



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА**

Горан Бошковић

**УНАПРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ
ГРАДСКОГ СИСТЕМА ЗА УПРАВЉАЊЕ ЧВРСТИМ
ОТПАДОМ**

Докторска дисертација

Крагујевац, јул 2014. године

| <i>I Аутор</i> | |
|--|--|
| Име и презиме: | Горан Бошковић |
| Датум и место рођења: | 18.06.1978., Трстеник |
| Садашње запослење: | Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу |
| <i>II Докторска дисертација</i> | |
| Наслов: | Унапређење енергетске ефикасности градског система за управљање чврстим отпадом |
| Број страница: | 138 |
| Број слика: | 60 |
| Број библиографских података: | 150 |
| Установа и место где је рад израђен | Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу |
| Научна област (УДК): | 536.7:58.036 |
| Ментор: | Др Небојша Јовичић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу |
| <i>III Оцена и одбрана</i> | |
| Датум пријаве теме: | 09.12.2011. |
| Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: | 01-1/1002-9 од 20.04.2012. год. Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу |
| Комисија за оцену подобности теме и кандидата: | |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Др Милан Деспотовић, ванредни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 2. Др Милун Бабић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 3. Др Добрица Миловановић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 4. Др Горан Вујић, доцент Факултета техничких наука у Новом Саду, Научне области: Инжењерство заштите животне средине 5. Др Небојша Јовичић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника | |
| Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације: | |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Др Вања Шуштершич, ванредни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 2. Др Милун Бабић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 3. Др Добрица Миловановић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника 4. Др Горан Вујић, ванредни професор Факултета техничких наука у Новом Саду, Научне области: Инжењерство заштите животне средине 5. Др Небојша Јовичић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Научне области: Енергетика и процесна техника | |
| Датум одбране дисертације: | |

Резиме

Сакупљање и транспорт чврстог отпада чине највећи део укупних трошкова система за управљање чврстим отпадом. Стога се оправдано намеће потреба за унапређењем овог сегмента система, у циљу подизања његове енергетске ефикасности и постизања економске оправданости. Основни научни циљ ове дисертације је формирање ефикасне методологије за мониторинг и оптимизацију процеса сакупљања и транспорта чврстог отпада. Применом развијене методологије, смањује се специфична потрошња енергије и ресурса, утиче се на очување животне средине као и на побољшање квалитета услуга које се пружају корисницима система.

Као први предуслов за остваривање постављеног циља, у оквиру истраживања, формиран је општи тип базе података о градском систему за управљање отпадом. С тим у вези, експерименталним мерењима на терену, уз коришћење одговарајуће мерне опреме и праћењем возила ЈКП „Чистоћа“ из Крагујевца, у постојећем систему рута, креиране су базе података о местима прикупљања као и путањама комуналних возила. Дефинисана је методологија за одређивање енергетски ефикаснијих путања кретања возила, повезивањем креираних база са елементима географског информационог система и оптимизационим алатима софтверског пакета ArcGIS. Добијени резултати су показали да се, применом поменуте методологије, генеришу нове руте возила којима се остварује уштеда у броју пређених километара од 13,7% у односу на постојећи систем рута. На годишњем нивоу, то представља 20.830 пређених километара мање, што је еквивалентно смањењу потрошње горива за око 15.000 литара односно износу од 19.500€. Поред очигледних енергетско-економских уштеда, оптимизовани систем остварује и еколошке бенефите. Њихова процена је извршена коришћењем математичког модела за емисију издувних гасова, као и софтвера EASETECH. Комунална возила, кретањем по дефинисаним оптимизованим рутама, на годишњем нивоу, смањују емисију CO₂ у атмосферу за 39 тона.

Будући да просторни распоред места прикупљања и фреквенца пражњења контејнера утичу на енергетске расходе процеса сакупљања отпада, формираном методологијом, за једну зону града, одређен је оптималан распоред места прикупљања у складу са демографијом, као и оптималан број контејнера на дефинисаним локацијама у складу са генерисаном количином стамбеног и комерцијалног отпада. Резултати истраживања су показали да се анализирани део града може покрити са 24% мање места прикупљања, док је број неопходних контејнера смањен за 33%, без утицаја на комфор грађана приликом одлагања отпада.

Алати за прикупљање, анализу и обраду података, развијени током истраживања, као и формирана методологија, која укључује комбинацију GPS и ГИС технологија, поседују велику флексибилност што им пружа широку могућност примене на друге локалне заједнице и комунална предузећа у Републици Србији.

Кључне речи: Управљање чврстим отпадом, сакупљање и транспорт отпада, Географски информациони системи, проблем рутирања возила

Abstract

Total cost of solid waste management is significantly driven by the costs of its collection and its transport. Consequently, there is a need for improvements of the waste management system, especially in terms of its energy and economic efficiency. The main aim of this research is development of an efficient methodology for monitoring and optimization of an efficient collection and transport of the solid waste. The methodology developed within this project was aimed at energy efficient, environmentally friendly and quality improved service provided to the wider community.

In order to achieve the project aim, the first objective was to develop a generic waste management model for a city of Kragujevac. The modeling approach was based on the database, defined in terms of the collection points and the waste collection vehicles routes, which were obtained by using appropriate equipment, and tracking the vehicles of publically funded company „Čistoća” from Kragujevac. The methodology developed, combined with GPS and optimization tool ArcGIS, enabled development of a better and energy more efficient system. As a result of the developed methodology, the newly calculated routes for the waste collection were 13.7% shorter, compared to the existing routes. This in turn means 20,830 km shorter total annual distance of the waste collection vehicles. The saving predicted was 15,000 liters less fuel or, based on the current fuel price, 19,500 € lower budget needed for the operation. In addition to the evident energy efficiency, there were also ecological benefits, such as CO₂ emission, calculated by using a mathematical model and software EASTECH. The annual CO₂ emission of the waste collection vehicles, when using the optimized routes, was predicted to be 39 tones lower, compared to the existing routes.

Since the cost of the waste collection is determined by the collection points (containers) locations as well as the frequency of the collection, these parameters were optimized for one zone of the city of Kragujevac, by using the methodology developed within this study. The results has shown that the considered zone could be serviced by 24% fewer collection points and 33% fewer containers, compared to the existing parameters, for the same comfort provided to the citizens/community.

The methodology for waste management developed within this project, including the GPS and GIS technologies, has got a great level of flexibility and robustness and so could be equally implemented in any waste management service in Republic of Serbia.

Key words: Solid waste management, Waste collection and transport, Geographic information systems, Vehicle routing problem

Садржај

| | |
|---|-----------|
| 1. Увод | 1 |
| 2. Уводна разматрања у области управљања чврстим отпадом | 4 |
| 2.1 Природни ресурси и одрживи развој..... | 4 |
| 2.2 Количина генерисаног отпада | 6 |
| 2.3 Састав генерисаног отпада..... | 10 |
| 2.4 Систем управљања чврстим комуналним отпадом..... | 12 |
| 2.5 Управљање комуналним отпадом у урбаној средини..... | 16 |
| 3. Сакупљање и транспорт отпада..... | 19 |
| 3.1 Проблем рутирања возила - Vehicle routing problem (VRP)..... | 21 |
| 3.1.1 Егзактне методе за решавање VRP проблема..... | 22 |
| 3.1.1.1 Линеарно програмирање..... | 23 |
| 3.1.1.2 Примена егзактних метода на решавање проблема рутирања возила у области управљања отпадом | 27 |
| 3.1.2 Хеуристичке методе..... | 27 |
| 3.1.2.1 Класичне хеуристичке методе..... | 29 |
| 3.1.2.2 Метакхеуристичке методе | 31 |
| 3.1.2.2.1 Методе локалног претраживања | 31 |
| 3.1.2.2.2 Методе глобалног претраживања..... | 33 |
| 3.1.2.2.3 Механизми учења..... | 34 |
| 3.2 Софтвери за решавање проблема рутирања возила | 35 |
| 3.3 Географски информациони систем | 37 |
| 3.3.1 Компоненте ГИС-а..... | 38 |
| 3.3.1.1 ГИС хардвер..... | 38 |
| 3.3.1.2 ГИС софтвер..... | 38 |
| 3.3.1.3 Људски ресурси..... | 39 |
| 3.3.1.4 ГИС подаци | 40 |
| 3.3.2 Примена ГИС-а у области управљања отпадом | 42 |
| 3.4 Систем за мониторинг кретања комуналних возила | 45 |
| 3.4.1 Хардвер и софтвер за сателитско праћење возила..... | 46 |
| 3.4.2 Главне карактеристике и предности коришћења система за мониторинг возила..... | 47 |
| 4. Стање чврстог отпада на нивоу града Крагујевца | 49 |
| 4.1 Управљање отпадом у Крагујевцу..... | 49 |
| 4.2 Састав комуналног отпада | 52 |
| 4.2.1 Методологија за одређивање састава отпада | 52 |
| 4.2.2 Локацијске и сезонске варијације у саставу отпада..... | 54 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3 | Количина комуналног отпада..... | 57 |
| 5. | Енергетска ефикасност процеса сакупљања и транспорта отпада на примеру града Крагујевца | 59 |
| 5.1 | Опрема и демо возило за снимање карактеристика процеса сакупљања и транспорта отпада..... | 59 |
| 5.2 | Прикупљање података о инфраструктури градског система за сакупљање и транспорт отпада..... | 66 |
| 5.2.1 | Просторна база о местима прикупљања отпада..... | 66 |
| 5.2.2 | Просторна база о путањама комуналних возила..... | 69 |
| 5.2.3 | Ортофото мапа и мрежа улица..... | 71 |
| 5.3 | Оптимизација путања кретања возила коришћењем ГИС софтвера | 73 |
| 5.3.1 | Оптимизација путања возила по критеријуму најмањег пређеног пута | 74 |
| 5.3.2 | Оптимизација путања возила по критеријуму најмање потрошње горива..... | 76 |
| 5.4 | Оптимизација просторног распореда места за прикупљање отпада и броја контејнера | 80 |
| 5.4.1 | Просторни распоред места за прикупљање отпада..... | 82 |
| 5.4.2 | Оптимизација броја контејнера | 84 |
| 6. | Анализа енергетске ефикасности унапређеног система за сакупљање и транспорт комуналног отпада | 89 |
| 6.1 | Енергетски расходи сакупљања и транспорта отпада..... | 89 |
| 6.2 | Анализа уштеда енергетских расхода | 96 |
| 6.3 | Анализа еколошких уштеда унапређеног система за сакупљање отпада..... | 99 |
| 6.3.1 | Процена смањења емисије гасова стаклене баште унапређеног система за сакупљање отпада на примеру једне руте | 100 |
| 6.3.2 | Анализа остварених еколошких уштеда применом EASETECH софтвера | 110 |
| 7. | Закључна разматрања | 116 |
| | Литература | 119 |

Списак слика

- Слика 2.1 Потрошња енергије и природних ресурса у свету по становнику
- Слика 2.2 Удео генерисаног комуналног отпада по регионима света
- Слика 2.3 Количина генерисаног отпада по становнику у државама Европе
- Слика 2.4 Отпад по пореклу
- Слика 2.5 Састав отпада
- Слика 2.6 Састав комуналног отпада у свету
- Слика 2.7 Морфолошки састав комуналног отпада у Републици Србији
- Слика 2.8 Хијерархија управљања отпадом
- Слика 2.9 Напредак у управљању отпадом у ЕУ
- Слика 2.10 Амбалажа стављена на тржиште и поново искоришћена
- Слика 2.11 Веза елемената система за управљање отпадом
- Слика 3.1 Софтверска архитектура у ГИС-у
- Слика 3.2 Атрибути у форми табеле
- Слика 3.3 Комбиновање различитих лејера у ГИС-у
- Слика 3.4 Растерски и векторски приказ основних географских примитива
- Слика 3.5 Шематски приказ система за мониторинг кретања возила
- Слика 4.1 Сезонске варијације у саставу отпада у Крагујевцу
- Слика 4.2 Морфолошки састав отпада у Крагујевцу
- Слика 4.3 Количина прикупљеног комуналног отпада по годинама
- Слика 4.4 Количина прикупљеног отпада по месецима
- Слика 4.5 Просечна количина сакупљеног отпада по месецима
- Слика 5.1 Garmin Colorado 300
- Слика 5.2 Trimble Juno SB
- Слика 5.3 Демо возило са уграђеним GPS/GPRS системом
- Слика 5.4 Шематски приказ функционисања GTarget AVL система
- Слика 5.5 GTarget уређај
- Слика 5.6 Уређај монтиран у возило
- Слика 5.7 Праћење возила у софтверу GTarget CLI
- Слика 5.8 Надгледање возила помоћу софтвера
- Слика 5.9 Типично место прикупљања комуналног отпада града Крагујевца
- Слика 5.10 Приказ места прикупљања отпада на дигиталној мапи града
- Слика 5.11 Приказ места прикупљања са атрибутима у Google Earth софтверу
- Слика 5.12 Обележавање рута
- Слика 5.13 Типичан циклус сакупљања отпада
- Слика 5.14 Ортофото мапа града са мрежом улица

- Слика 5.15 Постојећа рута возила
- Слика 5.16 Оптимизирана рута возила
- Слика 5.17 Структура модела за прорачун најекономичније руте
- Слика 5.18 Рута оптимизирана по критеријуму најмање потрошње горива
- Слика 5.19 Део града обухваћен анализом
- Слика 5.20 Зона утицаја места прикупљања у постојећем сценарију
- Слика 5.21 Оптималан распоред места прикупљања
- Слика 5.22 Формирани полигони у зони утицаја места прикупљања
- Слика 5.23 Карактеристике постојећег и оптимизованог система
- Слика 6.1 Енергетски расходи процеса сакупљања и транспорта отпада реона 1
- Слика 6.2 Временски параметри процеса сакупљања и транспорта отпада реона 1
- Слика 6.3 Енергетски расходи сакупљања и транспорта отпада по реонима
- Слика 6.4 Упросечени енергетски расходи процеса сакупљања отпада по реонима
- Слика 6.5 Просечан број километара циклуса по реонима
- Слика 6.6 Карактеристични примери оптимизација рута
- Слика 6.7 Дијаграмски приказ остварених уштеда у реону 1
- Слика 6.8 Дијаграмски приказ остварених уштеда по реонима
- Слика 6.9 Процес сакупљања и транспорта отпада по фазама
- Слика 6.10 Време пражњења контејнера
- Слика 6.11 Упоредна анализа постојеће и оптимизоване руте са 3 циклуса
- Слика 6.12 Уштеде у броју пређених километара по фазама
- Слика 6.13 Комплетан животно циклус чврстог комуналног отпада
- Слика 6.14 Улази и излази у фазама сакупљања и транспорта отпада
- Слика 6.15 Шематски приказ система управљања чврстим отпадом у Крагујевцу
- Слика 6.16 Улази и излази модула за сакупљање отпада
- Слика 6.17 Улази и излази модула за транспорт отпада

Списак табела

| | |
|-------------|---|
| Табела 2.1 | Индикатори везани за комунални отпад |
| Табела 2.2 | Врсте отпада и њихови извори |
| Табела 3.1 | Преглед компанија и софтвера за рутирање и распоређивање возила |
| Табела 3.2 | Водећи произвођачи ГИС софтвера |
| Табела 4.1 | Возни парк аутосмећара ЈКП „Чистоћа“ |
| Табела 4.2 | Опрема за сакупљање отпада |
| Табела 4.3 | Каталог сортирања отпада према категоријама |
| Табела 4.4 | Процентуална расподела категорија отпада по секторима у Крагујевцу |
| Табела 5.1 | Карактеристике GTarget GT405 уређаја |
| Табела 5.2 | Атрибути места прикупљања |
| Табела 5.3 | Класификација улица |
| Табела 5.4 | Класе комерцијалних активности |
| Табела 5.5 | Објекти обухваћени изабраним местом прикупљања |
| Табела 5.6 | Резултати анализе унапређења просторног распореда и броја контејнера |
| Табела 6.1 | Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада |
| Табела 6.2 | Просечна потрошња аутосмећара |
| Табела 6.3 | Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада градског реона 1 |
| Табела 6.4 | Оптимизација пређеног пута комуналних возила градског реона 1 |
| Табела 6.5 | Оптимизација пређеног пута комуналних возила по реонима |
| Табела 6.6 | Емисија полутаната сагоревањем једног литра дизела на празном ходу |
| Табела 6.7 | Коефицијенти за тешка возила у распону 7,5 - 16 тона |
| Табела 6.8 | Коефицијенти за тешка возила у распону 16 - 32 тоне |
| Табела 6.9 | Коефицијенти за хладан старт |
| Табела 6.10 | Број пређених километара и испражњених контејнера постојеће руте по циклусима и фазама процеса сакупљања и транспорта отпада |
| Табела 6.11 | Детаљна анализа првог циклуса постојеће руте |
| Табела 6.12 | Карактеристике кретања комуналног возила по фазама процеса сакупљања и транспорта отпада |
| Табела 6.13 | Број пређених километара и испражњених контејнера оптимизоване руте по циклусима и фазама процеса сакупљања и транспорта отпада |

| | |
|-------------|--|
| Табела 6.14 | Број пређених километара постојеће и оптимизоване руте по фазама |
| Табела 6.15 | Емисије полутаната по фазама постојеће и оптимизоване руте |
| Табела 6.16 | Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада постојеће и оптимизоване руте |
| Табела 6.17 | Остварене уштеде у емисији полутаната оптимизоване у односу на постојећу руту сакупљања и транспорта отпада |
| Табела 6.18 | Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада постојећег и оптимизованог система |
| Табела 6.19 | Емисије гасова у процесу сакупљања и транспорта отпада постојећег и оптимизованог система, на годишњем нивоу |

Списак ознака

| | |
|--------------|---|
| A | Скуп лукова |
| $A_{c,idle}$ | Просечна потрошња горива возила приликом рада мотора на празном ходу |
| A_c | Просечна потрошња горива возила |
| c_{ij} | Трошкови превоза од корисника i до корисника j |
| E | Скуп неусмерених лукова |
| E' | Проширени скуп неусмерених лукова |
| $e_{i,idle}$ | Емисија полутанта i настала сагоревањем једног литра дизел горива |
| $E_{i,cold}$ | Емисија полутанта i приликом хладног старта мотора |
| $E_{i,d}$ | Емисија полутанта i током вожње |
| E_i | Укупна емисија полутанта i приликом сакупљања отпада |
| $E_{i,hot}$ | Емисија полутанта i приликом рада мотора са постигнутом радном температуром |
| $E_{i,idle}$ | Емисија полутанта i при режиму рада мотора на празном ходу |
| f_c | Фактор потрошње горива |
| FC_v | Потрошња горива у зависности од брзине |
| F_m | Количина потрошеног горива по тони сакупљеног отпада |
| G | Граф |
| G' | Проширени граф |
| H | Рута возила |
| K | Број возила |
| k_o | Коефицијент количине отпада по класи објекта |
| L_C | Пређени пут возила у току једног циклуса сакупљања отпада |
| L_{CO} | Пређени пут возила у току оптимизованог циклуса сакупљања отпада |
| L_R | Пређени пут возила у оквиру једне руте |
| L_{RO} | Пређени пут возила у оквиру оптимизоване руте |
| L_S | Остварена уштеда у километрима по рути |
| L_{SP} | Остварена процентуална уштеда по рути |
| L_m | Растојање које возило пређе да прикупи једну тону отпада |
| L_{seg} | Дужина сегмента улице |
| L_{tr} | Дужина пута које возило пређе |
| m | Број возила |
| m_c | Маса отпада по испражњеном контејнеру |

| | |
|------------------------|---|
| m_n | Просечна маса отпада по становнику за посматрану зону |
| m_o | Маса отпада |
| MP | Место прикупљања |
| m_R | Маса отпада прикупљена дуж једне руте возила |
| $N(x_t)$ | Околина тренутног решења |
| N_c | Број контејнера у оквиру једне руте |
| N_{MP} | Број места прикупљања у оквиру једне руте |
| p | Површина објекта |
| q_i | Не-негативна тежина |
| Q | Капацитет возила |
| R' | Број изводљивих рута возила |
| R_o | Оптимизована рута |
| R_p | Постојећа рута |
| $r(s)$ | Минималан број возила потребан да опслужи скуп S корисника |
| S | Скуп корисника |
| SCF | Фактор класе улице |
| t_R | Укупно трајање руте возила |
| $t_{c,e}$ | Време пражњења контејнера |
| $t_{c,a}$ | Просечно време пражњења контејнера |
| $t_{c,idle}$ | Време које возило проведе у мировању приликом пражњења контејнера |
| t_c | Просечно време трајања руте сведено на један контејнер |
| t_{idle} | Време стајања возила у месту са мотором на празном ходу |
| $t_{i,idle}$ | Време које возило проведе у мировању приликом депоновања отпада |
| t_m | Време путовања возила по тони прикупљеног отпада |
| t_{tr} | Време које возило проведе у путу |
| TFC | Укупна потрошња горива |
| V | Скуп врхова графа (скуп n корисника) |
| V' | Проширени скуп $n + 1$ корисника |
| x_t | Тренутно решење |
| y_{ij} | Маса терета које возило превози |
| y_{ji} | Неискоришћени масени капацитет возила |
| v | Брзина возила |
| $\varepsilon_{i,c}$ | Емисиони фактор загрејаног мотора |
| $\varepsilon_{i,cold}$ | Емисиони фактор приликом хладног старта мотора |
| Ψ | Скуп свих рута |

Списак скраћеница

| | |
|-------|--|
| ACVRP | Asymmetric CVRP (Асиметрични проблем рутирања возила са ограниченим капацитетом) |
| CVRP | Capacitated VRP (Проблем рутирања возила са ограниченим капацитетом) |
| CVRS | Computerised Vehicle Routing and Scheduling (Системи за рутирање и распоређивање возила) |
| EEA | European Environment Agency (Европска агенција за заштиту животне средине) |
| ESRI | Environmental Systems Research Institute (Истраживачки институт за животну средину) |
| Gdb | Garmin Data Base (База података у Garmin софтверу) |
| GPRS | General Packet Radio Service (Технологија за пренос података) |
| GPS | Global Positioning System (Систем за глобално позиционирање) |
| Gpx | GPS eXchange Format (Формат за размену GPS података) |
| GSM | Global System for Mobile Communications (Глобални систем за мобилну комуникацију) |
| HDPE | High-density Polyethylene (Полиетилен високе густине) |
| ILP | Integer Linear Programming (Целобројно линеарно програмирање) |
| ISWA | International Solid Waste Association (Међународна организација за чврсти отпад) |
| LCA | Life-cycle Assessment (Оцењивање животног циклуса) |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development (Организација за економску сарадњу и развој) |
| RDF | Refuse-derived Fuel (Гориво из отпада) |
| RFID | Radio Frequency Identification (Идентификација путем радио фреквенције) |

| | |
|-------|---|
| SCVRP | Symmetric CVRP (Симетрични проблем рутирања возила са ограниченим капацитетом) |
| SERI | Sustainable European Research Institute (Европски истраживачки институт за одрживи развој) |
| SIM | Subscriber Identity Module |
| SMS | Short Message Service (Сервис за кратке поруке) |
| TCP | Transmission Control Protocol (Протокол за контролу података) |
| TIFF | Tagged Image File Format (Некомпримовани формат фајла) |
| TSP | Traveling Salesman Problem (Проблем трговачког путника) |
| UNEP | United Nations Environment Programme (Програм заштите животне средине Уједињених нација) |
| VRP | Vehicle Routing Problem (Проблем рутирања возила) |
| БДП | Бруто домаћи производ |
| ГИС | Географски информациони систем |
| ЕУ | Европска унија |
| ЈКП | Јавно комунално предузеће |

1. Увод

Урбанизација је једна од најевидентнијих глобалних промена широм света. Убрзан и константан раст урбане популације води у драматичан пораст количина природних ресурса који се користе и повећање продукције отпада. Стога је већина проблема који угрожавају опстанак човечанства на планети управо последица повећане потрошње енергије, воде и материјала, повећане продукције отпада и емисија гасова, као и све веће употребе земљишта од стране људи. Доказ да је данашња економија у конфликту са природним ресурсима и животном средином може се пронаћи у свакодневним извештајима о смањењу шума, деградирању земљишта, повећању концентрације угљен-диоксида, смањењу количина пијаће воде, глобалном порасту температуре, подизању нивоа мора и количини отпада који се одлаже у околину.

Величина проблема пред којима се налази људско друштво, када су у питању расположиви природни ресурси и генерисани отпад, постаје очигледнија када се сагледају количине употребљених ресурса и отпада који се свакодневно генерише у свету. У **делу уводних разматрања** ове дисертације дат је детаљан преглед количина природних ресурса који се користе у свету, по регионима и државама. Такође су систематизоване информације о количини и саставу отпада који се генерише. Поред прегледа на глобалном нивоу, детаљно су обрађени и доступни подаци за Републику Србију.

У развијеним земљама, али у последње време, и у појединим земљама у развоју, усвојен је принцип интегрисаног управљања отпадом. Интегрисано управљање отпадом представља комплексан задатак чије решење захтева истовремено задовољавање свих техничких, економских и социјалних захтева. У контексту методологија, постоје три основна начина управљања отпадом:

- редукција отпада на извору, поновна употреба и рециклажа,
- процесирање отпада,
- депоновање.

Увођењем такси за депоновање отпада и забраном депоновања одређених врста отпада, као и другим мерама рестриктивног законодавства, у развијеним државама, долази до развоја технологија збрињавања отпада. Отпад који се раније депоновао, применом релативно јефтине технологије, сада мора бити збринут и третиран на други, еколошки прихватљивији, али и економски неповољнији начин. У неразвијеним земљама света, али и у великом броју земаља у развоју, услед недостатка средстава за еколошки повољније збрињавање отпада, депоновање је и даље најзаступљенији начин управљања отпадом.

Управљање отпадом у Републици Србији, као земљи у транзицији, представља великим делом нерешен проблем. Националном стратегијом за управљање отпадом из 2003. године (Службени гласник Републике Србије, 2003) уводи се концепт интегрисаног управљања отпадом уз примену хијерархије управљања отпадом која се примењује у ЕУ. Међутим, у пракси у Србији не постоји систематски организовано

одвојено сакупљање, сортирање и рециклажа отпада, што доводи до недовољног степена искоришћења отпада. И поред високог удела органске компоненте у отпаду, у Србији не постоји постројење за биолошки третман отпада, као ни постројење за инсинерацију отпада. Стога се, у Републици Србији управљање отпадом заснива на депоновању. Главни изазови у овој области, још увек, се односе на повећање покривености и капацитета за пружање основних услуга – сакупљања, транспорта и одлагања отпада.

Сакупљање и транспорт чврстог отпада учествују великим уделом у укупним трошковима целокупног система за управљање чврстим отпадом. Удео трошкова је највећи у случајевима када нема третмана отпада, већ се сав прикупљени отпад директно депонује, као што је пракса у граду Крагујевцу и у Републици Србији уопште. Унапређење функционисања градског система за управљање отпадом, и то преко елемента сакупљања и превоза отпада, могуће је остварити кроз три нивоа оптимизације која су анализирана у **трећем поглављу**. При томе се унапређење комуналног сервиса, на најнижем, локалном нивоу намеће као једини модалитет који се у потпуности налази у домену комуналног предузећа и који, као исход, може да гарантује постизање пројектованих циљева у прецизно дефинисаном временском оквиру. Овакав вид оптимизације би обухватао решавање проблема, као што су дефинисање адекватног распореда места за прикупљање отпада у складу са густином становништва и степеном урбанизованости, подела града на реоне у складу са карактеристикама возног парка, оптимизација путања комуналних возила у оквиру дефинисаних реона, итд.

При томе Географски информациони систем (ГИС), као неизоставан алат у раду са просторним подацима има веома значајну примену у области управљања отпадом, нарочито у сегментима сакупљања и транспорта отпада. Приликом симулација и формирања варијантних решења ресурси ГИС-а обезбеђују неопходне информације као што су гео-референциране мапе, мрежа градских саобраћајница, усмереност улица, просторни распоред места за прикупљање отпада, демографски подаци, итд. Преглед општих карактеристика ГИС-а као и примена у области управљања отпадом такође су део трећег поглавља.

Обзиром да оптимизација путања кретања комуналних возила припада моделу рутирања возила, један део трећег поглавља је посвећен нумеричким методама за решавање овог проблема. Почевши од средине прошлог века, до данас, развијен је велики број алгоритама за решавање проблема распоређивања и рутирања возила које је, уз поштовање различитих ограничења, могуће применити у решавању реалних проблема. На основу алгоритама развијен је одређен број софтвера чији је основни задатак да одреде оптималне путање возила. Такође, нове технологије налазе све већу примену у области управљања отпадом. Последњи део овог поглавља даје детаљан преглед функционисања технологија за мониторинг процеса сакупљања, транспорта и депоновања отпада.

Анализа постојећег стања у сектору управљања чврстим отпадом у граду Крагујевцу, дата је у **четвртном поглављу** дисертације. У овом делу, приказани су сви доступни подаци о Јавном комуналном предузећу „Чистоћа“, које је задужено за управљање

отпадом у граду. Као један од основних података, битних за каснију анализу система, прикупљени су подаци о постојећој опреми за сакупљање отпада, као и возном парку.

Познавање састава и количине отпада, који се генерише на територији једне општине, представља предуслов за добро организовање система за управљање отпадом и пружање квалитетних услуга корисницима система. Детаљан опис методологије за одређивање морфолошког састава и количине отпада, која је настала у сарадњи Техничког факултета из Новог Сада и Факултета инжењерских наука из Крагујевца, такође је дат у овом поглављу. Приказане су и сезонске и локацијске варијације у саставу отпада на територији града Крагујевца, као и варијације у количинама отпада током вишегодишњих мерења.

Већина комуналних предузећа у Србији, као што је случај и са ЈКП „Чистоћа“ из Крагујевца, нема евиденцију о инфраструктури система за сакупљање отпада на нивоу ГИС захтева. Подела града на реоне, просторни распоред локалитета за прикупљање отпада и фреквенца пражњења контејнера, најчешће су резултат искуства, а не принципа минималних енергетских захтева. Када се разматрају путање комуналних возила, ситуација постаје још сложенија, па је без стварања предуслова кроз имплементацију базе података о ресурсима система (по ГИС захтевима), практично сваки покушај оптимизације осуђен на неуспех. У **петом поглављу** дисертације, формиран је и описан општи тип базе података о градском систему за управљање отпадом. За снимање карактеристика процеса прикупљања отпада потребно је поседовање одговарајуће опреме и демо возила. Детаљан опис опреме која је коришћена за формирање потребних база података о инфраструктури система за управљање отпадом града Крагујевца дат је у овом поглављу. Такође, развијена је и описана методологија за унапређење енергетске ефикасности процеса сакупљања и транспорта отпада. Применом поменутог методологије, коришћењем ArcGis софтверског пакета, извршена је оптимизација путања кретања комуналних возила као и просторног распореда контејнера за прикупљање отпада.

У **шестом поглављу** извршена је компаративна анализа постојећег система и оптимизованог система добијеног применом формираног методологија. Да би се ова анализа спровела, најпре је било потребно успоставити методологију за нумеричку симулацију енергетских расхода у постојећем систему управљања отпадом. Детаљан приказ енергетских расхода, добијен експерименталном анализом, по рутама, као и по реонима, такође је део овог поглавља. Полазећи од основног циља овог истраживања везаног за подизање енергетске ефикасности процеса сакупљања и транспорта отпада, извршена компаративна анализа постојећег и оптимизованог система садржи анализу енергетских, економских и еколошких уштеда. Између осталог, као један од начина за анализу оптерећења животне средине утицајима процеса сакупљања и транспорта отпада, примењен је концепт оцењивања животног циклуса (енгл. Life Cycle Assessment – LCA).

Последње, **седмо поглавље** дисертације даје закључна разматрања везана за процену енергетско-економских и еколошких карактеристика унапређеног система управљања чврстим отпадом у граду Крагујевцу. Такође, посебно је указано на флексибилност предложене методологије и широке могућности њене примене на друге локалне заједнице и комунална предузећа у Републици Србији.

2. Уводна разматрања у области управљања чврстим отпадом

Већина проблема који угрожавају опстанак човечанства на планети последица су повећане потрошње енергије, воде и материјала, повећане продукције отпада и емисија гасова, као и све веће употребе земљишта од стране људи. Доказ да је данашња економија у конфликту са природним ресурсима и животном средином може се видети у свакодневним извештајима о смањењу шума, деградирању земљишта, повећању концентрације угљен-диоксида, смањењу количина пијаће воде, глобалном порасту температуре, подизању нивоа мора и количини отпада који се одлаже у околину.

Сва жива бића на планети, осим човека, еволуцијски се прилагођавају условима који владају у природној средини. Човек, са друге стране, не поседује моћ прилагођавања па је стога упућен да мења природну средину и прилагођава је својим потребама. Он то чини својевољно и свесно захваљујући интелигенцији, моћи које немају животиње и која му је помогла да изгради свет око себе. Све ово чини искоришћавајући природне ресурсе и уз помоћ технике, скупа алата које је направио да би окружење прилагодио свом преживљавању.

Међутим, свака људска делатност праћена је негативном појавом - производњом отпада који је видљив и опипљив и самим тим представља нешто на шта се може и мора деловати. Отпад настаје у свим фазама животног циклуса производа, од ископавања руде, преко производње и дистрибуције до употребе производа и услуга. Стварање отпада директно је повезано са количином природних ресурса који се користе. Покрећу их исти фактори као што су: број становника, пораст стандарда и потрошачке навике, као и стање технологије. У суштини, што је већа количина употребљених ресурса, већа је количина отпада који се генерише.

Величина проблема пред којим се налази људско друштво, када су у питању расположиви природни ресурси и генерисани отпад, постаје много очигледнија када се сагледају количине употребљених ресурса и отпада који се свакодневно генерише у свету.

2.1 Природни ресурси и одрживи развој

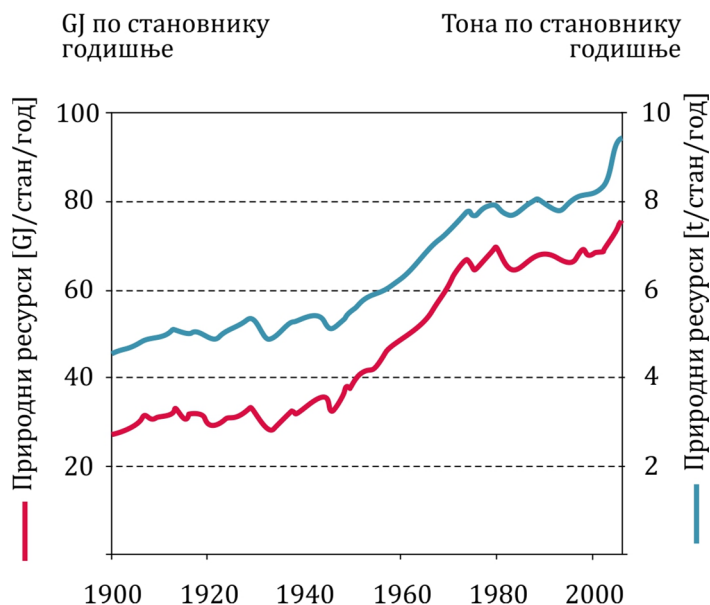
Егзистенција свих живих бића на планети Земљи зависи од природних ресурса. Без сталне употребе природних ресурса, у форми материјала, воде и енергије, функционисање људског друштва и привреде не би било могуће. Потребе за ресурсима су се током историје мењале. Неки од њих су данас итекако добили на важности у односу на ресурсе који су били релевантни у давној прошлости. Древне цивилизације су највише пажње придавале производњи хране. Са друге стране,

проблеми енергије, енергетике или отпада нису их толико забрињавали. Ови проблеми су данас итекако актуелни.

