	33
Sc. 5	0.175	0.175	0.175	0.3	0.175	615	188	989	21	36
Sc. 6	0.175	0.175	0.175	0.175	0.3	647	195	1141	14	33
Sc. 7	0	0.25	0.25	0.25	0.25	694	205	1351	9	34
Sc. 8	0.25	0	0.25	0.25	0.25	636	194	1086	15	33
Sc. 9	0.25	0.25	0	0.25	0.25	827	242	1947	5	40
Sc. 10	0.25	0.25	0.25	0	0.25	611	183	986	22	36
Sc. 11	0.25	0.25	0.25	0.25	0	611	185	980	21	38

Из приложених резултата се може видети да оправданост развоја МКЦ у функцији city-DP бива већа у варијанти где је у оптицају само једна речна

претоварна станица. У свим сценаријима осим последњег је оправдан већи број *city-DP* терминала у варијанти са једном речном претоварном станицом у односу на варијанту са две речне претоварне станице. Овакав резултат указује да су концепције CL попут анализираних оправдане у ситуацијама ограничене могућности развоја додатних речних претоварних станица, што и јесте случај у урбаним срединама, посебно у градовима код којих су атрактивни туристички и историјски садржаји управо на обалама река. У варијанти са две речне претоварне станице је шире подручје које је могуће ефикасно опслуживати са реке, па је самим тиме мањи број *city-DP* терминала чији је развој оправдан.

Што се тиче саме конфигурације тежинских коефицијената циљних функција, са подизањем појединачних значаја прве три циљне функције (оперативних трошкова, емисије CO₂ и пређеног пута), расте и број отворених *city-DP* терминала. С обзиром да број покретања возила није у линеарној вези са бројем лоцираних *city-DP* терминала, елиминацијом те циљне функције из прорачуна се као резултат добија оправданост развоја свих 30 *city-DP* терминала у варијанти са две речне претоварне станице. У варијанти са једном речном претоварном станицом, највећи број оправданих *city-DP* терминала за развој је у сценарију у којем је елиминисан број *city-DP* терминала као циљна функција. Из резултата је могуће уочити да се оперативни трошкови, емисије CO₂ и пређени пут доставних возила смањују са повећањем броја *city-DP* терминала, што указује на то да расте ефикасност система са развојем логистичких центара у зони испоруке.

Иако је посматрани пример веома упрошћен и релативно мањих димензија, може се навестити да комбинација категорија иницијатива логистичких центара, ИМТ, и кооперације може представљати одрживу CL концепцију. Конкретно, резултати указују на то да развој адекватних логистичких центара на периферији урбаних средина и у зони испоруке (МКЦ у функцији *city-DP*) оправдава употребу ИМТ (конкретно комбиновану примену речног и друмског вида транспорта) у испоруци робе.

Будућа истраживања би могла дубље истражити посматрану CL концепцију, или дефинисати нове концепције које се односе на развој специјализованих *city DP* терминала. Литератури и даље недостају радови који ће дубље анализирати концепције које се заснивају на комбинацији различитих иницијатива и технологија CL. Правац будућих истраживања би такође могао да се креће у дефинисању јединственог оквира на основу којег ће се утврђивати у ком смеру би требало да се креће развој CL система за конкретне примере.

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Планирање одрживих логистичких система је од великог значаја за постизање одрживог развоја на макро и микро нивоу. Неодржив правац којим се друштво креће указује да је потребно преиспитати досадашње приступе у планирању логистичких система и укључити сва три стуба одрживости (економску, друштвену и еколошку одрживост) у процесе доношења одлука. Ова дисертација представља јединствен случај у којем је указано на проблеме одрживог развоја, а потом су дефинисани нови приступи за планирање одрживих система у складу са интересима и циљевима свих интересних група и свих аспеката одрживости. Након тога је скренута пажња ка значају планирања одрживих логистичких система на макро и микро нивоу, наглашавајући значај ИМТ и СЛ.

Хипотезе на којима је утемељена дисертација су потврђене. Показано је да се проблемима планирања одрживих логистичких система на макро и микро нивоу може приступити на свеобухватан начин, поштујући сва три стуба одрживости – економску, еколошку и друштвену. Доказано је да је развој DP концепта у функцији речних контејнерских терминала потенцијално одржив, а такав систем би уједно представљао ембрион даљег развоја одрживог ИМТ система. Дефинисан је модел планирања DP концепта који на свеобухватан начин третира вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости, а његова примена је демонстрирана над инстанцом инспирисаном примером из реалности.

Показано је да оцена основних категорија иницијатива СЛ представља добар полазни корак у дефинисању одрживих решења СЛ. Дефинисан је модел оцене основних категорија иницијатива СЛ који на свеобухватан начин третира вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости. Примена модела је демонстрирана за случај града Београда. Показано је да планирање и развој концепција СЛ заснованих на одрживим категоријама иницијатива СЛ у комбинацији са савременим технологијама наговештава одрживост. Конкретно,

развој *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица представља потенцијално одрживу концепцију *CL*. Дефинисан је и развијен модел планирања *CL* концепције засноване на примени *city-DP* терминала који на свеобухватан начин третира вишекритеријалну природу проблема са акцентом на одрживости. Примена модела је демонстрирана над инстанцом инспирисаном примером града Београда.

Научни допринос дисертације је дефинисање улоге логистике у постизању одрживог развоја на макро и микро нивоу. Идентификовани су и описани проблеми, интересне групе, ставови и циљеви интересних група, критеријуми и приступи решавању проблема одрживости логистике. Истакнути су улога и значај планирања одрживих система *ИМТ* у функцији одрживог развоја на макро нивоу, као и улога и значај планирања одрживих система *CL* у функцији одрживог развоја на микро нивоу. Идентификован је потенцијал *DP* концепта као правца развоја одрживих система *ИМТ* и дефинисани су потенцијални сценарији развоја *ИМТ* система подунавског региона кроз *DP* концепт. Дефинисан је и детаљно описан *DP* концепт у функцији речних контејнерских терминала. Моделирање *DP* концепта у функцији речних контејнерских терминала је математички формулисано као проблем вишекритеријумске оптимизације, а за његово решавање је примењен хибридни метахеуристички модел заснован на *BCO* метахеуристици и *MARCOS* методи *ВКО*. Представљена је студија случаја за подунавски регион, а резултати примене хибридног *BCO-MARCOS* модела указују на оправданост развоја *DP* концепта у функцији дунавских речних контејнерских терминала. Идентификоване су и описане основне категорије иницијатива *CL* и критеријуми за њихово вредновање. Хибридни *fuzzy AHP – fuzzy MARCOS* модел *ВКО* је развијен и примењен за оцену одрживости категорија иницијатива *CL* за подручје Београда. На основу резултата примене хибридног *fuzzy AHP – fuzzy MARCOS* модела су идентификоване потенцијално одрживе концепције *CL* за град Београд. Дефинисана је и детаљно описана концепција *CL* која се односи на развој *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица као потенцијално

одржива концепција CL за град Београд. Моделирање CL концепције засноване на развоју *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица је математички формулисано као проблем вишекритеријумске оптимизације, а за његово решавање је прилагођен и примењен хибридни VCO – MARCOS метахеуристички модел. Генерисана је инстанца реалних димензија по узору на град Београд а резултати примене хибридног VCO – MARCOS модела указују да је развој *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица потенцијално одржива концепција CL.

Дисертација отвара нове просторе истраживањима одрживости логистичких система дефинисањем иновативних и креативних праваца развоја на макро и микро нивоу. Постављена је основа за даља научна истраживања у области која је могуће поделити у више праваца. Први од праваца будућих истраживања је разрада нових, потенцијално одрживих сценарија развоја ИМТ система и концепција CL. Будућа истраживања се могу бавити и детаљнијом разрадом DP концепта у функцији речних контејнерских терминала и испитати оправданост његове примене за друга географска подручја. Други правац се односи на разраду ширег скупа потенцијално одрживих концепција CL које се заснивају на развоју различитих типова логистичких центара, интензивнијој примени ИМТ и кооперацији између учесника. Истраживања могу да се баве даљом разрадом концепција које стимулишу употребу алтернативних видова транспорта на подручју CL. Посебна пажња би могла бити усмерена ка дефинисању и испитивању CL концепција заснованих на технологијама Индустрије 4.0 као решењима логистике у „паметним“ градовима (енгл. *smart cities*). Такође, будућа истраживања могу испитати оправданост развоја *city-DP* терминала у функцији речних претоварних станица за подручја других урбаних средина. Примењени модели у дисертацији су универзални па би се будућа истраживања могла бавити и развојем нових хибридних модела заснованих на комбинацији метахеуристичких и метода ВКО за решавање проблема моделирања одрживих система логистике на макро и микро нивоу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tadić, S.; Kilibarda, M.; Kovač, M.; Zečević, S. The assessment of intermodal transport in countries of the Danube region. *Int. J. Traffic Transp. Eng.* **2021**, *11*, 375–391, doi:10.7708/ijtte2021.11(3).03.
2. Kovač, M.; Roso, V.; Tadić, S.; Krstić, M. Dry Port system modelling in the function of inland waterway container terminals. *Раđ у припрему* **2022**.
3. Tadić, S.; Krstić, M.; Kovač, M. Assessment of city logistics initiative categories sustainability. *Environ. Dev. Sustain.* **2022**, 1–38, doi:10.1007/s10668-021-02099-0.
4. Alhaddi, H. Triple bottom line and sustainability: A literature review. *Bus. Manag. Stud.* **2015**, *1*, 6–10, doi:10.11114/bms.v1i2.752.
5. WCED - The world commission on environment and development. *Our common future*; Oxford University Press: Oxford, England, 1987;
6. Elkington, J. Enter the Triple Bottom Line. In *The Triple Bottom Line*; Henriques, A., Richardson, J., Eds.; Earthscan: London, United Kingdom, 2004; pp. 1–16.
7. Deutsch, N.; Berenyi, L. Personal approach to sustainability of future decision makers: a Hungarian case. *Environ. Dev. Sustain.* **2018**, *20*, 271–303, doi:10.1007/s10668-016-9881-9.
8. Govindan, K.; Khodaverdi, R.; Jafarian, A. A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *J. Clean. Prod.* **2013**, *47*, 345–354, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2012.04.014.
9. Tadić, S.; Zečević, S. *Modelling city logistics concepts (in Serbian)*; 1st ed.; University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering: Belgrade, Serbia, 2016;
10. Arvianto, A.; Sopha, B.M.; Sri Asih, A.M.; Ali Imron, M. City logistics challenges and innovative solutions in developed and developing economies: A systematic literature review. *Int. J. Eng. Bus. Manag.* **2021**, *13*, 1–18,

doi:10.1177/18479790211039723.

11. Tadić, S.; Zečević, S. Global trends and their impact on city logistics management. *Tehnika* **2016**, *71*, 459–464, doi:10.5937/tehnikal603459T.
12. Sultana, S.; Salon, D.; Kuby, M. Transportation sustainability in the urban context: a comprehensive review. *Urban Geogr.* **2019**, *40*, 279–308, doi:10.1080/02723638.2017.1395635.
13. ECMT - European Conference of Ministers of Transport. *Terminology on Combined Transport*; European Conference of Ministers of Transport: Paris, France, 1993;
14. Arnold, P.; Peeters, D.; Thomas, I. Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2004**, *40*, 255–270, doi:10.1016/j.tre.2003.08.005.
15. Macioszek, E. First and Last Mile Delivery – Problems and Issues. In Proceedings of the Advanced Solutions of Transport Systems for Growing Mobility; Sierpiński, G., Ed.; Springer Cham, 2017; pp. 147–154.
16. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. City logistics - status and trends. *Int. J. Traffic Transp. Eng.* **2015**, *5*, 319–343, doi:10.7708/ijtte.2015.5(3).09.
17. Hu, W.; Dong, J.; Hwang, B.; Ren, R.; Chen, Z. A Scientometrics Review on City Logistics Literature: Research Trends, Advanced Theory and Practice. *Sustainability* **2019**, *11*, 2724, doi:10.3390/su11102724.
18. Zečević, S.; Tadić, S. *City logistics (in Serbian)*; University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering: Belgrade, Serbia, 2006;
19. Buldeo Rai, H.; Verlinde, S.; Macharis, C. City logistics in an omnichannel environment. The case of Brussels. *Case Stud. Transp. Policy* **2019**, *7*, 310–317, doi:10.1016/J.CSTP.2019.02.002.
20. Van Rooijen, T.; Guikink, D.; Quak, H. Long-term effects of innovative city logistics measures. In *City Logistics 1: New Opportunities and Challenges*; Taniguchi, E., Thompson, R.G., Eds.; John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, 2018; pp. 189–208.