Са растом светске популације, повећањем производње и броја пружених услуга, растом богатства и потрошње добара, количина природних ресурса који се користе за производњу добара и услуга је у сталном порасту. У свету се данас годишње искористи око 58 милијарди тона природних ресурса, што је 50% више него пре 30 година (Behrens et al., 2007).

Експлоатација природних ресурса је неравномерно распоређена међу регионима света. Од укупне количине природних ресурса који се данас користе, 43% отпада на Азију, а свега 3% на Аустралију (SERI, 2009). Такође, постоје и велике варијације у количини и врстама експлоатисаних природних ресурса по глави становника. Иако Аустралија има најмањи удео у укупној светској количини експлоатисаних природних ресурса, са друге стране има највећу количину природних ресурса по глави становника која износи око 57 тона на годишњем нивоу или око 158 килограма дневно. У Азији и Африци је најмања количина утрошених природних ресурса по глави становника и износи свега 6 тона по години.

Потрошња природних ресурса, као што је случај и са експлоатацијом, такође је неуједначена између различитих региона света. У просеку, један становник Европе користи четири пута више природних ресурса него просечан становник Африке и три пута више него становник Азије (EEA, 2012). И у оквиру региона, између држава постоје знатне разлике у количинама искоришћених природних ресурса. Тако, на пример, у Европској унији се просечно годишње потроши око 15 тона природних ресурса по глави становника, док између чланица Уније количине варирају од 10 па до скоро 60 тона.



Слика 2.1 Потрошња енергије и природних ресурса по глави становника

Привредни раст је један од кључних узрочника увећања потрошње природних ресурса. Потрошња ресурса је у сталном порасту, док се једини видљиви пад јавља у случају

економске кризе. На глобалном нивоу потрошња природних ресурса по глави становника је више него удвостручена у периоду од 1900. до 2005. године. На слици 2.1 је приказан раст потрошених количина по глави становника током овог периода (Krausmann et al., 2009). На истом дијаграму приказана је и количина утрошене енергије и може се закључити да су количина утрошених материјала и енергије у директној сразмери.

У последње време, заједно са развојем технологије, користи се све мање и мање природних ресурса по јединици производа. Са те стране може се рећи да је постигнут одређени напредак у ефикасности коришћења природних ресурса. Данас је потребно мање ресурса за производњу једног долара (или евра) бруто домаћег производа (БДП) него што је било потребно раније. Захваљујући овоме, дошло је до релативног раскидања веза између БДП-а и количине потрошених природних ресурса (UNEP, 2011). У периоду између 1980. и 2005. године просечан БДП је порастао за 110% док је количина употребљених природних ресурса скочила за око 50% (Giljum et al., 2008).

Ефикасност коришћења природних ресурса, такође, знатно варира међу регионима света. Различити региони света користе различите количине ресурса по јединици БДП. Количина употребљених ресурса зависи од више фактора: врсте и количине ресурса доступних у одређеном региону света, увоза и извоза ресурса, стања технологије као и саме привредне структуре. Према доступним подацима, на светском нивоу, просечна количина ресурса за сваки долар БДП износи 1,4 килограма. Ова вредност варира од приближно једног килограма у Европи и Северној Америци до седам килограма у Африци.

Количина употребљених природних ресурса директно утиче на количину отпада који се генерише и на припадајуће негативне последице по животну средину. Поред тога, велики утицај има и стање технологије и ефикасност коришћења ресурса. Што је коришћење ресурса ефикасније ствара се мање отпада.

2.2 Количина генерисаног отпада

Отпад се ствара у свим фазама животног циклуса производа: почевши од ископавања руда (отпад из рудника), преко производње и дистрибуције производа (индустријски, опасни, амбалажни отпад...), употребе производа и услуга (комунални, електрични и електронски отпад) па до третмана отпада (нпр. отпад из постројења за рециклажу или остаци од спаљивања отпада).

Укупну количину отпада који се у свету произведе тешко је проценити, а груба процена је да се на годишњем нивоу генерише око 4 милијарде тона отпада (ISWA, 2012). Овде је укључен комунални, индустријски и опасан отпад. Количине отпада из каменолома и рудника као и из процеса изградње и рушења, који заузимају највећи удео, на светском нивоу је веома тешко проценити.

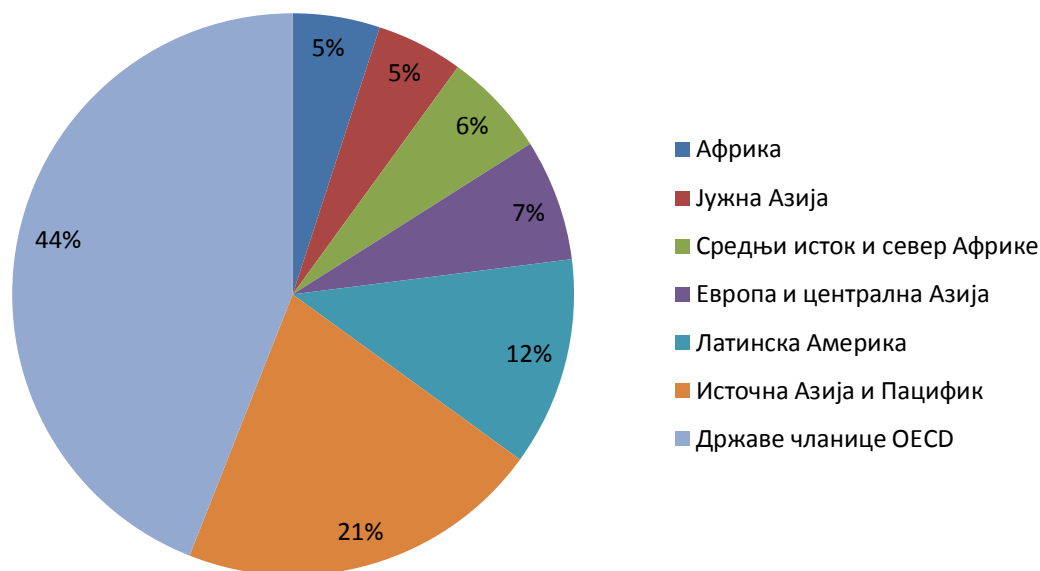
Нешто детаљнији подаци доступни су за Европу. Количина отпада у Европи је последњих година или у благом расту или у стагнацији. Према најновијим доступним

подацима, током 2010. године у Европи је генерисано укупно преко три милијарде тона отпада или око 5,2 тоне по глави становника (Eurostat, 2013).

Највише података доступно је за комунални отпад. Укупна количина чврстог комуналног отпада који се генерише у свету процењена је на 1,3 милијарде тона на годишњем нивоу. Ова количина отпада има тенденцију раста тако да ће, према проценама Светске банке, 2025. године достићи ниво од 2,2 милијарде тона (World Bank, 2012).

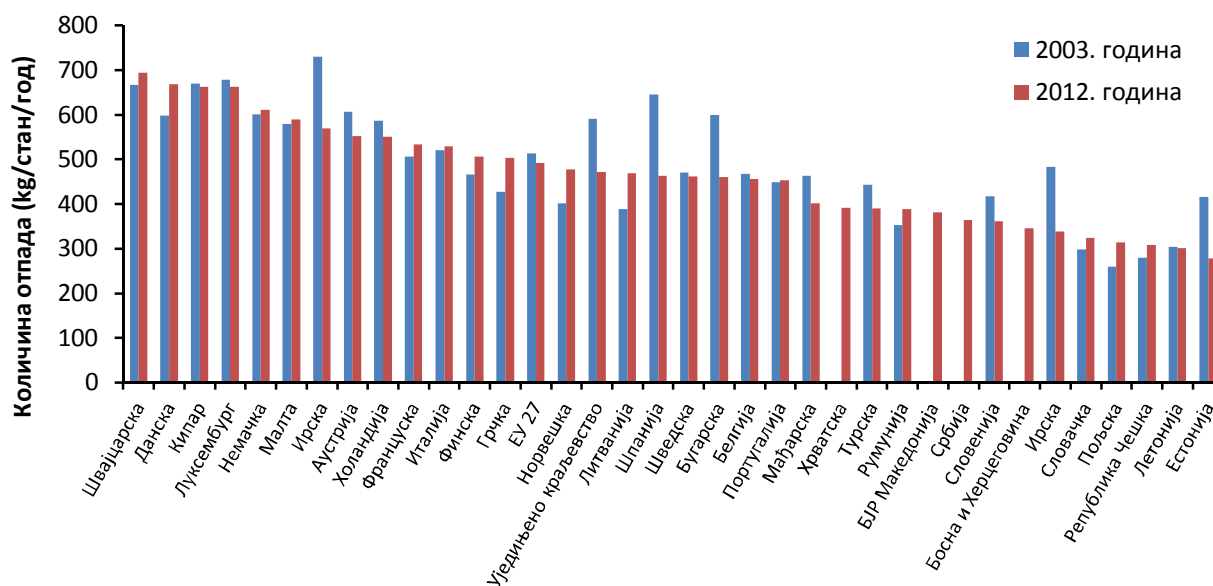
На генерисање комуналног отпада највише утичу економски развој, степен индустријализације као и навике становништва. Уопштено, већи економски развој и већа стопа урбанизације подразумева већу количину генерисаног комуналног отпада. Са порастом прихода и животног стандарда становништва, потрошња добара и коришћење услуга расте, а самим тим и количина отпада. Урбано становништво, у просеку, произведе двоструко више отпада од становништва у руралним пределима.

Варијације у количини комуналног отпада по глави становника могу бити веома велике унутар једног региона, једне државе, па чак и унутар једног града. По регионима света, најмања количина комуналног отпада по глави становника генерише се у Афричком региону, просечно 0,65 килограма дневно. Са друге стране, развијене земље, као што су, на пример, чланице ОЕЦД (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), имају највећу стопу генерисања отпада по глави становника која, у просеку, износи 2,2 кг/стан/дан. Вредности између чланица варирају између 1,1 и 3,7 кг/стан/дан. Са укупном количином од 572 милиона тона чврстог отпада годишње, чланице ОЕЦД учествују са 44% у укупној количини генерисаног отпада, што је приказано на слици 2.2 (World bank, 2012).



Слика 2.2 Удео генерисаног комуналног отпада по регионима света

Када је Европа у питању, просечна годишња количина генерисаног комуналног отпада, који се углавном састоји од отпада из домаћинства, али укључује и комерцијални отпад, достигла је 464 килограма по глави становника у 2012. години. На слици 2.3 приказан је тренд генерисања комуналног отпада у државама Европе за 2003. и 2012. годину (Eurostat, 2013). Укупна количина генерисаног комуналног отпада у 2010. години у Европи износила је 293 милиона тона.



Слика 2.3 Количина генерисаног отпада по глави становника у државама Европе

Када је реч о Републици Србији, потребно је нагласити да подаци о генерисању, начину одлагања и количинама третираног отпада нису потпуни. Систематско прикупљање података започето је тек пре неколико година, а за прикупљање података су задужени Завод за статистику и Агенција за заштиту животне средине, свака у оквиру својих надлежности.

Прикупљају се подаци о индустријском, комуналном (кућном) отпаду и комерцијалном отпаду, а такође се води статистика о медицинском и фармацеутском отпаду, амбалажи и амбалажном отпаду, као и посебним токовима отпада у које спадају електрични и електронски отпад, отпад који садржи азбест, отпадна уља и гуме, отпадне батерије и акумулатори.

Према објављеним подацима у оквиру извештаја о стању животне средине у Републици Србији (Агенција за заштиту животне средине, ¹2013), у 2012. години, 176 постројења која подлежу обавези извештавања у складу са Е-ПРТР протоколом (Протокол о регистру испуштања и преноса загађујућих супстанци), доставило је податке о евидентираним количинама произведеног индустријског отпада. Укупна количина евидентираниог отпада износи 6,7 милиона тона, од чега 219 хиљада тона чини опасан отпад. Највећи удео у генерисаном отпаду има отпад који потиче из термичких процеса, чак 96,6% (у чему пепео из термоелектрана учествује са 67%). Остатак углавном чини отпад из пољопривреде и прехранбене индустрије.

Обавезу достављања података Агенцији имају сва предузећа која у оквиру својих активности стварају отпад. Према подацима прикупљеним из 833 предузећа у току 2012. године, укупна количина генерисаног индустријског отпада износи 1,42 милиона тона отпада, од чега 19,5 хиљада тона чини опасан отпад. У овоме велики удео имају гвожђе и остали метали настали у процесу демонтаже, као и отпад из термичких процеса.

Према претходно изнетим подацима, укупна количина генерисаног индустријског отпада (укључујући и опасан отпад) у 2012. години у Републици Србији износила је 8,1 милион тона.

Податке о количини и саставу генерисаног отпада на територијама локалних заједница достављају комунална предузећа. Достављени подаци морају бити у складу са Правилником о методологији за прикупљање података о саставу и количинама отпада на територији јединице локалне самоуправе (Службени гласник Републике Србије, ²2010). Развијена методологија (Јовичић и сар., 2009; Vujić et. al, 2010) проистиче из искустава и методологија које се користе у Европској унији. У циљу одређивања укупне количине генерисаног отпада у општинама у Републици Србији, као и његовог морфолошког састава, вршена су експериментална мерења и анализе у десет репрезентативних општина. Обзиром да је општина Крагујевац једна од десет општина у којој су вршене анализе, комплетан опис методологије биће дат у поглављу дисертације у коме се говори о управљају отпадом у Крагујевцу.

На основу добијених података из комуналних предузећа и применом модела за процену вредности индикатора везаних за комунални отпад који се користи у Европи, за сваку годину, врше се процене укупне количине комуналног отпада и других индикатора. У табели 2.1, према најновијем извештају о стању животне средине у Републици Србији за 2012. годину (Агенција за заштиту животне средине, ¹2013), приказани су индикатори везани за комунални отпад.

Табела 2.1 Индикатори везани за комунални отпад

| Индикатор | Година | | | | | | |
|--|--------|------|------|------|------|------|------|
| | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| Укупна количина генерисаног отпада (милиона тона) | 1,73 | 2,07 | 2,55 | 2,63 | 2,65 | 2,71 | 2,62 |
| Количина прикупљеног и депонованог отпада од општинских ЈКП (милиона тона) | 1,04 | 1,24 | 1,52 | 1,58 | 1,89 | 2,09 | 1,83 |
| Просечни обухват прикупљања отпада (%) | ~60 | ~60 | ~60 | ~60 | 72 | 77,3 | ~70 |
| Средња дневна количина комуналног отпада по становнику (kg) | 0,62 | 0,77 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 1,01 | 0,99 |
| Средња годишња количина по становнику (t) | 0,23 | 0,28 | 0,35 | 0,36 | 0,36 | 0,37 | 0,36 |

Као што се може видети из претходне табеле, у 2012. години долази до благог пада средње дневне количине комуналног отпада у односу на претходну годину за око 2%. Овај пад је у складу са подацима Европске Агенције за заштиту животне средине којој

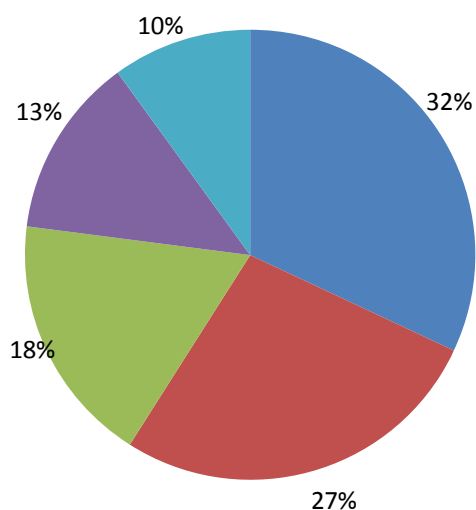
је велики број земаља пријавио пад количина комуналног отпада у 2012. години. Ово са једне стране показује пад куповне моћи становништва услед директних последица економске кризе, а са друге стране, успешност одвојеног сакупљања појединих фракција отпада које су раније завршавале у контејнерима заједно са мешаним комуналним отпадом (на пример амбалажног отпада).

Такође, у 2012. години је дошло до пада вредности просечног обухвата прикупљања отпада. Међутим, наведени податак је добијен на основу малог узорка квалитетних података, па се очекује да у току наредног периода дође до корекције ове вредности.

2.3 Састав генерисаног отпада

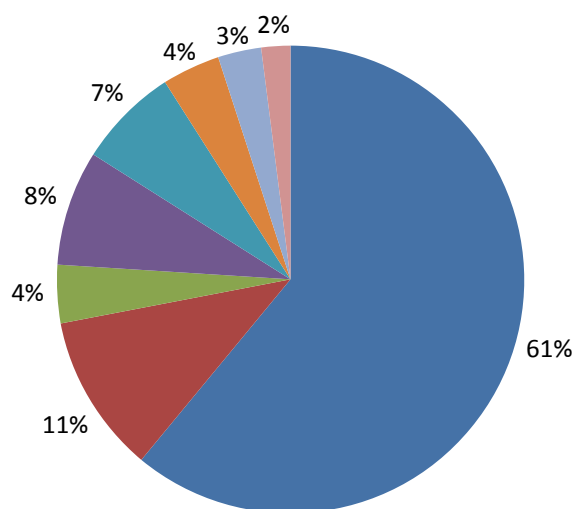
Као и у случају генерисаних количина отпада, састав отпада варира у различитим регионима света. У укупним количинама отпада, по пореклу, доминира отпад из изградње и рушења, и отпад из рудника и каменолома.

На сликама 2.4 и 2.5 приказан је процентуални удео отпада по пореклу и састав отпада у Европи, респективно. Као што се може видети на слици 2.4, 32% отпада који се генерише у Европској унији потиче из активности које су везане за изградњу и рушење, 27% из рудника и каменолома, а остатак из индустрије, домаћинства и осталих активности (World bank, 2012). Скоро две трећине од укупне количине отпада је отпад минералног порекла (из рудника, каменолома, изградње и рушења).



- Отпад из изградње и рушења
- Отпад из рудника и каменолома
- Остали отпад
- Индустријски отпад
- Отпад из домаћинства

Слика 2.4 Отпад по пореклу



- Минерални отпад
- Остали отпад
- Животињски и биљни отпад
- Кућни и сличан отпад
- Пепео
- Метал
- Дрво
- Папир и картон

Слика 2.5 Састав отпада

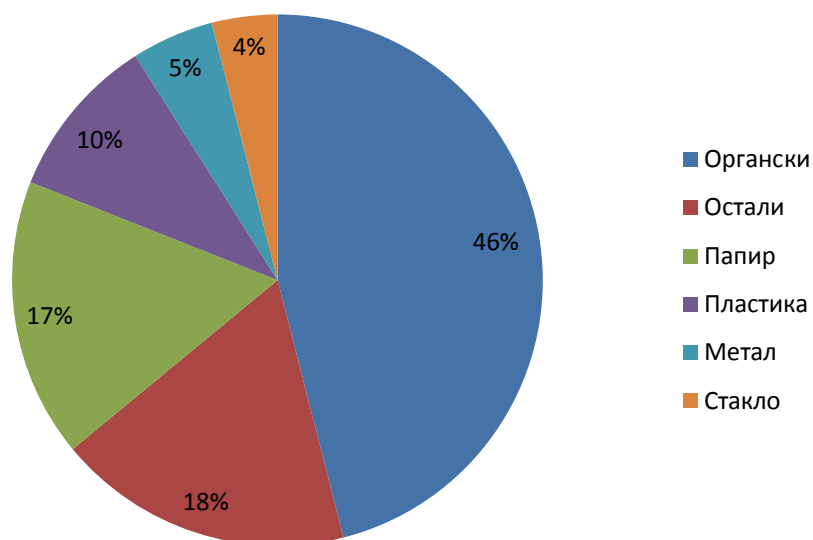
Чврсти комунални отпад се, по саставу, дели на органски и неоргански. У органски отпад спада отпад од хране (месо, воће и поврће), папир и картон, пластика, одећа и влакна (текстил, кожа, вуна), баштенски и дрвни отпад, као и остали органски отпад (кости и сл.). Неоргански отпад чине метали, стакло и разни инертан отпад (прашина, песак, камен, опека и др.).

На састав отпада утиче велики број фактора, као што су привредни развој, култура, географска локација, природни ресурси и клима. У државама са ниским националним дохотком процентуално је највише органског отпада који чине остаци од хране, као и баштенски и дрвни отпад. Количина органског отпада варира између 40 и 85% у зависности од државе. Са порастом стандарда становништва и растом удела урбаног становништва повећава се употреба папира и пластике (амбалажни отпад), док се релативно смањује количина осталих органских фракција отпада.

Према последњем доступном извештају (World bank, 2012), просечан састав комуналног отпада у свету изгледа као на слици 2.6. У овој студији комунални отпад је подељен у шест различитих категорија које су, са описом сваке од њих, дате у табели 2.2.

Табела 2.2 Врсте отпада и њихови извори

| Врста | Извор |
|-------------------|---|
| Органски (остали) | Отпад од хране, баштенски отпад (лишће, трава, гранчице), дрвни отпад |
| Папир | Старе новине, часописи, магацини, картонске кутије, књиге... |
| Пластика | Флаше, амбалажни отпад, кутије... |
| Стакло | Флаше, сијалице, обојено стакло |
| Метал | Лименке, конзерве, апарати (бела техника), ограде, бицикле... |
| Остало | Текстил, кожа, гума, електронски отпад, пепео и инертни материјали |

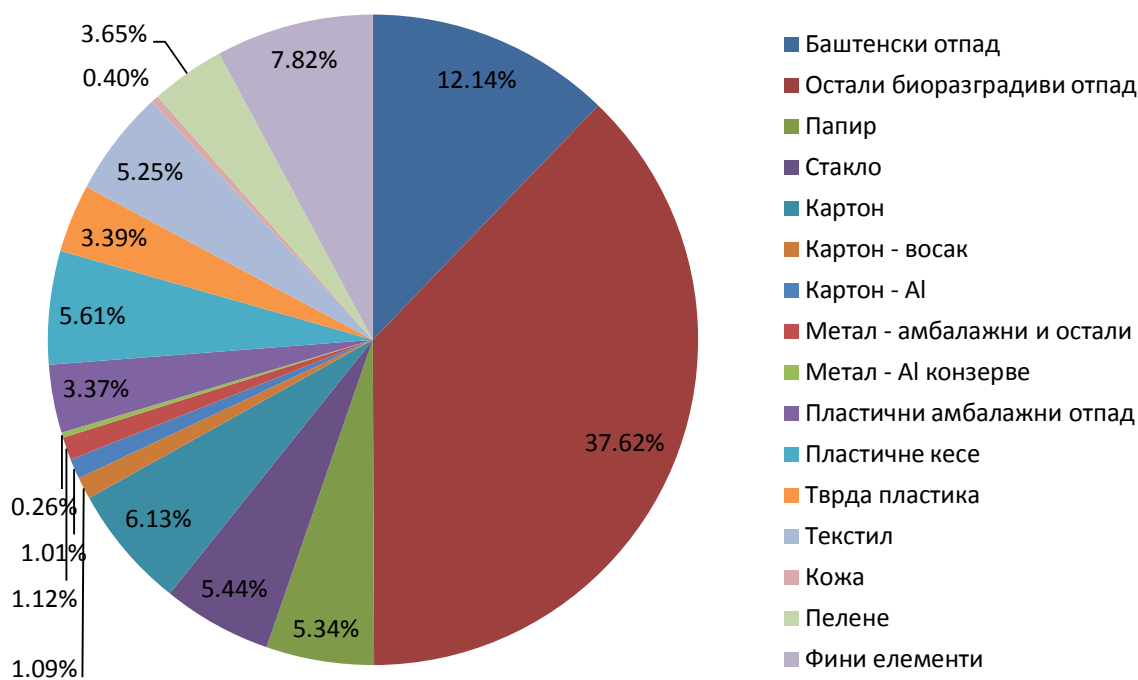


Слика 2.6 Састав комуналног отпада у свету

Најпрецизнији подаци о морфолошком саставу комуналног отпада у Србији, којима се тренутно располаже, добијени су експерименталним мерењем коришћењем раније поменуто методологије. Мерења су вршена за три годишња доба у десет референтних

градова, а затим је на основу добијених резултата вршена процена састава комуналног отпада у Републици Србији.

Графички приказ морфолошког састава отпада у Србији дат је на слици 2.7, где се може уочити да органски отпад заузима велики удео у укупној маси комуналног отпада. При томе остали биоразградиви отпад (који углавном чини отпад од хране) учествује са 37,62%, баштенски са 12,14%, након чега следе пластика са 12,73% и картон са 8,23%, а потом остале фракције са мањим уделом.



Слика 2.7 Морфолошки састав комуналног отпада у Србији

2.4 Систем управљања чврстим комуналним отпадом

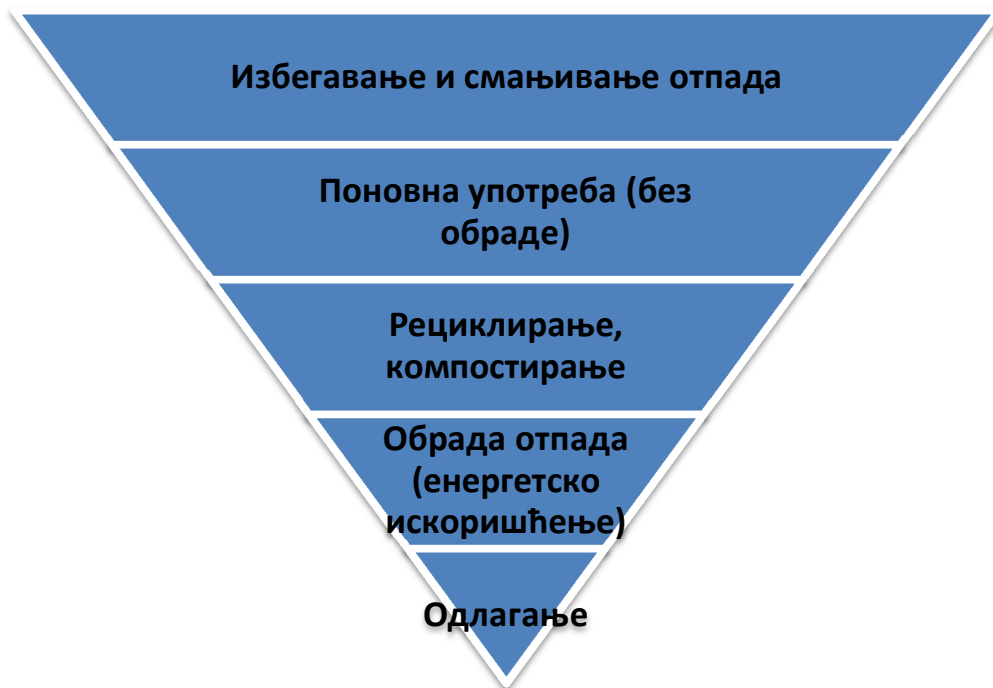
Управљање чврстим отпадом као примарни циљ има очување здравља људи, животне средине и природних ресурса и представља веома сложен процес који укључује многе технологије и дисциплине. При томе, сви процеси у оквиру система управљања чврстим отпадом, морају се изводити у складу са постојећим законским и друштвеним, као и нормама које се тичу животне средине.

У развијеним земљама, али у последње време, и у појединим земљама у развоју, усвојен је принцип интегрисаног управљања отпадом. Интегрисано управљање отпадом представља комплексан задатак чије решење захтева истовремено испуњавање свих техничких, економских и социјалних ограничења. McDougall et. al (2001) су дефинисали интегрисано управљање отпадом као систем који комбинује различите методе сакупљања, транспорта и депоновања свих фракција отпада са циљем да се заштити животна средина на економски одржив и друштвено прихватљив начин.

У контексту методологија, постоје три основна начина управљања отпадом:

- редукација отпада на извору, поновна употреба и рециклажа,
- процесирање отпада,
- депоновање.

У различитим државама, интегрисано управљање отпадом се различито тумачи. Претходно поменуте стратегије управљања отпадом се, у највећем броју држава, примењују по хијерархијском редоследу (са мањим варијацијама), какав је приказан на слици 2.8.



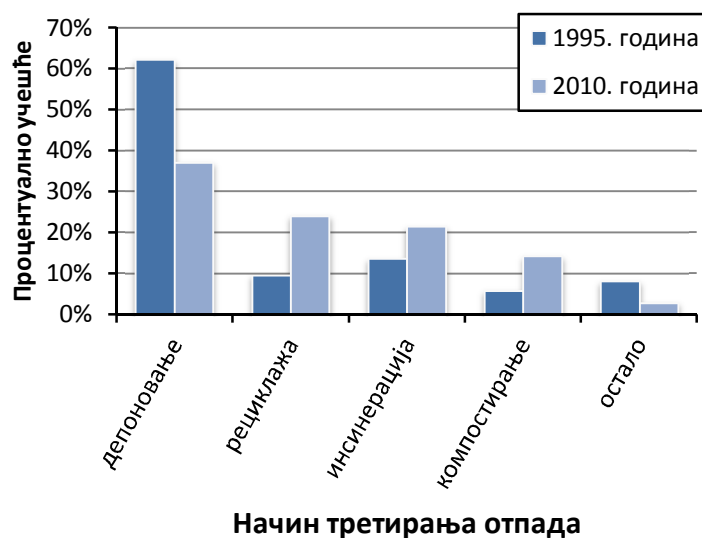
Слика 2.8 Хијерархија управљања отпадом

Процеси сакупљања, третмана и одлагања отпада суштински су усмерени ка очувању, унапређењу и подизању квалитета животне средине. Међутим, ови процеси имају и негативан утицај на животну средину, првенствено због емисије гасова стаклене баште и других гасова који загађују ваздух, као и због емисије материја у воду и земљиште. Резултантни утицај отпада на животну средину директно зависи од количина и карактеристика отпада, али и од начина на који се њиме управља. Тако, на пример, за исту количину збринутог отпада, количина гасова стаклене баште која се емитује у атмосферу, у многоме зависи од избора технологије којом се третира отпад.

Напредак у технологији управљања отпадом, као и у другим областима, имао је свој логичан историјски ток. Међутим, за разлику од технологија које су се развијале искључиво на бази иновативности и економских принципа, промене у систему управљања отпадом делом су усмераване рестриктивним законодавством, односно тежњом за постизањем одрживих еколошких принципа. Отуда, мимо тржишних принципа, кренуло се са успостављањем циљева и инструмената за рециклажу и повраћај материјала, увођењем такси за депоновање отпада и забраном депоновања

одређених врста отпада. Као последица унете неравнотеже на тржиште отпада и потребе да се смањи количина отпада који се одлаже на депонију, дошло је до развоја нових технологија збрињавања отпада. Отпад који се раније депоновао, применом релативно јефтине технологије, сада мора бити збринут и третиран на други, еколошки прихватљивији, али и скупљи начин.

На слици 2.9 приказан је напредак у ЕУ у области управљања отпадом у периоду између 1995. и 2010. године (Eurostat, 2013). У овом периоду проценат депонованог комуналног отпада опао са 62% на 37%, што је за последицу имало значајно повећање удела механичког, биолошког и термичког третмана отпада (рециклажа, компостирање и инсинерација).



Слика 2.9 Напредак у управљању отпадом у ЕУ

Управљање отпадом у Републици Србији, као земљи у транзицији, представља великим делом нерешен проблем. Националном стратегијом за управљање отпадом из 2003. године (Службени гласник Републике Србије, 2003) уводи се концепт интегрисаног управљања отпадом уз примену хијерархије управљања отпадом која се примењује у ЕУ.

Међутим, у пракси у Србији не постоји систематски организовано одвојено сакупљање, сортирање и рециклажа отпада, што доводи до недовољног степена искоришћења отпада. Према извештају Агенције за заштиту животне средине, у 2012. години укупна количина амбалаже стављене на тржиште Републике Србије износи 344 хиљаде тона, док према извештају оператера количина поново искоришћеног амбалажног отпада износи 68 хиљада тона или нешто мање од 20% (Агенција за заштиту животне средине, 2013). Охрабрује чињеница да се из године у годину овај проценат повећава (слика 2.10).



Слика 2.10 Амбалажа стављена на тржиште и поново искоришћена

У 2012. години у Србији је било у функцији само шест градских рециклажних центара (Суботица, Обреновац, Јагодина, Лесковац, Чачак, Сомбор), док је у плану да се започне са изградњом још 26 центара.

И поред високог удела органске компоненте у отпаду, у Србији не постоји постројење за биолошки третман отпада, као ни постројење за инсинерацију отпада.

Стога је, још увек, управљање отпадом у Србији углавном засновано на депоновању (Вујић и Миловановић, 2012). Отпад се одлаже на 164 регистроване општинске депоније, од којих већина не задовољава ни минимум техничких захтева. Поред тога, према извештају Агенције за заштиту животне средине (2010), током 2009. године у Србији је урађена идентификација и категоризација депонија на територији Републике Србије. Том приликом регистрована је 4481 неуређена (дивља) депонија што је последица недовољне покривености становништва организованим сакупљањем отпада, нарочито у руралним крајевима.

Према Стратегији за управљање отпадом за период 2010 - 2019. године (Службени гласник Републике Србије, ¹2010), која представља основни документ који обезбеђује услове за рационално и одрживо управљање отпадом на нивоу Републике Србије, један од приоритета у области управљања отпадом представља повећање броја становника обухваћених сакупљањем отпада. Циљ који је био постављен за 2014. годину, и који износи 75%, испуњен је до 2011. године. Као што је у претходном делу текста поменуто, 2012. године проценат покривености становништва износи око 70%, али се као основни узрок пада узима недовољан број прецизних података добијених од стране комуналних предузећа, приликом последњег извештавања. Сакупљање углавном обављају јавна комунална предузећа основана од стране локалних самоуправа (90,4%). Приватни сектор ушао је у посао сакупљања отпада 2007. године и данас постоји одређени број приватних компанија које се баве сакупљањем отпада, међу којима се истиче пет највећих (Brantner, ASA, Porr Werner&Weber, Spider i Trojan&Fischer ЕКО) које опслужују укупно 200 хиљада домаћинстава.

Такође, стратегијом из 2003. године, предвиђено је успостављање регионалног система управљања отпадом уз формирање 29 региона за управљање отпадом у Србији. Поред тога, предвиђено је затварање и рекултивација постојећих сметлишта и изградња 29 регионалних санитарних депонија као и 44 трансфер станице. Известан

број региона је формиран и урађени су регионални планови управљања отпадом, али успостављање регионалног система још увек није завршено.

Из претходно приказаног, може се закључити да се главни изазови у Републици Србији, у области управљања отпадом, још увек односе на повећање покривености и капацитета за пружање основних услуга – сакупљања, транспорта и одлагања отпада.

2.5 Управљање комуналним отпадом у урбаној средини

Управљање чврстим отпадом је један од најбитнијих задатака који се поставља представницима локалних власти у свакој урбаној средини. У циљу решавања конкретних комуналних проблема, на нивоу локалне заједнице, постоје различити елементи који се групишу у целину познату под називом систем за управљање чврстим отпадом.



Слика 2.11 Веза елемената система за управљање отпадом

Основне карактеристике градског система за управљање комуналним отпадом представљају сложеност и променљивост. Сложеност се огледа у великом броју значајних фактора који утичу на његово функционисање, док се променљивост исказује у варирању тих фактора, а посебно када су у питању количине и карактеристике генерисаног отпада, број становника, карактеристике саобраћајне мреже којом се крећу комунална возила, законски оквири, итд.