21. Black, J.; Roso, V.; Marušić, E.; Brnjac, N. Issues in dry port location and implementation in metropolitan areas: The case of Sydney, Australia. *Trans. Marit. Sci.* **2018**, *7*, 41–50, doi:10.7225/toms.v07.n01.004.
22. Tadić, S.; Zečević, S. Integrated planning aimed at sustainability city logistics solutions. *Tehnika* **2015**, *65*, 164–173, doi:10.5937/tehnika1501164T.
23. Szmelter-Jarosz, A.; Rześny-Cieplińska, J. Priorities of urban transport system stakeholders according to crowd logistics solutions in city areas. A sustainability perspective. *Sustainability* **2020**, *12*, 1–19, doi:10.3390/su12010317.
24. Kumar, A.; Anbanandam, R. Evaluating the interrelationships among inhibitors to intermodal railroad freight transport in emerging economies: A multi-stakeholder perspective. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2020**, *132*, 559–581, doi:10.1016/j.tra.2019.11.023.
25. Zečević, S. *Logistics centres and freight villages (in Serbian)*; University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering: Belgrade, Serbia, 2009;
26. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy VIKOR for city logistics concept selection. *Expert Syst. Appl.* **2014**, *41*, 8112–8128, doi:10.1016/j.eswa.2014.07.021.
27. Kelle, P.; Song, J.; Jin, M.; Schneider, H.; Claypool, C. Evaluation of operational and environmental sustainability tradeoffs in multimodal freight transportation planning. *Int. J. Prod. Econ.* **2019**, *209*, 411–420, doi:10.1016/J.IJPE.2018.08.011.
28. Raimbault, N. From regional planning to port regionalization and urban logistics. The inland port and the governance of logistics development in the Paris region. *J. Transp. Geogr.* **2019**, *78*, 205–213, doi:10.1016/J.JTRANGE.2019.06.005.
29. Van Duin, R.; Wiegmans, B.; Tavasszy, L.; Hendriks, B.; He, Y. Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching. *Transp. Res. Procedia* **2019**, *39*, 565–575, doi:10.1016/j.trpro.2019.06.058.
30. Wei, H.; Sheng, Z. Dry ports-seaports sustainable logistics network optimization: Considering the environment constraints and the concession cooperation relationships. *Polish Marit. Res.* **2017**, *24*, 143–151, doi:10.1515/pomr-2017-

0117.

31. Bojić, S.; Georgijević, M.; Brcanov, D. Transformation of the Danube Ports into Logistics Centers and Their Integration in the EU Logistics Network. *Towar. Innov. Freight Logist.* **2016**, *2*, 217–229, doi:10.1002/9781119307785.ch15.
32. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. Assessment of the political city logistics initiatives sustainability. *Transp. Res. Procedia* **2018**, *30*, 285–294, doi:10.1016/j.trpro.2018.09.031.
33. Tadić, S.; Krstić, M.; Roso, V.; Brnjac, N. Planning an intermodal terminal for the sustainable transport network. *Sustainability* **2019**, *11*, 4102, doi:10.3390/su11154102.
34. Robinson, J. Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development. *Ecol. Econ.* **2004**, *48*, 369–384, doi:10.1016/J.ECOLECON.2003.10.017.
35. Waas, T.; Hugé, J.; Verbruggen, A.; Wright, T. Sustainable Development: A Bird's Eye View. *Sustainability* **2011**, *3*, 1637–1661, doi:10.3390/su3101637.
36. Mensah, J. Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Soc. Sci.* **2019**, *5*, 1653531, doi:10.1080/23311886.2019.1653531.
37. United Nations. *The sustainable development agenda*; 2016;
38. Fu, B.; Wang, S.; Zhang, J.; Hou, Z.; Li, J. Unravelling the complexity in achieving the 17 sustainable-development goals. *Natl. Sci. Rev.* **2019**, *6*, 386–388, doi:10.1093/nsr/nwz038.
39. Fonseca, L.M.; Domingues, J.P.; Dima, A.M. Mapping the Sustainable Development Goals Relationships. *Sustainability* **2020**, *12*, 3359, doi:10.3390/su12083359.
40. Zeng, Y.; Maxwell, S.; Runting, R.K.; Venter, O.; Watson, J.E.M.; Carrasco, L.R. Environmental destruction not avoided with the Sustainable Development Goals. *Nat. Sustain.* **2020**, *3*, 795–798, doi:10.1038/s41893-020-0555-0.
41. Bocken, N.M.P.; Short, S.W. Unsustainable business models – Recognising and resolving institutionalised social and environmental harm. *J. Clean. Prod.* **2021**,

- 312, 127828, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2021.127828.
42. United Nations. *Sustainable development goals report*; 2020;
 43. Kurzgesagt. Who Is Responsible For Climate Change? – Who Needs To Fix It? Available online: <https://kurzgesagt.org>. Приступљено: 21.2.2022.
 44. Silvestre, B.S.; Țîrcă, D.M. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *J. Clean. Prod.* **2019**, *208*, 325–332, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.244.
 45. Lemke, C.; Bastini, K. Embracing multiple perspectives of sustainable development in a composite measure: The Multilevel Sustainable Development Index. *J. Clean. Prod.* **2020**, *246*, 118884, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.118884.
 46. Fuso Nerini, F.; Tomei, J.; To, L.S.; Bisaga, I.; Parikh, P.; Black, M.; Borrion, A.; Spataru, C.; Castán Broto, V.; Anandarajah, G.; et al. Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals. *Nat. Energy* **2018**, *3*, 10–15, doi:10.1038/s41560-017-0036-5.
 47. Liu, J.; Hull, V.; Godfray, H.C.J.; Tilman, D.; Gleick, P.; Hoff, H.; Pahl-Wostl, C.; Xu, Z.; Chung, M.G.; Sun, J.; et al. Nexus approaches to global sustainable development. *Nat. Sustain.* **2018**, *1*, 466–476, doi:10.1038/s41893-018-0135-8.
 48. Sachs, J.; Schmidt-Traub, G.; Mazzucato, M.; Messner, D.; Nakićenović, N.; Rockstrom, J. Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. *Nat. Sustain.* **2019**, *2*, 805–814, doi:10.1038/s41893-019-0352-9.
 49. Martins, V.; Anholon, R.; Quelhas, O.L.G.; Filho, W. Sustainable Practices in Logistics Systems: An Overview of Companies in Brazil. *Sustainability* **2019**, *11*, 4140, doi:10.3390/su11154140.
 50. Qaiser, F.H.; Ahmed, K.; Sykora, M.; Choudhary, A.; Simpson, M. Decision support systems for sustainable logistics: a review and bibliometric analysis. *Ind. Manag. Data Syst.* **2017**, *117*, 1376–1388, doi:10.1108/IMDS-09-2016-0410.
 51. Baah, C.; Amponsah, K.T.; Issau, K.; Ofori, D.; Acquah, I.S.K.; Agyeman, D.O. Examining the Interconnections Between Sustainable Logistics Practices, Environmental Reputation and Financial Performance: A Mediation Approach.

- Vis. J. Bus. Perspect.* **2021**, *25*, 47–64, doi:10.1177/0972262920988805.
52. Stojanović, Đ.; Ivetić, J.; Veličković, M. Assessment of International Trade-Related Transport CO₂ Emissions—A Logistics Responsibility Perspective. *Sustain.* 2021, *13*.
53. Kumar, A.; Anbanandam, R. Development of social sustainability index for freight transportation system. *J. Clean. Prod.* **2019**, *210*, 77–92, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.353.
54. Ge, J.; Shi, W.; Wang, X. Policy agenda for sustainable intermodal transport in China: An application of the multiple streams framework. *Sustainability* **2020**, *12*, 3915, doi:10.3390/su12093915.
55. Macharis, C.; Kin, B. The 4 A's of sustainable city distribution: Innovative solutions and challenges ahead. *Int. J. Sustain. Transp.* **2017**, *11*, 59–71, doi:10.1080/15568318.2016.1196404.
56. Björklund, M.; Forslund, H. Exploring the sustainable logistics innovation process. *Ind. Manag. Data Syst.* **2018**, *118*, 204–217, doi:10.1108/IMDS-02-2017-0058.
57. Wang, Z.; Tsai, Z.; Fu, J.; Zhao, L.; Yang, L. Internalization of negative external cost of green logistics and incentive mechanism. *Adv. Mech. Eng.* **2017**, *9*, 1–12, doi:10.1177/1687814017715420.
58. Zhang, D.; Zhan, Q.; Chen, Y.; Li, S. Joint optimization of logistics infrastructure investments and subsidies in a regional logistics network with CO₂ emission reduction targets. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *60*, 174–190, doi:10.1016/J.TRD.2016.02.019.
59. De Kervenoael, R.; Schwob, A.; Chandra, C. E-retailers and the engagement of delivery workers in urban last-mile delivery for sustainable logistics value creation: Leveraging legitimate concerns under time-based marketing promise. *J. Retail. Consum. Serv.* **2020**, *54*, 102016, doi:10.1016/J.JRETCOSER.2019.102016.
60. Caris, A.; Macharis, C.; Janssens, G.K. Decision support in intermodal transport: A

- new research agenda. *Comput. Ind.* **2013**, *64*, 105–112, doi:10.1016/j.compind.2012.12.001.
61. Macharis, C.; Caris, A.; Jourquin, B.; Pekin, E. A decision support framework for intermodal transport policy. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2011**, *3*, 167–178, doi:10.1007/s12544-011-0062-5.
62. Tadić, S.; Krstić, M.; Roso, V.; Brnjac, N. Planning an Intermodal Terminal for the Sustainable Transport Networks. *Sustainability* **2019**, *11*, 4102, doi:10.3390/su11154102.
63. Teye, C.; Bell, M.; Bliemer, M. Locating urban and regional container terminals in a competitive environment: An entropy maximising approach. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2018**, *117*, 971–985, doi:10.1016/j.trb.2017.08.017.
64. Vidović, M.; Zečević, S.; Kilibarda, M.; Vlajić, J.; Bjelić, N.; Tadić, S. The p-hub model with hub-catchment areas, existing hubs and simulation: A case study of Serbian intermodal terminals. *Networks Spat. Econ.* **2011**, *11*, 295–314, doi:10.1007/s11067-009-9126-7.
65. Tawfik, C.; Limbourg, S. Scenario-based analysis for intermodal transport in the context of service network design models. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* **2019**, *2*, 100036, doi:10.1016/j.trip.2019.100036.
66. Zhao, Y.; Xue, Q.; Cao, Z.; Zhang, X. A two-stage chance constrained approach with application to stochastic intermodal service network design problems. *J. Adv. Transp.* **2018**, 1–18, doi:10.1155/2018/6051029.
67. Zečević, S.; Tadić, S.; Krstić, M. Intermodal transport terminal location selection using a novel hybrid MCDM model. *Int. J. Uncertainty, Fuzziness Knowledge-Based Syst.* **2017**, *25*, 853–876, doi:10.1142/S0218488517500362.
68. Ližbetin, J. Methodology for determining the location of intermodal transport terminals for the development of sustainable transport systems: A case study from slovakia. *Sustainability* **2019**, *11*, 1230, doi:10.3390/su11051230.
69. Sun, Y. Green and Reliable Freight Routing Problem in the Road-Rail Intermodal Transportation Network with Uncertain Parameters: A Fuzzy Goal Programming

- Approach. *J. Adv. Transp.* **2020**, 7570686, doi:10.1155/2020/7570686.
70. Heggen, H.; Molenbruch, Y.; Caris, A.; Braekers, K. Intermodal container routing: Integrating long-haul routing and local drayage decisions. *Sustainability* **2019**, *11*, 1634, doi:https://doi.org/10.3390/su11061634.
71. Escuderp-Santana, A.; Munuzuri, J.; Cortes, P.; Onieva, L. The one container drayage problem with soft time windows. *Res. Transp. Econ.* **2020**, 100884, doi:10.1016/j.retrec.2020.100884.
72. Benantar, A.; Abourraja, M.N.; Boukachour, J.; Boudebous, D.; Duvallet, C. On the integration of container availability constraints into daily drayage operations arising in France: Modelling and optimization. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2020**, *140*, 101969, doi:10.1016/j.tre.2020.101969.
73. Carboni, A.; Deflorio, F. Performance indicators and automatic identification systems in inland freight terminals for intermodal transport. *IET Intell. Transp. Syst.* **2018**, *12*, 309–318, doi:10.1049/iet-its.2017.0349.
74. Vural, C.A.; Roso, V.; Halldorsson, A.; Stahle, G.; Yaruta, M. Can digitalization mitigate barriers to intermodal transport? An exploratory study. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2020**, *37*, 100525, doi:10.1016/j.rtbm.2020.100525.
75. Krstić, M.; Tadić, S.; Brnjac, N.; Zečević, S. Intermodal terminal handling equipment selection using a fuzzy multi-criteria decision-making model. *Promet - Traffic Transp.* **2019**, *31*, 89–100, doi:10.7307/ptt.v31i1.2949.
76. Tadić, S.; Zečević, S.; Milenković, D. Intermodal transport treatment in developed and developing countries. *Tehnika* **2017**, *72*, 897–902, doi:10.5937/tehnika1706897T.
77. Suarez-Aleman, A.; Trujillo, L.; Medda, F. Short sea shipping as intermodal competitor: A theoretical analysis of European transport policies. *Marit. Policy Manag.* **2014**, *42*, 1–18, doi:10.1080/03088839.2014.904947.
78. Tsamboulas, D.; Vrenken, H.; Lekka, A.-M. Assessment of a transport policy potential for intermodal mode shift on a European scale. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2007**, *41*, 715–733, doi:10.1016/j.tra.2006.12.003.