Активности повезане са управљањем комуналним отпадом у урбаним срединама, од момента његовог настанка до коначног одлагања, могу се груписати у шест функционалних, међусобно повезаних елемената (Tchobanoglous et. al, 1993). Шематски приказ повезаних елемената система за управљање чврстим отпадом дат је на слици 2.11.

Настанак чврстог отпада укључује активности на процени количина и састава отпада које је потребно прикупити. У зависности од претходно утврђених параметара дефинишу се остали елементи система.

Сепарација отпада на извору, привремено складиштење и руковање отпадом подразумева активности у оквиру управљања отпадом док отпад не доспе у посуде предвиђене за привремено складиштење. Овде може бити укључена примарна сепарација у домаћинствима на рециклабилни и нерэциклабилни отпад, као и процеси кућног компостирања. У зависности од избора начина сакупљања отпада (помешани отпад или издвојене фракције), облика становања и других параметара бира се врста одговарајућих посуда за складиштење.

Сакупљање отпада је елемент система који покрива пражњење посуда за привремено складиштење отпада у за то предвиђено комунално возило и превоз отпада до локације где се возило празни. У зависности од избора опција управљања отпадом ова локација може бити трансфер станица, постројење за третман отпада или депонија.

Третман отпада укључује активности сепарације у постројењима за рециклажу или други начин трансформисања отпада (анаэробна дигестија, компостирање, инсинерација). Обично се ове активности дешавају на местима која су удаљена од извора настанка отпада.

Трансфер и транспорт отпада подразумева претовар отпада из мањих возила којима се врши сакупљање отпада у возила веће запремине и носивости као и транспорт, обично до даљих дестинација, где се врши третман или депоновање отпада.

Депоновање отпада је елемент система који укључује, у зависности од избора опције управљања отпадом, трајно одлагање сакупљеног отпада или отпадног материјала из постројења за третман отпада.

Систем за управљање чврстим отпадом мора да буде еколошки и економски одржив. Еколошка одрживост подразумева смањење негативног утицаја система на животну средину, укључујући потрошњу енергије, загађење земљишта, ваздуха и воде. Економска одрживост подразумева да трошкови система морају да буду друштвено

прихватљиви. Евидентно је да је веома тешко истовремено смањити и трошкове и утицај на животну средину. Међутим, компромис мора увек да постоји. Баланс који је потребно успоставити подразумева редуковање негативних последица по животну средину, у што је могуће већој мери, у оквиру прихватљивих трошкова система.

Као што је у претходном делу поглавља наведено, највећи део отпада у Србији се без икаквог третмана трајно депонује. Самим тим, највећи део од укупних трошкова система отпада на сакупљање и превоз отпада.

Када се говори о процесима сакупљања и транспорта отпада на територији Републике Србије, потребно је посебно нагласити следеће проблеме који се јављају у већини локалних самоуправа:

- неодговарајући број и структура посуда за сакупљање отпада,
- неодговарајући распоред посуда,
- недостатак одговарајућих возила за транспорт отпада,
- неодговарајућа учесталост транспорта отпада,
- неодговарајуће руте кретања возила,
- нерешено питање транспорта отпада из здравствених установа и неких привредних субјеката.

У поглављима која следе биће разматране опције за унапређење функционисања сакупљања и транспорта отпада, на примеру града Крагујевца, кроз примену одговарајућих мера за повећање енергетске ефикасности процеса, са циљем да се остваре економске, енергетске и еколошке уштеде.

3. Сакупљање и транспорт отпада

Сакупљање и транспорт чврстог отпада учествују великим уделом у укупним трошковима целокупног система за управљање чврстим отпадом (Dogan and Suleyman, 2003; Ghose et al., 2006; Nguyen and Wilson, 2010). У случајевима када нема третмана отпада, већ се сав прикупљени отпад трајно одлаже на депонију, сакупљање и транспорт могу да достигну и 85% од укупних трошкова (Araudin and Gonullu, 2007). Стога се оправдано намеће потреба за унапређењем овог сегмента, у циљу успостављања енергетски ефикасног и економски оправданог система за управљање чврстим отпадом.

Када се тежи унапређењу функционисања градског система за управљање отпадом, и то преко елемента сакупљања и превоза отпада, могу се евидентирати три нивоа могуће оптимизације (Ерделез и сар., 2007): 1) стратешки ниво – избор одрживих технологија збрињавања отпада, 2) тактички ниво - избор економски оправданих локација претоварних (трансфер) станица, 3) оперативни ниво – дефинисање енергетски ефикаснијег система сакупљања отпада на локалном (градском) нивоу.

Стратешки ниво оптимизације се јавља током процеса дугорочног планирања функционисања система за управљање отпадом, односно када се услед застарелости система, појаве новог законског оквира или развоја и уплива нових одрживих технологија врши анализа, ревизија или се доноси нова стратегија управљања отпадом.

Приликом дугорочног планирања система за управљање отпадом врши се избор технологија збрињавања отпада, што у великој мери утиче на начин и организацију транспорта отпада. Различите технологије подразумевају различит предмет превоза. Такође, различите су локације на које се отпад одвози и растојања до тих локација, што као последицу има различите трошкове система. За већи број различитих фракција отпада, које је потребно збринути посебно, неопходан је знатно сложенији систем за сакупљање и транспорт, што захтева скупљи возни парк. Дакле, оптимизација система сакупљања отпада, избором одрживе технологије збрињавања отпада, представља системски приступ решавању овог сложеног инжењерског проблема. У процес одлучивања се мора укључити више оптимизационих критеријума који се истовремено узимају у обзир.

Тактички ниво оптимизације подразумева избор економски оправданих локација претоварних (трансфер) станица. У односу на стратешки ниво, овај ниво оптимизације је нижи и њега је могуће вршити тек када је формиран регионални систем за управљање отпадом или у случају када је обухват, односно подручје које покрива комунално предузеће постало велико. У овим случајевима се врши увођење претоварних станица, чиме се смањују трошкови транспорта отпада. Реализација стратешких одлука врши се кроз коректно изведене тактичке одлуке.

Оперативни ниво унапређења система представља дефинисање енергетски ефикаснијег система сакупљања отпада на локалном (градском) нивоу. Овај ниво

оптимизације представља трајни задатак сваког комуналног предузећа и потребно је да се спроводи сваких неколико година. Он подразумева решавање следећих проблема:

- адекватан распоред места за прикупљање отпада у складу са густином становништва и степеном урбанизованости (унапређена или оптимизована фреквенца пражњења контејнера),
- подела града на реоне у складу са карактеристикама возног парка (унапређено или максимизовано искоришћење капацитета комуналних возила),
- оптимизација путања комуналних возила у оквиру дефинисаних реона (смањење или минимизација енергетских расхода возног парка).

Ова врста оптимизације је нужна, јер се током времена често мењају значајни квантификатори урбане средине, односно фактори који утичу на ефикасност комуналног сервиса. Међу ове факторе спадају: обим опслуживане популације, број становника, количина генерисаног отпада, врста расположивих транспортних средстава, саобраћајни услови, итд., тако да је оптимизацијом потребно прилагођавати систем новонасталој ситуацији.

Тактички и стратешки ниво унапређења или оптимизације градског система за управљање отпадом су ограничени правним, економским, али и политичким оквиром и као такви превазилазе могућности које произилазе из потребе типичног комуналног сервиса за сопственим унапређењем.

Отуда се унапређење комуналног сервиса, у циљу стварања предуслова за дефинисање енергетски ефикаснијег и економски одрживог система сакупљања отпада, на локалном нивоу намеће као једини модалитет који за свој исход може да гарантује постизање пројектованих циљева у прецизно дефинисаном временском оквиру и као такав представља предмет истраживања докторске дисертације.

Оптимизација путања кретања комуналних возила припада моделу проблема рутирања возила (енгл. Vehicle Routing Problem – у даљем тексту VRP). Обзиром да комунална возила имају ограничен капацитет, применом VRP модела на проблем оптимизације путања сакупљања и транспорта отпада, обавезно је укључити капацитет као први ограничавајући фактор. Осим овога, у циљу решавања реалних проблема, укључује се и низ других фактора, као што су трајање смене, променљивост саобраћајних услова, сезонске варијације у количини генерисаног отпада, ограничено време складиштења у контејнерима, итд. Потребно је нагласити да не постоји универзално решење за овакве проблеме, јер је сваки проблем јединствен и мора се индивидуално решавати. Први део овог поглавља посвећен је методама за решавање VRP, почевши од егзактних алгоритама, чија је примена ограничена на једноставне моделе, до хеуристичких метода којима се решавају сложенији проблеми.

Географски информациони систем (ГИС) је, такође, пронашао значајну примену у области управљања отпадом, нарочито у сегментима сакупљања и транспорта отпада. Коришћењем могућности ГИС-а одређују се оптималне локације за постављање контејнера и најеконичније путање кретања комуналних возила. Приликом симулација и формирања варијантних решења ресурси ГИС-а обезбеђују неопходне

информације као што су гео-референциране мапе, мрежа градских саобраћајница, усмереност улица, просторни распоред места за прикупљање отпада, демографски подаци, итд. Преглед општих карактеристика ГИС-а као и примена у области управљања отпадом дате су у другом делу поглавља.

Нове технологије налазе све већу примену и у области управљања комуналним отпадом. Комбинација система за глобално позиционирање (енгл. Global Positioning System – у даљем тексту GPS) и система за пренос података коришћењем мреже мобилне телефоније (енгл. General Packet Radio Service – у даљем тексту GPRS) све чешће се користе за праћење комуналних возила. Последњи део овог поглавља даје детаљан преглед функционисања нових технологија у мониторингу процеса сакупљања, транспорта и депоновања отпада.

3.1 Проблем рутирања возила - Vehicle routing problem (VRP)

Проблем рутирања возила представља један од најпознатијих проблема оптимизационе комбинаторике. VRP се састоји од одређивања оптималних рута скупа m возила за испоруку (или прикупљање) робе из централног складишта (енгл. depot) до географски расутих корисника, уз поштовање различитих ограничења као што су капацитет возила, дужина руте, временски оквири итд. Ово је проблем са којим се свакодневно суочава на хиљаде дистрибутера широм света и који има битан економски значај. Први пут се помиње пре више од 50 година (Dantzig and Ramser, 1959).

Као што је случај и са више познатих комбинаторних оптимизацијских проблема, не постоји јединствено прихваћена универзална дефиниција VRP-а због велике разноврсности ограничења са којима се проблем суочава у пракси. Стога су истраживачи концентрисани на стандардизовану верзију проблема која се назива *класични VRP*, имајући у виду да већина алгоритама развијених за решавање овог проблема може да се прилагоди компликованијим ситуацијама из реалног живота.

Основни модел проблема рутирања возила је VRP са ограничењима капацитета CVRP (енгл. Capacitated VRP). Сви корисници и њихови захтеви су унапред познати, користе се идентична возила која имају заједничку полазну тачку у складишту. Једино ограничење је капацитет појединачног возила. Коришћењем нотације теорије графова CVRP је могуће представити на потпуном графу $G=(V,A)$, где $V=\{0,1,\dots,n\}$ представља скуп врхова, а A скуп лукова. Врх са индексом 0 представља складиште у коме се налази m идентичних возила капацитета Q , а врхови $i=1,\dots,n$ кориснике. Сваком кориснику $i \in V/\{0\}$ додељена је не-негативна тежина $q_i \leq Q$. Матрица трошкова c дефинисана је на скупу A . Не-негативна цена c_{ij} повезана је са луком $(i,j) \in A$ и представља цену превоза између корисника i и j . Термини цена превоза, дужина руте и време путовања се користе наизменично. Уколико је G усмерени граф, матрица c је асиметрична, па је посматрани проблем у том случају асиметрични VRP са ограничењима капацитета ACVRP (енгл. asymmetric CVRP). Уколико је $c_{ij} = c_{ji}$ за свако $(i,j) \in A$ тада се проблем назива симетрични VRP са ограничењима капацитета –

SCVRP (енгл. symmetric CVRP). Под појмом CVRP најчешће се подразумева SCVRP, и у том случају скуп A се замењује скупом неусмерених лукова E . Решавање проблема састоји се од одређивања m рута где укупан трошак рута треба да буде минималан. Свака рута је повезана само са једним возилом. Укупан трошак је збир трошкова на сваком луку који припада рути. Такође решење треба да задовољи следеће услове:

- свака рута почиње и завршава се у складишту,
- сваки корисник се посећује тачно једанпут тачно једним возилом,
- збир тежина на било којој рути не сме да буде већи од укупног капацитета возила Q ,
- укупан трошак руте је минималан.

VRP припада групи NP тешких проблема (недетерминистичких у полиномијалном времену) јер укључује *Проблем трговачког путника* (енгл. Traveling salesman problem – TSP) као специјалан случај, када је $m = 1$ и $Q = \infty$. У пракси је знатно теже решити VRP проблем него TSP проблем исте величине. На пример, TSP који укључује стотине а некада и хиљаде корисника може рутински да се реши коришћењем напредних алгоритама гранања и одсецања (енгл. branch and cut). Са друге стране, коришћењем најсофистициранијих егзактних алгоритама могуће је решити VRP проблеме до највише 100 корисника (Baldacci et al., 2008). Ово објашњава чињеницу да је напор истраживача, у последње време, највећим делом окренут хеуристичким алгоритмима.

Методe за решавање комбинаторних оптимизацијских проблема деле се у 3 групе:

- егзактне,
- хеуристичке,
- метахеуристичке.

3.1.1 Егзактне методе за решавање VRP проблема

Егзактне методе гарантују добијање оптималног решења. VRP спада у NP-тешке проблеме код којих време рачунања потребно да се дође до решења експоненцијално расте са величином проблема. Самим тим, коришћење ових метода у пракси је ограничено на решавање проблема са мањим бројем корисника.

Постоји неколико фамилија егзактних алгоритама за решавање VRP са симетричном трошковном структуром. Оне се заснивају на целобројном линеарном програмирању (енгл. integer linear programming - ILP), динамичком програмирању (енгл. dynamic programming) и гранању и ограничавању (енгл. branch and bound) (Toth and Vigo, 2002). Целобројно линеарно програмирање засновано на алгоритмима гранања и одсецања је доказано најпоузданија методологија.

3.1.1.1 Линеарно програмирање

За решавање CVRP коришћењем целобројног линеарног програмирања постоје три приступа решавања проблема: двоиндексни модел протока возила, двоиндексни модел протока терета и модел партиционирања скупа.

Модел протока возила користи целобројне променљиве повезаних са сваким луком графа. Променљиве пребројавају, за свако возило, колико је пута возило користило лук. Ово су најчешће коришћени модели за решавање основних верзија VRP. Нарочито су погодни у случајевима када се трошкови добијене руте могу изразити као збир трошкова лукова или када се најбитнија ограничења могу задати преко чланова скупа лукова и одговарајућих трошкова. Са друге стране, недостатак ових модела је тај што не могу да изађу на крај са одређеним практичним стварима, на пример када су трошкови руте повезани са целокупним редоследом корисника у рути или типом возила које је додељено одређеној рути.

Двоиндексни модели протока возила представљају проширење класичне формулације проблема трговачког путника (Dantzig et al., 1954) и установљени су 80-тих година прошлог века (Laporte and Nobert, 1983; Laporte et. al., 1985). Овај модел користи бинарне променљиве x (укупно $O(n^2)$) и оне означавају да ли возило користи одређени лук у оптималном решењу или не. Другим речима, променљива x_{ij} поприма вредност 1 уколико лук $(i, j) \in A$ припада оптималном решењу, у супротном случају поприма вредност 0. Модел протока возила се математички може описати на следећи начин:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (3.6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (3.7)$$

Постављањем ограничења (3.2) гарантује се да тачно једно возило долази ка кориснику, а ограничењем (3.3) да тачно једно возило одлази од корисника. По аналогији, ограничења (3.4) и (3.5) показују да K возила полази и враћа се у складиште. Ограничења (3.2) до (3.4) имплицитно одређују ограничење (3.5) тако да оно може бити уклоњено.

Ограничење (3.6) представља такозвано ограничење капацитивног реза (engl. Capacity Cut Constraints - CCC) и оно обезбеђује повезаност добијеног решења и захтеве капацитета возила. Уствари, ово ограничење условљава да сваки рез $(V/S, S)$ дефинисан на скупу корисника S сече лукове и да број пресечених лукова није мањи од $r(S)$ што представља минималан број возила потребних да се послужи скуп корисника S . Треба напоменути да када је $|S| = 1$ или $S = V \setminus \{0\}$ из ограничења (3.2) до (3.5) се може извести:

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} = \sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ij} \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (3.8)$$

Другим речима сваки капацитивни рез сече лукове у оба смера исти број пута па се такође може написати:

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(V \setminus S) \quad \forall S \subset V, 0 \in S \quad (3.9)$$

Naddef и Rinaldi (2002) су развили алгоритам гранања и одсецања који им је омогућио да реше шест примера за $22 \leq n \leq 45$ без гранања и девет других примера за $51 \leq n \leq 135$ користећи гранање. У скорије време branch-and-cut алгоритме засноване на протоку возила развили су Lysgaard et al. (2004).

Поред двоиндексног модела протока возила развијен је и троиндексни модел (Golden et al. 1977; Fisher and Jaikumar, 1981). У овом моделу бинарне променљиве x_{ijk} добијају вредност 1 уколико возило k користи лук (i, j) , у супротном добијају вредност 0. Ови модели су се показали као мање успешни у односу на двоиндексне моделе протока возила.

Модел протока терета за разлику од претходно описаног модела протока возила, поред постојећих променљивих x_{ij} , уводи и нови скуп променљивих повезаних са сваким луком које се односе на терет возила на одговарајућим луковима. Овај модел први пут је представљен 1957. године у раду у коме је решаван проблем дистрибуције нафте (Garvin et al., 1957). Касније је проширен у радовима Gavish-a и Graves-a и то за две варијанте – TSP и VRP (Gavish and Graves, 1979; Gavish and Graves, 1982). У новије време, најпознатија је формулација овог модела из 2004. године (Baldacci et al., 2004) која је заснована на TSP моделу (Finke et al., 1984). Модел је заснован на проширеном графу $G' = (V' A')$ где скуп $V' = V \cup \{n + 1\}$ укључује још једног корисника $n + 1$ који представља копију складишта, а скуп $E' = E \cup \{|i, n + 1| : i \in V\}$. Руте представљају путеви повезаних лукова почев од корисника 0 до корисника $n + 1$. Сваком луку $(i, j) \in A'$ додељују се две не-негативне променљиве протока y_{ij} и y_{ji} . Уколико се

возило креће из i у j тада y_{ij} представља терет, а променљива y_{ji} неискоришћени капацитет возила дуж лука (i, j) . Однос између ових двеју променљивих је $y_{ji} = C - y_{ij}$. Када возило путује из j у i тада променљиве мењају места тако да претходна формула важи за свако $(i, j) \in A'$.

За сваку руту која је део остваривог решења, променљиве протока дефинишу две усмерене путање, једну која креће од корисника 0 и иде до $n + 1$ и чије променљиве представљају терет, док у другом смеру променљиве представљају неискоришћени капацитет возила.

За сваки лук $(i, j) \in A'$ бинарна променљива x_{ij} поприма вредност 1 уколико је лук укључен у оптималном решењу у супротном поприма вредност 0, као и у моделу протока возила. Модел протока терета за ACVRP може се исказати следећим релацијама:

$$\min \sum_{i,j \in A'} c_{ij} x_{ij} \quad (3.10)$$

где је

$$\sum_{i \in V'} (y_{ji} - y_{ij}) = 2d_i \quad \forall i \in V' \setminus \{0, n + 1\} \quad (3.11)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n + 1\}} y_{0j} = d(V' \setminus \{0, n + 1\}) \quad (3.12)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n + 1\}} y_{j0} = KC - d(V' \setminus \{0, n + 1\}) \quad (3.13)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{0, n + 1\}} y_{n+1,j} = KC \quad (3.14)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = C x_{ij} \quad (i, j) \in A' \quad (3.15)$$

$$\sum_{i \in V'} (x_{ij} + x_{ji}) = 2 \quad \forall i \in V' \setminus \{0, n + 1\} \quad (3.16)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad (i, j) \in A' \quad (3.17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in A' \quad (3.18)$$

Ограничења (3.11) обезбеђују да је разлика између суме променљивих протока терета везаних за долазак и одлазак сваког од корисника i једнака двострукој вредности захтева сваког од корисника. Вредности променљивих протока терета дефинисана су ограничењима (3.12, 3.13 и 3.14). Ограничење (3.15) даје однос између променљивих

протока терета, док је број посета сваком од корисника дефинисан ограничењем (3.16).

Модел партиционирања скупа (енгл. Set Partitioning) први пут су представили Balinski и Quandt (1964). Овај модел користи потенцијално експоненцијални број бинарних променљивих, од којих је свака променљива повезана са неком од изведених рута из скупа свих рута $\Psi = \{H_1, \dots, H_q\}$ где је $q = |\Psi|$. При томе свака рута H_j има трошак c_j , а бинарни коефицијент a_{ij} поприма вредност 1 уколико је корисник посећен, односно 0 у супротном. Бинарна променљива x_j (за $j = 1, \dots, q$) једнака је 1 ако и само ако је рута H_j део оптималног решења. Модел партиционирања скупа може се описати следећим релацијама:

$$\min \sum_{j=1}^q c_j x_j \quad (3.19)$$

$$\sum_{j=1}^q a_{ij} x_j = 1 \quad \forall i \in V' \setminus \{0\} \quad (3.20)$$

$$\sum_{j=1}^q x_j = K \quad (3.21)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j = 1, \dots, q \quad (3.22)$$

Ограничење (3.20) обезбеђује да сваки корисник буде посећен тачно једном у оптималном решењу, док ограничење (3.21) обезбеђује да решење има k рута. Овај модел је веома уопштен, али га је могуће лако проширити увођењем нових ограничења.

Постоји велики број развијених алгоритама који користе модел партиционирања скупа за решавање VRP-а. Један од првих алгоритама развијен је 1968. године (Rao and Zions, 1968) и он није нумерички тестиран. 1976. године развијен је метод који користи динамичко програмирање за генерисање рута (Foster and Rayan, 1976). Први потпуни алгоритам, заснован на методи партиционирања скупа, могао је да реши VRP са бројем корисника $15 \leq n \leq 25$ (Agarwal et al., 1989). Два најуспешнија алгоритма развијена су у релативно скорије време (Fukasawa et al., 2006; Baldacci et al., 2008). Овим алгоритмима могуће је успешно решити VRP са бројем корисника $37 \leq n \leq 121$. Ови резултати су тренутно најбољи могући који су постигнути коришћењем егзактних алгоритама.

3.1.1.2 Примена егзактних метода на решавање проблема рутирања возила у области управљања отпадом

Модели за решавање VRP, описани у претходном делу, могу се применити у било којој области где се врши дистрибуција или прикупљање робе. Једна од области је сакупљање и транспорт отпада у којој се применом представљених алгоритама тражи најкраћи пут који комунално возило треба да пређе а да притом сакупи отпад са свих предвиђених локација и транспортује га до места на коме се врши третман или одлагање.

Marianov и ReVelle (1996) су коришћењем линеарног оптимизационог модела извршили оптимизацију руте кретања возила за прикупљање опасног отпада. Модел који су развили имао је за циљ да се одреди рута са најнижим трошковима, али је као додатно ограничење уведена и најмања вероватноћа да дође до хаварије. Развијени алгоритам је линеаран и без потребних апроксимација. Пример линеарног модела са применом на прикупљање рециклабилног отпада може се пронаћи и у истраживању које су спровели Krikke et al. (2007) у Холандији. Развијен је линеарни оптимизациони модел у коме се прикупља отпад, најпре са локација које имају виши приоритет па затим са локација са нижим приоритетом, тако да трошкови буду минимални. Локације за прикупљање отпада подељене су у две групе: локације са којих отпад мора да се прикупи (енгл. *must*) и локације са којих би требало прикупити отпад (енгл. *can*).

Лоше стране егзактног приступа приказали су Simonetto и Borenstein (2007). Они су показали да коришћењем формулације која је добијена линеарним програмирањем не могу да добију добар резултат у прихватљивом прорачунском времену, па су стога упоредо развили и модел коришћењем хеуристичког приступа. Развијени модел примењен је у граду Porto Alegre у Бразилу.

3.1.2 Хеуристичке методе

Претходно описане егзактне методе решавања проблема увек крећу од математичког модела који је прецизно формулисан и који довољно добро одражава природу проблема који се решава. Проблеми за које је могуће наћи овакве моделе се називају *добро структурираним*. Међутим, већина реалних проблема су *слабо структурирани*, односно њихова структура може бити веома комплексна и са великим бројем ограничења, па је стога немогуће формирати прецизан математички модел који би у потпуности задовољио ову структуру. Практични проблеми такође могу да садрже и одређене елементе неодређености, неизвесности и субјективне процене. Поред тога, и код добро структурираних проблема се може десити, да због великих димензија проблема, егзактне методе не могу да нађу оптимално решење у разумном времену. Овакав је случај са проблемом рутирања возила.

Заједно са развојем рачунарске технологије и компјутерских наука, средином 60-тих година прошлог века, почеле су да се развијају тзв. *хеуристичке методе* или *хеуристике*, које покушавају да превазиђу претходно описане проблеме. Хеуристичке методе не користе класично формализоване математичке поступке засноване на

теорији и због тога њихова примена не гарантује налажење оптималног решења. Међутим, ове методе имплементирају различита здраворазумска правила која често имитирају процес људског мишљења и ослањају се на позитивно људско искуство и интуицију. Самим тим, интелигентно конципиране хеуристичке методе могу да обезбеде решења која су веома блиска оптималном решењу.

Термин „хеуристика“ води порекло од старогрчке речи „хеуристкеин“ што у преводу значи *наћи* или *открити*. Као општи појам, хеуристика се најчешће дефинише на следећи начин:

Хеуристика је техника која покушава да нађе нека „добра“ решења проблема (допустива решења која су довољно блиска његовом оптимуму) у оквиру разумног времена, при чему се не гарантује да ће нађена решења бити оптимална, нити се може одредити њихова блискост оптималном решењу (Крчевинац и сарадници, 2010).

При креирању хеуристичких метода за решавање појединачних проблема није неопходно поћи од прецизно дефинисаних математичких модела, нити од њима одговарајућих теоријских резултата који гарантују добијање оптималних решења или конвергенцију ка тим решењима. Ове методе дозвољавају да се на врло слободан начин, коришћењем здраворазумске логике, интуиције и претходне праксе у решавању проблема, формализују најразличитија интелигентна правила која, примењена у процесу налажења решења, могу обезбедити да она у просеку буду довољно блиска оптимуму. Другим речима, при формирању неке хеуристике треба тежити да се имплементирају таква правила која омогућују њено „добро“ *просечно понашање*.

Најважнија особина коју треба да поседују сви хеуристички алгоритми јесте да раде у разумном времену, тј. да буду рачунски ефикасни. Рачунска ефикасност неког алгоритма обично се мери укупним бројем „елементарних корака“ које треба у том алгоритму остварити да би се решио посматрани проблем. Укупан број елементарних корака неког алгоритма треба да буде мањи или једнак $Cf(n)$, где је C позитивна константа, а f нека реална функција. При томе алгоритам има рачунску сложеност $O(f(n))$. Уколико је $f(n)$ полином по n , тада се алгоритам назива *полиномијалним*, а у супротном он је *експоненцијалан*. Полиномијални алгоритми се сматрају рачунски ефикасним, док експоненцијални то не морају да буду. Код експоненцијалних алгоритама се врло често дешава да не могу у разумном времену да реше проблеме великих димензија. Стога, да би хеуристички алгоритми били ефикасни, треба да буду полиномијални.

Хеуристичке методе могу да се поделе у две главне групе: *класичне хеуристичке*, које су развијане у периоду од 1960. до 1990. године и *метахеуристичке* чији развој траје последњих 20 година. Већина стандардних конструктивних и унапређених процедура, које се данас користе, припадају првој групи. Простор истраживања ових метода је релативно ограничен али оне углавном дају квалитетна решења у разумном рачунском времену. Штавише, већина њих се може лако проширити додатним ограничењима која се јављају у реалним проблемима. Стога, ови алгоритми се још увек користе у комерцијалним пакетима. Метахеуристички алгоритми се могу применити на било који проблем комбинаторне оптимизације, без обзира на специфичност његове

структуре. Имају веома широку примену и популарност и могуће их је прилагодити различитим врстама проблема. Коришћењем ових метода добијају се знатно квалитетнија решења у односу на класичне хеуристичке методе, али се негативна страна тих решења огледа у знатно дужем времену потребном за прорачун.

3.1.2.1 Класичне хеуристичке методе

Класичне хеуристичке методе за решавање проблема рутирања возила могу се природно поделити у две групе: *конструктивне хеуристичке* (енгл. constructive) и *побољшане хеуристичке* (енгл. improvement) методе. Придев „класичне“ односи се на чињеницу да кораци унапређења ових метода иду силазно, односно из итерације у итерацију се претраживањем околине тренутног решења прелази на боље решење све док напредак постоји. Насупрот томе, метакхеуристичке методе дозвољавају и разматрање лошијих решења па чак и незадовољавајућих прелазних решења. Уобичајено је да се хеуристичке методе тестирају на познатим примерима (Christofides et al., 1979; Golden et al., 1977). Пошто оптимална решења за ове примере нису позната, поређење резултата се врши у односу на најбоље резултате добијене коришћењем метакхеуристичких метода.

Конструктивне хеуристичке генеришу само једно допустиво решење проблема које, применом одговарајућих интелигентних правила, треба да буде блиско оптимуму. Ово решење се постепено гради, све време водећи рачуна о цени самог решења, али не постоји фаза унапређења решења. При томе се могу користити два принципа:

- принцип „похлепности“ (енгл. greedy) код кога се у свакој итерацији од тренутно могућих избора бира онај који је „најбољи“ по неком локалном критеријуму,
- принцип „гледања унапред“ који у свакој итерацији међу тренутно могућим препознаје оне који могу да доведу до формирања лошег крајњег решења, па се зато овакви избори избегавају.

Најпознатија конструктивна хеуристичка метода је „Clarke and Wright“ метода (Clarke and Wright, 1964) позната као *алгоритам уштеде*. Ова метода је лака за описивање и имплементацију и гарантује разумно добра решења. Алгоритам започиње од иницијалног решења где свака рута има само складиште и једног корисника $(0, i, 0)$ ($i = 1, \dots, n$). У свакој итерацији алгоритам покушава да сједини две руте; руту која се завршава код i -тог корисника са руту која почиње код j -тог корисника према критеријуму максималне уштеде која износи: $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$. Процес стаје оног тренутка када сједињавање рута више није могуће. Број возила који се користи представља излазни податак из алгоритма. Трошкови возила се могу лако убацивати додавањем константе на сваку цену лука. Такође је могуће користити алгоритам и са унапред задатим бројем возила.

Постоји више варијанти алгоритма уштеде, развијених током времена. Неким од ових алгоритама постигнуто је смањење времена прорачуна (Nelson et al., 1985), оптимизовано спајање рута према вредностима које доприносе уштеди (Altinkemer and Gavish, 1991; Wark and Holt, 1994) или је дефиниција уштеда учињена флексибилнијом (Golden et al., 1977). Обзиром на то да се ови алгоритми нису

показали као најпрецизнији у одређивању оптималног решења (у тестовима просечно одступање износи око 7% од оптималног), њиховој популарности доприноси то што су веома брзи и једноставни за имплементацију.

Примену Clarke and Wright методе у управљању отпадом и одређивању најкраћих рута комуналних возила могуће је пронаћи у радовима чији су аутори Beltrami и Bodin (1974), Hansmann и Zimmermann (2009) као и De Meulemeester et al. (1997).

Друга веома важна класа конструктивних хеуристичких метода је *петал хеуристика*. Ова метода се састоји од генерисања фамилије R' изводљивих рута, а затим оптимизовањем рута партиционирањем скупа (енгл. Set Partitioning). Добијени резултат у многоме зависи од квалитета генерисаних рута. Елементарна верзија ове хеуристичке методе је *sweeper* алгоритам који су дали Gillet и Miller (1974). Ова графичка метода се састоји у томе да се из складишта (енгл. depot) повуче права линија, а затим се са једне стране линије додају корисници све док се не попуни капацитет возила. Корисници се додају један по један у руту, а први корисник је најближи повученој линији. Када додавање корисника постане немогуће, односно попуни се капацитет возила, онда се линија ротира око складишта и започиње се са новом рутом. Ова процедура гарантује да неће доћи до пресецања рута, али је веома застарела и не користи се. Новије процедуре за генерисање рута су више софистициране и у њима аутори дозвољавају да дође до пресецања рута (Foster and Rayan, 1976; Renauld et al., 1996). Просечно одступање на тестовима у односу на алгоритме који дају најбоље резултате износи 2,38%.

Метода двофазне декомпозиције такође спада у конструктивне хеуристичке методе. Ову методу су представили Fisher и Jaikumar (1981). У првој фази, позиционира се једна полазна тачка (енгл. seed) у региону где би свака рута требало да буде и формирају се групе корисника (енгл. clusters) према решењу GAP (Generalized Assignment Problem), такве да је сума растојања између корисника и изабране тачке минимална, уз поштовање ограничења о капацитету возила. У другом кораку се за сваку групу корисника решава посебно TSP. Постоје многи проблеми који се решавају коришћењем овог приступа. Baker и Sheasby (1999) су описали одређене процедуре за одређивање полазне тачке, од које у многоме зависи тачност решења.

Arribas et al. (2009) су развили методологију за оптимизацију постојећих рута прикупљања отпада и одређивање оптималне величине возног парка применом методе двофазне декомпозиције. Методологија је примењена у граду Сантиаго у Чилеу. У првој фази оптимизације формиран су кластери локација за прикупљање отпада а у другој је извршено рутирање возила.

Одређивање минималног броја возила и најкраћег времена потребног за прикупљање отпада јављају се у литератури као главни циљ решавања проблема рутирања возила. Међутим, компактност рута и њихова међусобна избалансираност су веома важни у практичној примени. Kim et al., (2006) су применом алгоритма двофазне композиције вршили унапређење компактности и избалансираности рута комуналних возила.

Simonetto и Borenstein (2007) су развили систем за подршку одлучивању у области операционог планирања у управљању чврстим отпадом. Главни задатак овог система је био генерисање алтернатива у процесима распоређивања возила за раздвојено

сакупљање отпада и одређивање њихових рута, као и одређивање количина прикупљеног отпада који се шаље у свако постројење за сортирање отпада како би се смањили трошкови рада и количина отпада која се депонује. Систем се заснива на алгоритмима двофазне декомпозиције.

Побољшане хеуристичке методе служе за побољшање добијених решења VRP проблема и могуће је применити два типа алгоритама: *Intra-route* и *Inter-route* хеуристике. *Intra-route* хеуристике служе за пост-оптимизацију сваке оптимизоване руте, без комбиновања рута и мењања корисника у једној рути. *Inter-route* хеуристике се састоје од размене корисника између различитих рута: простим пребацивањем корисника из једне руте у другу, трансфером који укључује више рута или заменом корисника између две или више рута. Уопштени оквири описани у неколико радова обухватају највише примењиване *Inter-route* хеуристичке процедуре (Thompson and Psaraftis, 1993; Van Breedam, 1994; Kindervater and Savelsberg, 1997.)

Перформансе класичних напредних хеуристичких метода могу да се окарактеришу као добре, али не и као одличне. Најбољи резултати се добијају у комбинацији са метахеуристичким методама.