79. Islam, D.M.Z.; Ricci, S.; Nelldal, B.-L. How to make modal shift from road to rail possible in the European transport market, as aspired to in the EU Transport White Paper 2011. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2016**, *8*, 9409, doi:10.1007/s12544-016-0204-x.
80. He, Z.; Haasis, H.-D. Integration of Urban Freight Innovations: Sustainable Inner-Urban Intermodal Transportation in the Retail/Postal Industry. *Sustainability* **2019**, *11*, 1749, doi:10.3390/su11061749.
81. Janic, M. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2007**, *12*, 33–44, doi:10.1016/j.trd.2006.10.004.
82. Tadić, S.; Krstić, M.; Kovač, M. Implementation of the dry port concept in Central and Southeastern Europe logistics network. *World Rev. Intermodal Transp. Res.* **2021**, *10*, 131–151, doi:10.1504/WRITR.2021.115414.
83. Kumar, A.; Anbanandam, R. Analyzing interrelationships and prioritising the factors influencing sustainable intermodal freight transport system: A grey-DANP approach. *J. Clean. Prod.* **2020**, *252*, 119769, doi:10.1016/j.jclepro.2019.119769.
84. Tadić, S.; Kovač, M.; Krstić, M.; Roso, V.; Brnjac, N. The Selection of Intermodal Transport System Scenarios in the Function of Southeastern Europe Regional Development. *Sustainability* **2021**, *13*, 5590, doi:10.3390/su13105590.
85. Tadić, S.; Krstić, M.; Brnjac, N. Selection of efficient types of inland intermodal terminals. *J. Transp. Geogr.* **2019**, *78*, 170–180, doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.06.004.
86. Krstić, M.; Tadić, S.; Zečević, S. Elements for defining the intermodal terminals structure. In Proceedings of the Proceedings of the 4th Logistics International Conference (LOGIC); Faculty of Transport and Traffic Engineering, Univeristy of Belgrade: Belgrade, Serbia, 2019; pp. 206–215.
87. Roso, V.; Woxenius, J.; Lumsden, K. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. *J. Transp. Geogr.* **2009**, *17*, 338–345,

- doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008.
88. Jeevan, J.; Chen, S.L.; Cahoon, S. The impact of dry port operations on container seaports competitiveness. *Marit. Policy Manag.* **2019**, *46*, 4–23, doi:10.1080/03088839.2018.1505054.
 89. Onwuegbuchunam, D.; Ekwenna, D. Analysing The Determinants Of Dry Port Selection By Shippers In Nigeria. *J. Res. Natl. Dev.* **2008**, *6*, 15–24, doi:10.4314/jorind.v6i1.42381.
 90. Chang, Z.; Notteboom, T.; Lu, J. A two-phase model for dry port location with an application to the port of Dalian in China. *Transp. Plan. Technol.* **2015**, *38*, 442–464, doi:10.1080/03081060.2015.1026103.
 91. Abbasi, M.; Pishvae, M.S. A two-stage GIS-based optimization model for the dry port location problem : A case study of Iran. *J. Ind. Syst. Eng.* **2018**, *11*, 50–73.
 92. Ng, A.; Padilha, F.; Pallis, A.A. Institutions, bureaucratic and logistical roles of dry ports: The Brazilian experiences. *J. Transp. Geogr.* **2013**, *27*, 46–55, doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.05.003.
 93. Rodrigue, J.P.; Debrie, J.; Fremont, A.; Gouvernal, E. Functions and actors of inland ports: European and North American dynamics. *J. Transp. Geogr.* **2010**, *18*, 519–529, doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.03.008.
 94. Montecinos, J.; Ouhimmou, M.; Chauhan, S.; Paquet, M.; Gharbi, A. *Transport carriers' cooperation on the last-mile delivery in urban areas*; Springer US, 2020; ISBN 0123456789.
 95. Raicu, S.; Costescu, D.; Burciu, S. Distribution system with flow consolidation at the boundary of urban congested areas. *Sustainability* **2020**, *12*, doi:10.3390/su12030990.
 96. Strale, M. The Cargo Tram: Current Status and Perspectives, the Example of Brussels. In *Sustainable Logistics*; Macharis, C., Melo, S., Woxenius, J., Van Lier, T., Eds.; Emerald Group Publishing Limited, 2014; pp. 245–263.
 97. Janjević, M.; Ndiaye, A.B. Inland waterways transport for city logistics: A review of experiences and the role of local public authorities. *WIT Trans. Built Environ.*

- 2014, 138, 279–292, doi:10.2495/UT140241.
98. Tadić, S.; Kovač, M.; Čokorilo, O. The application of drones in city logistics concepts. *Promet - Traffic Transp.* **2021**, 33, 451–462, doi:10.7307/ptt.v33i3.3721.
 99. Quak, H.; Nesterova, N.; Van Rooijen, T. Possibilities and Barriers for Using Electric-powered Vehicles in City Logistics Practice. *Transp. Res. Procedia* **2016**, 12, 157–169, doi:10.1016/j.trpro.2016.02.055.
 100. Quereshi, A.G.; Taniguchi, E.; Thompson, R.; Teo, J. Application of exact route optimization for the evaluation of a city logistics truck ban scheme. *Int. J. Urban Sci.* **2014**, 18, 117–132, doi:10.1080/12265934.2014.930672.
 101. Awasthi, A.; Chauhan, S.S. A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning. *Appl. Math. Model.* **2012**, 36, 573–584, doi:10.1016/j.apm.2011.07.033.
 102. Castillo, V.E.; Bell, J.E.; Rose, W.J.; Rodrigues, A.M. Crowdsourcing Last Mile Delivery: Strategic Implications and Future Research Directions. *J. Bus. Logist.* **2018**, 39, 7–25, doi:10.1111/jbl.12173.
 103. Pimentel, C.; Alvelos, F. Integrated urban freight logistics combining passenger and freight flows - Mathematical model proposal. *Transp. Res. Procedia* **2018**, 30, 80–89, doi:10.1016/j.trpro.2018.09.010.
 104. Vahrenkamp, R. 25 years city logistic: Why failed the urban consolidation centres? *Eur. Transp. \ Trasp. Eur.* **2016**, 60, 1–6.
 105. Janjević, M.; Lebeau, P.; Ndiaye, A.B.; Macharis, C.; Van Mierlo, J.; Nsamzinshuti, A. Strategic Scenarios for Sustainable Urban Distribution in the Brussels-capital Region Using Urban Consolidation Centres. *Transp. Res. Procedia* **2016**, 12, 598–612, doi:10.1016/j.trpro.2016.02.014.
 106. Diziain, D.; Taniguchi, E.; Dablanc, L. Urban Logistics by Rail and Waterways in France and Japan. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2014**, 125, 159–170, doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1464.
 107. Arvidsson, N.; Browne, M. A review of the success and failure of tram systems to

- carry urban freight: The implications for a low emission intermodal solution using electric vehicles on trams. *Eur. Transp. \ Trasp. Eur.* **2013**, *54*, 1–18.
108. Zych, M. Identification of Potential Implementation of the Cargo Tram in Warsaw: A First Overview. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2014**, *151*, 360–369, doi:10.1016/j.sbspro.2014.10.034.
109. Dondo, R.; Méndez, C.A.; Cerdá, J. The multi-echelon vehicle routing problem with cross docking in supply chain management. *Comput. Chem. Eng.* **2011**, *35*, 3002–3024, doi:10.1016/j.compchemeng.2011.03.028.
110. Silvestre, B.S. Sustainable supply chain management in emerging economies: Environmental turbulence, institutional voids and sustainability trajectories. *Int. J. Prod. Econ.* **2015**, *167*, 156–169, doi:10.1016/J.IJPE.2015.05.025.
111. Kurzgesagt A Selfish Argument for Making the World a Better Place – Egoistic Altruism Available online: <https://kurzgesagt.org>. Приступљено: 29.1.2022.
112. Ren, R.; Hu, W.; Dong, J.; Sun, B.; Chen, Y.; Chen, Z. A Systematic Literature Review of Green and Sustainable Logistics: Bibliometric Analysis, Research Trend and Knowledge Taxonomy. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *17*, 261, doi:10.3390/ijerph17010261.
113. Wu, X.; Zhang, L.; Luo, M. Current strategic planning for sustainability in international shipping. *Environ. Dev. Sustain.* **2020**, *22*, 1729–1747, doi:10.1007/s10668-018-00303-2.
114. United Nations *Key Statistics and Trends in International Trade 2018*; 2018;
115. Loh, H.; Thai, V.; Wong, Y.; Yuen, K.; Zhou, Q. Portfolio of port-centric supply chain disruption threats. *Int. J. Logist. Manag.* **2017**, *28*, 1368–1386, doi:<https://doi.org/10.1108/IJLM-09-2016-0208>.
116. Musso, E.; Sciomachen, A. Impact of megaships on the performance of port container terminals. *Marit. Econ. Logist.* **2020**, *22*, 432–445, doi:10.1057/s41278-019-00120-y.
117. Chandrasekhar Iyer, K.; Nihar Nanyam, V.P.S. A grounded theory approach in the identification of enabling and inhibiting factors affecting the performance of

- container terminals. *Transp. Dev. Econ.* **2021**, 7, 1–17, doi:<https://doi.org/10.1007/s40890-021-00133-4>.
118. EUROSTAT *Freight transport statistics - modal split*; 2021;
119. Mostert, M.; Caris, A.; Limbourg, S. Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2017**, 23, 75–85, doi:[10.1016/j.rtbm.2017.02.004](https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.02.004).
120. European Environment Agency *Greenhouse gas emissions from transport in Europe*; 2020;
121. Llano, C.; Pérez-Balsalobre, S.; Pérez-García, J. Greenhouse Gas Emissions from Intra-National Freight Transport: Measurement and Scenarios for Greater Sustainability in Spain. *Sustain.* 2018, 10.
122. European Commission *Road safety: European Commission rewards effective initiatives and publishes 2020 figures on road fatalities*; 2021;
123. Melkonyan, A.; Krumme, K.; Gruchmann, T.; Spinler, S.; Schumacher, T.; Bleischwitz, R. Scenario and strategy planning for transformative supply chains within a sustainable economy. *J. Clean. Prod.* **2019**, 231, 144–160, doi:[10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.222](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.222).
124. Prata, J.; Arsenio, E. Assessing intermodal freight transport scenarios bringing the perspective of key stakeholders. *Transp. Res. Procedia* **2017**, 25, 900–915, doi:[10.1016/j.trpro.2017.05.465](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.465).
125. Caris, A.; Macharis, C.; Janssens, G.K. Planning Problems in Intermodal Freight Transport: Accomplishments and Prospects. *Transp. Plan. Technol.* **2008**, 31, 277–302, doi:[10.1080/03081060802086397](https://doi.org/10.1080/03081060802086397).
126. Kudlac, S.; Gasparik, J.; Dedik, M.; Kurenkov, P. Identification of Restricting Criteria for Comprehensive Assessment of Logistics Chains in Intermodal Transport. *LOGI - Sci. J. Transp. Logist.* **2018**, 9, 18–27.
127. Ge, J.; Wang, X.; Shi, W.; Wan, Z. Investigating the Practices, Problems, and Policies for Port Sea–Rail Intermodal Transport in China. *Transp. Res. Rec.* **2020**, 1–12, doi:[10.1177/0361198120917670](https://doi.org/10.1177/0361198120917670).