3.1.2.2 Метахеуристичке методе

У последњих 20 година метахеуристичке методе су, као посебна врста хеуристичких метода, значајно напредовале. Свака од метода омогућује истраживање околине решења око првог локалног минимума који се појављује и у све методе су уграђене процедуре позајмљене од класичних конструктивних и унапређених хеуристичких метода. Постоји велики број различитих метахеуристичких метода које се широко могу класификовати у три категорије (Gendreau et al., 2007):

- методе локалног претраживања,
- методе глобалног претраживања,
- механизми учења.

3.1.2.2.1 Методе локалног претраживања

Све метахеуристичке методе засноване на принципу локалног претраживања полазе од почетног произвољног решења x (које може бити неизводљиво) и крећу се за сваку итерацију n од решења x_n које има вредност $f(x_n)$ ка другом решењу у околини $N(x_n)$ решења x_n . У околини $N(x_n)$ налази се, према дефинисаном *правилу избора*, сусед који представља следеће решење x_{n+1} . Уколико се такав сусед не може наћи, претраживање стаје и за апроксимацију решења проблема узима се, међу генерисаним решењима, оно решење за које је вредност $f(x_n)$ најмања.

Ефикасност једне конкретне методе која се базира на локалном претраживању, односно вероватноћа да се у разумном времену добије довољно добро решење у многеме, пре свега, зависи од начина дефинисања појма „околина“, као и од тога како се формулише правило за избор следећег решења у свакој итерацији.

Класични примери методе локалног претраживања укључују *табу претраживање* (Glover, 1986), *симулирано каљење* (Kirkpatrick et al., 1983), *детерминистичко каљење*

(Dueck and Scheurer 1990; Dueck, 1993) и *методу променљивих околина* (Mladenović and Hansen, 1997).

Табу претраживање (енгл. Tabu search), као метода локалног претраживања, користи тзв. *адаптивну меморију*, односно памћење неких података о претходним фазама процеса претраживања, које затим утиче на избор следећих тачака у овом процесу. Идеју табу претраживања први пут је представио Glover (1986). Ова метода се темељи на спречавању кружења између локалних минимума коришћењем адаптивне меморије која забрањује помаке према решењима која су означени као „табу помаци“ и који воде ка већ пронађеним локалним минимумима. Најважнији део ове методологије је дефинисање одговарајуће адаптивне меморије, тј. начина формирања и ажурирања историје. У основној верзији користи се један тип меморије – тзв. *краткорочна меморија* (енгл. short term memory) код које се у свакој итерацији памте карактеристике тачке генерисане у непосредној прошлости. У меморију се бележе само атрибути пронађених решења који се желе заобићи (тзв. Табу листа), а свако решење које поседује запамћене атрибуте се одбацује у следећих n итерација. Изузетак је када је такво решење најбоље међу свим познатим решењима које поседују дати атрибут. Први пут овај принцип је уведен 1997. године (Cordeau et al., 1997), а сада је познат као *табу претрага заснована на атрибутима* (Derigs and Kaiser, 2007).

Коришћењем табу претраживања Angelelli и Speranza (¹2002) су развили метод за процену оперативних трошкова прикупљања отпада који су стриктно повезани са растојањем које комунална возила пређу у току самог процеса сакупљања отпада. Оптимизација и процена трошкова урађена је за три различита система сакупљања отпада на примеру две студије случаја. Исти аутори су проблем проширили увођењем више локација за истовар отпада (Angelelli and Speranza, ²2002).

Bianchessi и Righini (2005) су применили алгоритам заснован на табу претраживању у циљу смањења броја комуналних возила потребних за сакупљање отпада. У овом раду је приказано неколико алгоритама и извршено је поређење методе локалног претраживања и табу претраживања. При томе табу претраживање је дало боље резултате и краће време прорачуна (3-11%) за исти проблем.

Benjamin и Beasley (2010) су проблем распоређивања и рутирања комуналних возила проширили увођењем временских оквира (енгл. Time windows) за одређене локације са којих се сакупља отпад, као и паузе за одмор возача и радника. Коришћењем методе локалног претраживања, унапређиване су постојеће руте на два начина: померањем корисника и места одлагања у оквиру једне руте као и заменом места корисника у две различите руте. Поред алгоритма табу претраживања коришћен је и метод променљивих околина који ће бити објашњен у наставку.

Метода симулираног каљења (енгл. simulated annealing) је развијена по аналогiji са процесом каљења. Први алгоритми појавили су се 50-тих година прошлог века, а 80-тих година је показано да се основни принципи на којима се заснива симулација каљена могу применити на решавање оптимизационих проблема (Kirkpatrick et al., 1983). Алгоритам симулира процес контролисаног хлађења (каљења) до постизања кристализованог чврстог стања. Уколико се материјал хлади лагано, даје се атомима

довољно времена да постигну минимално енергетско стање формирајући правилну кристалну решетку. Ова метода допушта да се претрага настави у смеру суседних решења иако функција циља у том смеру даје лошије резултате.

У методи симулираног каљења у итерацији t се случајним избором бира решење x из околине $N(x_t)$ тренутног решења x_t . Уколико је $f(x) \leq f(x_t)$ тада x_{t+1} постаје нова вредност x , а у супротном $x_{t+1} = x$ са вероватноћом p_t и $x_{t+1} = x_t$ са вероватноћом $1 - p_t$. p_t представља опадајућу функцију са аргументима t и $f(x) - f(x_t)$.

Примењени алгоритам симулираног каљења у области управљања отпадом могуће је пронаћи у раду аутора Sahoo et al., (2005). Ови аутори су на основу алгоритма симулираног каљења развили софтвер под називом WasteRoute. Овај систем је имао за циљ смањење оперативних трошкова, пружање боље услуге корисницима и одређивање одговарајућих цена услуга. Поред тога, метода симулираног каљења користи се и у одређивању најповољније локације за депоновање отпада (Muttiah et al., 1996).

У методи *детерминистичког каљења* такође се бира x из околине $N(x_t)$ и развијене су две стандардне технике овог метахеуристичког приступа: *прихватање прага* (енгл. trashold accepting) (Dueck and Scheurer, 1990) и *кретање од решења до решења* (енгл. record to record travel) (Dueck, 1993). Код алгоритма првог типа $x_{t+1} = x$ уколико је $f(x) < f(x_t) + \theta_1$, где је θ_1 контролни параметар, у супротном $x_{t+1} = x_t$. У алгоритму другог $x_{t+1} = x$ уколико је $f(x) \leq \theta_2 f(x^*)$ где је θ_2 контролни параметар тек нешто мало већи од броја 1, а x^* је најбоље познато решење. У супротном, $x_{t+1} = x_t$.

Метода променљивих околина (енгл. Variable neighbourhood search) спада у једну од најновијих метахеуристичких методологија развијеној 90-тих година прошлог века (Mladenovic and Hensen, 1997). Ова метода се базира на принципу локалног претраживања при чему се у свакој итерацији може, у циљу проналажења следеће тачке, вршити систематско реструктурирање околине тренутне тачке. Дакле, дефинише се неколико различитих структура (типова) околина. Претраживање почиње у задатој околини. Када се достигне локални минимум, прелази се у другу околину и претрага почиње од почетка све док се не добије решење x^* које представља најбоље познато решење у свим истраженим околинама.

Метода променљивих околина примењена је у случају унапређења сакупљања отпада у Источној Финској (Nuortio et al., 2006). У овој студији случаја, за два различита региона, приказано је да се трошкови значајно редукују коришћењем развијеног модела у поређењу са постојећом ситуацијом. У истраживању које је спроведено у Данској (Buhrkal et al., 2012) метода променљивих околина проширена је са још једним ограничењем – временским оквирима.

3.1.2.2 Методе глобалног претраживања

Генетски алгоритми представљају најпознатију методу глобалног претраживања (Holland, 1975). Ова метода решава проблеме опонашајући еволуцијске процесе у природи. На почетку се насумице бира популација у којој се у свакој следећој генерацији бирају потомци са „бољим“ циљним функцијама пошто се родитељи са лошијим вредностима циљне функције замењују својим „бољим“ потомцима. Сама

еволуција се одвија применом оператера који опонашају феномене операција над генима попут репродукције, укрштања, мутације.

Сви познати генетски алгоритми који су примењени на VRP су примењени у комбинацији са локалном претрагом и веома је уобичајено да се добијени потомци унапређују коришћењем локалне претраге (Prins, 2004; Nagata, 2007).

У литератури је могуће пронаћи велики број радова у којима је коришћењем генетских алгоритама вршена оптимизација сакупљања отпада, почев од пружања помоћи у вишекритеријумском одлучивању формирања процеса сакупљања отпада (Rubestein and Zandi, 1999; Yeomans et al., 2003), преко одређивања оптималне локације за претоварну станицу (Chang and Wei, 1998) до оптимизовања путања кретања комуналних возила и њихових распоређивања (Lin and Malasri, 1998; Viotti et al., 2003; Ombuki-Berman et al., 2007).

3.1.2.2.3 Механизми учења

Механизми учења (енгл. Learning Mechanism) укључују неуронске мреже и оптимизацију колонијом мрава.

Неуронске мреже представљају модел који је састављен од јединки неурона (процесних јединица) које су међусобно повезане тежинским везама (синапсама), попут неурона у људском мозгу. Показало се да неуронске мреже могу учити на темељу примера и „доносити“ опште концепте поступком угађања тежина веза. Неуронске мреже при решавању комбинаторних проблема први пут су примењене 1985. године (Hopfield and Tank, 1985).

Метода оптимизације колонијом мрава симулира понашање правих мрава у потрази за храном. Док се крећу тражећи храну, мрави за собом остављају траг испуштајући хормон феромон. Овај траг користе други мрави да би одредили најкраћи пут до хране. Феромон временом испарава, најјачи је на најкраћој путањи јер мрави враћајући се у мравињак најкраћим путем освежавају траг чешће него мрави који користе дужу питању. Јака концентрација феромона омогућава мравима да изаберу краћи пут и евентуално долази до формирања најкраћег пута. Аналогно природним мравима, у овим алгоритмима циљ је да се пронађе минимални пут између чворова графа.

Када се говори о коришћењу ове методе у процесу сакупљања отпада, треба напоменути да су Karadimas et al. (2005) развили стратегију за смањење укупног времена потребног да се сакупи отпад, док су Bautista et al. (2007) своје истраживање усмерили на смањење укупног пређеног пута.

3.2 Софтвери за решавање проблема рутирања возила

На основу математичких модела описаних у претходном тексту, развијен је велики број софтверских решења за проблеме рутирања возила. Сви софтвери се генерално деле у две категорије:

- системи за планирање путовања – ауторутери,
- системи за рутирање и распоређивање возила (енгл. Computerised Vehicle Routing and Scheduling – CVRS).

Ауторутери су на неки начин поједностављена верзија CVPS система. Основна сврха ових софтвера је да израчунају време путовања и пређени пут за индивидуална путовања као и да, у неким случајевима, израчунају трошкове путовања. Ови софтвери, при прорачуну идеалне путање возила, не узимају у обзир количине добара или робе које треба испоручити или прикупити од клијената, временске оквира, ограничења капацитета возила, као ни многа друга ограничења која се јављају у реалним транспортним проблемима које треба решити.

Велика предност ових софтвера је њихова ниска цена. Најчешће се користе у комбинацији са GPS пријемницима и дигиталним картама у уређајима за навигацију. Развојем технике, GPS пријемници су веома напредовали, што је поред ниске цене, омогућило њихову уградњу и у савремене мобилне телефоне. Самим тим, коришћење GPS технологија постала је масовна појава. Коришћењем дигиталних карата (најчешће Garmin, TomTom или iGO) могуће је пронаћи најкраћу или најбржу путању од тачке А до тачке Б на нивоу улица са кућним бројевима и уз детаљно навођење (енгл. turn by turn) најеконичније стићи на жељено одредиште. Међутим, овде се могућност примене ове врсте софтвера завршава. За потребе компанија које се баве транспортом и имају већи возни парк потребни су сложенији софтвери који пружају више могућности.

Системи за рутирање и распоређивање возила представљају софистицирани алат који пружа помоћ при одлучивању и организацији транспорта. Основни циљ система јесте креирање брзих и прецизних прорачуна путања возила за велики број захтева за доставом или прикупљањем.

Коришћењем система за рутирање и распоређивање возила остварују се вишеструке користи кроз смањени број пређених километара, смањену потрошњу горива, као и употребу мањег броја возила и возача за обављање истих задатака. Такође, значајно се утиче на смањење времена планирања и побољшање квалитета пружених услуга кориснику. Времена за преузимање и доставу робе, за већи број путања, постају предвидљивија. Смањује се прековремени рад запослених, као и потреба за изнајмљивањем простора. Коришћењем ових система постижу се значајна унапређења у целокупној ефикасности рада предузећа.

Компаније које се баве развојем софтвера такмиче се да израде што бољи софтвер и понуде што креативније решење. Иновација почиње проналажењем правог приступа

за решавање реалних проблема рутирања возила и овакви приступи се често разликују од стандардних формулација.

Данас се на тржишту може наћи доста софтверских решења усмерених ка проблемима рутирања и распоређивања возила. Најпознатије светске компаније које се баве развојем и дистрибуцијом софтвера овог типа, приказане су у табели 3.1.

Табела 3.1 Преглед компанија и софтвера за рутирање и распоређивање возила

| Компанија | Назив софтвера |
|-----------------------------------|--|
| Esri | ArcLogistics |
| Descartes System Group | Descartes Routing, Mobile & Telematics Suite |
| MJC2 | DISC |
| IBM | IBM ILOG Transportation Analyst |
| DNA Evolution GmbH | JOptAAS |
| Optrak Distribution Software Ltd. | Optrak Vehicle Routing Software |
| Paragon Software Systems Inc. | Paragon Routing and Scheduling Optimizer |
| Roadnet technologies | Roadnet Transportation Suite |
| RouteSolutions | StreetSync |
| TMW Systems Inc | TMW Appian Direct Route |
| MapMechanics | Truck Stop VRS |
| SAITECH Inc | WebStar 5.4 |

Када су у питању алгоритми на којима су засновани ови софтвери, компаније углавном тврде да су њихови производи засновани на алгоритмима које су саме компаније изградиле. Међутим, већина ових алгоритама обично укључује комбинацију линеарног програмирања и хеуристичких метода (као на пример извесна форма локалног претраживања). Компанија DNA Evolutions користи генетске алгоритме, док IBM користи комбинацију хеуристичких алгоритама уз укључивање ограничења (Patryka and Hall, 2012).

Већина компанија тврди да су њихови софтвери у могућности да реше практично сваки проблем независно од величине проблема, али са становишта рачунара који се користе, ограничења су брзина процесора или величина меморије. На данашњем нивоу развоја рачунарске технике, за неколико минута је могуће решити просечан проблем који се састоји од генерисања 50-так рута возила, уз око 1000 заустављања. Време за извршење прорачуна је веома битно код динамичког рутирања, нарочито у случајевима када је потребно врло често мењати параметре самих рута.

Све компаније које се баве рутирањем, за прорачун растојања и времена путовања, користе дигиталне мапе. Највише су у употреби NAVTEQ и TomTom (ISWA, 2014). За поједина подручја користе се и специјализоване мапе самог подручја, а компаније су у могућности и да изврше додатну дораду мапа или израду потпуно нових, наравно уз посебну надокнаду трошкова израде мапа. Од самог квалитета дигиталних мапа које се користе зависи и квалитет добијеног решења проблема.

Цена софтвера доста варира у зависности од произвођача и саме могућности софтвера. На коначну цену утиче број: а) симулираних возила, б) корисника система, ц) складишта, д) потрошача којима се допрема или од којих се прикупља роба. Поред тога, као што је већ поменуто, тренутна доступност дигиталних мапа може знатно да

увећа укупне трошкове. Просечна цена система за мониторинг и оптимизацију кретања комуналних возила креће се између 30.000 и 40.000 € за лиценцирани софтвер и опрему коју је потребно уградити у возила за возни парк од 20-25 возила. Поред ових трошкова, техничка подршка и годишње одржавање софтвера је на нивоу од неколико хиљада евра. И поред високих иницијалних трошкова, овакве инвестиције се веома исплате компанијама које се искључиво баве транспортом.

Када су у питању предузећа која се баве сакупљањем отпада, уградња оваквих система је изводљива, али је са економске стране мање исплатива. Конкретно за случај Србије, за већину поменутих софтвера, не постоје званични заступници произвођача или дистрибутера. Постојеће дигиталне мапе би морале бити дорађене, што опет захтева додатне трошкове. Са друге стране, олакшавајућа околност је да се комунална возила, током процеса сакупљања отпада, крећу углавном истим путањима, тако да нема потребе за динамичким рутирањем, односно свакодневним прорачуном нових путања кретања.

3.3 Географски информациони систем

Географски информациони систем (ГИС), као један од видова информационог система, почео је са развојем још седамдесетих година прошлог века, али потпуну употребу доживљава у последњих 20-так година, тако да се може рећи да представља релативно нову технологију. Ова технологија је широко примењена како у бројним научним дисциплинама, тако и у решавању свакодневних проблема. Међутим, дефинисати ГИС, а да се при томе обухвати читава ширина ове технологије, није једноставно, имајући у виду чињеницу да, како је која наука или дисциплина усвајала ГИС као алат за решавање специфичних проблема у свом домену, тако се технологија прилагођавала захтевима корисника (Марић, 2011). Могуће је пронаћи велики број различитих, углавном поједностављених, дефиниција, али највећи број дефиниција ГИС-а може се генерално сврстати у три групе: засноване на ГИС-у као средству за рад, засноване на базама података и дефиниције засноване на организацији.

Уколико се ГИС посматра као средство за рад он се може дефинисати као моћан скуп средстава за прикупљање, меморисање, претраживање по потреби, трансформације и приказивање просторних података из стварног света (Burrough, 1986). Такође се може дефинисати и као информациона технологија која меморише, анализира и приказује како просторне тако и непросторне податке (Parker, 1988).

Према дефиницији заснованој на базама података, ГИС представља систем база података у којем је већина података просторно индексирани и над којима се управља низом поступака са циљем да се одговори на упите о просторним ентитетима који се налазе у бази (Smith et al., 1987). ГИС је било који низ поступака заснованих на ручној или компјутерској обради који се при томе користи за меморисање и манипулацију географски референцираним подацима (Aronoff, 1989).

Уколико се ГИС посматра са становишта организације он представља аутоматизовани скуп функција које стручњацима обезбеђују напредне могућности меморисања,

претраживања, манипулације и приказивања географски лоцираних података (Ozemoj et al., 1981).

На основу претходно приказаних дефиниција може се уопштено узети да је главна намена географског информационог система чување, управљање, анализа и презентовање информација о простору. Пре настанка ГИС-а, за приказ просторних података коришћене су разне врсте аналогних папирних мапа. Сви атрибутни подаци обрађивани су најпре ручно, у виду списка и пописа, а касније у виду рачунарских база података. Са те стране, компоненте ГИС-а не представљају новину, али је начин на који се појединачне компоненте организују у јединствену и складно координирану целину управо једна од основних карактеристика географског информационог система.

3.3.1 Компоненте ГИС-а

Као што постоје различите дефиниције ГИС-а, на исти начин различити аутори другачије тумаче компоненте од којих се састоји Географски информациони систем. У литератури се најчешће истиче да ГИС чине следеће компоненте:

- хардвер,
- софтвер,
- људски ресурси, односно организациони садржај који обухвата обучене људе.

Међутим, поред поменутих компонената, неизоставну основу на којој се заснива ГИС представљају подаци (Lo et al., 2002).

3.3.1.1 ГИС хардвер

Под хардвером се подразумевају рачунари на којима функционише ГИС. Овде је обухваћен широк спектар рачунара, од централизованих сервера, до десктоп рачунара који функционишу независно или у оквиру неке локалне мреже. Поред тога, у последње време, упоредо са развојем паметних мобилних телефона и таблет рачунара, развија се и ГИС софтвер прилагођен овим уређајима. Осим рачунара, остале хардверске компоненте неопходне за функционисање ГИС-а могу се поделити у две групе: уређаје за унос података (табле за дигитализацију, скенери, GPS уређаји, итд.) и уређаје за преглед података (монитори, штампачи, плотери).

3.3.1.2 ГИС софтвер

ГИС софтверски пакети обезбеђују функције и алате потребне за унос и чување географских информација. Такође, обезбеђују алате за претрагу, вршење анализа и приказ ових података у форми различитих мапа или извештаја. Функције и алати су организовани кроз модуле чија је структура приказана на слици 3.1.



Слика 3.1 Софтверска архитектура у ГИС-у

Сваки ГИС софтвер мора да задовољи следеће услове: (а) да поседује просторну базу података; (б) да има механизам за повезивање атрибута и просторних података и (в) да има способност геопроецирања, односно, да може да манипулише и анализира просторне информације из базе података.

Број компанија које се баве развојем и дистрибуцијом ГИС софтвера на свету је велики. Преглед водећих светских компанија, заједно са називима софтверских пакета које су развили, дат је у табели 3.2 (DeMers, 2009).

Табела 3.2 Водећи произвођачи ГИС софтвера

| Компанија | Назив софтвера |
|---|---------------------|
| Environmental Systems Research Institute (ESRI) | ArcGIS |
| PitneyBowes MapInfo | MapInfo |
| Intergraph | GeoMedia |
| ClarkLab | Idrisi |
| Autodesk | AutoCAD |
| PCI Geomatics | Geomatica |
| Leica Geosystems | Erdas |
| Bentley Systems | MicroStation |
| GRASS GIS | Grass (open source) |

3.3.1.3 Људски ресурси

Велики број аутора књига о ГИС-у као најважнију компоненту ГИС-а наводе људске ресурсе – компоненту која омогућава да географски информациони систем функционише. За развој и примену ГИС-а неопходан је одређени ниво образовања. У почетку, ГИС је био резервисан само за стручњаке из ове области. Међутим, његовом комерцијализацијом прилагођаван је и корисницима са нижим нивоом знања потребног за коришћење расположивих апликација. Према томе, све кориснике ГИС-а је могуће сврстати у три категорије (Lo et al., 2002):

- основни корисници (енгл. Viewers) – најбројнији у људским ресурсима. Употреба ГИС од стране ове групе корисника своди се на преглед и претрагу географских база за референтним подацима,
- напредни корисници (енгл. General Users) су људи који користе ГИС за обављање делатности, обављање стручних услуга и доношење одлука. Овде су укључени менаџери, планери, научници, инжењери, предузетници, итд.,

- ГИС стручњаци (енгл. GIS specialists) обухватају групу људи која је задужена за креирање ГИС-а. Овде се подразумевају ГИС менаџери, администратори база података, аналитичари система, програмери, итд. Они су одговорни за одржавање географских база података и пружање техничке подршке другим двама категоријама корисника.

3.3.1.4 ГИС подаци

Подаци представљају најбитнију, врло често најскупљу, компоненту географског информационог система. Веома је битно нагласити да ГИС не представља само алат за мапирање, нити само занимљив начин за приказивање снимака из авиона или сателита. ГИС се састоји из база података у којима су географске форме (енгл. features) међусобно повезане, у складу са својим просторним распоредом. На тај начин, за сваки географски ентитет, у оквиру ГИС базе података, везане су следеће информације:

- идентитет (шта ентитет представља),
- локација (где се ентитет налази),
- однос са осталим ентитетима (у каквим је односима са свим осталим ентитетима, које су суседни ентитети, колика су растојања, итд).

Постоје два основна типа података који се користе у оквиру ГИС-а: просторни и непросторни подаци (атрибути). Просторни подаци чине основу и неопходан елемент сваке ГИС процедуре или апликације. Сваки просторни податак је геореференциран његовом локацијом на површини Земље. Ово значи да поседује тачно забележену локацију у дефинисаном референтном координатном систему и пројекцији. Са друге стране, непросторни подаци представљају описне информације (атрибуте) географских ентитета (текст, бројеви, називи, својства...) који се обично чувају у виду различитих табела (слика 3.2). Атрибутске табеле које садрже информације о карактеристикама објеката у реалном свету се користе на различите начине и у најразноврсније сврхе. У већини савремених софтверских ГИС решења се аутоматски придружују просторним подацима. Главна предност географског информационог система у односу на остале информационе системе се огледа у његовој способности да интегрише просторне и непросторне податке.

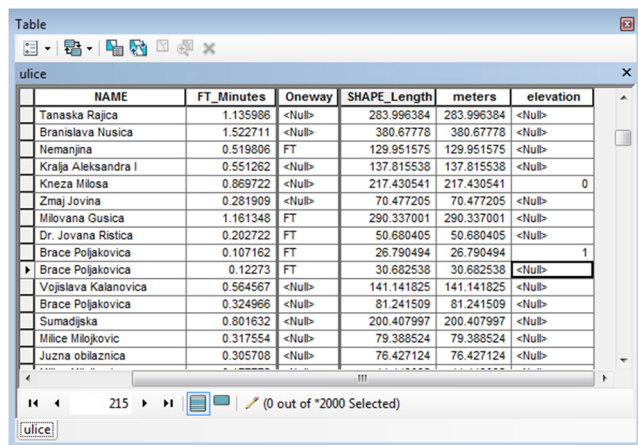
У процесу представљања простора постоје два различита модела (Burrough et al., 1986):

- модел континуалног поља,
- модел ентитета.

Први модел представља простор као континуално поље варијација без јасно изграђених граница. У овом приступу користе се основне ћелијске јединице које описују различите карактеристике географских појмова. Уз овај модел се везују растерске структуре података.

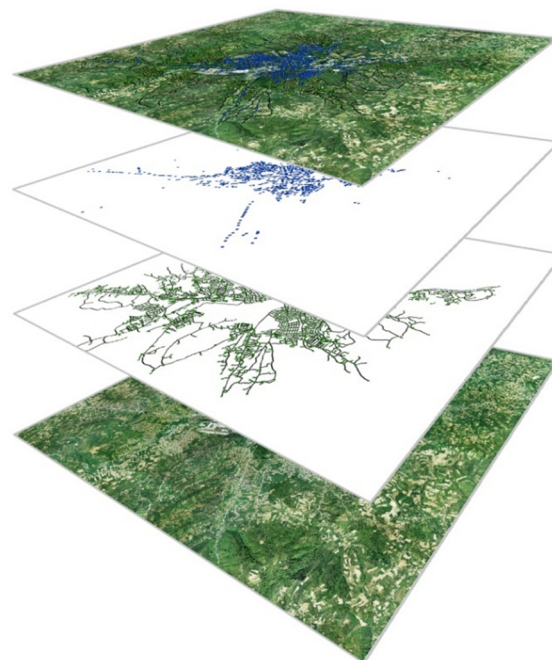
У другом моделу простор је представљен скупом ентитета (целина) који имају познату локацију. За представљање географских појмова користи се низ тачака, линија и

полигона. Сваки ентитет се карактерише просторним и/или непросторним атрибутима. Овај модел карактерише векторска структура података.



| NAME | FT_Minutes | Oneway | SHAPE_Length | meters | elevation |
|----------------------|------------|--------|--------------|------------|-----------|
| Tanaska Rajica | 1.135986 | <Null> | 283.996384 | 283.996384 | <Null> |
| Branislava Nusica | 1.522711 | <Null> | 380.67778 | 380.67778 | <Null> |
| Nemanjina | 0.519806 | FT | 129.951575 | 129.951575 | <Null> |
| Kralja Aleksandra I | 0.551262 | <Null> | 137.815538 | 137.815538 | <Null> |
| Kneza Milosa | 0.869722 | <Null> | 217.430541 | 217.430541 | <Null> |
| Zmaj Jovina | 0.281909 | <Null> | 70.477205 | 70.477205 | <Null> |
| Milovana Gusica | 1.161348 | FT | 290.337001 | 290.337001 | <Null> |
| Dr. Jovana Ristica | 0.202722 | FT | 50.680405 | 50.680405 | <Null> |
| Brace Pojakovica | 0.107162 | FT | 26.790494 | 26.790494 | <Null> |
| Brace Pojakovica | 0.12273 | FT | 30.682538 | 30.682538 | <Null> |
| Vojislava Kalanovica | 0.564567 | <Null> | 141.141825 | 141.141825 | <Null> |
| Brace Pojakovica | 0.324966 | <Null> | 81.241509 | 81.241509 | <Null> |
| Sumadjska | 0.801632 | <Null> | 200.407997 | 200.407997 | <Null> |
| Milice Mirkovic | 0.317554 | <Null> | 79.388524 | 79.388524 | <Null> |
| Juzna obilaznica | 0.305708 | <Null> | 76.427124 | 76.427124 | <Null> |

Слика 3.2 Атрибути у форми табле

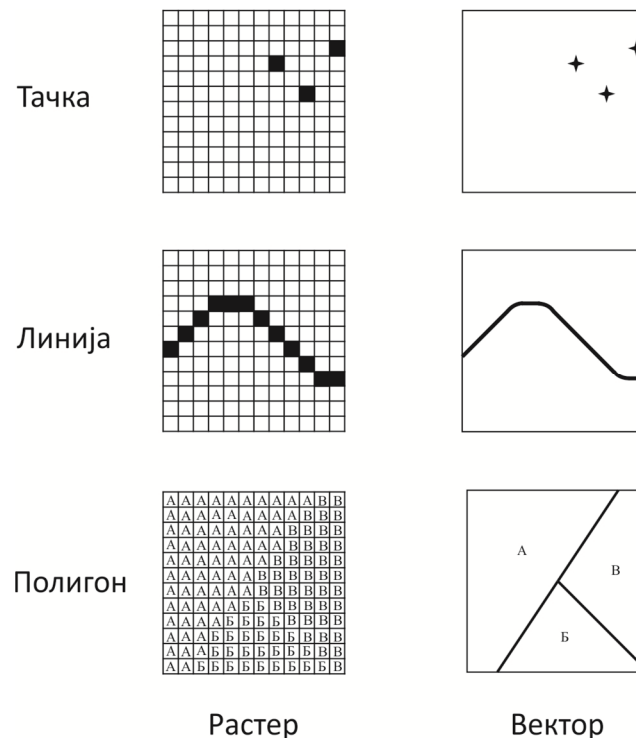


Слика 3.3 Комбиновање различитих лејера у ГИС-у

Начини на који ове две структуре података бележе информације веома су различите. У почетку, ГИС софтвери су користили искључиво растерску или векторску структуру података. Међутим, временом је већина софтвера прилагођена обема структурама, при чему корисник софтвера доноси одлуку коју врсту података ће користити. На слици 3.3 представљен је пример комбиновања растерских и векторских података кроз различите слојеве (лејере).

Растерски модел података има релативно једноставну структуру и користи се и у више области мимо ГИС-а. Графичке информације у растерској структури података представљене су серијом елемената – пиксела (енгл. pixel). Ове информације обично имају назив ћелије или група ћелија. Простор се, при томе, не бележи кроз индивидуалне карактеристике, већ се проучава кроз фину мрежу ћелија. Тачке се приказују као серије појединачних ћелија, линије као сетови повезаних ћелија, а полигони као континуални блокови ћелија наслоњени једни на друге. Овакав модел података најчешће се користи за чување ортофото или сателитских снимака. Код овог формата непросторна компонента налази се у оквиру саме растерске датотеке, дакле, не постоји издвојена датотека која повезује просторне и непросторне информације. Овакав начин везивања непросторних информација представља и главну слабост растерског формата. За једну ћелију могуће је узети само један податак (нешто постоји или не постоји) што умногоме смањује могућност управљања појединачним операцијама у оквиру растера. Поред тога, главни недостатак растерског формата јесте зависност прецизности од резолуције мреже ћелија (Meijerink, 1994). Са друге стране,

предности овог модела података огледају се у једноставној структури података, међусобном лако преклапању и просторној анализи, као и у чињеници да трошкови ове технологије нису велики.



Слика 3.4 Растерски и векторски приказ основних географских примитива

У векторском моделу података просторни објекти су описани са својим координатама, у одређеном координатном систему. У овој структури података сваки ентитет може да се представи комбинацијом геометријских примитива (тачка, линија, полигон), описних података (карактеристика објекта) и тополошких података.

Описни подаци се, у векторском моделу података, чувају у одвојеним базама података. За сваку тачку могуће је узети велики број описних података.

Као што је случај и са растерским моделом, и векторски модел има својих предности и мана. Главне предности векторског модела података су компактна структура података, веома прецизна графичка репрезентација независно од размере, могућности селектовања, модификовања и генерализовања графике и придружених атрибута. Недостаци овог модела огледају се у веома комплексној структури података, немогућности просторне анализе у оквиру одређених просторних јединица (као што су полигони) и у компаративно високим трошковима технологије и података (Meijerink, 1994).

3.3.2 Примена ГИС-а у области управљања отпадом

У последње време, Географски информациони систем је постао незаобилазан алат у анализи просторних информација. ГИС може да препозна, повеже и анализира просторне везе између различитих појава на мапи чиме се омогућава повезивање

различитих извора информација, обављање софистициране анализе, као и праћење резултата пројеката и стратегије развоја дугорочних циљева. Имајући у виду ове особине, не изненађује чињеница да је употреба ГИС-а веома распрострањена у великом броју области. Сходно томе, има и веома широку примену у области управљања отпадом, у коме се највише користи за одређивање оптималне локације за депонију, претоварну станицу или постројење за третман отпада као и за оптимизацију процеса сакупљања и транспорта отпада кроз проналажење оптималне најкраће путање кретања комуналних возила, смањење броја потребних возила, смањење укупног трајања руте, унапређење просторног распореда локација за прикупљање отпада, итд. Такође, као један од веома битних фактора у управљању отпадом, ГИС се користи за процену утицаја система за управљање чврстим отпадом на животну средину.

Избор погодне локације за санитарну депонију, претоварну станицу или постројење за третман отпада представља просторни проблем који се у последњих неколико година најчешће решава интегрисањем вишекритеријумске анализе и географског информационог система. Тако су Sener et al. (2006), коришћењем претходно поменуте технике, вршили истраживања са циљем да одреде оптималну локацију санитарне депоније на територији града Анкаре, Турска. У истој држави, само за град Трабзон, аутори Ersoy и Bulut (2009) развили су методологију за одређивање локације санитарне депоније у урбаним срединама које су у експанзији. Избор погодне локације за постројење за спаљивање отпада уз добијање енергије била је тема истраживања аутора Tavares et al. (2011).

Прегледом референтне литературе могуће је пронаћи велики број радова у којима је применом ГИС-а вршена оптимизација процеса сакупљања и транспорта отпада. При томе, велика важност придаје се смањењу укупне дужине пређеног пута возила које врши сакупљање и транспорт отпада, као једном од начина за смањење трошкова и постизање веће ефикасности. Lakshumi (2006) је представио резултате студије која се односила на град Chennai у Индији. Циљ истраживања је био да се одреде оптималне руте за сакупљање отпада и да се упореде трошкови транспорта између оптимизованих и постојећих рута. Коришћен је софтверски пакет ArcGis и на примеру једне руте евидентирана је уштеда у дужини путање прикупљања отпада од 41,5% у дневној смени и 44% у ноћној смени. Ghose et al. (2005) су применом развијеног оптимизационог модела у ГИС радном окружењу, који је заснован на параметрима као што су густина становника, стопа генерисаног отпада, мрежа и типови улица, врсте контејнера и возила, одређивали најефикасније путање за транспорт отпада до депоније. Развијени модел је коришћен као подршка одлучивању локалним властима за ефикасније управљање дневним операцијама транспорта чврстог отпада, равномерније оптерећење возила теретом, смањење потрошње горива и прављење распореда за раднике и возила.

Karadimas et al. (2007) су вршили упоредну оптимизацију рута прикупљања отпада у Атини коришћењем ГИС софтверског пакета ArcGIS и развијеног математичког модела заснованог на алгоритму колоније мравца. У оба случаја добијен је краћи пут којим возило може да се креће а да при томе опслужи сва места на којима су распоређени контејнери. Коришћењем ГИС-а уштеда у пређеном путу је износила 23,9%, док је коришћењем математичког модела предложени пут био краћи за 25,6% од постојећег.

Географски информациони систем је веома често коришћен за унапређење ефикасности прикупљања поједених фракција или врста отпада. Тако су Alagöz и Kocasoу (2008) развили систем за ефикасније сакупљање медицинског отпада из 401 клинике и 197 болница у Истамбулу, Турска. У овој студији приказано је да је постојећи систем веома неефикасан и скуп, па се стога јавила потреба за развијањем новог система који би ове проблеме решио. Коришћени су ГИС софтверски пакети MapInfo за мапирање и Roadnet за решавање оптимизационих проблема и формирање извештаја, за два различита сценарија – раздвојено сакупљање из клиника и болница, као и истовремено сакупљање из клиника и болница. Применом развијеног система трошкови прикупљања су знатно редуковани. Karadimas et al. (2007) су на примеру једног дела града Атине развили модел за прикупљање кабастог отпада (намештај, велики електрични уређаји, итд.) који не може да се прикупи стандардним комуналним возилима. Коришћен је софтверски пакет ArcGIS са модулом Network Analyst. ГИС се веома често користи и за унапређење процеса прикупљања рециклабилног отпада. Тако су Alvarez et al. (2008) у свом истраживању описали процес сакупљања отпадног папира и картона уз одређивање нових места за прикупљање ове врсте отпада и оптималних рута комуналних возила.

Велики број истраживања у области сакупљања и транспорта отпада фокусиран је на смањење укупног времена потребног за овај процес. Оптимизацијом рута кретања комуналних возила и смањењем укупног пређеног пута у највећем броју случајева се добија и уштеда у времену. Araydin и Gonullu (2007) су публиковали резултате истраживања на оптимизацији кретања комуналних возила у граду Трабзон у Турској. Коришћен је софтверски пакет RouteView Pro и у поређењу са постојећим системом, указано је да је оптимизацијом дошло до скраћивања путање кретања возила од 4 до 59% по рути и уштеди у времену од 11 до 65%, такође по рути. Исти аутори су развили модел за процену времена сакупљања отпада у зависности од густине насељености (Araydin and Gonullu, 2011). Arribas et al. (2009) су комбинацијом целобројног програмирања и ГИС алата развили методологију за смањење укупног времена као и оперативних трошкова прикупљања отпада у граду Santiago у Чилеу.

Tavares et al. (2009) су у креирање оптималне руте укључили, поред географске ширине и дужине, надморску висину чиме су остварени услови за стварање 3D ГИС-а који у прорачун укључује и рељеф увођењем треће координате. На овај начин, поред дужине пређеног пута, као фактор који утиче на укупну потрошњу горива појављује се и нагиб пута. Добијене су две различите оптималне путање; по критеријуму најкраћег пута и по критеријуму најмање потрошње горива. Иако прелази пут који је за 1,8% дужи од најкраћег, комунално возило које се креће најекономичнијом рутом, услед различитог нагиба пута, троши 8% мање горива.

Број возила и радника које је потребно ангажовати за процес сакупљања и транспорта отпада у великој мери утиче на укупне трошкове. Carić (2006) је публиковао добијене резултате истраживања за град Загреб у Хрватској. Истраживања вршена комбинацијом развијеног нумеричког поступка и ГИС-а указују на могућност смањивања возила са 7 на 6 и уштеду у пређеном путу од 30% у односу на постојећи систем рута. Arribas et al. (2009) су развили методологију која, поред оптимизације путања кретања возила, одређује адекватну величину возног парка комуналних возила и врши упоредну анализу трошкова постојећег и унапређеног система.

Правилан просторни распоред локација за прикупљање отпада као, и број потребних контејнера у складу са демографијом умногоне могу да учине систем за управљање отпадом ефикаснијим. Имајући у виду чињеницу да ГИС на првом месту ради са просторним подацима, коришћење ГИС-а као алата за помоћ у решавању ових проблема је неопходно. Оптималан просторни распоред и број контејнера били су фокус истраживања у Атини (Karadimas et al., 2008) у коме је коришћен софтверски пакет ArcGIS за процесирање просторних база података дизајнираних у ГИС радном окружењу. Према прорачуну, за део града који је анализиран, број контејнера је редукован са 162 на 112 што представља смањење од 30% и велику уштеду у енергетским расходима за прикупљање отпада. Истраживања на тему просторног распореда локација за прикупљање отпада вршена су и у Шпанији у граду Chuarrigana de la Vera (Zamorano et al., 2009). Полазна претпоставка, у овом истраживању, била је да место на коме се налазе контејнери за прикупљање отпада не сме бити удаљено више од 75 метара од корисника. Користећи могућности ГИС-а извршена је нова, ефикаснија, прерасподела места прикупљања. Након тога су оптимизоване путање кретања комуналних возила при чему је добијена уштеда од скоро 40%.

Оптимална фреквенца пражњења контејнера утиче на ефикасност сакупљања отпада. У случају када је фреквенција пражњења контејнера мања од оптималне контејнери су препуњени и долази до нагомилавања отпада поред контејнера што ствара нехигијенски изглед и лошу слику о насељу, тако да сав напор око управљања комуналним отпадом може доћи у други план. Са друге стране, уколико је фреквенца пражњења већа од потребне, долази до пражњења контејнера који нису довољно напуњени, непотребно увећавајући трошкове. Стога је веома често напор истраживача усмерен ка предвиђању количина генерисаног отпада и истраживању оптималне фреквенце пражњења контејнера, у чему ГИС има веома битну улогу (Karadimas and Loumos, 2008; Dyson and Chang, 2005; Vijay et al., 2005). У новије време, веома често се у мониторинг процеса сакупљања отпада укључују најновије технологије. У литератури је могуће пронаћи све већи број истраживања у којима се, поред раније описаних система за праћење комуналних возила, испитују предности система за мониторинг канти и контејнера за привремено складиштење отпада. Уградња сензора у контејнере којима се прати ниво њихове попуњености, а затим врши оптимизација прикупљања отпада коришћењем ГИС-а представља један од начина да се смање укупни трошкови (Vicentini et al., 2009; Rovetta et al., 2009). Уместо сензора могуће је користити камере и интеграцијом комуникационих технологија као што су RFID (Radio Frequency Identification), GPS, GPRS и ГИС постићи жељене резултате (Hannan et al., 2011; Arebey et al., 2010; Hannan et al., 2013; Rada et al., 2013).

3.4 Систем за мониторинг кретања комуналних возила

За потпуну контролу процеса сакупљања и транспорта отпада потребно је имати увид у историју кретања комуналних возила. Најзаступљенији вид праћења возила, у последње време, је праћење путем сателита. Овакав вид праћења возила је веома учестао у већини фирми која има комерцијалисте на терену, у такси возилима и фирмама чија је основна делатност превоз робе и путника. Међутим, праћење возила

путем сателита се показало као неопходно и веома корисно и у случају комуналних предузећа.

За функционисање овог система потребан је хардверски део који се уграђује у возило и развијен софтвер који има могућност да добијене податке прими, обради и прикаже на начин који највише одговара кориснику система. У наставку текста биће приказан начин функционисања овог система и предности које се добијају његовим коришћењем.

3.4.1 Хардвер и софтвер за сателитско праћење возила

Као што је у претходном делу наглашено, за правилно функционисање система за сателитско праћење возила неопходно је да постоји хардверски део система који прикупља податке и развијени софтвер који је у стању да добијене податке прими, обради и прикаже на начин какав захтева корисник система. Систем за праћење и контролу возила користи систем за глобално позиционирање преко сателита (GPS), GSM мрежу (GPRS) и интернет.



Слика 3.5 Шематски приказ система за мониторинг кретања возила

Основни хардверски елемент система представља GPS/GPRS модемска јединица, односно уређај који се инсталира у возило које се прати. Његове главне компоненте су GPS модул који прима податке од сателита о тренутној позицији, брзини и смеру кретања возила, као и модул за пренос података путем GSM мреже. У зависности од околности и намене самог система, остале хардверске компоненте могу бити екстерна GPS антена, различите врсте сензора (температурни, сензори притиска, влажности ваздуха, итд.), протокомери, аналогни уређаји, итд.

Шематски приказ функционисања система дат је на слици 3.5. Након што GPS модул прими потребне податке са сателита, прикупљени подаци заједно са подацима који се прате помоћу сензора, се компримују и, у одговарајућим временским интервалима које обично дефинише сам корисник, шаљу путем GSM мреже и интернета до сервера на коме се подаци складиште.

На серверу је обично инсталиран серверски програм који има задатак да примљене податке обради и упише у одговарајућу базу података. Поред података које прима са уређаја инсталираног у возило, сервер прима и команде од корисника и прослеђује уређају. На тај начин остварена је двосмерна комуникација између корисника система и возила.

Кориснички софтвер је обично део интегрисаног система за праћење возила. У зависности од намене самог система, његове комплексности, цене и захтева самих клијената произвођачи развијају web апликације или клијентске десктоп апликације. Коришћењем развијених софтвера могуће је пратити тренутну позицију возила на мапи града. Мапе које се користе такође зависе од произвођача софтвера, па се тако код једноставнијих система возила прате на Google мапи док сложенија и скупља решења подразумевају специјално дизајниране дигиталне мапе градова. Поред приказа тренутне позиције возила на мапи, односно плану града, софтвери обично нуде и многе друге могућности у виду формирања извештаја као и задавања команди уређају у возилу.

3.4.2 Главне карактеристике и предности коришћења система за мониторинг возила

Једна од основних могућности система за мониторинг возила је праћење у реалном времену са приказом на мапи града. Корисник може надгледати своја возила, самим тим их рационалније користити, смањити трошкове и могућност злоупотребе. У случају возила комуналног предузећа праћењем возила може се утврдити да ли се возило кретало по унапред дефинисаној рути и на тај начин се у потпуности искључује самовоља возача при избору путање кретања.

Такође, већина софтвера за праћење возила има могућност приказа историје кретања возила са симулацијом. Возила се не морају надгледати стално, постоји могућност да се накнадно види историја кретања са симулацијом и пређеном километражом. На серверу се обично чувају подаци за свако возило изван период у оквиру кога корисник може да им приступи или их преузме и сними на свој рачунар и трајно их сачува.

У зависности од комплексности развијеног софтвера, у појединим случајевима постоји могућност да се на мапу града унесу карактеристичне тачке (локације клијената) и да се дефинише радијус у метрима од задатих тачака, а затим да се, у извештају који кориснички софтвер даје, провери да ли је возило прошло поред одређеног клијента у дефинисано време и да ли је испоштован унапред утврђен распоред обиласка клијената. У случају комуналног предузећа, карактеристичне локације које се уносе су локације на којима су распоређени контејнери – места прикупљања.

Као што је у претходном делу поменуто, у хардверске компоненте система спадају и различити сензори који служе за праћење жељених параметара у возилу. Преносом података са сензора до корисника, који надгледа кретање возила, у сваком тренутку може да види да ли је мотор возила упаљен, да ли су отворена врата, итд. Код возила новије генерације обично се уређај повезује на путни рачунар. Сви подаци које бележи путни рачунар возила (број обртаја мотора, тренутна потрошња горива, просечна потрошња...) могу се, путем интернета, одмах пренети до корисника на чијем рачунару је инсталиран софтвер за мониторинг возила. Поред праћења путање возила, праћењем ових параметара и благовременом реакцијом у случају лошег опхођења према возилу (честа нагла убрзања и кочења, превелика брзина, дужи рад мотора при високим обртајима...), може се продужити радни век возила и повећати интервал између два сервисирања.

У случајевима када је GSM мрежа недоступна или преоптерећена, код већине произвођача, уређај снима позиције возила у интерну меморију и када мрежа поново буде доступна, сви подаци се шаљу из меморије чиме се осигурава да уређај увек може да прикаже историју кретања возила.

Сложенији софтвери за мониторинг кретања возила обично нуде и могућност формирања извештаја. Извештај се формира на захтев корисника и може да садржи различите податке почевши од пређеног пута за једно или више возила у одређеном временском периоду, податке о укупном времену путовања и мировања возила, броја опслужених клијената (места прикупљања), просечној брзини возила, итд. Поред тога извештај може да садржи и податке о кршењу унапред дефинисаних правила као што су ограничење брзине, кретање возила ван предвиђене руте или реона града као и изостављање одређених клијената из дефинисане руте. Осим формирања извештаја на захтев корисника, када возило прекрши одређено правило уређај који је инсталиран у возило може истог тренутка да пошаље смс поруку оператеру задуженом за надзор возила и обавести га да се неко возило користи на начин који није предвиђен.

У последње време, са развојем паметних мобилних телефона и њиховом масовном употребом јавила се потреба и за развој апликација за телефоне које ће бити саставни део система за мониторинг кретања возила. Развијена и инсталирана апликација која подржава део могућности софтвера за мониторинг кретања возила обезбеђује већу мобилност оператера који је задужен за праћење возила. Оператер, или руководилац у предузећу чија се возила прате, не мора да буде увек поред рачунара већ може и на свом мобилном телефону да прати кретање возила, уочи евентуалне неправилности и благовремено да реагује.

4. Стање чврстог отпада на нивоу града Крагујевца

4.1 Управљање отпадом у Крагујевцу

Крагујевац је град смештен у средишњем делу Републике Србије и представља административни, привредни, образовни, културни и здравствени центар централне Србије и седиште шумадијског округа. Налази се на 44°22' северне географске ширине и 20°56' источне географске дужине на надморској висини од 185 до 220 м и покрива површину од 835 км².

Према попису становништва из 2011. године, на широј територији града Крагујевца (општине) живи 179.417 становника од чега 150.835 у самом градском насељу, што га чини четвртим градом по величини у Србији.

Управљање отпадом на подручју града Крагујевца је поверено Јавном комуналном предузећу „Чистоћа“. Предузеће је основано 1954. године, када почиње прикупљање отпада из ужег центра града. Осамдесетих година прошлог века приступа се сакупљању отпада из приградских месних заједница и тиме се знатно увећава обим услуга. 2008. године почиње процес сакупљања и балирања старог папира, док је 2010. године, у складу са Законом о управљању отпадом (Службени гласник Републике Србије, 2009) склопљен уговор са организацијом Секопак којој се, након примарне селекције, дистрибуира рециклабилни отпад. Од секундарних сировина сакупљају се папир, картон, ПЕТ, пластика, лименке, гуме и тетра пак.

Поред сакупљања, транспорта и одлагања комуналног отпада и секундарних сировина, под делатност предузећа спадају:

- сакупљање и уклањање отпадака са јавних површина,
- чишћење и прање улица, стаза и паркиралишта,
- услуге прихватилишта за напуштене животиње – зоохигијена,
- димничарске услуге.

До недавно су организованим прикупљањем отпада биле обухваћене само градске месне заједнице. Међутим, од 2011. године и сеоске месне заједнице се укључују у систем организованог сакупљања отпада по планираној динамици ЈКП „Чистоћа“. У веома блиској будућности у плану је да 100% домаћинстава на територији општине Крагујевац буду корисници услуга одношења отпада, што је редак случај у Републици Србији (према Националној стратегији до 2014. године пројектовани циљ износи 75%).

Концепција управљања отпадом мора се прилагодити различитим деловима општине, од апсолутно урбаних до руралних целина па се разликују и модели сакупљања али и опрема и возила која се користе. За сакупљање отпада ЈКП „Чистоћа“ користи сопствену оперативу и опрему, коју чине возила за транспорт отпада, машине за рад на депонији и опрема за сакупљање.

Возни парк који је на располагању за сакупљање и транспорт отпада чини 20 аутосмеђара, четири подизача и четири теретна возила - кипера. Поред тога, за обављање осталих делатности предузеће располаже са шест цистерни за прање улица и две чистилице.

У Табели 4.1 дат је преглед аутосмеђара којима располаже ЈКП „Чистоћа“. Из табеле се може видети да се ради о возилима различитих произвођача, модела, запремине и носивости.

Табела 4.1 Возни парк аутосмеђара ЈКП „Чистоћа“

| Редни бр. | Тип возила | Тип надградње | Година производње | Носивост | |
|-----------|------------|---------------|-------------------|----------------|-------|
| | | | | m ³ | t |
| 1 | FAP 16-20 | ФАУН-РОТО | 1990. | 16 | 4,94 |
| 2 | MB 17-22 | ФАУН-РОТО | 1992. | 16 | 6,80 |
| 3 | FAP 22-28 | ВАР-ПРЕСА | 1991. | 19 | 13,00 |
| 4 | MAN 24-242 | РОТ. ПЛОЧА | 1991. | 19 | 9,63 |
| 5 | MERC 29-24 | РОТ. ПРЕСА | 1993. | 19 | 13,35 |
| 6 | MERC 16-17 | РОТ. ПРЕСА | 1991. | 16 | 5,60 |
| 7 | MAN 18-192 | РОТ. ПЛОЧА | 1993. | 16 | 6,60 |
| 8 | MAN 22-240 | РОТ. ПЛОЧА | 1987. | 19 | 8,60 |
| 9 | FAP 19-21 | РОТ. ПЛОЧА | 2003. | 15 | 8,00 |
| 10 | FAP 19-21 | РОТ. ПЛОЧА | 2003. | 15 | 6,68 |
| 11 | ZETA 85.14 | РОТ. ПЛОЧА | 2006. | 5 | 2,71 |
| 12 | MERC 18-23 | РОТ. ПЛОЧА | 2006. | 16 | 5,94 |
| 13 | MERC 18-23 | РОТ. ПЛОЧА | 2007. | 16 | 5,50 |
| 14 | RENAULT | РОТ. ПЛОЧА | 1996. | 16 | 7,20 |
| 15 | MERC 25.27 | РОТ. ПЛОЧА | 1996. | 19 | 10,00 |
| 16 | MERC 18.23 | РОТ. ПЛОЧА | 2007. | 16 | 5,95 |
| 17 | MAN 26-293 | РОТ. ПЛОЧА | 1996. | 19 | 11,40 |
| 18 | RENAULT | РОТ. ПЛОЧА | 1999. | 19 | 11,40 |
| 19 | RENAULT | РОТ. ПЛОЧА | 1999. | 19 | 11,40 |
| 20 | EURO ZETA | РОТ. ПЛОЧА | 2009. | 8 | 5,15 |

Постојећа механизација показала се као недовољна, неефикасна и врло често неисправна. Највећи недостатак возног парка представља старост возила која у просеку износи 15 година, док је оптимални радни век седам година. Услед недостатка средстава за куповину нових возила, са овим проблемом среће се већина комуналних предузећа у Србији.

Механизација која је задужена за рад на депонији, такође је недовољна и веома често неисправна. Механизацију чине два трактора гусеничара, утоваривач и компактор који је тренутно ван функције.

Опремену за сакупљање отпада чине контејнери различитих запремина (1,1 m³, 5 m³ и 7 m³), канте запремине 140 литара и кесе. Преглед опреме која се користи за сакупљање отпада дат је у табели 4.2.

Табела 4.2 Опрема за сакупљање отпада

| Опрема за сакупљање отпада | Број комада опреме |
|--|---|
| Контејнер запремине 5 m ³ | 115 |
| Контејнер запремине 7 m ³ | 15 |
| Контејнер запремине 1,1 m ³ | 3.500 |
| Канта запремине 140 литара | *4.500 |
| Контејнер за секундарне сировине | 770 |
| Кесе (на месечном нивоу) | - 12.000 за комунални отпад - 12.000 за ПЕТ амбалажу |

*Канте су у власништву корисника услуга ЈКП „Чистоћа“

У ужем центру града, као и у деловима града где преовлађује колективни начин становања (у стамбеним зградама) за привремено складиштење отпада се користе контејнери запремине 1.1 m³. Обзиром да је у граду Крагујевцу успостављен принцип примарне селекције отпада, у граду постоји 20 формираних сакупљачких станица или „рециклажних острва“ на којима се налазе контејнери за одвојено сакупљање рециклабилног отпада. Углавном се састоје од 3-5 жичаних контејнера у којима се сакупљају папир, ПЕТ амбалажа, стакло и метал. Поред „рециклажних острва“ на неким локацијама се поред контејнера за сакупљање комуналног отпада налазе и контејнери за секундарне сировине.

У зонама индивидуалног становања, која обухвата велики део града на ободу централне зоне, као и у приградским насељима, отпад се сакупља у контејнерском систему или путем канти (140 l). Канте су власништво корисника услуга ЈКП „Чистоћа“. И у овим деловима града постоје „рециклажна острва“, односно местимично постављени контејнери за сакупљање секундарних сировина.

У сеоским срединама домаћинствима се деле кесе у којима се скупља отпад – црне кесе за комунални отпад и плаве кесе за ПЕТ амбалажу.

Контејнери од 5 и 7 m³ користе се за различите намене – од сакупљања секундарних сировина (папир и стакло) до грађевинског отпада. Такође, одређени број ових контејнера налази се и у индустријским и привредним објектима.

Према усвојеном Локалном плану управљања отпадом града Крагујевца (2012), на основу предвиђања количине отпада у наредних десет година, број контејнера запремине 1,1 m³ за сакупљање комуналног отпада је довољан за сакупљање комуналног отпада из урбане зоне града. Број жичаних контејнера за секундарне сировине требало би незнатно повећати, док се предлаже набавка већег броја контејнера запремине 5 m³ који би се користили за сакупљање папира, како у градској зони, тако и у селима. Такође, неопходно је обезбедити још око 9.500 канти од 140 литара за домаћинства која сада отпад привремено складиште у кесама.

Након сакупљања, сав комунални отпад се транспортује на главну градску депонију, познатију као депонија у Јовановцу. Отпад се трајно одлаже, без икаквог третмана. Депонија је у употреби од 1966. године, и у власништву је локалне самоуправе, односно града Крагујевца. Налази се на 3 km од центра града, а од најближег насеља удаљена је 1,2 km.

Депонија је површинског типа, простире се на 15 хектара површине и просечна висина износи преко 15 метара. Депонија није ограђена, осим са предње стране где се налази рампа, пријавница и колска вага на којој се мери маса депонованог отпада. Осим ЈКП „Чистоћа“, депонију могу да користе и друга правна и приватна лица, уз плаћање накнаде за депоновање.

Обзиром на дуги низ година који је депонија у употреби, као и количину депонованог отпада, депонија представља један од највећих еколошких проблема у граду. Капацитети депоније су скоро сасвим попуњени и предвиђа се да је депонију могуће користити још највише две године. Челници ЈКП „Чистоћа“, у сарадњи са локалним властима, покушавају да реше проблем нове локације за депоновање отпада. Урађен је и план отварања санитарне депоније Витлиште, која се налази у природно формираној ували на 9 km од центра града. Међутим, до сада је само добијено одобрење за локацију, а радови још нису започети.

Депонија у Јовановцу је веома богата депонијским гасом. У тело депоније постављено је 17 биотрнова, од којих је тренутно активно само четири. Процењује се да би депонијски гас могао да се искористи за снабдевање око 250 домаћинстава електричном и топлотном енергијом (Милашиновић и сар., 2012).

Из претходно изложеног може се увидети да се као главни проблеми, у области управљања отпадом у Крагујевцу, појављују недостатак простора за депоновање отпада и решавање проблема рекултивације и затварања постојеће депоније. Поред тога велики проблем је и застарели возни парк и неефикасан начин сакупљања отпада, као и мали проценат издвајања секундарних сировина. Као што је раније поменуто, покривеност становништва планским сакупљањем отпада је доста већа од просечне у Србији.

Као решење ових проблема потребно је створити услове за отварање нове санитарне депоније (било самостално или у склопу региона), обновити возни парк и успоставити ефикасније шеме сакупљања, како комуналног тако и рециклабилног отпада.

4.2 Састав комуналног отпада

4.2.1 Методологија за одређивање састава отпада

Методологију за одређивање састава и количине отпада је настала у сарадњи Техничког факултета из Новог Сада и Факултета инжењерских наука из Крагујевца (Јовичић и сар., 2009; Vujic et. al, 2010). Ова методологија, која проистиче из искустава и методологија које се користе у Европској унији, састоји се из два сегмента. У првом сегменту се врши процена количина генерисаног комуналног отпада на основу мерења која трају седам дана. Имајући у виду чињеницу да је градска депонија у Крагујевцу опремљена колском вагом и да се свакодневно врши мерење количина прикупљеног отпада, овај сегмент методологије биће објашњен у делу поглавља о количини генерисаног отпада у Крагујевцу.

Други сегмент методологије се односи на узорковање и анализу морфолошког састава отпада. Са циљем да се одреди састав отпада, сакупљају се узорци приближне масе око 500 kg. Обзиром да на састав отпада, поред економских прилика, утиче и облик становања (колективно или индивидуално), различит начин живота, обичаја и других фактора везаних за локацију становања, прикупљају се узорци из различитих делова општине, и то из следећих зона:

- градска зона – индивидуално становање,
- градска зона – колективно становање и комерцијална зона,
- сеоска зона – дубоки приград.

Табела 4.3 Каталог сортирања отпада према категоријама

| Врста отпада | Примери |
|-----------------------------------|---|
| 1. Баштенски отпад | Покошена трава, коров, цвеће, гранчице, гране, лишће, остаци од живе оградe... |
| 2. Остали биоразградиви отпад | Отпад од хране - свих врста (хлеб, месо, поврће, воће...), угинули пилићи, животињски органи... |
| 3. Папир | Старе новине, огласи и рекламе на папиру, коверте, компјутерска штампа, стара пошта, дневници, постери, књиге, свеске, карте за аутобус, рачуни, писма... |
| 4. Стакло | Флаше (вино, пиво, жестока пића, минерална вода, сокови...), стаклене тегле (туршија, џемови...), равно стакло, сијалице, огледала... |
| 5. Картон | Картонске кутије свих врста, кутије од паковања електричних уређаја, кутије од паковања хране, пића, картонске кутије за пиво, кутије кекса, играчака, раван |
| 6. Картон са воском | Тетрапак за јогурт, млеко, сокове, шлаг...*у зависности од произвођача |
| 7. Картон са алуминијумом | Тетрапак за јогурт, млеко, сокове, шлаг...*у зависности од произвођача |
| 8. Метал - амбалажни и остали | Конзерве за храну (сардине, паштете, месни нарезак), алат, метални делови од кола, кућни жичани водови, кухињски прибор (тигањ, шерпе, поклопци), делови бицикла... |
| 9. Метал - алуминијумске конзерве | Лименке за напитке (пиво, кока-кола, енергетска пића)... |
| 10. Пластични амбалажни отпад | Пластичне флаше за воду, сокове, пиво, уље, сирће... |
| 11. Пластичне кесе | Кесе из продавница, кесе за смеће, пластичне кесе (црне, зелене, сиве), кесе од чипса, кесе за сендвиче, кесе за замрзнуто поврће, омоти од кекса... |
| 12.Тврда пластика | Кутије од маргарина, јогурта, сладоледа, телефонске картице, пластичне играчке, лењири, оловке, тоалетни поклопци, четкице за зубе, пластичне кутије, средства за чишћење, саксије за цвеће, канте, лавори, наочари за сунце, пластични делови кола |
| 13.Текстил | Природна и вештачка влакна: одећа од природних влакана (памук, вуна, лан), и синтетичких влакана (панталоне, чарапе, торбе од тканина, платна), кухињске крпе |
| 14.Кожа | Кожни делови одеће, новчаници, каишеви, кожане ципеле, торбе, кожане лопте... |
| 15.Пелене | Пелене за бебе, санитарне пелене... |
| 16.Фини елементи | Сви остаци отпада, који прођу последње сито од 20мм, земља, прашина, пепео, песак, фрагменти стакла... |

За сваку од наведених зона се врши одабир улица које најбоље репрезентују дати сектор. У изабраним улицама се насумично бирају канте/контејнери чији се садржај празни у камион. Сакупљени узорци отпада, из сва три сектора, довозе се до локације која је одређена за сортирање и анализу где се отпад, за сваки узорак посебно, најпре пропушта кроз сита различитих величина отвора, а затим се ручно разврстава према каталогу сортирања приказаном у табели 4.3 која је у складу са Националном стратегијом за управљање отпадом за период 2010. – 2019. године (Службени гласник Републике Србије, ¹2010).

Након што се сав отпад разврста по категоријама, врши се мерење на електронској ваги. Резултат анализе је количина отпада по категоријама у килограмима, укупна количина узорка као и запремина истог у m^3 или литрима. Ради лакшег увида у добијене резултате заступљеност сваке врсте отпада се даје у процентима.

Поред локације на којој се генерише отпад, на морфолошки састав отпада умногоме утиче и годишње доба. Због тога се за одређивање састава отпада, по претходно описаној методологији, врши три пута годишње – у зимској, пролећној и летњој сезони (уз претпоставку да је отпад по морфолошком саставу сличан у пролећној и јесењој сезони).

4.2.2 Локацијске и сезонске варијације у саставу отпада

Користећи методологију која је објашњена у претходном тексту, извршено је одређивање морфолошког састава отпада за град Крагујевац, у периоду од септембра 2008. до маја 2009. године. Анализа је рађена за три различита годишња доба (лето – I, зима – II и пролеће – III), на узорцима три различита сектора општине. У табели 4.4, приказани су резултати спроведене анализе, процентуално по категоријама отпада из каталогу сортирања.

Када се говори о локацијским варијацијама у саставу отпада, из приложене табеле се може видети да се у колективном становању, у градском сектору и комерцијалној зони, процентуално заступљенији папир, картон, кесе и амбалажни отпад. Ово је последица великог броја продавница и локала који се налазе у овој зони града, али и навика становништва у колективном становању.

У сеоском сектору преовладава баштенски отпад, кога процентуално има више него у друга два сектора становања.

Битну разлику у процентуалном саставу могуће је уочити и у финим елементима којих има више у сеоском сектору и градском сектору са индивидуалном врстом становања, у односу на градску зону са колективним становањем. Ову категорију отпада чине елементи који прођу кроз последње сито од 20 mm, као што су земља, прашина, пепео, песак, итд. Ово се повезује са начином загревања станова у деловима општине где нема даљинског грејања и где се становништво греје сагоревањем угља и дрва, чиме настаје пепео који се најчешће одлаже у контејнере.

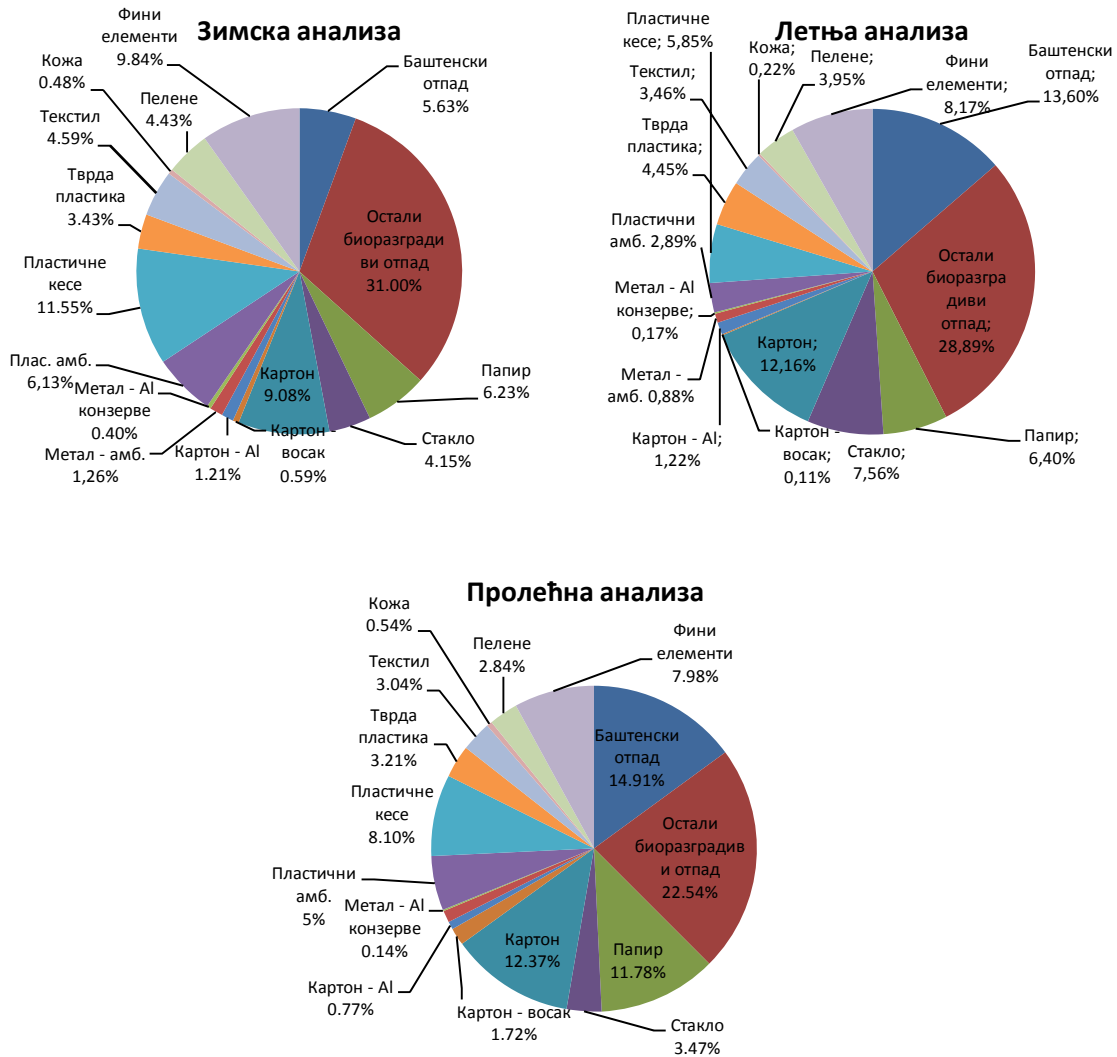
Табела 4.4 Процентуална расподела категорија отпада по секторима у Крагујевцу

| Категорија отпада | Сектор становања | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | Град - индивидуално | | | Град - колективно | | | Сеоско | | |
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Баштенски отпад | 1,61 | 6,43 | 24,19 | 13,71 | 2,77 | 4,22 | 33,33 | 13,20 | 30,98 |
| Остали биоразградиви отпад | 27,96 | 26,69 | 19,69 | 29,34 | 32,79 | 23,11 | 29,06 | 32,64 | 23,12 |
| Папир | 7,48 | 6,81 | 3,72 | 7,31 | 6,15 | 18,83 | 1,89 | 5,53 | 2,11 |
| Стакло | 2,26 | 1,31 | 5,46 | 12,42 | 5,8 | 2,72 | 1,30 | 3,78 | 2,11 |
| Картон | 9,72 | 11,41 | 6,73 | 15,50 | 8,73 | 18,23 | 5,84 | 6,28 | 2,28 |
| Картон - восак | 0,17 | 0,3 | 0,97 | 0,10 | 0,87 | 2,41 | 0,00 | 0,21 | 0,64 |
| Картон -алуминијум | 1,35 | 0,96 | 0,28 | 1,35 | 1,58 | 2,05 | 0,63 | 0,50 | 0,58 |
| Метал - амбалажни и остали | 1,17 | 1,9 | 1,79 | 0,55 | 0,81 | 0,91 | 1,45 | 1,59 | 0,80 |
| Метал- Al конзерве | 0,12 | 0,05 | 0,36 | 0,26 | 0,66 | 2,35 | 0,00 | 0,18 | 0,51 |
| Пластични амбалажни отпад | 3,74 | 3,75 | 6,07 | 2,24 | 7,94 | 5,67 | 3,48 | 4,50 | 2,99 |
| Пластичне кесе | 7,56 | 11,61 | 5,74 | 5,54 | 13,42 | 10,02 | 3,98 | 5,63 | 5,23 |
| Тврда пластика | 4,22 | 3,90 | 4,03 | 4,33 | 3,48 | 2,53 | 5,22 | 2,37 | 3,62 |
| Текстил | 8,39 | 5,11 | 8,27 | 1,07 | 3,95 | 0,6 | 2,62 | 5,73 | 1,53 |
| Кожа | 0,00 | 1,18 | 1,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,25 | 0,82 | 0,90 |
| Пелене | 8,42 | 3,99 | 1,35 | 1,97 | 5,38 | 1,27 | 2,60 | 2,21 | 9,91 |
| Фини елементи | 15,83 | 14,60 | 10,07 | 4,31 | 5,67 | 5,07 | 7,35 | 14,83 | 12,68 |

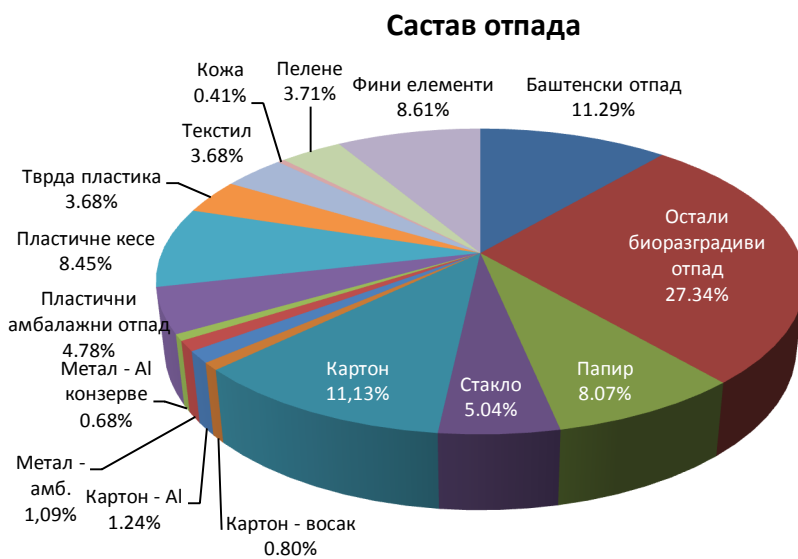
Графички приказ састава отпада по категоријама, у различитим сезонама у току године, приказан је на слици 4.1. Имајући у виду да је анализа морфолошког састава отпада рађена за три сектора, до процентуалне заступљености сваке категорије отпада за целу општину долази се множењем удела становника из сваког сектора са процентуалним вредностима сваке од категорија отпада и сабирањем добијених резултата.