128. Meers, D.; Macharis, C. Are additional intermodal terminals still desirable? An analysis for Belgium. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* **2014**, *14*, 176–196, doi:10.18757/ejtir.2014.14.2.3024.
129. Barthel, F.; Woxenius, J. Developing intermodal transport for small flow over short distance. *Transp. Plan. Tehcnology* **2004**, *27*, 403–424, doi:10.1080/0308106042000287586.
130. Reis, V. Analysis of mode choice variables in short-distance intermodal freight transport using an agent-based model. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2014**, *61*, 100–120, doi:10.1016/j.tra.2014.01.002.
131. Eftestol-Wilhelmsson, E.; Bask, A.; Rajahonka, M. Intermodal Transport Research: A Law and Logistics Literature Review with EU Focus. *Eur. Transp. Law* **2014**, *49*, 609–674.
132. Eng-Larsson, F.; Kohn, C. Modal shift for greener logistics – the shipper’s perspective. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* **2012**, *42*, 36–59, doi:10.1108/09600031211202463.
133. Ambrosino, D.; Ferrari, C.; Sciomachen, A.; Tei, A. Intermodal nodes and external costs: Re-thinking the current network organization. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2016**, *19*, 106–117, doi:10.1016/j.rtbm.2016.05.001.
134. Dai, Q.; Yang, J.; Li, D. Modeling a Three-Mode Hybrid Port-Hinterland Freight Intermodal Distribution Network with Environmental Consideration: The Case of the Yangtze River Economic Belt in China. *Sustainability* **2018**, *10*, 3081, doi:10.3390/su10093081.
135. Ghane-Ezabadi, M.; Vergara, H.A. Decomposition approach for integrated intermodal logistics network design. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2016**, *89*, 53–69, doi:10.1016/j.tre.2016.02.009.
136. Tadić, S.; Krstić, M.; Roso, V.; Brnjac, N. Dry port terminal location selection by applying the hybrid grey MCDM model. *Sustainability* **2020**, *12*, 1–22, doi:10.3390/su12176983.
137. Notteboom, T.E. A carrier’s perspective on container network configuration at

- sea and on land. *J. Int. Logist. Trade* **2004**, 1, 65–87, doi:10.24006/jilt.2004.1.2.65.
138. Lam, J.S.L.; Gu, Y. A market-oriented approach for intermodal network optimisation meeting cost, time and environmental requirements. *Int. J. Prod. Econ.* **2016**, 171, 266–274, doi:10.1016/j.ijpe.2015.09.024.
139. Resat, H.G.; Turkey, M. Design and operation of intermodal transportation network in the Marmara region of Turkey. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2015**, 83, 16–33, doi:10.1016/j.tre.2015.08.006.
140. Ertem, M.A.; Isbilir, M.; Arslan, S. A review of intermodal freight transportation in humanitarian logistics. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2017**, 9, doi:10.1007/s12544-017-0226-z.
141. Demir, E.; Burhholzer, W.; Hrušovský, M.; Arikan, E.; Jammerneegg, W.; Van Woensel, T. A green intermodal service network design problem with travel time uncertainty. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2015**, 93, 789–807, doi:10.1016/j.trb.2015.09.007.
142. Fotuhi, F.; Huynh, N. Reliable Intermodal Freight Network Expansion with Demand Uncertainties and Network Disruptions. *Networks Spat. Econ.* **2017**, 17, 405–433, doi:10.1007/s11067-016-9331-0.
143. Qu, L.; Chen, Y. A hybrid MCDM method for route selection of multimodal transportation network. In Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Beijing, China, 2008; Vol. 5263 LNCS, pp. 374–383.
144. Bouchery, Y.; Fransoo, J. Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions. *Int. J. Prod. Econ.* **2015**, 164, 388–399, doi:10.1016/j.ijpe.2014.11.017.
145. Uddin, M.; Huynh, N. Routing Model for Multicommodity Freight in an Intermodal Network Under Disruptions. *Transp. Res. Rec.* **2016**, 2548, 71–80, doi:10.3141/2548-09.
146. Mostert, M.; Caris, A.; Limbourg, S. Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. *Res. Transp. Bus.*

- Manag.* **2017**, *23*, 75–85, doi:10.1016/j.rtbm.2017.02.004.
147. Heinold, A.; Meisel, F. Emission limits and emission allocation schemes in intermodal freight transportation. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2020**, *141*, 101963, doi:10.1016/j.tre.2020.101963.
148. Assadipour, G.; Ke, G.Y.; Verma, M. Planning and managing intermodal transportation of hazardous materials with capacity selection and congestion. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2015**, *76*, 45–57, doi:10.1016/j.tre.2015.02.003.
149. Murillo, D.G.C.; Liedtke, G. A model for the formation of colloidal structures in freight transportation: The case of hinterland terminals. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2013**, *49*, 55–70, doi:10.1016/j.tre.2012.07.004.
150. Dong, C.; Boute, R.; McKinnon, A.; Verelst, M. Investigating synchromodality from a supply chain perspective. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *61*, 42–57, doi:10.1016/j.trd.2017.05.011.
151. Kim, N.S.; Van Wee, B. The relative importance of factors that influence the break-even distance of intermodal freight transport systems. *J. Transp. Geogr.* **2011**, *19*, 859–875, doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.11.001.
152. Macharis, C.; Van Hoeck, E.; Pekin, E.; Van Lier, T. A decision analysis framework for intermodal transport: Comparing fuel price increases and the internalisation of external costs. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2010**, *44*, 550–561, doi:10.1016/j.tra.2010.04.006.
153. Chen, L.; Miller-Hooks, E. Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport. *Transp. Sci.* **2012**, *46*, 109–123, doi:10.1287/trsc.1110.0376.
154. Munim, Z.H.; Haralambides, H. Competition and cooperation for intermodal container transshipment: A network optimization approach. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2018**, *26*, 87–99, doi:10.1016/j.rtbm.2018.03.004.
155. Saeed, N. Cooperation among freight forwarders: Mode choice and intermodal freight transport. *Res. Transp. Econ.* **2013**, *42*, 77–86,

- doi:10.1016/j.retrec.2012.11.005.
156. Tadić, S.; Zečević, S.; Milenković, D. Problems regarding intermodal transport in the Danube Region. In Proceedings of the 4th International Conference on Traffic and Transport Engineering; ICTTE, City Net Scientific Research Center Ltd. Belgrade: Belgrade, Serbia, 2017; pp. 483–489.
157. Krstić, M. Modelling the structure of intermodal transport terminals, University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, 2019.
158. Crainic, T.G.; Dell’Olmo, P.; Ricciardi, N.; Sgalambro, A. Modeling dry-port-based freight distribution planning. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2015**, *55*, 518–534, doi:10.1016/j.trc.2015.03.026.
159. Miraj, P.; Ali Berawi, M.; Zagloel, T.Y.; Sari, M.; Saroji, G. Research trend of dry port studies: a two-decade systematic review. *Marit. Policy Manag.* **2021**, *48*, 1–20, doi:10.1080/03088839.2020.1798031.
160. Ambrosino, D.; Sciomachen, A. Location of Mid-range Dry Ports in Multimodal Logistic Networks. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2014**, *108*, 118–128, doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.825.
161. Roso, V.; Russel, D.; Rhoades, D. Diffusion of Innovation Assessment of Adoption of the Dry Port Concept. *Trans. Marit. Sci.* **2019**, *8*, 26–36, doi:https://doi.org/10.7225/toms.v08.n01.003.
162. Facchini, F.; Digiesi, S.; Mossa, G. Optimal dry port configuration for container terminals: A non-linear model for sustainable decision making. *Int. J. Prod. Econ.* **2020**, *219*, 164–178, doi:10.1016/j.ijpe.2019.06.004.
163. Wilmsmeier, G.; Monios, J.; Rodrigue, J.P. Drivers for Outside-In port hinterland integration in Latin America: The case of Veracruz, Mexico. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2015**, *14*, 34–43, doi:10.1016/J.RTBM.2014.10.013.
164. Santos, T.A.; Guedes Soares, C. Development dynamics of the Portuguese range as a multi-port gateway system. *J. Transp. Geogr.* **2017**, *60*, 178–188, doi:10.1016/J.JTRANGE0.2017.03.003.
165. De Almeida Rodrigues, T.; De Miranda Mota, C.M.; Ojiako, U.; Dweiri, F. Assessing

- the objectives of dry ports: main issues, challenges and opportunities in Brazil. *Int. J. Logist. Manag.* **2020**, *32*, 237–261, doi:10.1108/IJLM-10-2020-0386.
166. Awad-Núñez, S.; Soler-Flores, F.; González-Cancelas, N.; Camarero-Orive, A. How should the Sustainability of the Location of Dry Ports be Measured? *Transp. Res. Procedia* **2016**, *14*, 936–944, doi:10.1016/J.TRPRO.2016.05.073.
167. Lättilä, L.; Henttu, V.; Hilmola, O.P. Hinterland operations of sea ports do matter: Dry port usage effects on transportation costs and CO2 emissions. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2013**, *55*, 23–42, doi:10.1016/j.tre.2013.03.007.
168. Gonzalez-Aregall, M.; Bergqvist, R. The role of dry ports in solving seaport disruptions: A Swedish case study. *J. Transp. Geogr.* **2019**, *80*, 102499, doi:10.1016/J.JTRANGE0.2019.102499.
169. Bask, A.; Roso, V.; Andersson, D.; Hämäläinen, E. Development of seaport-dry port dyads: Two cases from Northern Europe. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *39*, 85–95, doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.06.014.
170. Xie, J.; Sun, Y.; Huo, X. Dry Port-Seaport Logistics Network Construction under the Belt and Road Initiative: A Case of Shandong Province in China. *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* **2021**, *30*, 178–197, doi:https://doi.org/10.1007/s11518-021-5484-6.
171. Fazi, S.; Fransoo, J.C.; Van Woensel, T.; Dong, J.X. A variant of the split vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups for inland container shipping in dry-port based systems. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2020**, *142*, 102057, doi:10.1016/j.tre.2020.102057.
172. Jeevan, J.; Chen, S.L.; Lee, E.S. The Challenges of Malaysian Dry Ports Development. *Asian J. Shipp. Logist.* **2015**, *31*, 109–134, doi:10.1016/J.AJSL.2015.03.005.
173. Eliza, G.; Nikos, A.; George, V.; Georgia, A.; Maria, M. ICT for Cooperative Supply Chain Visibility within a Port Centric Intermodal Setting: The Case of the Thessaloniki Port-Rail-Dryport Integration. *Int. J. Adv. Logist.* **2013**, *2*, 38–47, doi:10.1080/2287108X.2013.11006081.
174. Nguyen, L.C.; Thai, V.; Nguyen, D.M.; Nguyen, S.C. An examination of the

- interrelation between seaports and dry ports in developing countries: the case of Vietnam. *World Rev. Intermodal Transp. Res.* **2020**, *9*, 334–357, doi:10.1504/WRITR.2020.111102.
175. Tadić, S.; Krstić, M.; Kovač, M. Location of Dry Port terminals: Case study for the territory of republic of Serbia. In Proceedings of the Proceedings of the fifth scientific conference with international participation “Politehnika”; Belgrade, Serbia, 2019; pp. 558–563.
176. Ng, A.; Tongzon, J. The transportation sector of India’s economy: Dry ports as catalysts for regional development. *Eurasian Geogr. Econ.* **2010**, *51*, 669–682, doi:10.2747/1539-7216.51.5.669.
177. Panova, Y.; Hilmola, O.P. Justification and evaluation of dry port investments in Russia. *Res. Transp. Econ.* **2015**, *51*, 61–70, doi:10.1016/j.retrec.2015.07.008.
178. Božičević, J.; Lovrić, I.; Bartulović, D.; Steiner, S.; Roso, V.; Pašagić Škrinjar, J. Determining Optimal Dry Port Location for Seaport Rijeka Using AHP Decision-Making Methodology. *Sustainability* **2021**, *13*, 6471, doi:10.3390/su13116471.
179. Kurtulus, E.; Cetin, I.B. Assessing the Environmental Benefits of Dry Port Usage: A Case of Inland Container Transport in Turkey. *Sustainability* **2019**, *11*, 6793, doi:10.3390/su11236793.
180. Kramberger, T.; Monios, J.; Strubelj, G.; Rupnik, B. Using dry ports for port co-competition: the case of Adriatic ports. *Int. J. Shipp. Transp. Logist.* **2017**, *10*, 18, doi:10.1504/IJSTL.2018.10008533.
181. Tadić, S.; Kovač, M.; Zečević, S.; Krstić, M. Implementation of the dry port concept in the West Balkans region. In Proceedings of the VII International symposium: New Horizons of Transport and Communications; Doboј, Republic of Srpska, 2019; pp. 422–427.
182. Amer, M.S. The Dry Port as a Holistic Approach for the Relocation of City Gateways. *Int. J. Environ. Sci. Sustain. Dev.* **2018**, *3*, 1–14, doi:10.21625/essd.v3i2.279.g142.
183. Alo, G.; Endris, M.; Abdela, U. Challenges and Prospects of Multimodal Transport