Прегледом графика сезонских анализа састава отпада може се закључити да процентуално највише варира баштенски отпад кога има највише у пролећном периоду, а најмање у зимском. Такође, у пролеће се процентуално појављује више папира у отпаду, а мање пластичних кеса у односу на зимски период.

Налажењем средње вредности из три сезонске анализе добија се просечан састав отпада за територију општине Крагујевац – слика 4.2.



Слика 4.1 Сезонске варијације у саставу отпада



Слика 4.2 Морфолошки састав отпада у Крагујевцу

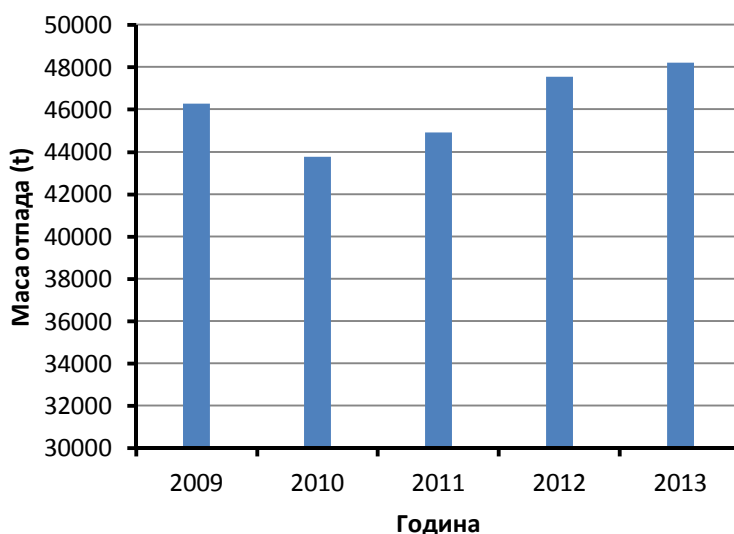
4.3 Количина комуналног отпада

Стално праћење количина отпада која се генерише на територији једне општине представља предуслов за добро организовање система за управљање отпадом и пружање квалитетне услуга корисницима система. Крагујевац је један од ретких градова у Србији на чијој се депонији налази колска вага на којој се свакодневно мери маса прикупљеног отпада. Колска вага је повезана са рачунаром на коме је инсталиран софтвер за праћење измерене масе отпада.

По завршетку сваког циклуса сакупљања отпада, пре депоновања, возило прелази преко колске ваге на којој се мери маса возила заједно са прикупљеним отпадом (брuto). Након депоновања отпада, возило поново прелази преко ваге и мери се маса празног возила (тара), а затим софтвер одузимањем бруто масе и тара масе возила рачуна нето масу прикупљеног отпада и бележи је у базу података. Свако возило преко регистарског броја има јединствену ознаку у бази података. Поред масе прикупљеног отпада и регистарске ознаке возила, при сваком мерењу се бележе и следећи подаци:

- датум и време,
- власник возила (ЈКП „Чистоћа“ или друго правно или приватно лице будући да на депонију могу да довозе отпад и друга лица која на исти начин пролазе мерења као и возила ЈКП „Чистоћа“),
- име возача (уколико се ради о возилима ЈКП „Чистоћа“),
- врста отпада (комунални, грађевински, ризла, стаклена, картонска или PVC амбалажа),
- реон града из ког потиче сакупљени отпад.

На слици 4.3 приказана је количина прикупљеног комуналног отпада од стране ЈКП „Чистоћа“, по годинама за период 2009. - 2013. године.

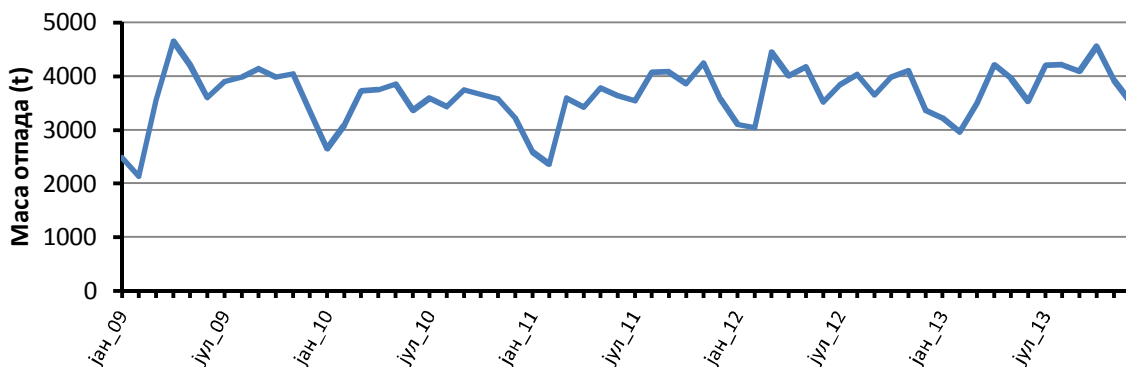


Слика 4.3 Количина прикупљеног комуналног отпада по годинама

Са претходне слике може се видети да се, у последњих пет година, прикупи у просеку око 47.000 тона комуналног отпада годишње, односно око 130 тона дневно. Просечна количина отпада по становнику износи 0,8 kg/становник/дан.

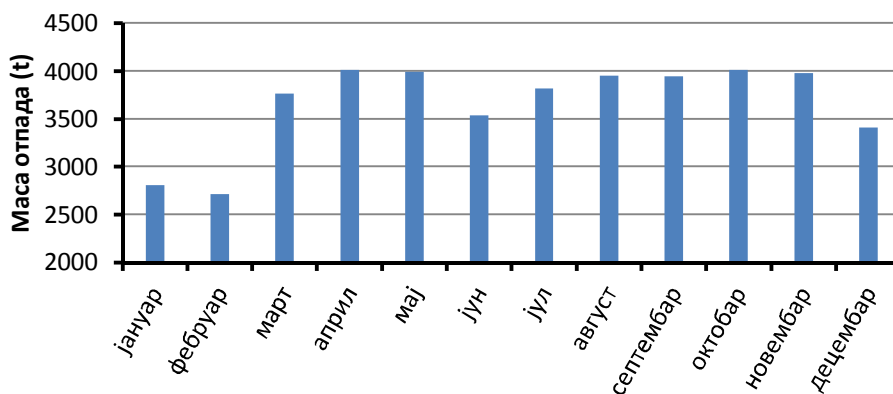
ЈКП „Чистоћа“, поред мешаног комуналног отпада, одвојено сакупља рециклабилни отпад (стакло, PVC и алуминијум). На месечном нивоу просечно се сакупи 20 тона ПЕТ и пластичне амбалаже, 50 тона папирне и картонске амбалаже, 10 тона стакла и око 100 килограма алуминијумских лименки. Обзиром на састав отпада, проценат издвојених секундарних сировина је веома мали. Након разврставања и балирања, амбалажни отпад се испоручује овлашћеним оператерима. Поред амбалажног отпада, предузеће се бави и сакупљањем отпадних гума од вулканизера, по позиву. Месечно се, у просеку, прикупи око седам тона гума, које се такође испоручују овлашћеном оператеру.

Као што је случај са саставом отпада, количина отпада варира у зависности од годишњег доба, односно од месеца у години. На слици 4.4 приказана је маса прикупљеног отпада по месецима за период 2009. - 2013. године.



Слика 4.4 Количина прикупљеног отпада по месецима

На слици 4.4 може се приметити да се локални минимуми јављају у зимским месецима (јануар - фебруар) док су локални максимуми у пролеће и јесен. Слика 4.5 приказује просечну количину прикупљеног отпада по месецима у последњих пет година.



Слика 4.5 Просечна количина прикупљеног отпада по месецима

5. Енергетска ефикасност процеса сакупљања и транспорта отпада на примеру града Крагујевца

Сакупљање и транспорт чврстог отпада учествују највећим уделом у укупним трошковима система за управљање чврстим отпадом. Стога је, основни циљ овог истраживања, унапређење функционисања комуналног сервиса за управљање чврстим отпадом града Крагујевца путем подизања енергетске ефикасности система за сакупљање и превоз чврстог отпада до места за коначно одлагање. Као основа, за развијање опште методологије за успостављање енергетски ефикаснијег и економски одрживог система, биће коришћене могућности географског информационог система. Стога је потребно анализирати систем и остварити потребне предуслове за његову оптимизацију.

Већина комуналних предузећа у Србији, као што је случај и са ЈКП „Чистоћа“ из Крагујевца, нема евиденцију о инфраструктури система за сакупљање отпада на нивоу ГИС захтева. Подела града на реоне, просторни распоред локалитета за прикупљање отпада и фреквенца пражњења контејнера, најчешће су резултат искуства, а не принципа минималних енергетских захтева. Када се разматрају путање комуналних возила, ситуација постаје још сложенија, па је без стварања предуслова кроз имплементацију базе података о ресурсима система (по ГИС захтевима), практично, сваки покушај оптимизације осуђен на неуспех. Из тог разлога, најпре је формирана база података, са свим неопходним елементима. Потом су развијене методологије за оптимизацију путања кретања возила као и унапређење просторног распореда локалитета за прикупљање отпада и броја контејнера, коришћењем ГИС софтвера. Детаљан поступак на који је база формирана, као и опис поменутих методологија дати су у наставку текста.

За снимање тренутног стања на терену и формирање базе података коришћена је одговарајућа опрема и софтвери. Такође, као део овог истраживања, у једно демо возило уграђен је систем за GPS-GPRS мониторинг кретања возила. Опис коришћене опреме, софтвера и демо возила приказан је у наредном одељку.

5.1 Опрема и демо возило за снимање карактеристика процеса сакупљања и транспорта отпада

За прикупљање неопходних просторних података и формирање потребних база коришћена је мерна опрема (Garmin Colorado 300 и Trimble Juno SB) приказана на сликама 5.1 и 5.2.

Garmin Colorado 300 представља преносни GPS уређај са веома робусним и водоотпорним кућиштем, намењен за рад на отвореном. Овај уређај поседује пријемник високе осетљивости и изузетно квалитетну Quad-Helix антену, која гарантује

високу прецизност позиције у свим условима. Прецизност, која у оптималним условима износи до 3 метра, показала се као сасвим довољна за обележавање локација контејнера и снимање путања возила. Карактеристичне тачке (енгл. waypoints) и путање снимљене овим уређајем могу се, у gdb (GarminDataBase) или grx (GPS Exchange Format) формату, преbacити на рачунар и учитати у инсталиран MapSource софтвер и прегледати на постојећој мапи. Током истраживања коришћена је мапа SCG Route 2.30 NT.



Слика 5.1 Garmin Colorado 300



Слика 5.2 Trimble Juno SB

За коришћење снимљених података у ГИС софтверским апликацијама, прикупљени подаци су прилагођени ГИС захтевима. У ову сврху, за конверзију података, коришћен је софтвер DNRGps (ранији назив DNRGarmin) чији је задатак да податке добијене описаном мерном опремом прилагоди формату који је могуће користити у ГИС апликацијама.

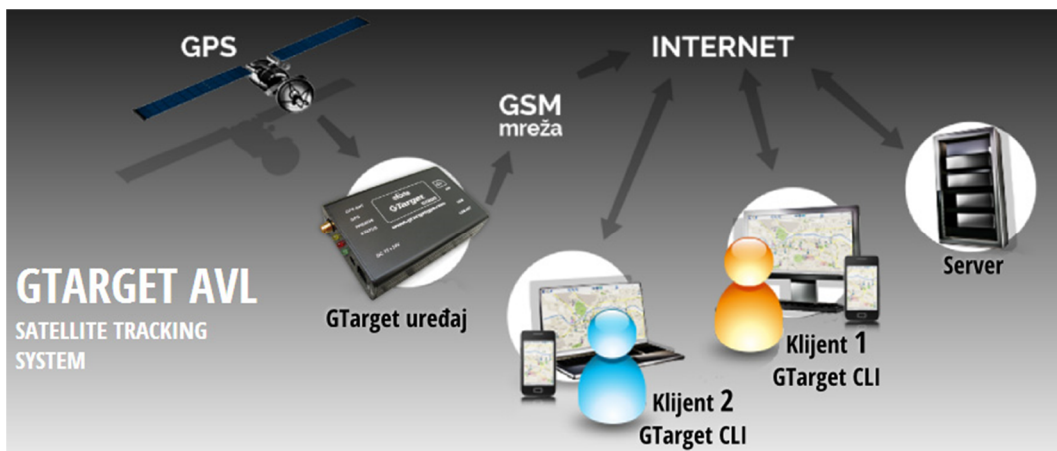
Trimble Juno SB је уређај који ради са Windows Mobile оперативним системом и поседује уграђен GPS пријемник. На овом уређају, за формирање база података, коришћен је специјализовани софтвер Trimble Terrasync, који се може инсталирати само на уређаје које производи фирма Trimble. Овај софтвер је дизајниран за брзо и ефикасно прикупљање ГИС података на терену и формирање просторних база података. Прикупљени подаци, у форми креираних база, компатибилни су са ГИС софтверима, тако да није потребна накнадна конверзија података. Поред тога, као позадински лејер, могуће је учитати ортофото мапу града, тако да корисник има тачан преглед тренутне позиције на мапи града. Уређај поседује и камеру резолуције 5 мегапиксела чијим коришћењем се фотографија аутоматски убацује у формирану базу података и везује за локацију на којој је снимљена.

За потребе мониторинга процеса сакупљања, транспорта и депоновања отпада, у оквиру овог истраживања, у једно возило јавног комуналног предузећа је уграђен систем за GPS-GPRS праћење возила. Систем је инсталиран у возило марке Mercedes Benz 18-23 које је произведено 2006. године. Корисна запремина возила износи 16 m³, док је носивост 5,94 тоне. Демо возило које је коришћено у експерименту приказано је на слици 5.3.



Слика 5.3 Демо возило са уграђеним GPS/GPRS системом

У претходно приказано возило уграђен је систем GTarget AVL чији је произвођач компанија д.о.о. Ефорте са седиштем у Нишу. Шематски приказ функционисања овог система дат је на слици 5.4.



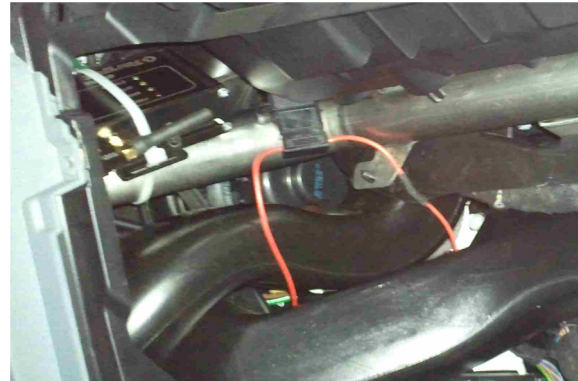
Слика 5.4 Шематски приказ функционисања GTarget AVL система

GTarget AVL представља интегрисани систем за праћење и контролу возила комбиновањем GPS и GPRS система. Систем се састоји од GTarget уређаја, који се инсталира у возило, сервера на коме је инсталиран серверски софтвер GTarget SRV и клијентског софтвера GTarget CLI који се инсталира на рачунар корисника.

Основни хардверски елемент (GTarget уређај), спреман за уградњу, приказан је на слици 5.5, док слика 5.6 приказује уређај монтиран у демо возило.



Слика 5.5 GTarget уређај



Слика 5.6 Уређај монтиран у возило

Уградња уређаја за сателитско праћење састоји се из:

- инсталације кутије уређаја у возило,
- инсталације напајања уређаја,
- инсталације линије за детекцију контакт кључа,
- инсталације GPS антене.

Уређај се монтира у инструмент таблу возила испред сувозача, иза касете за одлагање ствари. Након тога се уређај повезује на напајање возила и линију која врши детектовање контакт кључа. Поред напајања са инсталације возила, уређај поседује и резервно напајање из сопствене батерије чије се стање редовно прати. Уређај поседује интерну GPS антену, али се врши и уградња екстерне антене чиме се обезбеђује добар пријем сигнала са сателита и у условима слабе покривености. Ово је од нарочитог значаја у централним градским зонама, где услед великог броја високих зграда, долази до рефлексије сигнала, па већина стандардних GPS пријемника врло често има проблем са пријемом сигнала.

Подаци добијени са сателита се компримују, а затим путем GSM мреже и интернета, шаљу до сервера. Период између слања два пакета података дефинише сам корисник система и он може да буде у границама између једне секунде и пет минута. Обзиром да се подаци пре слања компримују, величина пакета који се шаље путем GPRS-а је мала, тако да су и трошкови ниски. У случају да дође до губитка сигнала мобилног оператера, или немогућности слања података из неког другог разлога (нпр. услед недостатка кредита ако је реч о prepaid верзији SIM картице), уређај поседује интерну меморију у којој се подаци складиште. Интерна меморија има капацитет од преко 40.000 записа, што је довољно за 7 дана непрекидног меморисања GPS позиција за период слања од 20 секунди. У зонама непокривености GSM мрежом ово омогућава

да уређај пошаље све снимљене податке када се конектује на GSM мрежу, без губитака. Детаљне карактеристике уређаја уграђеног у демо возило дате су наредној табели.

Табела 5.1 Карактеристике GTarget GT405 уређаја

| Спецификација | Опис | |
|------------------------------|---------------------------|--|
| Напајање | Напон | 8-28 V |
| | Потрошња (снага) | 1 mA (sleep mode) – 92 mA (емитовање) |
| Температура | Оперативни услови | -40°C до 85°C |
| Услови рада | Влага | 50% до 80% |
| Димензије | | 47x68x24 mm, 150 грама |
| Мрежни модем | GSM | Motorola G-30, Quad Band |
| Мрежа | Data, Voice | GSM, GPRS, SMS |
| Поруке | SMS, GPRS | Encrypted protocol TCP/IP |
| Меморија | Трајна меморија | 2048 Kb |
| | Flash меморија | 2048 Kb |
| Улазно/Излазни Интерфејси | Улази | 5 дигиталних, 2 аналогна |
| | Излази | 4 дигитална |
| | Улаз импулсни | 1 улазни бројач |
| | Улаз за екстерни протокол | 1 PC232 |
| Аларм систем | Блокада возила | Екстерни релеј – постепено заустављање |
| | Искључивање аларма | Тастатура, даљински управљач |
| Резервна батерија | Тип | Varta PoLiFlex, 800-1200 mAh |
| Com port | RS232 | 115,200 bps |

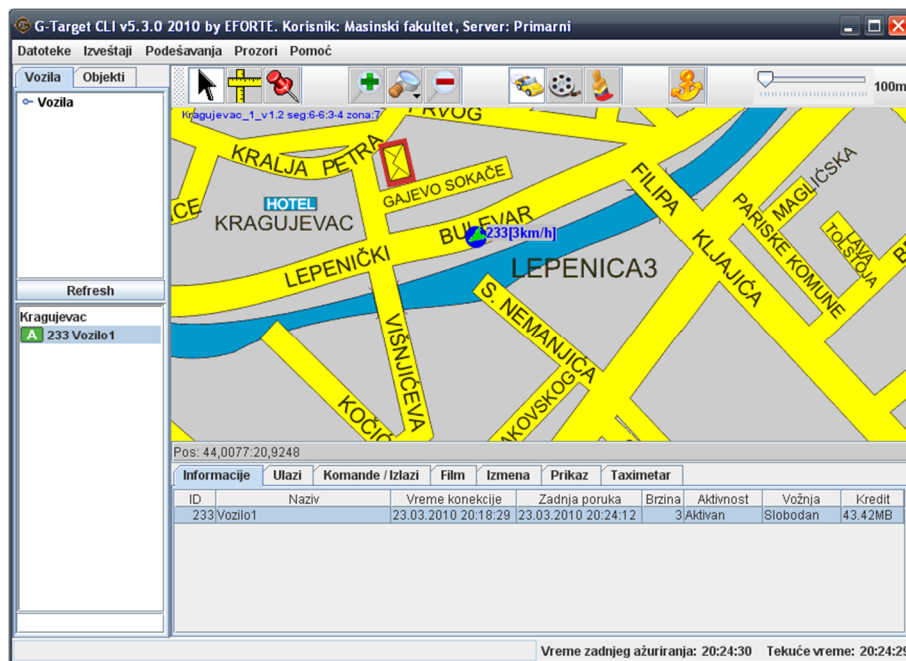
Сви подаци које уређај прикупи прослеђују се серверу. Систем истовремено ради са два сервера на Linux платформи. У случају да је примарни сервер недоступан из било ког разлога, уређај аутоматски прелази на секундарни. Овим се постиже висока доступност уређаја (позиције возила) у сваком тренутку. Софтвер GTarget SRV, има улогу да прослеђује примљене и обрађене податке до корисника. Сви подаци, примљени са уређаја, чувају се на серверу до месец дана и у том року корисник може да их преузме.

Задатак клијентског софтвера, GTarget CLI, је да, путем интернета, преузима податке са сервера и врши њихову даљу обраду. Путем корисничког интерфејса корисник система добија све потребне информације и шаље команде које се реализују на уређају у возилу.

Основни задатак GTarget AVL система за сателитско праћење возила може се поделити на четири основне функције:

- праћење возила,
- надгледање возила,
- алармирање,
- извештавање.

Праћење возила подразумева да корисник система може, путем клијентског софтвера, у сваком тренутку да одреди тренутну позицију возила које се прати на дигиталној мапи града. Поред тренутне позиције такође су доступни подаци о брзини и смеру кретања возила, стању резервне батерије уређаја и броју обртаја мотора. Брзина се мери GPS-ом, па је прецизност у оквиру 1 km/h. Уколико се возило налази у стању мировања корисник добија податке да је контакт кључ у возилу укључен и да ли су отворена врата возила. Корисник сам подешава период између слања пакета информација са уређаја инсталираног у возилу. У случају демо возила, које је коришћено током истраживања, уређај је био подешен да шаље податке на сваких пет секунди. Слика 5.7 приказује софтвер GTarget CLI приликом праћења кретања демо возила ЈКП „Чистоћа“.

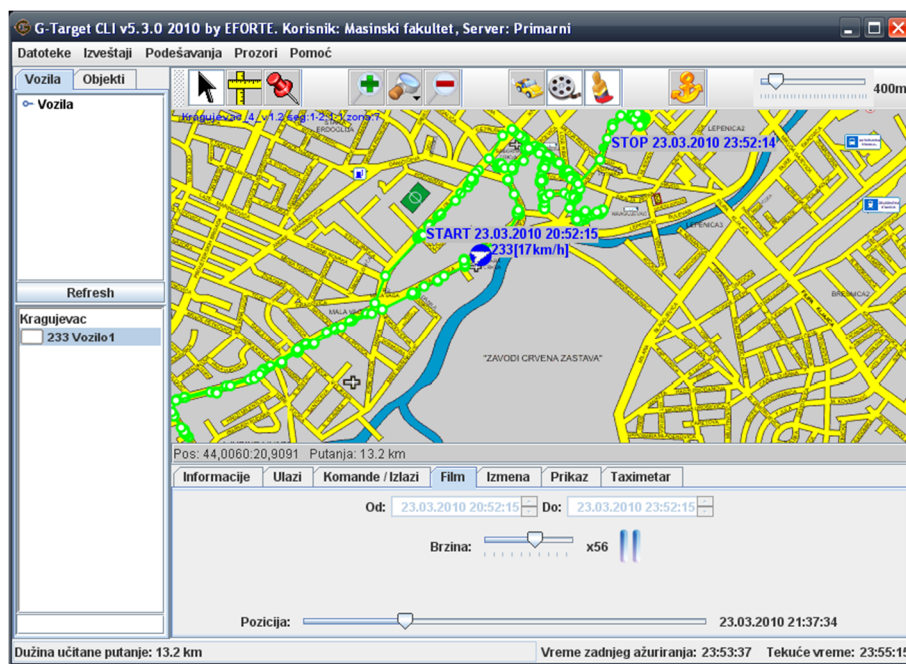


Слика 5.7 Праћење возила у софтверу GTarget CLI

Возила се не морају пратити искључиво у реалном времену. Коришћењем функције *надгледања* коју омогућава софтвер, постоји могућност да се накнадно види историја кретања са симулацијом и пређеном километражом. Као што је раније поменуто, на серверу се чувају подаци о кретању свих возила у трајању од месец дана. У том периоду корисник има могућност да преузме потребне податке са сервера, сними их у меморију свог рачунара и по потреби их поново учита у софтвер ради анализе или упоређивања са другим подацима. На слици 5.8 приказан је софтвер GTarget CLI са активираним функцијом надгледања возила.

Алармирање представља веома битну функцију система која подразумева обавештавање особа задужених за контролу над возилима да је дошло до кршења неког од унапред задатих правила коришћења возила. Уколико се таква ситуација деси, уређај уграђен у возило је у могућности да слањем SMS-а на дефинисани број телефона или e-mail-ом упозори о врсти прекршаја, времену и локацији на којој се прекршај десио. Прекршај може да се односи на непримерено коришћење возила као

што је прекорачење брзине или дужа возња возила при високом броју обртаја мотора. Такође, током праћења демо возила ЈКП „Чистоћа“, вршен је мониторинг кретања возила по унапред дефинисаним рутама. На мапи града су унете све локације на којима се налазе контејнери које возило треба да испразни, у оквиру реона у коме ово возило врши сакупљање. Ове локације су преузете из базе података о местима прикупљања отпада чији начин креирања и улога ће бити детаљно описани у наставку текста. За сваку локацију, у оквиру софтвера, је могуће дефинисати радијус у оквиру кога возило треба да прође. Уколико возило у току радног дана не посети задату локацију, односно не прође у дефинисаном радијусу поред контејнера, уређај шаље поруку у којој обавештава диспечера да одређена локација није посећена. Такође, за сваку локацију, може се дефинисати минимално време задржавања возила. Поред тога, у софтверу се подешава редослед обиласка места прикупљања, чиме се дефинише рута којом возило мора да прође. Одређивање оптималних рута возила такође ће бити детаљно описано у тексту који следи. Диспечер се обавештава уколико возило напусти дефинисану руту или уколико изађе из реона који му је додељен за сакупљање отпада.



Слика 5.8 Надгледање возила помоћу софтвера

Извештавање подразумева креирање извештаја о кретању возила на дневном и месечном нивоу. Извештај се генерише из софтвера на захтев корисника и садржи податке о пређеном путу возила, броју радних сати и опслужених места прикупљања, задржавању возила дужих од два минута на локацијама на којима нису контејнери, као и читавом низу параметара које може да дефинише сам корисник система. Такође, подразумева се да извештај садржи и све податке које је уређај послао у оквиру функције алармирања.

У оквиру овог истраживања, анализирано је кретање демо возила у трајању од годину дана. За овај период дефинисане су све варијације које се јављају у процесу

сакупљања отпада и утврђене су функционалне зависности и сезонске варијације у ланцу пређени пут (број радних сати) – количина сакупљеног отпада – енергетски расходи (количина потрошеног горива и мазива). Овај део ће детаљно бити дискутован у једном од наредних делова текста у коме ће бити извршена техно-економска анализа унапређеног система за сакупљање отпада града Крагујевца.

5.2 Прикупљање података о инфраструктури градског система за сакупљање и транспорт отпада

Као што је већ наглашено, подаци представљају најбитнију компоненту географског информационог система, врло често и финансијски најзахтевнију. За прикупљање података о инфраструктури градског система за сакупљање отпада коришћена је опрема приказана у претходном делу текста, као и одговарајући софтвери. Поред основних података о предузећу, броју радника, возном парку, за потребе ГИС анализе неопходно је формирати следеће базе података:

- просторну базу података о местима прикупљања отпада,
- просторну базу података о путањама комуналних возила,
- мрежу градских улица.

Поред поменутих база података, неопходна је и ортофото мапа града. Начин на који су подаци прикупљани, формирање база и њихов детаљан опис, дат је у наставку текста.

5.2.1 Просторна база о местима прикупљања отпада

Евиденција места за прикупљање отпада на територији града Крагујевца, кроз просторну базу података о местима прикупљања, представља први услов за покретање оптимизације сакупљања и транспорта отпада, било да се ради о унапређењу просторног распореда локација за прикупљање отпада или се разматрају путање (руте) кретања комуналних возила.

Евиденција ЈКП „Чистоћа“ о броју и распореду контејнера на територији града, пре формирања ове базе, вођена је у виду табела са списковима улица и бројем распоређених контејнера. Подаци са спискова ретко су ажурирани и често нису одговарали реалном стању на терену. Увид у праву ситуацију о броју и распореду контејнера, као и о њиховом стању и исправности, имали су једино радници који раде непосредно на пражњењу контејнера и они су, у виду дневног извештаја о сакупљању отпада, пријављивали неправилности. Приказ просторног распореда контејнера на мапи града није постојао и стога је, једини начин за формирање просторне базе података теренско снимање ситуације, уз праћење кретања комуналних возила.

Формирање базе података о местима прикупљања отпада, на којима су распоређени контејнери у власништву ЈКП „Чистоћа“ и које редовно празне комунална возила овог

предузећа, трајало је два месеца. Снимања су обављана у све три смене. У процесу снимања и прикупљања података коришћена је раније описана опрема.

Формирана је евиденција о сваком месту прикупљања отпада које је у надлежности ЈКП „Чистоћа“, при чему је регистровано 3.052 контејнера за сакупљање комуналног отпада запремине $1,1 \text{ m}^3$ распоређених на 1.451 локацију (место прикупљања), као и 700 контејнера за рециклабилни отпад. За свако место прикупљања, поред GPS координата, као атрибути, су уписани следећи подаци:

- јединствена идентификациона ознака локације (ID),
- реон,
- улица,
- месна заједница,
- број и тип контејнера,
- страна улице,
- напомена.

Поред основних података који се у базу уписују као атрибути, податак о страни улице односи се на положај контејнера у односу на смер кретања камиона приликом пражњења контејнера, у постојећем систему рута. Додатно се уписује могућност приласка комуналног возила посматраном месту прикупљања и евентуалног доласка из супротног смера. Ово је битно евидентирати због будуће оптимизације кретања комуналних возила, да би се избегла ситуација у којој се у оквиру оптимизоване руте крше саобраћајна правила. За свако место прикупљања остављено је додатно поље за посебне напомене (празни контејнери, препуњени контејнери, отежан приступ возила, итд.)



Слика 5.9 Типично место прикупљања комуналног отпада града Крагујевца

Свака локација је фотографисана тако да се фотографија заједно са атрибутима везује за јединствену ознаку места прикупљања у бази података. Типично место за сакупљање отпада у граду Крагујевцу је приказано на слици 5.9, док су атрибути за дату локацију дати у табели 5.2.