- System Provision and Operation in Ethiopia: The Case of Modjo Dry Port. *Ind. Eng. Lett.* **2020**, *10*, 1–25, doi:10.7176/IEL/10-2-01.
184. Roso, V. Factors influencing implementation of a dry port. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* **2008**, *38*, 782–798, doi:10.1108/09600030810926493.
185. Degbe, A.S.; Akossiwa, D.L. SWOT Analysis for Developing Dry Ports in Togo. *Am. J. Ind. Bus. Manag.* **2018**, *8*, 1407–1417, doi:10.4236/ajibm.2018.86094.
186. Roso, V. Sustainable intermodal transport via dry ports - Importance of directional development. *World Rev. Intermodal Transp. Res.* **2013**, *4*, 140–156, doi:10.1504/WRITR.2013.058976.
187. Bentaleb, F.; Mabrouki, C.; Semma, A. A Multi-Criteria Approach for Risk Assessment of Dry Port-Seaport System. *Supply Chain Forum An Int. J.* **2015**, *16*, 32–49, doi:10.1080/16258312.2015.11728692.
188. Bentaleb, F.; Mouhsene, F.; Charif, M.; Alami, S. Dry Port-Seaport System Development: Application of the Product Life Cycle Theory. *J. Transp. Logist.* **2016**, *1*, 116–128.
189. Monios, J.; Wang, Y. Spatial and institutional characteristics of inland port development in China. *GeoJournal* **2013**, *78*, 897–913, doi:10.1007/s10708-013-9473-2.
190. Krstić, M.; Kovač, M.; Tadić, S. Dry Port Location Selection: Case Study for the Adriatic Ports. In Proceedings of the XLVI Symposium on Operational Research - SYM-OP-IS 2019; 2019.
191. Wiegmans, B.; Konings, R. Intermodal Inland Waterway Transport: Modelling Conditions Influencing Its Cost Competitiveness. *Asian J. Shipp. Logist.* **2015**, *31*, 273–294, doi:10.1016/j.ajsl.2015.06.006.
192. Hofbauer, F.; Putz, L.M. External costs in inland waterway transport: An analysis of external cost categories and calculation methods. *Sustainability* **2020**, *12*, 5874, doi:10.3390/su12145874.
193. Notteboom, T. Inland waterway transport of containerised cargo: from infancy to a fully fledged transport mode. *J. Marit. Res. JMR* **2007**, *4*, 63–80.

194. Caris, A.; Limbourg, S.; Macharis, C.; van Lier, T.; Cools, M. Integration of inland waterway transport in the intermodal supply chain: A taxonomy of research challenges. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *41*, 126–136, doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.08.022.
195. Feng, X.; Zhang, Y.; Li, Y.; Wang, W. A location-allocation model for seaport-dry port system optimization. *Discret. Dyn. Nat. Soc.* **2013**, *2013*, 309585, doi:10.1155/2013/309585.
196. Tsao, Y.C.; Linh, V.T. Seaport- dry port network design considering multimodal transport and carbon emissions. *J. Clean. Prod.* **2018**, *199*, 481–492, doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.137.
197. Tsao, Y.C.; Thanh, V. Van A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2019**, *124*, 13–39, doi:10.1016/j.tre.2019.02.006.
198. Sarmadi, K.; Amiri-Aref, M.; Dong, J.X.; Hicks, C. Integrated strategic and operational planning of dry port container networks in a stochastic environment. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2020**, *139*, 132–164, doi:10.1016/J.TRB.2020.06.002.
199. de Almeida Rodrigues, T.; Maria de Miranda Mota, C.; Manuele dos Santos, I. Determining dry port criteria that support decision making. *Res. Transp. Econ.* **2020**, 100994, doi:10.1016/j.retrec.2020.100994.
200. Yildirim, M.S.; Karaşahin, M.; Gökkuş, Ü. Scheduling of the Shuttle Freight Train Services for Dry Ports Using Multimethod Simulation–Optimization Approach. *Int. J. Civ. Eng.* **2021**, *19*, 67–83, doi:10.1007/s40999-020-00553-0.
201. Muravev, D.; Hu, H.; Rakhmangulov, A.; Mishkurov, P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port. *Int. J. Inf. Manage.* **2021**, *57*, 102133, doi:10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133.
202. Komchornrit, K. The Selection of Dry Port Location by a Hybrid CFA-MACBETH-

- PROMETHEE Method: A Case Study of Southern Thailand. *Asian J. Shipp. Logist.* **2017**, 33, 141–153, doi:10.1016/j.ajsl.2017.09.004.
203. Wang, R.; Yang, K.; Yang, L.; Gao, Z. Modeling and optimization of a road–rail intermodal transport system under uncertain information. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2018**, 72, 423–436, doi:10.1016/j.engappai.2018.04.022.
204. Walha, F.; Chaabane, S.; Bekrar, A.; Loukil, T.M. A Simulated Annealing Metaheuristic for a Rail-Road PI-Hub Allocation Problem. In *Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing*; Borangiu, T., Thomas, A., Trentesaux, D., Eds.; Springer Cham, 2015; pp. 307–314.
205. Abbassi, A.; Alaoui, A.E. hilali; Boukachour, J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. *J. Comput. Sci.* **2019**, 30, 127–142, doi:10.1016/j.jocs.2018.12.001.
206. Kai, Y.; Rui, W.; Lixing, Y. Fuzzy reliability-oriented optimization for the road-rail intermodal transport system using tabu search algorithm. *J. Intell. Fuzzy Syst.* **2020**, 38, 3075–3091, doi:10.3233/JIFS-191010.
207. SteadieSeifi, M.; Dellaert, N.P.; Nuijten, W.; Van Woensel, T. A metaheuristic for the multimodal network flow problem with product quality preservation and empty repositioning. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2017**, 106, 321–344, doi:10.1016/j.trb.2017.07.007.
208. Maiyar, L.M.; Thakkar, J.J. Modelling and analysis of intermodal food grain transportation under hub disruption towards sustainability. *Int. J. Prod. Econ.* **2019**, 217, 281–297, doi:10.1016/j.ijpe.2018.07.021.
209. Sörensen, K.; Vanovermeire, C.; Busschaert, S. Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem. *Comput. Oper. Res.* **2012**, 39, 2079–2090, doi:10.1016/j.cor.2011.10.005.
210. Sörensen, K.; Vanovermeire, C. Bi-objective optimization of the intermodal terminal location problem as a policy-support tool. *Comput. Ind.* **2013**, 64, 128–135, doi:10.1016/j.compind.2012.10.012.

211. Lučić, P.; Teodorović, D. Bee system: modelling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence. In Proceedings of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis; Sao Miguel, Azore Islands, Portugal, 2001; pp. 441–445.
212. Nikolić, M.; Teodorović, D. Empirical study of the Bee Colony Optimization (BCO) algorithm. *Expert Syst. Appl.* **2013**, *40*, 4609–4620, doi:10.1016/j.eswa.2013.01.063.
213. Davidović, T.; Ramljak, D.; Šelmić, M.; Teodorović, D. Bee colony optimization for the p-center problem. *Comput. Oper. Res.* **2011**, *38*, 1367–1376, doi:10.1016/j.cor.2010.12.002.
214. Dimitrijević, B.; Teodorović, D.; Simić, V.; Šelmić, M. Bee Colony Optimization Approach to Solving the Anticovering Location Problem. *J. Comput. Civ. Eng.* **2012**, *26*, 759–768, doi:10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000175.
215. Nikolić, M.; Teodorović, D. Vehicle rerouting in the case of unexpectedly high demand in distribution systems. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2015**, *55*, 535–545, doi:10.1016/j.trc.2015.03.002.
216. Nikolić, M.; Teodorović, D. Transit network design by Bee Colony Optimization. *Expert Syst. Appl.* **2013**, *40*, 5945–5955, doi:10.1016/j.eswa.2013.05.002.
217. Tadić, S.; Kovač, M.; Krstić, M. An approach for determining time access restriction measures in city logistics. In Proceedings of the XLVII International Symposium on Operational Research - SYM-OP-IS 2020; Kraljevo, Serbia, 2020; pp. 195–200.
218. Marchi, E.; Oviedo, J.A. Lexicographic optimality in the multiple objective linear programming: The nucleolar solution. *Eur. J. Oper. Res.* **1992**, *57*, 355–359, doi:10.1016/0377-2217(92)90347-C.
219. Marler, T.R.; Arora, J.S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Struct. Multidiscip. Optim.* **2010**, *41*, 853–862, doi:10.1007/s00158-009-0460-7.
220. Mavrotas, G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-

- Objective Mathematical Programming problems. *Appl. Math. Comput.* **2009**, *213*, 455–465, doi:10.1016/j.amc.2009.03.037.
221. Duckstein, L. Multiobjective Optimization in Structural Design: The Model Choice Problem. In *New directions in optimum structural design*; Atrek, E., Gallagher, R.H., Ragsdell, K.M., Zienkiewicz, O.C., Eds.; John Wiley: New York, 1984; pp. 448–459.
222. Stević, Ž.; Brković, N. A Novel Integrated FUCOM-MARCOS Model for Evaluation of Human Resources in a Transport Company. *Logistics* **2020**, *4*, 4, doi:10.3390/logistics4010004.
223. Stević, Ž.; Pamučar, D.; Puška, A.; Chatterjee, P. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS). *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *140*, 106231, doi:10.1016/j.cie.2019.106231.
224. Stanković, M.; Stević, Ž.; Das, D.K.; Subotić, M.; Pamučar, D. A new fuzzy marcos method for road traffic risk analysis. *Mathematics* **2020**, *8*, doi:10.3390/MATH8030457.
225. Badi, I.; Pamučar, D. Supplier selection for steelmaking company by using combined Grey-MARCOS methods. *Decis. Mak. Appl. Manag. Eng.* **2020**, *3*, doi:10.31181/dmame2003037b.
226. Kovač, M.; Tadić, S.; Krstić, M.; Bouraima, M.B. Novel spherical fuzzy MARCOS method for assessment of drone-based city logistics concepts. *Complexity* **2021**, *18*, 1–17, doi:10.1155/2021/2374955.
227. Ali, J. A q-rung orthopair fuzzy MARCOS method using novel score function and its application to solid waste management. *Appl. Intell.* **2021**, doi:10.1007/s10489-021-02921-2.
228. Bakir, M.; Atalik, Ö. Application of fuzzy AHP and fuzzy MARCOS approach for the evaluation of e-service quality in the airline industry. *Decis. Mak. Appl. Manag. Eng.* **2021**, *4*, 127–152, doi:10.31181/dmame2104127b.
229. Mitrović Simić, J.; Stević, Ž.; Zavadskas, E.K.; Bogdanović, V.; Subotić, M.; Mardani, A. A Novel CRITIC-Fuzzy FUCOM-DEA-Fuzzy MARCOS Model for Safety

- Evaluation of Road Sections Based on Geometric Parameters of Road. *Symmetry (Basel)*. **2020**, *12*, 2006, doi:10.3390/sym12122006.
230. Blagojević, A.; Kasalica, S.; Stević, Ž.; Tričković, G.; Pavelkić, V. Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability* **2021**, *13*, 832, doi:10.3390/su13020832.
231. Torkayesh, A.E.; Hashemkhani Zolfani, S.; Kahvand, M.; Khazaelpour, P. Landfill location selection for healthcare waste of urban areas using hybrid BWM-grey MARCOS model based on GIS. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *67*, 102712, doi:10.1016/J.SCS.2021.102712.
232. Wiegmans, B.; Behdani, B. A review and analysis of the investment in, and cost structure of, intermodal rail terminals. *Transp. Rev.* **2017**, *38*, 1–19, doi:10.1080/01441647.2017.1297867.
233. Van Riessen, B.; Negenborn, R.R.; Dekker, R.; Lodewijks, G. Service network design for an intermodal container network with flexible transit times and the possibility of using subcontracted transport. *Int. J. Shipp. Transp. Logist.* **2015**, *7*, 457–478, doi:10.1504/IJSTL.2015.069683.
234. Elbert, R.; Müller, J.P.; Rentschler, J. Tactical network planning and design in multimodal transportation – A systematic literature review. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2020**, *35*, 100462, doi:10.1016/j.rtbm.2020.100462.
235. United Nations Standard international trade classification. Available online: <https://unstats.un.org/unsd/trade/sitcrev4.htm>. Приступљено: 15.1.2022.
236. Hekkenberg, R.; Van Dorsser, C.; Schweighofer, J. Modelling sailing time and cost for inland waterway transport. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* **2017**, *17*, 508–529, doi:10.18757/ejtir.2017.17.4.3212.
237. Höjer, M.; Wangel, J. Smart sustainable cities: Definition and challenges. In *Advances in intelligent systems and computing*; Hilty, L., Aebischer, B., Eds.; 2015; Vol. 310, pp. 333–349 ISBN 9783319092287.
238. Bibri, S.E.; Krogstie, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive

- interdisciplinary literature review. *Sustain. Cities Soc.* **2017**, *31*, 183–212, doi:10.1016/j.scs.2017.02.016.
239. Bai, X.; Surveyer, A.; Elmqvist, T.; Gatzweiler, F.W.; Güneralp, B.; Parnell, S.; Prieur-Richard, A.H.; Shrivastava, P.; Siri, J.G.; Stafford-Smith, M.; et al. Defining and advancing a systems approach for sustainable cities. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2016**, *23*, 69–78, doi:10.1016/J.COSUST.2016.11.010.
240. Akande, A.; Cabral, P.; Gomes, P.; Casteleyn, S. The Lisbon ranking for smart sustainable cities in Europe. *Sustain. Cities Soc.* **2019**, *44*, 475–487, doi:10.1016/J.SCS.2018.10.009.
241. Kauf, S. City logistics - A Strategic Element of Sustainable Urban Development. In Proceedings of the Transportation Research Procedia; Elsevier B.V., 2016; Vol. 16, pp. 158–164.
242. Taniguchi, E. City logistics for sustainable and liveable cities. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2014**, *151*, 310–317, doi:10.1007/978-3-319-17181-4.
243. Tadić, S. Modelling of integrated city logistics systems performances, University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, 2014.
244. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. Ranking of logistics system scenarios for central business district. *Promet - Traffic Transp.* **2014**, *26*, 159–167, doi:10.7307/ptt.v26i2.1349.
245. Rześny-Cieplińska, J.; Szmelter-Jarosz, A. Environmental Sustainability in City Logistics Measures. *Energies* **2020**, *13*, 1303, doi:10.3390/en13061303.
246. Anand, N.; Yang, M.; Van Duin, J.H.R.; Tavasszy, L. GenCLOn: An ontology for city logistics. *Expert Syst. Appl.* **2012**, *39*, 11944–11960, doi:10.1016/J.ESWA.2012.03.068.
247. Crainic, T.G.; Montreuil, B. Physical Internet Enabled Hyperconnected City Logistics. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *12*, 383–398, doi:10.1016/J.TRPRO.2016.02.074.
248. Marsal-Llacuna, M.L. How to succeed in implementing (smart) sustainable urban Agendas: “keep cities smart, make communities intelligent.” *Environ. Dev. Sustain.*

- 2019, 21, 1977–1998, doi:https://doi.org/10.1007/s10668-018-0115-1.
249. Hu, W.; Dong, J.; Hwang, B. gang; Ren, R.; Chen, Z. Hybrid optimization procedures applying for two-echelon urban underground logistics network planning: A case study of Beijing. *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *144*, 106452, doi:10.1016/J.CIE.2020.106452.
250. Triki, C. Using combinatorial auctions for the procurement of occasional drivers in the freight transportation: A case-study. *J. Clean. Prod.* **2021**, *304*, 127057, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2021.127057.
251. Perera, L.; Thompson, R.G. Multi-stakeholder acceptance of optimum toll schemes. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2021**, 100654, doi:10.1016/J.RTBM.2021.100654.
252. Perera, S.; Dawande, M.; Janakiraman, G.; Mookerjee, V. Retail Deliveries by Drones: How Will Logistics Networks Change? *Prod. Oper. Manag.* **2020**, *29*, 2019–2034, doi:10.1111/poms.13217.
253. Kong, X.T.R.; Kang, K.; Zhong, R.Y.; Luo, H.; Xu, S.X. Cyber physical system-enabled on-demand logistics trading. *Int. J. Prod. Econ.* **2021**, *233*, 108005, doi:10.1016/J.IJPE.2020.108005.
254. Groß, P.O.; Ehmke, J.F.; Mattfeld, D.C. Interval travel times for robust synchronization in city logistics vehicle routing. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2020**, *143*, 102058, doi:10.1016/J.TRE.2020.102058.
255. Van Duin, J.H.R.; Quak, H.; Muñuzuri, J. New challenges for urban consolidation centres: A case study in The Hague. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2010**, *2*, 6177–6188, doi:10.1016/J.SBSPRO.2010.04.029.
256. Dong, J.; Xu, Y.; Hwang, B.; Ren, R.; Chen, Z. The Impact of Underground Logistics System on Urban Sustainable Development: A System Dynamics Approach. *Sustainability* **2019**, *11*, 1223, doi:10.3390/su11051223.
257. Condeço-Melhorado, A.; Tillema, T.; de Jong, T.; Koopal, R. Distributive effects of new highway infrastructure in the Netherlands: the role of network effects and spatial spillovers. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *34*, 96–105,

- doi:10.1016/J.JTRANGE0.2013.11.006.
258. Visser, J.G.S.N. The development of underground freight transport: An overview. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2018**, *80*, 123–127, doi:10.1016/j.tust.2018.06.006.
259. Andres Figliozzi, M.; Mahmassani, H.S.; Jaillet, P. Framework for study of carrier strategies in auction-based transportation marketplace. *Transp. Res. Rec.* **2003**, *1854*, 162–170, doi:https://doi.org/10.3141/1854-18.
260. Masson, R.; Trentini, A.; Lehuede, F.; Malhene, N.; Petron, O.; Tlahig, H. Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods. *EURO J. Transp. Logist.* **2017**, *6*, 81–109, doi:https://doi.org/10.1007/s13676-015-0085-5.
261. Pinto, R.; Lagorio, A.; Golini, R. The location and sizing of urban freight loading/unloading lay-by areas. *Int. J. Prod. Res.* **2019**, *57*, 83–99, doi:10.1080/00207543.2018.1461269.
262. Muñuzuri, J.; Cuberos, M.; Abaurrea, F.; Escudero, A. Improving the design of urban loading zone systems. *J. Transp. Geogr.* **2017**, *59*, 1–13, doi:10.1016/J.JTRANGE0.2017.01.004.
263. Krstić, M.; Tadić, S.; Kovač, M.; Roso, V.; Zečević, S. A Novel Hybrid MCDM Model for the Evaluation of Sustainable Last Mile Solutions. *Math. Probl. Eng.* **2021**, *2021*, 5969788, doi:10.1155/2021/5969788.
264. De Langhe, K. The importance of external costs for assessing the potential of trams and trains for urban freight distribution. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2017**, *24*, 114–122, doi:https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.07.002.
265. Ouhader, H.; El kyal, M. Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery: Performance and scenario analysis. *Uncertain Supply Chain Manag.* **2020**, *8*, 303–320, doi:https://doi.org/10.5267/j.uscm.2019.12.001.
266. Liu, C.; Kou, G.; Zhou, X.; Peng, Y.; Sheng, H.; Alsaadi, F.E. Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach. *Knowledge-Based Syst.* **2020**, *188*, 104813,

- doi:10.1016/J.KNOSYS.2019.06.021.
267. Yu, V.F.; Winarno; Lin, S.W.; Gunawan, A. Design of a two-echelon freight distribution system in an urban area considering third-party logistics and loading–unloading zones. *Appl. Soft Comput.* **2020**, *97*, 106707, doi:10.1016/J.ASOC.2020.106707.
268. Eshtehadi, R.; Demir, E.; Huang, Y. Solving the vehicle routing problem with multi-compartment vehicles for city logistics. *Comput. Oper. Res.* **2020**, *115*, 104859, doi:10.1016/J.COR.2019.104859.
269. Deflorio, F.P.; Gonzalez-Feliu, J.; Perboli, G.; Montreal, C.; Tadei, R. The influence of time windows on the costs of urban freight distribution services in city logistics applications. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* **2012**, *12*, 256–274, doi:https://doi.org/10.18757/ejtir.2012.12.3.2965.
270. Anderson, S.; Allen, J.; Browne, M. Urban logistics—how can it meet policy makers’ sustainability objectives? *J. Transp. Geogr.* **2005**, *13*, 71–81, doi:10.1016/J.JTRANGEO.2004.11.002.
271. Quak, H.; De Koster, R. Delivering goods in urban areas: How to deal with urban policy restrictions and the environment. *Transp. Sci.* **2009**, *43*, 211–227, doi:https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0235.
272. Dong, J.; Hu, W.; Yan, S.; Ren, R.; Zhao, X. Network planning method for capacitated metro-based underground logistics system. *Adv. Civ. Eng.* **2018**, 1–14, doi:https://doi.org/10.1155/2018/6958086.
273. Maes, J.; Sys, C.; Vanelslander, T. City logistics by water: Good practices and scope for expansion. In *Transport of water versus transport over water*; Ocampo-Martinez, C., Negenborn, R.R., Eds.; Springer Berlin Heidelberg, 2015; pp. 413–437.
274. Serrano-Hernandez, A.; Faulin, J.; Hirsch, P.; Fikar, C. Agent-based simulation for horizontal cooperation in logistics and transportation: From the individual to the grand coalition. *Simul. Model. Pract. Theory* **2018**, *85*, 47–59, doi:10.1016/J.SIMPAT.2018.04.002.

275. Pan, Y.; Liang, C.; Dong, L. A two-stage model for an urban underground container transportation plan problem. *Comput. Ind. Eng.* **2019**, *138*, 106113, doi:10.1016/J.CIE.2019.106113.
276. Perera, L.; Thompson, R.G.; Wu, W. A multi-class toll-based approach to reduce total emissions on roads for sustainable urban transportation. *Sustain. Cities Soc.* **2020**, *63*, 102435, doi:10.1016/J.SCS.2020.102435.
277. Jaller, M.; Sánchez, S.; Green, J.; Fandiño, M. Quantifying the Impacts of Sustainable City Logistics Measures in the Mexico City Metropolitan Area. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *12*, 613–626, doi:10.1016/J.TRPRO.2016.02.015.
278. Teoh, T.; Kunze, O.; Teo, C.-C.; Wong, Y. Decarbonisation of Urban Freight Transport Using Electric Vehicles and Opportunity Charging. *Sustainability* **2018**, *10*, 3258, doi:10.3390/su10093258.
279. Nuzzolo, A.; Comi, A.; Ibeas, A.; Moura, J.L. Urban freight transport and city logistics policies: Indications from Rome, Barcelona, and Santander. *Int. J. Sustain. Transp.* **2016**, *10*, 552–566, doi:10.1080/15568318.2015.1014778.
280. De Marco, A.; Mangano, G.; Zenezini, G. Classification and benchmark of City Logistics measures: an empirical analysis. *Int. J. Logist. Res. Appl.* **2018**, *21*, 1–19, doi:10.1080/13675567.2017.1353068.
281. Tadić, S.; Zečević, S. A framework for structuring city logistics initiatives. *Int. J. Traffic Transp. Eng.* **2016**, *6*, 243–252, doi:https://doi.org/10.7708/ijtte.2016.6(3).01.
282. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. City logistics initiatives aimed at improving sustainability by changing the context of urban area. *Tehnika* **2014**, *69*, 834–843, doi:10.5937/tehnika1405834T.
283. Tadić, S.; Zečević, S.; Krstić, M. City logistics initiatives aimed at improving sustainability within existing context of urban area. *Tehnika* **2014**, *69*, 487–495, doi:10.5937/tehnika1403487T.
284. van Heeswijk, W.; Larsen, R.; Larsen, A. An urban consolidation center in the city of Copenhagen: A simulation study. *Int. J. Sustain. Transp.* **2019**, *13*, 675–691,