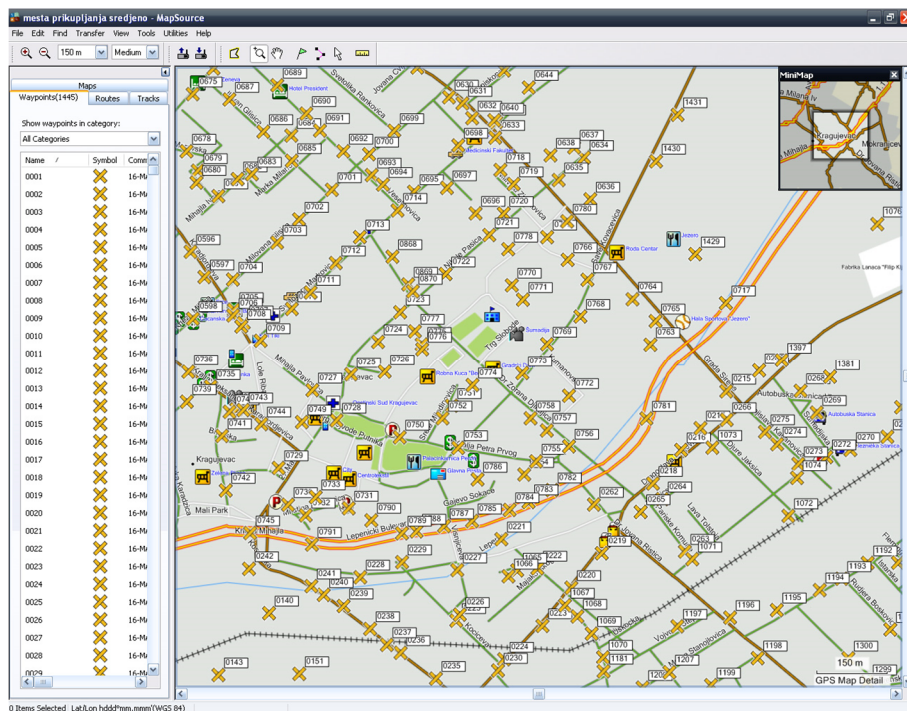
Табела 5.2 Атрибути места прикупљања

| | |
|---------------------------|-------------------------------|
| Идентификациони број (ID) | MP 0013 |
| Број контејнера | 5 (1,1m ³)+ 1 ПЕТ |
| Координате | N 44°00.297' E20°53.519' |
| Реон | 03 |
| Улица | Јосифа Шмерсона |
| Месна заједница | Багремар |
| Страна улице | Десна |
| Напомена | - |

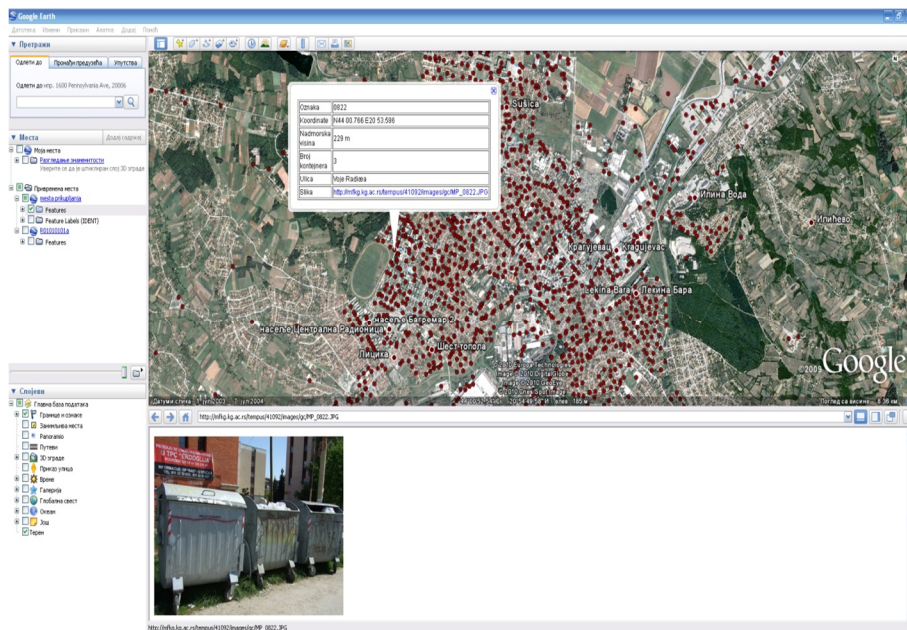
Бази података могуће је приступити на више начина. Први начин је кроз Гарминов софтвер MapSource, пошто је база у изворном облику GDB (GarminDataBase). Учитавањем овог фајла могуће је, на дигиталној мапи града, приказати просторни распоред места прикупљања, што је приказано на слици 5.10.

За потребе рада у ГИС софтверу, база мора бити трансформисана тако да задовољи све критеријуме ГИС апликација. Ово подразумева и прилагођавање националном референтном координатном систему, имајући у виду да је за прикупљање података коришћен светски геодетски систем WGS 84.

Поред трансформације базе за потребе ГИС прорачуна, о чему ће накнадно бити још речи, база је трансформисана и прилагођена Google Earth софтверу. Овај софтвер је бесплатан и може се несметано користити у интернет окружењу, без ограничења броја корисника. Предност у односу на MapSource се огледа у томе што Google Earth као позадински лејер има сателитски снимак Земље, па је могуће видети распоред контејнера у природном окружењу (њихов положај у односу на куће, зграде, улице...). Ово може послужити за вршење елементарних анализа, без употребе ГИС софтвера. Поред приказа локације могуће је видети и све атрибуте везане за дато место прикупљања (слика 5.11).



Слика 5.10 Приказ места прикупљања отпада на дигиталној мапи града



Слика 5.11 Приказ места прикупљања са атрибутима у Google Earth софтверу

5.2.2 Просторна база о путањама комуналних возила

У циљу унапређења путања комуналних возила, формирана је просторна база података о путањама комуналних возила, која ће послужити као референтна за

упоређивање са оптимизованим рутама. За њено формирање, као и за случај базе података о местима прикупљања, најпре је уведен јединствен начин обележавања рута комуналних возила. Ознака руте се формира у зависности од реона који дато возило покрива, дана у недељи, екипе и смене у току радног дана. Под рутом возила подразумева се путања комуналног возила у току једног радног дана. Свака рута састоји се од једног, а најчешће два или више циклуса сакупљања отпада. На слици 5.12 дато је значење свих ознака које се појављују у обележавању рута.



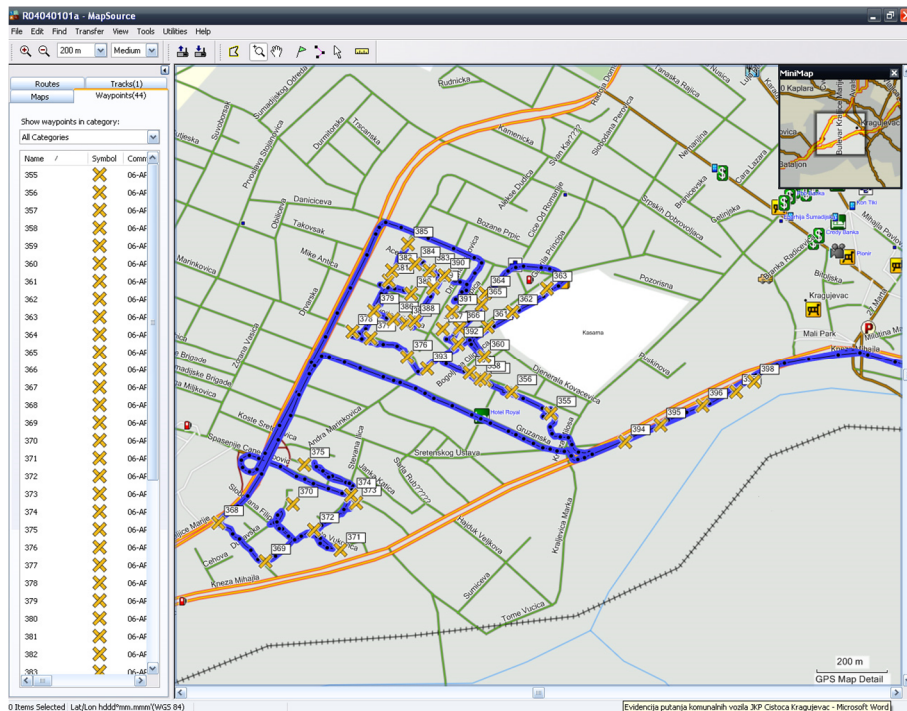
Слика 5.12 Обележавање рута

На пример, ознака руте R02030101a садржи у себи податке да је возило сакупљало отпад у реону 2, у среду, да је радила прва екипа, у првој смени и да је у питању први циклус сакупљања отпада у оквиру радног дана.

Снимање постојећих путања комуналних возила вршено је, такође, GPS мерном опремом Garmin Colorado 300 и Trimble Juno. Прикупљање података са терена о кретању комуналних возила трајало је четири месеца. Свака рута снимана је више пута. Детаљне анализе постојећег система рута биће приказане у наредном поглављу, у делу који се односи на енергетске расходе сакупљања отпада у постојећем систему рута.

Формираној бази података могуће је приступити кроз MapSource софтвер, а такође, као и за случај базе података о местима прикупљања, кроз Google Earth. У базу података, поред снимљене путање, уписују се и атрибути везани за сваку руту, што подразумева информације о броју циклуса, пређеном путу, укупном времену и просечној брзини, броју опслужених места прикупљања отпада (са ознаком MP) и броју испражњених контејнера. Један типичан циклус сакупљања отпада приказан је на слици 5.13. Поред путање возила на дигиталној мапи града обележене су и локације на којима се налазе контејнери који се празне у посматрано возило.

Ради лакшег приступа бази и бољег прегледа, база је трансформисана и прилагођена Google Earth формату, тако да је могуће учитати једну или више путања са местима прикупљања и вршити њихову анализу и међусобна упоређивања.



Слика 5.13 Типичан циклус сакупљања отпада

5.2.3 Ортофото мапа и мрежа улица

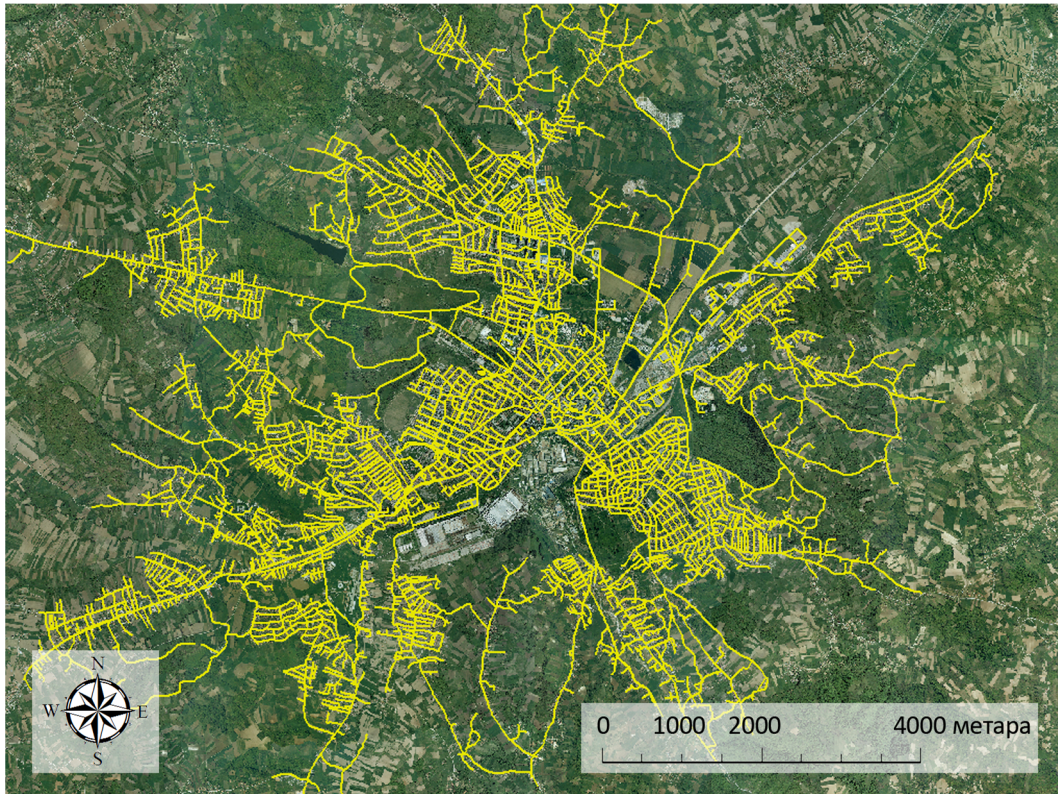
Ортофото мапа града преузета је од градског Јавног комуналног предузећа „Дирекција за урбанизам“. Ова мапа настала је снимањем из авиона и састоји се од 24 фајла у TIFF екстензији. Мапа је геопозиционирана коришћењем Gauss_Kruger-ове пројекције док је као географски координатни систем коришћен GCS_Hermannskogel. Приликом вршења анализа у ГИС софтверу мапа се учитава као позадински тематски лејер и њена улога је да боље прикаже стваран распоред елемената у простору.

Мрежа улица је такође преузета од ЈКП „Дирекција за урбанизам“, али је морала бити накнадно прилагођена за потребе вршења прорачуна у ГИС софтверу. На слици 5.14 приказана је ортофото мапа града Крагујевца са мрежом улица.

Уз сваку улицу, поред графичког приказа полилинијом, у базу података уписују се атрибути. Овде се најпре подразумева име и дужина улице у метрима, која се аутоматски прерачунава приликом учртавања улица и формирања мреже. Поред тога, за сваку улицу се, као атрибут, уноси време у минутима потребно комуналном возилу да прође кроз посматрану улицу (посебно за један и други смер кретања кроз улицу). Времена проласка кроз улице, односно просечне брзине возила по улицама, добијена су из базе података о путањама комуналних возила тј. снимањем GPS мерном опремом.

Обзиром да алтернативну путању возила, која се добије симулацијом у ГИС софтверу, треба применити у реалним саобраћајним условима, у мрежи улица морају бити означене све једносмерне улице, што се чини додавањем новог атрибута. Такође,

пошто се ради о 2D моделу улица, код улица које се на мапи секу на истим координатама, а нису физички спојене, као што је случај код надвожњака, као атрибут се уводи елевација чиме се повезују само сегменти улица који се спајају у истом чвору, а при томе имају исту надморску висину (елевација се бележи као атрибут сваког сегмента улице).



Слика 5.14 Ортофото мапа града са мрежом улица

Да би се избегло скретање возила на местима где је то забрањено (пуна линија, прелазак преко пешачког острва, итд.), мрежа улица је надограђена посебним лејером који се односи на забране скретања.

Такође, мрежа улица је морала бити модификована, обзиром да је дошло до промена од момента када је она формирана до тренутка вршења анализе (ово се односи на уцртавање нових кружних токова који су формирану у граду, али и других промена на саобраћајницама до којих је у међувремену дошло). Поред тога, велики број контејнера које празне возила ЈКП „Чистоћа“ налази се на паркиралиштима, или испред зграда, до којих, у постојећој мрежи улица, нису били формирану прилази. У том смислу, у оквиру мреже улица, изведене су одговарајуће корекције, како би анализа, у потпуности, била успешно изведена.

5.3 Оптимизација путања кретања возила коришћењем ГИС софтвера

Као што је у једном од претходних поглавља поменуто, ГИС софтвер представља један од елемената географског информационог система. На тржишту је могуће пронаћи велики број компанија које се баве развојем софтвера међу којима се истиче ESRI (Environmental Systems Research Institute) са традицијом, у овој области, дужом од тридесет година. Компанија има удео од око 30% на светском тржишту ГИС софтвера и процењује се да око 70% свих корисника ГИС-а користи софтвере управо ове компаније.

ArcGIS for Desktop је један од софтвера који је развила компанија ESRI и он ће бити коришћен у наставку за вршење анализа. За просторну анализу засновану на мрежи, користи се посебан додатни модул софтвера ArcGIS - Network Analyst. Овај модул представља моћну екстензију, која омогућава већи број различитих анализа, укључујући рутирање, проналазак најближег објекта, итд. Користећи ArcGIS Network Analyst корисник може да моделира динамички модел мреже улица који укључује реалне услове саобраћаја, као што су забрана скретања, ограничења брзине, висинска ограничења возила као и специфичне саобраћајне услове за различита доба дана. Коришћењем ове екстензије пружају се могућности за:

- израчунавање најкраће руте,
- проналажење најефикасније руте за возни парк од више возила који опслужује велики број локација,
- коришћење временских оквира када возило може да стигне на локацију,
- проналажење најближих објеката,
- утврђивање оптималних локација за објекте,
- дефинисање радијуса деловања заснованог на растојању или времену путовања,
- генерисање матрица путних трошкова дуж мреже.

У наставку ће бити приказан поступак којим се врши рутирање комуналних возила града Крагујевца, коришћењем база података које су раније описане. За проналажење оптималних путања овај модул, као основу, користи алгоритам који је развио Dijkstra (1959) који спада у тзв. „похлепне“ алгоритме и служи за добијање најкраће путање код усмерених графова са не-негативним променљивим. Овај алгоритам представља један од најједноставнијих алгоритама за налажење најкраће путање, али, такође, и један од најефикаснијих, иако је након њега развијен велики број других алгоритама. Његовим коришћењем, са једне стране, остварује се веома добар баланс између рачунарских ресурса и времена потребног за прорачун, а са друге, блискост добијене путање оптималној, која је рачунарски изводљива.

Алгоритам, у циљу решавања проблема рутирања возила, може бити заснован на једном од два критеријума:

- најкраћи пут – оптимална рута која је добијена на овај начин узима у обзир само локације контејнера које посматрано возило треба да испразни, док се променљиви услови саобраћаја не узимају у обзир,
- најмање време путовања – укупно време путовања возила представља збир времена које возило проведе у кретању између места прикупљања и времена потребног за пражњење контејнера. Време које возило проведе зависи од дужине сваког сегмента пута и брзине возила. Као што је раније описано, при креирању мреже улица, у базу података су уношене просечне брзине возила добијене теренским мерењем GPS мерном опремом. Узимајући просечну брзину возила на одређеним деоницама могу се добити различите путање, зависно од конкретних саобраћајних услова (руте се могу креирати за различито доба дана за које се уносе различите брзине возила, у складу са условима које диктира тренутна ситуација у саобраћају).

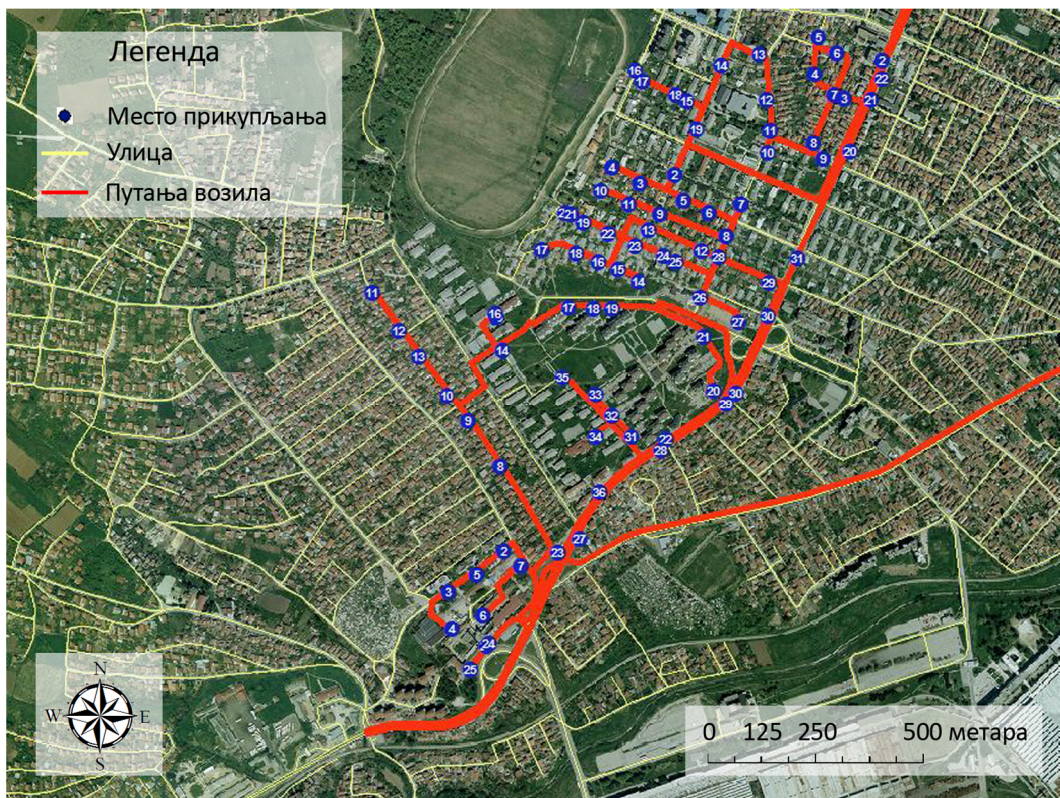
5.3.1 Оптимизација путања возила по критеријуму најмањег пређеног пута

Оптимизација путања кретања комуналних возила, при чему се као критеријум узима најкраћи пређени пут, биће приказана, на примеру анализе једне руте. На слици 5.15 приказана је рута једног комуналног возила са припадајућим местима прикупљања на којима су распоређени контејнери запремине 1,1 m³. Према подацима из базе података о путањама комуналних возила, ова рута састоји се из три циклуса пражњења контејнера, уз три одласка на депонију ради депоновања отпада. На почетку радног дана возило креће из гараже, а по завршетку последњег циклуса, након депоновања, поново се враћа у гаражу комуналног предузећа. Рута комуналног возила обухвата места прикупљања у више градских насеља.

Такође, на истој слици, у доњем делу мапе, могу се приметити два карактеристична, издвојена места за прикупљање отпада која су лоцирана на паркингу, у близини фабрике „Фиат Аутомобили Србија“. Укупна дужина постојеће руте износи 59,2 km. Анализом је утврђено да би било оправдано изузети два наведена места прикупљања, чиме би се пређени пут комуналног возила смањио за 3 km. Обзиром да сви контејнери који припадају рути возила морају бити испражњени, изузете локације, на којима се налази укупно пет контејнера, биће додате рути возила које истим данима празни контејнере лоциране у фабричком кругу. У том случају, укупна дужина пређеног пута руте возила коме су припојене нове локације повећала би се за око 500 метара. Поред овог крајње поједностављеног али брзог и ефикасног приступа, који се базирао на визуелном сагледавању слабих тачака система и којим је остварена уштеда од 2,5 километра, у другој фази анализе урађен је прорачун оптималне руте коришћењем ArcGIS Network Analyst-а. На слици 5.16 приказана је оптимизирана рута возила.



Слика 5.15 Постојећа рута возила



Слика 5.16 Оптимизована рута возила

Улазни подаци у прорачуну били су локације места прикупљања, број контејнера и мрежа улица са свим атрибутима, док је ортофото мапа града учитана као позадински слој. Поред ограничења која су дефинисана у самој мрежи улица (једносмерне улице и забране скретања), приликом симулације оптималне руте, искључена је могућност полукружних окретања возила, осим у случају слепих улица.

Добијена оптимална рута возила се такође састоји из три циклуса и њена укупна дужина износи 50,5 километара. Укупна уштеда, остварена кроз две фазе оптимизације, износи 8,7 km или 14,7 % у односу на постојећу руту. Имајући у виду чињеницу да наведено возило пролази ову путању 2 пута недељно, може се закључити да се модификацијом приказане путање комуналног возила остварује уштеда од преко 900 km на годишњем нивоу.

Поред графичког приказа оптимизоване руте на мапи града са редоследом обиласка места прикупљања, софтвер такође генерише текстуални фајл са навођењем возила скретање по скретање (енгл. Turn-by-turn). Праћењем ових упутстава возило се креће оптималном путањом добијеном прорачуном.

На начин који је описан на примеру претходне руте, извршена је оптимизација свих постојећих рута комуналних возила, при чему је показано да је коришћењем алтернативних путања возила могуће смањити број пређених километара за 13,7%.

Потребно је напоменути да су се, приликом симулирања алтернативних путања возила, користила два приступа. Први приступ је оптимизација комплетне руте комуналног возила, при чему се у оквиру нових путања мења редослед обиласка места прикупљања, без обзира на претходно дефинисане припадности ових локација појединим циклусима. Улазни параметар је капацитет возила и када се ово ограничење достигне, сматра се да возило одлази на депонију, чиме практично започиње нови циклус сакупљања отпада.

Други приступ подразумева оптимизацију сваког од постојећих циклуса сакупљања отпада у оквиру анализираних руте. У овом случају, локације места прикупљања остају придружене постојећим циклусима, а оптимизацијом се долази до енергетски ефикаснијих путања у оквиру сваког циклуса појединачно.

5.3.2 Оптимизација путања возила по критеријуму најмање потрошње горива

Приликом избора оптималне путање возила традиционално се користе критеријуми најкраћег пута или времена путовања. Међутим, постоје случајеви када најкраћи или најбржи пут није уједно и најекономичнији (Tavares et al., 2009, Ericsson et al., 2006). На потрошњу горива, а самим тим и на емисију издувних гасова, поред дужине пређеног пута и времена путовања утиче и низ других фактора. Стога је, за добијање најекономичније путање, у прорачун потребно укључити фактор потрошње горива. Развијени модел, коришћен за добијање најекономичније руте, приказан је на слици 5.17.



Слика 5.17 Структура модела за прорачун најјекономичније руте

Сваком сегменту улице, представљеном у мрежи улица линијом између два чвора (преко 7.000 сегмената) придодат је фактор потрошње горива. Укупна потрошња горива дуж одређене путање може се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$TFC = \sum_{i=1}^n L_{seg(i)} f_{c(i)} \quad (5.1)$$

где је TFC – укупна потрошња горива дуж путање, n – број сегмената улица укључених у оптималну путању, $L_{seg(i)}$ – дужина сегмента у метрима, и $f_{c(i)}$ – фактор потрошње горива за сегмент i .

Фактор потрошње горива зависи од типа возила и тренутних оперативних услова. Са циљем да се израчуна потрошња горива коришћен је метод базиран на програму Sorpert (Ntziachristos and Samaras, 2000). По овој методологији, упрошћено, потрошња горива је функција само брзине кретања возила и рачуна се коришћењем следеће једначине:

$$FC_v = 1068,4v^{-0,4905} \quad (5.2)$$

У претходној једначини FC_v [g/km] представља потрошњу горива у зависности од брзине v (km/h).

Брзине возила за поједине сегменте улица преузете су из претходно формиране базе података путања комуналних возила. У циљу да се симулирани проблем више приближи реалним условима, уводи се утицај саобраћајних услова који утичу на потрошњу горива. Овај утицај уводи се кроз фактор класе улица - SCF , тако да се фактор потрошње горива, за сваки сегмент улице, рачуна према следећој формули:

$$f_c = FC_v \cdot SCF \quad (5.3)$$

На потрошњу горива највећи утицај имају следећи фактори: тип окружења, ширина улице, регулисаност раскрсница семафором или саобраћајним знаком и мере за посебно успоравање саобраћаја (Ericsson et. al, 2006). Ова четири критеријума су се показала као најбитнија приликом прорачуна фактора потрошње горива и емисија гасова.

Окружење има велики утицај на саобраћај и на потрошњу горива. Под окружењем се подразумева део града у коме се налазе улице, при чему сваку зону карактерише одређени интензитет саобраћаја. По овом критеријуму све улице су подељене на три типа према зонама града у којима се налазе:

- улице у приградској зони,
- улице у градској зони,
- улице у екстра градској зони.

Ширина улице утиче на брзину одвијања саобраћаја. Према овом критеријуму улице су подељене, према броју саобраћајних трака, у две групе:

- са једном саобраћајном траком,
- са две саобраћајне траке.

Регулисаност раскрсница семафором или саобраћајним знаком такође утиче на учесталост заустављања, рад мотора у празном ходу, као и убрзању и успорењу возила. Према овом критеријуму, улице су подељене у три групе:

- улице регулисане семафором,
- улице са знаком СТОП или знаком уступања првенства пролаза,
- улице без семафора или знака СТОП.

Мере за успоравање саобраћаја које подразумевају лежеће полицајце, пешачка острва и слично, деле улице у две групе:

- са мерама за успорење саобраћаја,
- без мера за успорење саобраћаја.

Поделом улица на основу поменутих критеријума и њиховим комбиновањем добија се велики број класа улица. Међутим, неке од ових класа су у пракси непостојеће па је стога издвојено укупно 17 класа улица. Класе улица су, по редоследу од најмањег до највећег утицаја на повећање потрошње горива, приказане у табели 5.3.

Као што је у претходном делу поменуто, постојећа мрежа улица је ажурирана подацима о класама улица, тачније, сваком сегменту улице је додат коефицијент потрошње горива. Након тога, коришћењем модула Network Analyst оптимизирана је рута по критеријуму најмање потрошње горива. Извршена је оптимизација руте која је описана у одељку 5.3.1. На слици 5.18 приказана је рута добијена оптимизацијом по критеријуму најмање потрошње горива.

Табела 5.3 Класификација улица

| Класа улице | Окружење | Број трака | Семафор | СТОП | Мере за успорене саобраћаја |
|----------------|---------------------|------------|---------|------|-----------------------------------|
| 1 | Приградска зона | 2 | - | - | - |
| 2 | Приградска зона | 1 | - | - | - |
| 3 | Приградска зона | 1 | - | + | - |
| 4 | Градска зона | 2 | - | - | - |
| 5 | Градска зона | 2 | + | - | - |
| 6 | Градска зона | 1 | - | - | - |
| 7 | Градска зона | 1 | + | - | - |
| 8 | Градска зона | 1 | - | + | - |
| 9 | Градска зона | 1 | - | - | + |
| 10 | Градска зона | 1 | - | + | + |
| 11 | Екстра градска зона | 2 | - | - | - |
| 12 | Екстра градска зона | 2 | - | - | - |
| 13 | Екстра градска зона | 1 | + | - | - |
| 14 | Екстра градска зона | 1 | - | + | - |
| 15 | Екстра градска зона | 1 | - | - | + |
| 16 | Екстра градска зона | 1 | - | + | + |
| 17 | Екстра градска зона | 1 | + | - | - |



Слика 5.18 Рута оптимизована по критеријуму најмање потрошње горива

Најекономичнија рута је дужине 50,9 километара, што представља 400 метара дужу путању од руте оптимизоване коришћењем критеријума најкраћег пута. У циљу упоређивања потрошње горива, ових двеју путања, према једначинама 5.1 – 5.3, добијене су потрошње горива за обе путање, а њихов однос износи:

$$TFC_2/TFC_1 = 0,95 \quad (5.4)$$

где је:

- TFC_1 – укупна потрошња горива за руту оптимизовану по критеријуму најмањег пређеног пута,
- TFC_2 – укупна потрошња горива за руту оптимизовану по критеријуму најмање потрошње горива.

Резултат указује на уштеду од 5 % у потрошњи горива за другу руту, као и на чињеницу да постоје случајеви када најкраћа рута није најјекономичнија. Треба напоменути да је, за дефинисање класа улица и формирање веродостојнијих резултата, потребно урадити експериментално испитивање потрошње горива за сваку од постојећих класа улица.

5.4 Оптимизација просторног распореда места за прикупљање отпада и броја контејнера

Идеални систем за сакупљање отпада мора да укључи у прорачун локалне услове и да узме у обзир културолошке, демографске, географске, економске и социјалне факторе. Стога анализа просторног распореда места за прикупљање отпада мора бити извршена према расположивим подацима везаним за густину насељености, степен урбанизованости, специфични састав отпада за изабрани део града као и количини генерисаног отпада.

Отпад који се генерише у домаћинствима и привредним објектима привремено се, до доласка комуналног возила које врши сакупљање и транспорт отпада, складишти у контејнерима и кантама. Као што је у претходном поглављу наглашено, у Крагујевцу се за привремено чување отпада користе контејнери различитих запремина, при чему су најбројнији контејнери запремине $1,1 \text{ m}^3$, док се канте запремине 140 литара користе у индивидуалном типу становања, најчешће у насељима на ободу града. Фреквенца пражњења контејнера креће се од једном (а негде и два пута) дневно у ужем центру града, па до једном недељно у приградским насељима. Распоред и број контејнера, као и фреквенца пражњења, резултат су дугогодишњег искуства, чиме је успостављен функционалан систем којим су корисници задовољни, а град чист. Међутим, услед недостатка прорачуна који укључује минималне енергетске захтеве, у пракси се често среће ситуација да су места прикупљања међусобно постављена веома близу, што непотребно повећава трошкове сакупљања отпада услед честог заустављања комуналних возила. Такође, праћењем возила на терену, као и увидом у масу сакупљеног отпада и број испражњених контејнера по једном циклусу сакупљања отпада, често је просечна маса по контејнеру далеко испод масе која одговара пуном

контејнеру у складу са саставом отпада. Ово додатно увећава трошкове сакупљања отпада, јер се врши пражњење контејнера у којима има веома мало отпада.

Формирањем просторне базе података о местима за прикупљање комуналног отпада града Крагујевца створени су почетни услови за анализу и потенцијално унапређење кроз промену локација за прикупљање отпада и смањење броја контејнера до оптималног нивоа.

У наставку ће, на примеру изабраног дела града, бити приказана методологија за оптимизацију просторног распореда места прикупљања и броја контејнера која се састоји из две фазе:

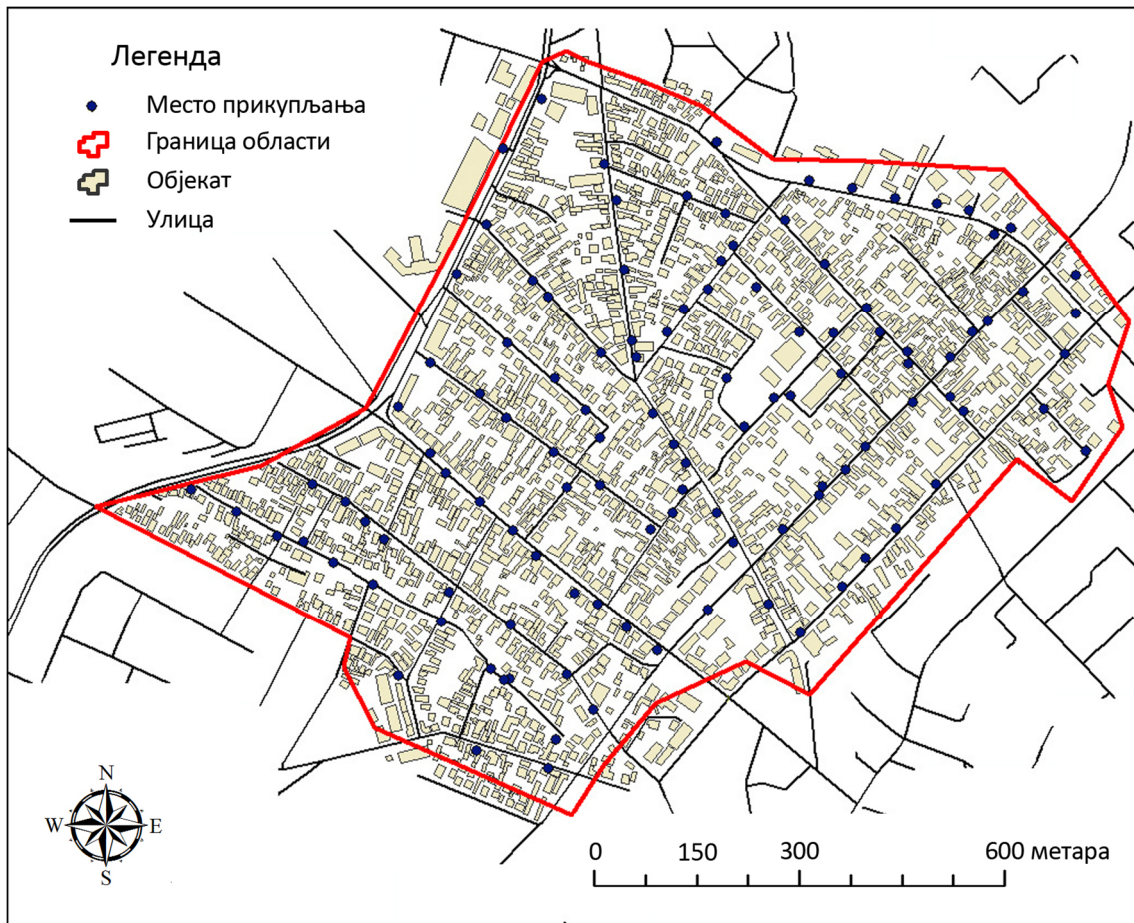
- у првој фази се коришћењем могућности ГИС-а дефинише нови просторни распоред у зависности од удаљености места за прикупљање отпада од објеката,
- друга фаза подразумева одређивање оптималног броја контејнера, на претходно дефинисаним локацијама, у складу са бројем становника, саставом отпада и врстом комерцијалних активности које се обављају у објектима.

За потребе анализе у ГИС софтверу неопходни су следећи подаци:

- ортофото мапа града,
- мрежа улица,
- база података о местима прикупљања,
- база података о путањама комуналних возила,
- база података о објектима,
- подаци о саставу комуналног отпада.