- doi:10.1080/15568318.2018.1503380.
285. Janjević, M.; Ndiaye, A.B. Development and Application of a Transferability Framework for Micro-consolidation Schemes in Urban Freight Transport. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2014**, *125*, 284–296, doi:10.1016/j.sbspro.2014.01.1474.
286. Akgün, E.Z.; Monios, J.; Fonzone, A. Supporting urban consolidation centres with urban freight transport policies: a comparative study of Scotland and Sweden. *Int. J. Logist. Res. Appl.* **2020**, *23*, 291–310, doi:10.1080/13675567.2019.1679743.
287. Chen, Z.; Dong, J.; Ren, R. Urban underground logistics system in China: Opportunities or challenges? *Undergr. Sp.* **2017**, *2*, 195–208, doi:10.1016/J.UNDSP.2017.08.002.
288. Li, J.; Wen, J.; Jiang, B. Spatial Spillover Effects of Transport Infrastructure in Chinese New Silk Road Economic Belt. *Int. J. e-Navigation Marit. Econ.* **2017**, *6*, 1–8, doi:10.1016/J.ENAVI.2017.05.001.
289. Rijsenbrij, J.C. Benefits from changes in scale in sustainable city logistics. In Proceedings of the Recent advances in city logistics, Proceedings of the 4th international conference on city logistics; Taniguchi, E., Thompson, R., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2006; pp. 317–330.
290. Gansterer, M.; Hartl, R.F.; Sörensen, K. Pushing frontiers in auction-based transport collaborations. *Omega* **2020**, *94*, 102042, doi:10.1016/J.OMEGA.2019.01.011.
291. Liang, R.; Wang, J.; Huang, M.; Jiang, Z.Z. Truthful auctions for e-market logistics services procurement with quantity discounts. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2020**, *133*, 165–180, doi:10.1016/J.TRB.2020.01.002.
292. Arvidsson, N.; Pazirandeh, A. An ex ante evaluation of mobile depots in cities: A sustainability perspective. *Int. J. Sustain. Transp.* **2017**, *11*, 623–632, doi:10.1080/15568318.2017.1294717.
293. Zhou, L.; Burris, M.; Baker, R.T.; Geiselbrecht, T. Impact of incentives on toll road

- use by trucks. *Transp. Res. Rec.* **2009**, 2115, 84–93, doi:<https://doi.org/10.3141/2115-11>.
294. Alho, A.R.; de Abreu e Silva, J. Analyzing the relation between land-use/urban freight operations and the need for dedicated infrastructure/enforcement — Application to the city of Lisbon. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2014**, 11, 85–97, doi:10.1016/J.RTBM.2014.05.002.
295. Braekers, K.; Ramaekers, K.; Van Nieuwenhuysse, I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Comput. Ind. Eng.* **2016**, 99, 300–313, doi:10.1016/J.CIE.2015.12.007.
296. Kim, G.; Ong, Y.-S.; Heng, C.K.; Tan, P.S.; Zhang, N.A. City vehicle routing problem (City VRP): A review. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2015**, 16, 1654–1666, doi:<https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2395536>.
297. Kim, G.; Ong, Y.-S.; Cheong, T.; Tan, P.S. Solving the dynamic vehicle routing problem under traffic congestion. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2016**, 17, 2367–2380, doi:<https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2521779>.
298. Kunze, O. Replicators, Ground Drones and Crowd Logistics A Vision of Urban Logistics in the Year 2030. *Transp. Res. Procedia* **2016**, 19, 286–299, doi:10.1016/j.trpro.2016.12.088.
299. Kumar, S.; Bharj, R.S. Solar hybrid e-cargo rickshaw for urban transportation demand in India. *Transp. Res. Procedia* **2020**, 48, 1998–2005, doi:10.1016/j.trpro.2020.08.228.
300. Das, H.S.; Tan, C.W.; Yatim, A.H.M. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, 76, 268–291, doi:10.1016/j.rser.2017.03.056.
301. Chen, Z.; Dong, J.; Ren, R. Urban underground logistics system in China: Opportunities or challenges? *Undergr. Sp.* **2017**, 2, 195–208, doi:10.1016/j.undsp.2017.08.002.
302. Ittman, H. Private–public partnerships: A mechanism for freight transport infrastructure delivery? *J. Transp. Supply Chain Manag.* **2017**, 11, 1–13,

doi:10.4102/jtscm.v11i0.262.

303. Holguin-Veras, J. On the estimation of the maximum efficiency of the trucking industry: Implications for city logistics. In Proceedings of the Logistics Systems for Sustainable Cities; Taniguchi, E., Thompson, R.G., Eds.; Emerald Group Publishing Limited, Bingley, 2004; pp. 123–134.
304. Taniguchi, E.; Van Der Heijden, R.E.C.M. An evaluation methodology for city logistics. *Transp. Rev.* **2000**, *20*, 65–90, doi:10.1080/014416400295347.
305. Nathanail, E.; Karakikes, I.; Mitropoulos, L.; Adamos, G. A sustainability cross-case assessment of city logistics solutions. *Case Stud. Transp. Policy* **2021**, *9*, 219–240, doi:10.1016/J.CSTP.2020.12.005.
306. Russo, F.; Comi, A. Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability* **2020**, *12*, 1439, doi:10.3390/su12041439.
307. Fehr, M.; Alves de Sousa, K.; Pereira, A.; Pelizer, L. Proposal of Indicators to assess urban sustainability in Brazil. *Environ. Dev. Sustain.* **2004**, *6*, 355–366, doi:https://doi.org/10.1023/B:ENVI.0000029914.82071.6e.
308. Koç, Ç.; Bektaş, T.; Jabali, O.; Laporte, G. The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2016**, *84*, 81–102, doi:10.1016/J.TRB.2015.12.010.
309. Yang, K.; Yang, L.; Gao, Z. Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2016**, *95*, 248–266, doi:10.1016/j.tre.2016.10.001.
310. Comi, A.; Rosati, L. CLASS: A City Logistics Analysis and Simulation Support System. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2013**, *87*, 321–337, doi:10.1016/J.SBSPRO.2013.10.613.
311. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Inf. Control* **1965**, *8*, 338–353, doi:https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
312. Rao, C.; Goh, M.; Zhao, Y.; Zheng, J. Location selection of city logistics centers under sustainability. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2015**, *36*, 29–44, doi:10.1016/J.TRD.2015.02.008.

313. Datta, S.; Samantra, C.; Mahapatra, S.S.; Mandal, G.; Majumdar, G. Appraisalment and selection of third party logistics service providers in fuzzy environment. *Benchmarking An Int. J.* **2013**, *20*, 537–548, doi:<https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2011-0087>.
314. Biancini, A. 3PL provider selection by AHP and TOPSIS methodology. *Benchmarking* **2018**, *25*, 235–252, doi:<https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2016-0125>.
315. Švadlenka, L.; Simić, V.; Dobrodolac, M.; Lazarević, D.; Todorović, G. Picture fuzzy decision-making approach for sustainable last-mile delivery. *IEEE Access* **2020**, *8*, 209393–209414, doi:10.1109/ACCESS.2020.3039010.
316. Tadić, S.; Krstić, M.; Kovač, M.; Brnjac, N. Smart solutions for the problems of city logistics. In Proceedings of the 19th European Transport Congress - European Green Deal Challenges and Solutions for Mobility and Logistics in Cities; Maribor, Slovenia, 2021; pp. 3–17.
317. Saaty, T.L. *The analytic hierarchy process*; McGraw-Hill: New York, 1980;
318. Anderluh, A.; Hemmelmayr, V.C.; Rüdiger, D. Analytic hierarchy process for city hub location selection - The Viennese case. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *46*, 77–84, doi:10.1016/J.TRPRO.2020.03.166.
319. Tugba Turgut, B.; Tas, G.; Herekoglu, A.; Tozan, H.; Vayvay, O. A fuzzy AHP based decision support system for disaster center location selection and a case study for Istanbul. *Disaster Prev. Manag.* **2011**, *20*, 499–520, doi:<https://doi.org/10.1108/09653561111178943>.
320. Sirisawat, P.; Kiatcharoenpol, T. Fuzzy AHP-TOPSIS approaches to prioritizing solutions for reverse logistics barriers. *Comput. Ind. Eng.* **2018**, *117*, 303–318, doi:10.1016/J.CIE.2018.01.015.
321. Kayikci, Y. A conceptual model for intermodal freight logistics centre location decisions. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* **2010**, *2*, 6297–6311, doi:10.1016/J.SBSPRO.2010.04.039.
322. Tavana, M.; Zareinejad, M.; Di Caprio, D.; Kaviani, M.A. An integrated intuitionistic

- fuzzy AHP and SWOT method for outsourcing reverse logistics. *Appl. Soft Comput.* **2016**, *40*, 544–557, doi:10.1016/J.ASOC.2015.12.005.
323. Ka, B. Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to China Dry Port Location Selection. *Asian J. Shipp. Logist.* **2011**, *27*, 331–353, doi:10.1016/S2092-5212(11)80015-5.
324. Aminbakhsh, S.; Gunduz, M.; Sonmez, R. Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects. *J. Safety Res.* **2013**, *46*, 99–105, doi:10.1016/J.JSR.2013.05.003.
325. Emrouznejad, A.; Marra, M. The state of the art development of AHP (1979–2017): a literature review with a social network analysis. *Int. J. Prod. Res.* **2017**, *55*, 6653–6675, doi:10.1080/00207543.2017.1334976.
326. Javanbarg, M.B.; Scawthorn, C.; Kiyono, J.; Shahbodaghkhan, B. Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization. *Expert Syst. Appl.* **2012**, *39*, 960–966, doi:10.1016/J.ESWA.2011.07.095.
327. Mikaeil, R.; Ozcelik, Y.; Yousefi, R.; Ataei, M.; Mehdi Hosseini, S. Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2013**, *58*, 118–126, doi:10.1016/J.IJRMMS.2012.09.002.
328. Wang, Y.M.; Chin, K.S. Fuzzy analytic hierarchy process: A logarithmic fuzzy preference programming methodology. *Int. J. Approx. Reason.* **2011**, *52*, 541–553, doi:10.1016/J.IJAR.2010.12.004.
329. Kutlu, A.C.; Ekmekçioğlu, M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Syst. Appl.* **2012**, *39*, 61–67, doi:10.1016/J.ESWA.2011.06.044.
330. Centobelli, P.; Cerchione, R.; Esposito, E. Developing the WH2 framework for environmental sustainability in logistics service providers: A taxonomy of green initiatives. *J. Clean. Prod.* **2017**, *165*, 1063–1077, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.150.
331. Kubek, D.; Więcek, P. An integrated multi-layer decision-making framework in

- the Physical Internet concept for the City Logistics. *Transp. Res. Procedia* **2019**, 39, 221–230, doi:10.1016/J.TRPRO.2019.06.024.
332. Sternberg, H.; Norrman, A. The Physical Internet – review, analysis and future research agenda. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* **2017**, 47, 736–762, doi:10.1108/IJPDLM-12-2016-0353.
333. Çalışkan, A.; Kalkan, M.; Ozturkoglu, Y. City logistics: Problems and recovery proposals. *Int. J. Logist. Syst. Manag.* **2017**, 26, 145–162, doi:10.1504/IJLSM.2017.081497.
334. Lebeau, P.; Macharis, C.; Van Mierlo, J.; Janjevic, M. Improving policy support in city logistics: The contributions of a multi-actor multi-criteria analysis. *Case Stud. Transp. Policy* **2018**, 6, 554–563, doi:10.1016/j.cstp.2018.07.003.
335. Leyerer, M.; Sonneberg, M.-O.; Heumann, M.; Breitner, M.H. Shortening the Last Mile in Urban Areas: Optimizing a Smart Logistics Concept for E-Grocery Operations. *Smart Cities* 2020, 3.
336. Lebeau, P.; Verlinde, S.; Macharis, C.; Van Mierlo, J. How can authorities support urban consolidation centres? A review of the accompanying measures. *J. Urban.* **2017**, 10, 468–486, doi:10.1080/17549175.2017.1310747.
337. Browne, M.; Allen, J.; Leonardi, J. Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. *IATSS Res.* **2011**, 35, 1–6, doi:10.1016/j.iatssr.2011.06.002.
338. Allen, J.; Browne, M.; Woodburn, A.; Leonardi, J. A review of urban consolidation centres in the supply chain based on a case study approach. *Supply Chain Forum* **2014**, 15, 100–112, doi:10.1080/16258312.2014.11517361.
339. Gianessi, P.; Alfandari, L.; Létocart, L.; Calvo, R.W. The multicommodity-ring location routing problem. *Transp. Sci.* **2016**, 50, 541–558, doi:10.1287/trsc.2015.0600.
340. Vakulenko, Y.; Hellström, D.; Hjort, K. What's in the parcel locker? Exploring customer value in e-commerce last mile delivery. *J. Bus. Res.* **2018**, 88, 421–427, doi:10.1016/j.jbusres.2017.11.033.

341. González-Varona, J.M.; Villafañez, F.; Acebes, F.; Redondo, A.; Poza, D. Reusing newspaper kiosks for last-mile delivery in urban areas. *Sustainability* **2020**, *12*, 1–27, doi:10.3390/su12229770.
342. Van Duin, J.H.R.; Wiegmans, B.W.; Van Arem, B.; Van Amstel, Y. From home delivery to parcel lockers: A case study in Amsterdam. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *46*, 37–44, doi:10.1016/j.trpro.2020.03.161.
343. Jones, J.; Genovese, A.; Tob-Ogu, A. Hydrogen vehicles in urban logistics: A total cost of ownership analysis and some policy implications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, *119*, 109595, doi:10.1016/j.rser.2019.109595.
344. Rudolph, C.; Gruber, J. Cargo cycles in commercial transport: Potentials, constraints, and recommendations. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2017**, *24*, 26–36, doi:10.1016/j.rtbm.2017.06.003.
345. Melo, S.; Baptista, P. Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries. *Eur. Transp. Res. Rev.* **2017**, *9*, doi:10.1007/s12544-017-0246-8.
346. Conway, A.; Cheng, J.; Kamga, C.; Wan, D. Cargo cycles for local delivery in New York City: Performance and impacts. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2017**, *24*, 90–100, doi:10.1016/j.rtbm.2017.07.001.
347. Schliwa, G.; Armitage, R.; Aziz, S.; Evans, J.; Rhoades, J. Sustainable city logistics - Making cargo cycles viable for urban freight transport. *Res. Transp. Bus. Manag.* **2015**, *15*, 50–57, doi:10.1016/j.rtbm.2015.02.001.
348. Enthoven, D.L.J.U.; Jargalsaikhan, B.; Roodbergen, K.J.; uit het Broek, M.A.J.; Schrottenboer, A.H. The two-echelon vehicle routing problem with covering options: City logistics with cargo bikes and parcel lockers. *Comput. Oper. Res.* **2020**, *118*, 104919, doi:10.1016/j.cor.2020.104919.
349. Perboli, G.; Rosano, M.; Saint-Guillain, M.; Rizzo, P. Simulation-optimisation framework for City Logistics: An application on multimodal last-mile delivery. *IET Intell. Transp. Syst.* **2018**, *12*, 262–269, doi:10.1049/iet-its.2017.0357.
350. Nocerino, R.; Colorni, A.; Lia, F.; Luè, A. E-bikes and E-scooters for Smart Logistics:

- Environmental and Economic Sustainability in Pro-E-bike Italian Pilots. *Transp. Res. Procedia* **2016**, *14*, 2362–2371, doi:10.1016/j.trpro.2016.05.267.
351. Fan, S.; Peng, S.; Liu, X. Can Smart City Policy Facilitate the Low-Carbon Economy in China? A Quasi-Natural Experiment Based on Pilot City. *Complexity* **2021**, *2021*, 9963404, doi:10.1155/2021/9963404.
352. Figliozzi, M.A. Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2020**, *85*, 102443, doi:10.1016/j.trd.2020.102443.
353. Hoffmann, T.; Prause, G. On the regulatory framework for last-mile delivery robots. *Machines* **2018**, *6*, 6–8, doi:10.3390/machines6030033.
354. Baum, L.; Assmann, T.; Strubelt, H. State of the art - Automated micro-vehicles for urban logistics. *IFAC-PapersOnLine* **2019**, *52*, 2455–2462, doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.575.
355. Jennings, D.; Figliozzi, M. Study of Sidewalk Autonomous Delivery Robots and Their Potential Impacts on Freight Efficiency and Travel. *Transp. Res. Rec.* **2019**, *2673*, 317–326, doi:10.1177/0361198119849398.
356. Es Yurek, E.; Ozmutlu, H.C. A decomposition-based iterative optimization algorithm for traveling salesman problem with drone. *Transp. Res. Part C* **2018**, *91*, 249–262, doi:10.1016/j.trc.2018.04.009.
357. Murray, C.C.; Chu, A.G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2015**, *54*, 86–109, doi:10.1016/j.trc.2015.03.005.
358. Popović, D.; Kovač, M.; Bjelić, N. A MIQP model for solving the vehicle routing problem with drones. In Proceedings of the 4th Logistics International Conference – LOGIC; University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering: Belgrade, Serbia, 2019; pp. 52–62.
359. Karak, A.; Abdelghany, K. The hybrid vehicle-drone routing problem for pick-up and delivery services. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2019**, *102*, 427–449, doi:10.1016/j.trc.2019.03.021.

360. Ferrandez, S.M.; Harbison, T.; Weber, T.; Sturges, R.; Rich, R. Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm. *J. Ind. Eng. Manag.* **2016**, *9*, 374–388, doi:10.3926/jiem.1929.
361. Dayarian, I.; Savelsbergh, M.; Clarke, J.-P. Same-Day Delivery with Drone Resupply. *Transp. Sci.* **2020**, *54*, 229–249, doi:10.1287/trsc.2019.0944.
362. Kim, J.; Moon, H.; Jung, H. Drone-based parcel delivery using rooftops of city buildings: Model and solution. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 4362, doi:10.3390/app10124362.
363. Kim, S.; Moon, I. Traveling Salesman Problem With a Drone Station. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.* **2019**, *49*, 42–52, doi:10.1109/TSMC.2018.2867496.
364. Fatnassi, E.; Chaouachi, J.; Klibi, W. Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics. *Transp. Res. Part B Methodol.* **2015**, *81*, 440–460, doi:10.1016/j.trb.2015.07.016.
365. Wojewódzka-Król, K.; Rolbiecki, R. The role of inland waterway transport in city logistics. *Transp. Econ. Logist.* **2019**, *84*, 103–114, doi:10.26881/etil.2019.84.09.
366. Jeremić, M.; Andrejić, M. Crowd logistics – A new concept in realization of logistics services. In Proceedings of the The 4th Logistics International Conference – LOGIC; Belgrade, Serbia, 2019; pp. 170–179.
367. Estellés-Arolas, E.; González-Ladrón-De-Guevara, F. Towards an integrated crowdsourcing definition. *J. Inf. Sci.* **2012**, *38*, 189–200, doi:10.1177/0165551512437638.
368. Wang, Y.; Zhang, D.; Liu, Q.; Shen, F.; Lee, L.H. Towards enhancing the last-mile delivery: An effective crowd-tasking model with scalable solutions. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2016**, *93*, 279–293, doi:10.1016/j.tre.2016.06.002.
369. Huang, K.; Ardiansyah, M.N. A decision model for last-mile delivery planning with crowdsourcing integration. *Comput. Ind. Eng.* **2019**, *135*, 898–912, doi:10.1016/j.cie.2019.06.059.
370. Qi, W.; Li, L.; Liu, S.; Shen, Z.M. Manufacturing & Service Operations Management Shared Mobility for Last-Mile Delivery : Design , Operational Prescriptions , and

- Environmental Impact Shared Mobility for Last-Mile Delivery: Design , Operational Prescriptions , and Environmental Impact. *Manuf. \$Service Oper. Manag.* **2018**, 1–15.
371. Tadić, S.; Veljović, M.; Zečević, S. Crowd logistics: Household as a logistics service provider. *Int. J. Traffic Transp. Eng.* **2022**, *12*, In press.
372. Giret, A.; Carrascosa, C.; Julian, V.; Rebollo, M.; Botti, V. A crowdsourcing approach for sustainable last mile delivery. *Sustainability* **2018**, *10*, doi:10.3390/su10124563.
373. Devari, A.; Nikolaev, A.G.; He, Q. Crowdsourcing the last mile delivery of online orders by exploiting the social networks of retail store customers. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2017**, *105*, 105–122, doi:10.1016/j.tre.2017.06.011.
374. Turkowski, M.; Szudarek, M. Pipeline system for transporting consumer goods, parcels and mail in capsules. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* **2019**, *93*, 103057, doi:10.1016/j.tust.2019.103057.
375. Hai, D.; Xu, J.; Duan, Z.; Chen, C. Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China. *J. Clean. Prod.* **2020**, *260*, 121019, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121019.
376. Romano Alho, A.; Sakai, T.; Oh, S.; Cheng, C.; Seshadri, R.; Chong, W.H.; Hara, Y.; Caravias, J.; Cheah, L.; Ben-Akiva, M. A Simulation-Based Evaluation of a Cargo-Hitching Service for E-Commerce Using Mobility-on-Demand Vehicles. *Futur. Transp.* **2021**, *1*, 639–656, doi:10.3390/futuretransp1030034.
377. Luo, Z.; Liu, Z.; Shi, J. A Two-Echelon Cooperated Routing Problem for a Ground Vehicle and Its Carried Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors* **2017**, *17*, 1144, doi:10.3390/s17051144.
378. Mohebban-Azad, E.; Abtahi, A.-R.; Yousefi-Zenouz, R. A reliable location-inventory-routing three-echelon supply chain network under disruption risks. *J. Model. Manag.* **2021**, *ahead-of-p*, doi:10.1108/JM2-02-2020-0052.
379. Dai, Z.; Aqlan, F.; Gao, K.; Zhou, Y. A two-phase method for multi-echelon location-routing problems in supply chains. *Expert Syst. Appl.* **2019**, *115*, 618–634,

doi:10.1016/J.ESWA.2018.06.050.

380. Rosenkrantz, D.; Stearns, R.; Lewis, P. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. *SIAM J. Comput.* **1977**, *6*, 563–581, doi:10.1137/0206041.
381. Boeing, G. OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Comput. Environ. Urban Syst.* **2017**, *65*, 126–139, doi:10.1016/J.COMPENVURBSYS.2017.05.004.
382. Tadić, S.; Zečević, S. Cooperation and consolidation of flows in city logistics. *Tehnika* **2015**, *70*, 687–694, doi:10.5937/tehnika1504687t.
383. Giordano, A.; Fischbeck, P.; Matthews, H.S. Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *64*, 216–229, doi:10.1016/j.trd.2017.10.003.
384. Goodchild, A.; Toy, J. Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *61*, 58–67, doi:10.1016/j.trd.2017.02.017.
385. FleetNews Vehicle CO2 Emissions Footprint Calculator Available online: <https://www.fleetnews.co.uk/costs/carbon-footprint-calculator>.
Приступљено: 12.2.2022.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Милован Ковач је рођен у Чачку 1995. године. Након завршене гимназије, 2014. године је уписао, а 2018. године и завршио основне академске студије на Саобраћајном факултету у Београду, одсек за логистику, са одбрањеним дипломским радом на тему „Развој хеуристичког модела за решавање проблема дистрибуције робе са вишеструким ограничењима капацитета возила“. На истом одсеку је потом уписао и 2019. године завршио мастер академске студије са одбрањеном мастер тезом са темом „Могућност оптимизације комисионог система избором тактичких и оперативних одлука“. Током мастер студија је у периоду од месец дана, у оквиру CEEPUS (*Central European Exchange Programme for University Studies*) програма за међународну размену студената, боравио на Факултету за транспортно и ваздухопловно инжењерство, Шлески технички универзитет, Катовице, Пољска. Докторске академске студије уписао је 2019. године на Саобраћајном факултету у Београду. Студент је треће године са положеним свим испитима у оквиру овог студијског програма. До сада је учествовао у изради већег броја научних радова публикованих у међународним и домаћим часописима и зборницима научних конференција.

Научна и стручна интересовања кандидата су у оквиру области интермодалног транспорта, логистичких центара и city логистике, као и примене операционих истраживања у решавању проблема логистике. Влада широким скупом квалитативних и квантитативних техника и течно говори енглески и немачки језик. Велики је пријатељ животиња, љубитељ природе и родољуб, интересује се за историју, географију, лингвистику, зоологију и ботанику, а активно се бави нумизматиком и музиком.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора: Милован Ковач

Број индекса: DS19D010

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

„Моделирање одрживих система логистике“

- 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 кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 30.3.2022.

Потпис аутора

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора: Милован Ковач

Број индекса: DS19D010

Студијски програм: Саобраћај

Наслов рада: „Моделирање одрживих система логистике“

Ментор: др Снежана Тадић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради објављивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци у вези са добијањем 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.

У Београду, 30.3.2022.

Потпис аутора

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Моделирање одрживих система логистике“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима сам предао у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију објављену 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).

У Београду, 30.3.2022.

Потпис аутора

1. Ауторство. Дозвољаваате 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. Дозвољаваате 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 рада.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада. Дозвољаваате 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. Дозвољаваате 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. Дозвољаваате 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. Дозвољаваате 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.