На слици 5.19 приказан је део града изабран за анализу. Овај део припада градском реону 1, у коме се контејнери празне једном дневно, а изабран је као репрезентативан, јер се поред великог броја стамбених објеката, колективног и индивидуалног типа, у овој зони налази и велики број објеката у којима се врше различити типови комерцијалних делатности.

Област истраживања приказана на слици 5.19 покрива површину од 0,8 km². У овој зони налази се 116 места прикупљања на којима је распоређено укупно 263 контејнера запремине 1,1 m³. Као што је поменуто, отпад се прикупља свакодневно, а сав отпад се сакупи из два циклуса. Према подацима са колске ваге на депонији, просечна маса прикупљеног отпада се креће између 11,5 и 12 тона.



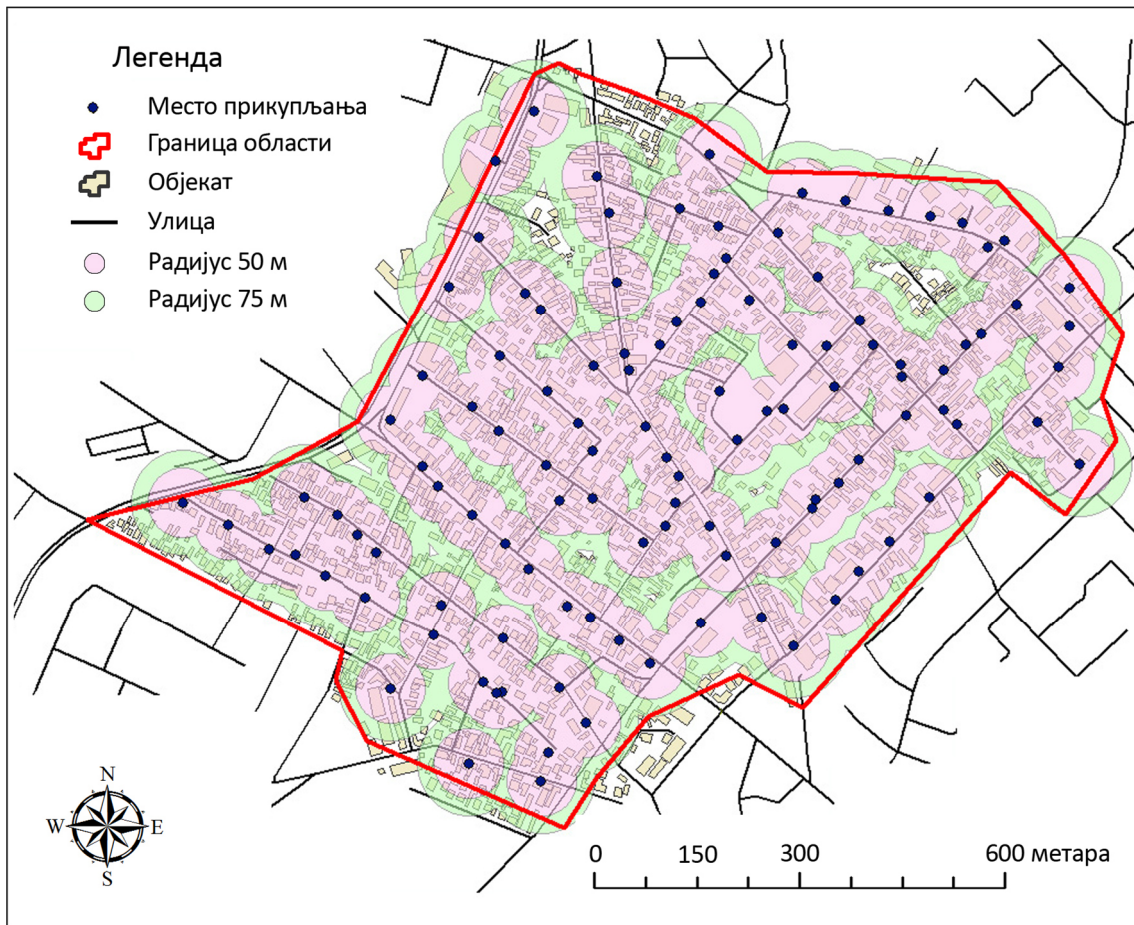
Слика 5.19 Део града обухваћен анализом

5.4.1 Просторни распоред места за прикупљање отпада

Са циљем да се одреди зона утицаја места прикупљања отпада у постојећем сценарију, око сваког места прикупљања постављена је зона утицаја у радијусу од 50 и 75 метара, што је приказано на слици 5.20.

Анализом постављених зона може се закључити да се скоро сви објекти налазе у зони од 75 метара од контејнера. Изузетак представљају две слепе улице у којима је отежан приступ комуналним возилима, па стога у њима не постоје контејнери, као и део објеката приказан у горњем средишњем делу слике 5.20. У овом делу града, који се налази изнад клиничког центра, не постоји могућност постављања контејнера услед недовољне ширине улице и тротоара.

На претходној слици уочава се, да су на појединим местима, контејнери постављени на веома малим растојањима – од 15 до 20 метара. Тиме се значајно утиче на повећање трошкова сакупљања отпада, јер честа заустављања и убрзања имају велики утицај на потрошњу горива комуналних возила.



Слика 5.20 Зона утицаја места прикупљања у постојећем сценарију

Максимално растојање објеката од контејнера у Србији законски није дефинисано. Према светским искуствима (Zamorano et al., 2009), сматра се да растојање до 75 метара не умањује комфор грађана приликом одлагања отпада. Сходно томе, за део града који је посматран, постоји могућност смањења броја места прикупљања и уклањања неефикасних контејнера. Места за прикупљање треба постављати дуж улица, тако да буду хомогено распоређена, и у складу са постојећим локацијама контејнера. Приликом избора нових локација за контејнере обавезно се, на терену, мора проверити да ли је на изабраном месту могуће поставити контејнере, а да при том не ометају грађане или саобраћај.

У циљу новог, ефикаснијег распореда места прикупљања комуналног отпада, формирана је база података објеката који се налазе у испитиваној зони. Коришћењем GPS мерне опреме, на мапи града је означен улаз у сваки објекат. За стамбене зграде означене су локације улаза у саму зграду, док је за куће са двориштем означен улаз у двориште. Поред тога, у базу је за сваки од стамбених објеката унета улица и број, број станова, односно чланова домаћинства, а за комерцијалне објекте површина и врста комерцијалних активности које се обављају у објекту. За стамбено пословне објекте унет је број становника и површине локала са врстама активности. База је прилагођена ГИС радном окружењу, на начин који је коришћен за претходно описане формиране просторне базе података.



Слика 5.21 Оптималан распоред места прикупљања

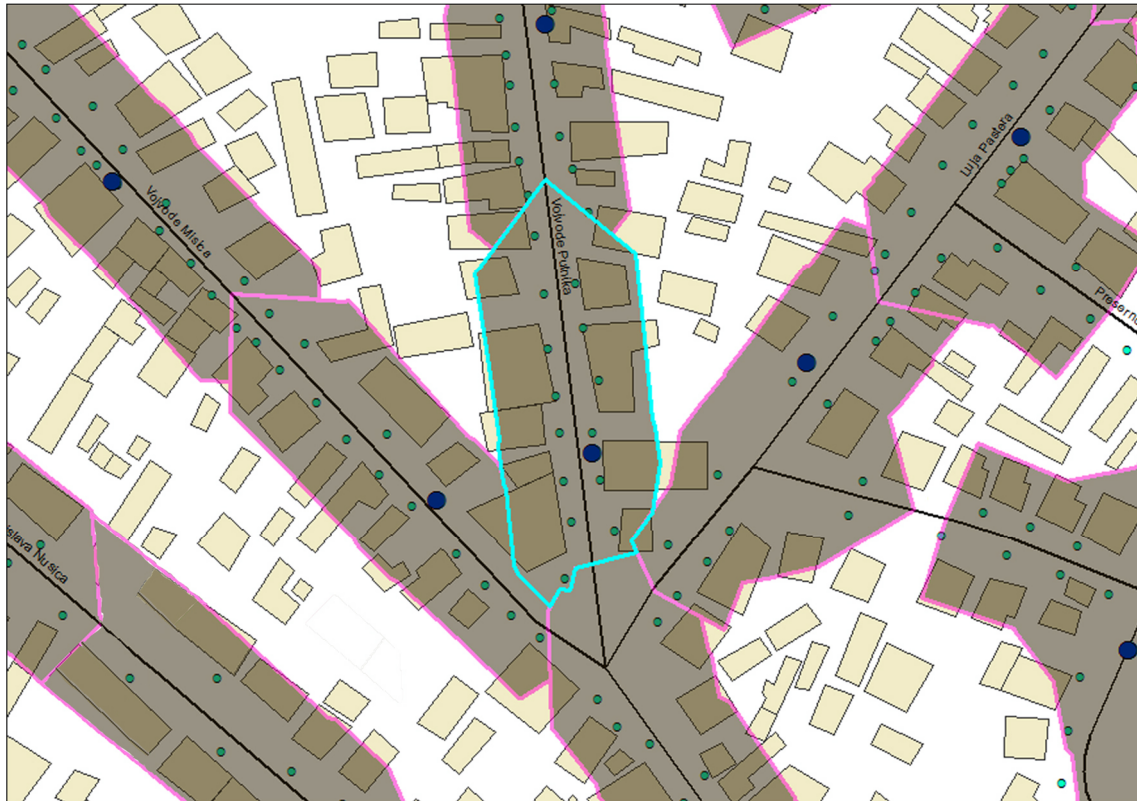
На слици 5.21 приказан је оптималан распоред места прикупљања у односу на постојеће објекте у посматраној зони. За свако место прикупљања формиран је полигон дуж мреже улица са импедансом од 75 метара. Са слике се може уочити да се сви објекти налазе у оквиру формираних полигона (осим на неколико локација где је било немогуће поставити контејнере и пре оптимизације), што значи да грађани морају да пређу највише 75 метара од места становања до најближег контејнера. Број места прикупљања који је довољан да покрије читаву посматрану зону износи 88 што је за 28 локација мање од постојећег стања, односно представља смањење од 24%.

5.4.2 Оптимизација броја контејнера

Пошто је дефинисан оптималан распоред места прикупљања, следећи корак подразумева одређивање потребног броја контејнера на свакој од одабраних локација.

Сваки објекат из базе података припојен је одређеном месту прикупљања (слика 5.22). На основу овога, може се дефинисати број становника који у њему живи, као и површина и тип комерцијалних објеката у оквиру утицаја места прикупљања.

У зависности од састава, у типичан контејнер запремине $1,1 \text{ m}^3$, може да се одложи 80 до 250 kg отпада. На основу претходних истраживања о саставу отпада у појединим зонама града (Јовичић и сар., 2009), усвојено је да просечна маса отпада по контејнеру износи 100 kg. При томе је узето у обзир да се контејнери пуне до нивоа од 90% своје запремине.



Слика 5.22 Формирани полигони у зони утицаја места прикупљања

Услед недостатка релевантних података о количинама генерисаног отпада према врсти комерцијалне делатности у Србији, коришћени су расположиви подаци из литературе (Karadimas et al., 2008) и то за градове са сличним карактеристикама састава и количина генерисаног отпада. Све комерцијалне активности се, према количини генерисаног отпада по m^2 површине, могу поделити у четири класе. У табели 5.4 приказана је категоризација комерцијалних активности, као и количина генерисаног отпада по класама.

Табела 5.4 Класе комерцијалних активности (Karadimas et al., 2008)

| Класа | Типичне комерцијалне активности | k_o (kg/m ²) |
|-------|--|----------------------------|
| A | Супермаркет, пекара, ресторан, пиљарница, рибарница, киоск брзе хране, бар, кафић, итд. | 0,398-0,419 |
| B | Месара, посластичарница, фризерска радња, цвећара, гаража, итд. | 0,200-0,225 |
| C | Позориште, црква, школа, књижара, апотека, пошта, итд. | 0,109-0,124 |
| D | Осигуравајућа компанија, кладионица, продавница обуће, продавница одела, златара, видео клуб, итд. | 0,011-0,024 |

Количина отпада, у килограмима, за свако место прикупљања може се израчунати према следећој формули:

$$m_o = nm_n + \sum_{i=1}^4 k_{oi}p_i \quad (5.4)$$

У претходној једначини дати параметри су:

- $m_o [kg]$ - маса отпада за посматрано место прикупљања,
- $n [-]$ - број становника који живе у објектима које покрива полигон места прикупљања,
- $m_n [kg]$ - просечна маса генерисаног отпада дневно по становнику за посматрану зону,
- $k_o [kg/m^2]$ – коефицијент количине отпада за одређену класу,
- $p [m^2]$ – укупна површина објекта припадајуће класе комерцијалних активности.

На основу резултата представљених у одељку 4.3, просечна количина отпада по становнику дневно, за подручје града Крагујевца износи 0,8 kg. Узимајући у обзир да се истраживано подручје налази у ужем центру града, у коме настаје већа количина отпада по становнику него у осталим деловима, усвојено је да маса која се генерише износи 1kg/становник/дан.

Табела 5.5 Објекти обухваћени изабраним местом прикупљања

| Улица и број | Намена објекта | n | p (m ²) | $k_o [kg/m^2]$ | Стамбени отпад (kg/dan) | Комерцијални отпад (kg/dan) |
|------------------------------------|---------------------|---|---------------------|----------------|-------------------------|-----------------------------|
| Војводе Путника бр. 1 | ресторан | | 250 | 0.4 | | 100 |
| Војводе Путника бр. 2 | кућа | 3 | | | 3 | - |
| Војводе Путника бр. 3 | кладионица | | 50 | 0.02 | | 1 |
| Војводе Путника бр. 4 | кућа | 4 | | | 4 | 0 |
| Војводе Путника бр. 5 | сервис беле технике | | 40 | 0.1 | - | 4 |
| Војводе Путника бр. 6 | кућа | 3 | | | 3 | - |
| Војводе Путника бр. 7 | кућа | 4 | | | 4 | - |
| Војводе Путника бр. 8 | кућа + локал | 4 | 80 | 0.1 | 4 | 8 |
| Војводе Путника бр. 9 | кућа | 3 | | | 3 | - |
| Војводе Путника бр. 9а | кућа | 5 | | | 5 | - |
| Војводе Путника бр. 10 | кућа | 2 | | | 2 | - |
| Војводе Путника бр. 11 | кућа | 4 | | | 4 | - |
| Војводе Путника бр. 11а | кућа | 3 | | | 3 | - |
| Војводе Путника бр. 13 | кућа | 3 | | | 3 | - |
| Σ | | | | | 38 | 113 |
| Укупна количина отпада (kg) | | | | | | 151 |

Број потребних контејнера на месту прикупљања рачуна се као количник укупне процењене масе отпада и усвојене максималне масе отпада по контејнеру. Резултат се заокружује на први већи цео број.

У наставку је, као пример, дато одређивање потребног броја контејнера за место прикупљања (селектовани полигон) приказано на слици 5.22. Објекти који се налазе у зони утицаја изабраног места прикупљања, заједно са њиховим карактеристикама, дати су табелом 5.5.

Изабрано место прикупљања опслужује укупно 11 стамбених кућа у којима живи 34 становника, ресторан, кладионицу, као и сервис беле технике. Према претходно приказаном прорачуну укупна дневна количина генерисаног отпада износи 151 килограм. Према томе, на ово место прикупљања потребно је поставити два контејнера.

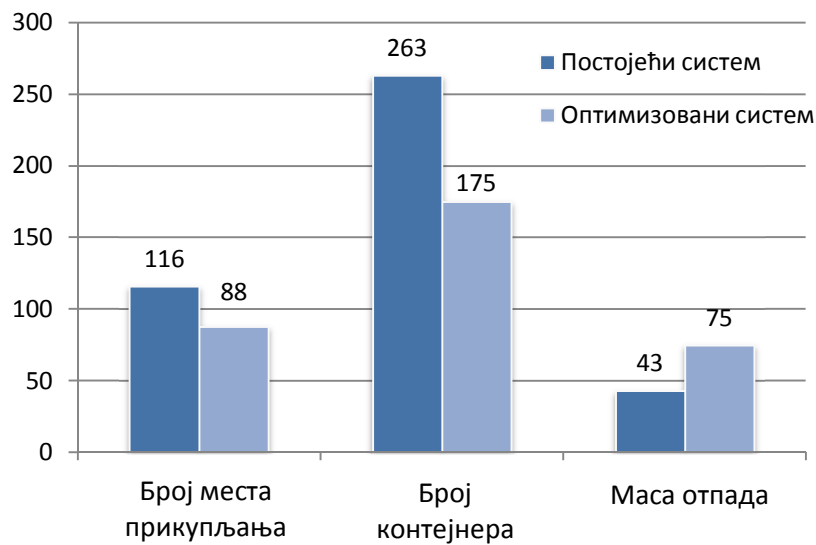
У складу са приказаном методологијом, урађен је прорачун потребних броја контејнера и на осталим местима прикупљања. Резултати добијени оптимизацијом просторног распореда и броја потребних контејнера приказани су у табели 5.6.

Табела 5.6 Резултати анализе унапређења просторног распореда и броја контејнера

| | Број МР | Број контејнера | Маса по контејнеру (kg) |
|--------------|---------|-----------------|-------------------------|
| Постојећи | 116 | 263 | 43 |
| Оптимизовани | 88 | 175 | 75 |
| Уштеда | 28 | 88 | 32 |

На слици 5.23 упоредо су приказане карактеристике постојећег и оптимизованог система.

Из табеле 5.6 се може уочити да део града обухваћен оптимизацијом може бити покривен са укупно 28 локација за прикупљање отпада мање од тренутног броја, а да се при томе не умањи комфор грађана приликом изношења отпада. Ово у пракси значи да возило које врши сакупљање отпада, из овог дела града, има 28 заустављања мање у односу на актуелни режим. Имајући у виду чињеницу да је потрошња горива знатно већа приликом заустављања и покретања возила из стања мировања у односу на прелазак исте путање уједначеном брзином, могу се очекивати значајне уштеде.



Слика 5.23 Карактеристике постојећег и оптимизованог система

Оптимизацијом броја потребних контејнера њихов број је редукован за 88, што такође представља финансијски бенефит у виду смањења потребне опреме за сакупљање отпада, смањења потрошње горива за рад хидраулике за подизање контејнера, али и краћег времена потребног за сакупљање отпада. Према оствареним мерењима, просечно време потребно за пражњење једног контејнера износи око 50 секунди, што значи да се иста количина отпада може сакупити за око сат времена мање у односу на постојећи сценарио.

6. Анализа енергетске ефикасности унапређеног система за сакупљање и транспорт комуналног отпада

Након оптимизације система за сакупљање и транспорт чврстог отпада на територији града Крагујевца, на начин који је детаљно описан у претходном тексту, потребно је извршити процену остварених економских и еколошких уштеда. Стога ће, у наставку, бити најпре дефинисани сви меродавни параметри процеса сакупљања и транспорта отпада у постојећем стању, односно матрица трошкова система за прикупљање отпада на тренутном нивоу, а затим детаљно анализирани уштеде добијене применом методологије за оптимизацију система. Процена смањења негативног утицаја на стање животне средине биће, такође, предмет анализе у наставку текста.

6.1 Енергетски расходи сакупљања и транспорта отпада

У оквиру експерименталних истраживања и формирања базе података о инфраструктури градског система за сакупљање отпада, описаном у претходном поглављу, прикупљени су сви релевантни подаци потребни за дефинисање енергетских расхода и параметара процеса сакупљања и транспорта чврстог отпада на територији града Крагујевца. Наиме, дневним евидентирањем и разврставањем потрошње погонских материјала по сваком елементу возног парка (возило – путања прикупљања - енергетски расходи), за свако возило, створени су услови за формирање техно-економске анализе функционисања комуналног система у постојећој инфраструктури (постојеће карактеристике места за прикупљање, постојећа подела града на реоне, постојећи систем путања прикупљања отпада). Резултати ове анализе дефинишу матрицу трошкова система за прикупљање отпада на тренутном нивоу.

За дефинисање постојећег стања процеса сакупљања отпада, као меродавни, изабрани су параметри приказани у табели 6.1. Детаљан опис параметара, као и начин на који се они утврђују дат је у тексту који следи.

Табела 6.1 Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада

| Параметар | Опис | Јединица мере |
|-----------|--|---------------|
| L_m | Укупно растојање које комунално возило пређе да би прикупило једну тону отпада | km/t |
| F_m | Количина потрошеног горива сведена на прикупљање једне тоне отпада | l/t |
| m_c | Просечна маса комуналног отпада по испражњеном контејнеру | kg/kont. |
| t_m | Просечно време путовања комуналног возила (гаража-депонија) сведено на тону отпада | min/t |
| t_c | Просечно време путовања комуналног возила (гаража-депонија) сведено на један контејнер | min/kont. |

Укупно растојање које комунално возила пређе (L_m) да би прикупило једну тону комуналног отпада представља један од основних параметара за дефинисање енергетских расхода система за сакупљање и транспорт отпада. Овај параметар дефинише се на следећи начин:

$$L_m = \frac{L_R}{m_R}, \quad (6.1)$$

где L_R представља укупно растојање, у километрима, које возило пређе у оквиру једне руте сакупљања отпада, а m_R укупну масу отпада коју је возило прикупило дуж посматране руте. Дужина пређеног пута, коришћена при утврђивању параметра L_m , добијена је мерењем на терену уз коришћење опреме која је описана у одељку 5.1. Ознаке рута, које ће се у наставку користити, у складу су са просторном базом података о путањама комуналних возила (одељак 5.2.2). Маса прикупљеног отпада m_R , такође, резултат је мерења. У процесу праћења комуналних возила и формирања базе података о путањама, податак о измереној количини депонованог отпада бележен је за сваку посматрану руту.

Количина потрошеног горива по тони прикупљеног отпада (F_m), указује на ефикасност процеса сакупљања и транспорта отпада. Начин дефинисања овог параметра дат је релацијом:

$$F_m = \frac{L_R \cdot A_c}{100 \cdot m_R} \quad (6.2)$$

У претходном изразу, A_c ($l/100km$) представља просечну потрошњу горива возила које врши сакупљање отпада. Просечна потрошња комуналних возила добијена је анализом и обрадом расположивих података о возном парку комуналног предузећа и представља просечан број потрошених литара горива на 100 пређених километара, посматрано на годишњем нивоу. Од укупно двадесет аутосмећара који се налазе у возном парку, седамнаест возила врше сакупљање и превоз искључиво мешаног комуналног отпада, а њихове карактеристике су дате у табели 6.2.

Маса комуналног отпада по испражњеном контејнеру (m_c), одређује се коришћењем следеће једначине:

$$m_c = \frac{m_R}{N_c} \quad (6.3)$$

У претходној формули, N_c представља број испражњених контејнера током посматране руте. Број места прикупљања и број контејнера у складу су са просторном базом података о местима прикупљања, чији је начин формирања описан у одељку 5.2.1. Анализом параметра m_c добијају се информације о ефикасности просторног распореда контејнера и/или фреквенце њиховог пражњења.

Просечно утрошено време путовања комуналног возила сведено на тону отпада (t_m) може да се дефинише на следећи начин:

$$t_m = \frac{t_R}{m_R} \quad (6.4)$$

где је t_R укупно трајање руте возила (укључујући време које возило проведе у путовању, као и мировању док се контејнери празне и отпад депонује). Време трајања рута, коришћено у даљој анализи, одређено је детаљним мерењима на терену и у складу је са базом података о путањама возила.

Табела 6.2 Просечна потрошња аутосмеђара

| Ознака | Регистрација | Година производње | Носивост | | Врста отпада | A_c (l/100km) |
|--------|--------------|-------------------|----------------|-------|--------------|--------------------|
| | | | m ³ | t | | |
| SM01 | KG 046 TŽ | 1991. | 19 | 13,00 | меш. ком. | 81,5 |
| SM02 | KG 056 XĆ | 1990. | 16 | 4,94 | меш. ком. | 68,3 |
| SM03 | KG 029 ĐM | 1993. | 16 | 5,60 | меш. ком. | 50,7 |
| SM04 | KG 068 KŽ | 1987. | 19 | 8,60 | меш. ком. | 77,4 |
| SM05 | KG 023 AŽ | 1996. | 19 | 10,00 | меш. ком. | 109,8 |
| SM06 | KG 068 ŽĐ | 1999. | 19 | 11,40 | меш. ком. | 77,8 |
| SM07 | KG 016 IŽ | 2007. | 16 | 5,50 | меш. ком. | 55,6 |
| SM08 | KG 015 IŽ | 2006. | 16 | 5,94 | меш. ком. | 56,3 |
| SM09 | KG 023 AV | 1996. | 16 | 7,20 | меш. ком. | 74,9 |
| SM10 | KG 027 ŽŠ | 1993. | 19 | 13,00 | меш. ком. | 77,9 |
| SM11 | KG 054 RY | 2003. | 15 | 8,00 | меш. ком. | 76,1 |
| SM12 | KG 033 SČ | 1991. | 16 | 5,60 | меш. ком. | 62,5 |
| SM13 | KG 029 ĐP | 1992. | 16 | 6,80 | меш. ком. | 75,6 |
| SM14 | KG 063 YŽ | 1991. | 19 | 9,63 | меш. ком. | 93,5 |
| SM15 | KG 026 JA | 1996. | 19 | 11,40 | меш. ком. | 96,2 |
| SM16 | KG 068 YJ | 1999. | 19 | 11,40 | меш. ком. | 82,9 |
| SM17 | KG 029 ĐM | 1993. | 16 | 6,60 | меш. ком. | 73,2 |

Параметар t_c , који представља време утрошено на сакупљање отпада сведено на један контејнер, по аналогији са претходним параметром, дефинише се као :

$$t_c = \frac{t_R}{N_c} \tag{6.5}$$

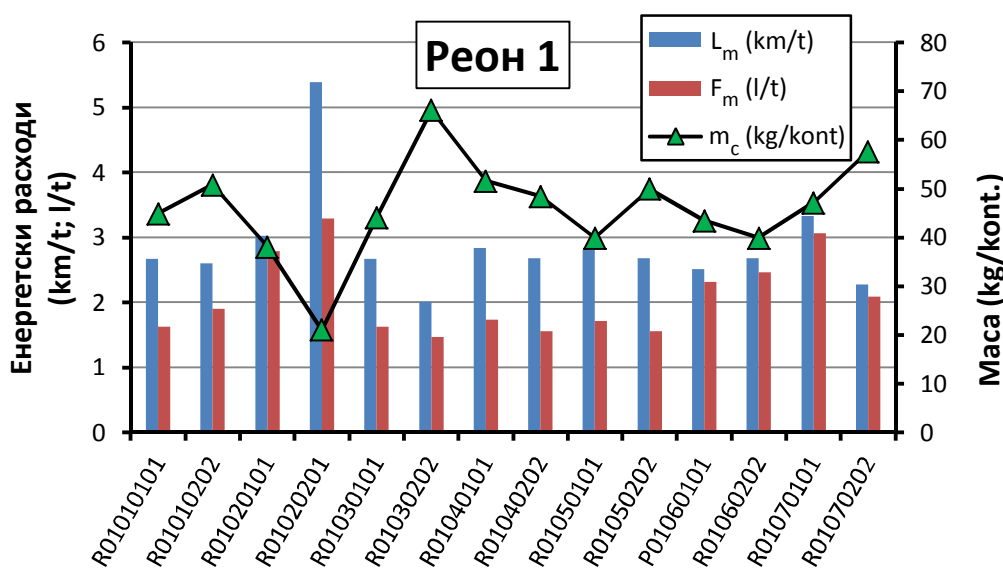
Имајући у виду чињеницу да је град Крагујевац подељен на једанаест градских реона из којих се сакупља отпад, приказ енергетских расхода процеса сакупљања и транспорта отпада, као и осталих претходно дефинисаних меродавних параметара, извршен је по реонима.

Као репрезентативан, изабран је градски реон 1 који обухвата ужи центар града одакле се отпад сакупља и више пута дневно. Због тога представља одређену специфичност која се одражава на енергетске расходе. Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада, за овај реон, приказани су у табели 6.3.

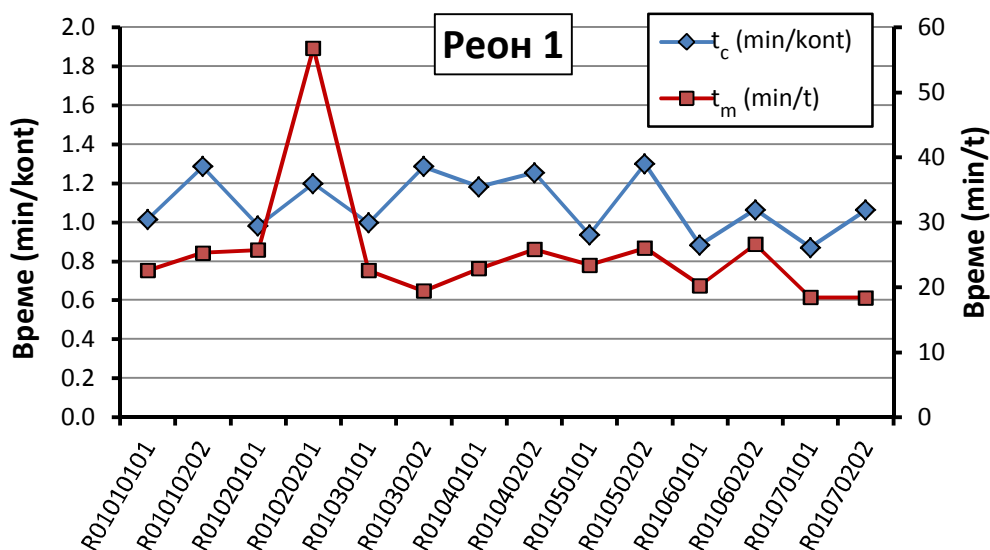
Табела 6.3 Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада градског реона 1

| Рута | L_m (km/t) | F_m (l/t) | m_c (kg/kont.) | t_m (min/t) | t_c (min/kont.) |
|-----------|-----------------|----------------|---------------------|------------------|----------------------|
| R01010101 | 2,67 | 1,63 | 44,90 | 22,61 | 1,01 |
| R01010202 | 2,60 | 1,90 | 50,81 | 25,29 | 1,29 |
| R01020101 | 3,03 | 2,79 | 38,11 | 25,77 | 0,98 |
| R01020201 | 5,39 | 3,29 | 21,07 | 56,86 | 1,20 |
| R01030101 | 2,67 | 1,63 | 44,07 | 22,61 | 1,00 |
| R01030202 | 2,01 | 1,47 | 66,11 | 19,45 | 1,29 |
| R01040101 | 2,84 | 1,73 | 51,61 | 22,90 | 1,18 |
| R01040202 | 2,68 | 1,55 | 48,46 | 25,87 | 1,25 |
| R01050101 | 2,81 | 1,71 | 39,89 | 23,45 | 0,94 |
| R01050202 | 2,68 | 1,55 | 49,95 | 26,03 | 1,30 |
| R01060101 | 2,51 | 2,31 | 43,50 | 20,28 | 0,88 |
| R01060202 | 2,68 | 2,46 | 39,91 | 26,64 | 1,06 |
| R01070101 | 3,34 | 3,07 | 47,12 | 18,46 | 0,87 |
| R01070202 | 2,27 | 2,09 | 57,66 | 18,42 | 1,06 |

Дијаграмски приказ упоредне анализе претходно приказаних енергетских расхода, по рутама, за изабрани реон, представљен је сликама 6.1 и 6.2.



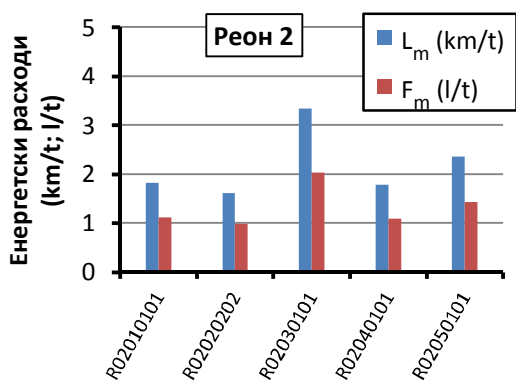
Слика 6.1 Енергетски расходи процеса сакупљања и транспорта отпада реона 1



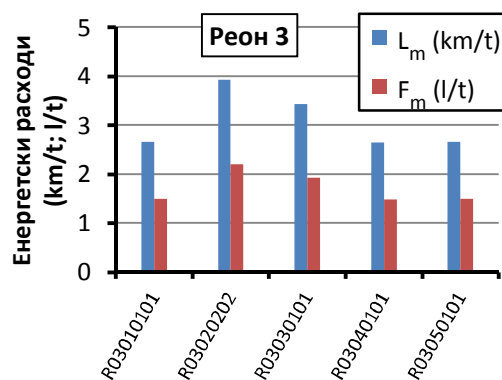
Слика 6.2 Временски параметри процеса сакупљања и транспорта отпада реона 1

На приказаним дијаграмима се може уочити да су енергетски расходи по рутама у оквиру анализираниог реона прилично уједначени, осим за једну руту у којој се појављују одређена одступања. Детаљном анализом наведене руте, дошло се до закључка да је важан узрок високих енергетских расхода специфичан састав отпада који возило сакупља. Наиме, ради се о ужем центру и најгушћој комерцијалној зони града, па у саставу отпада доминира амбалажни отпад, који је у овом случају, најчешће одлаган у контејнере за мешани комунални отпад. Поред тога, у овом делу града, отпад се сакупља два пута у току дана, па је честа појава ниже попуњености контејнера који се празне у поподневној смени.

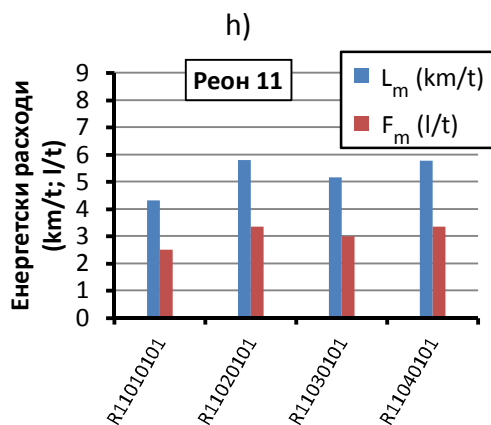
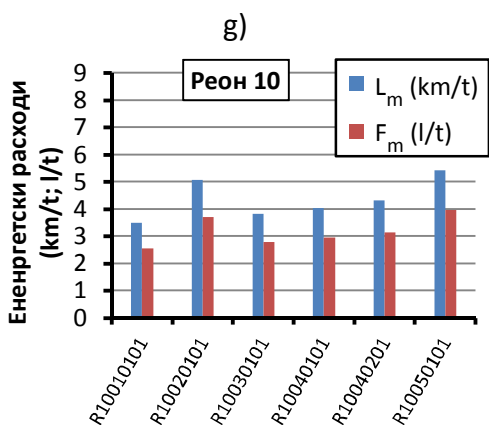
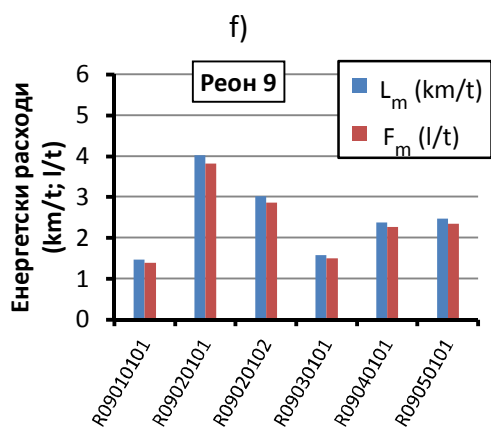
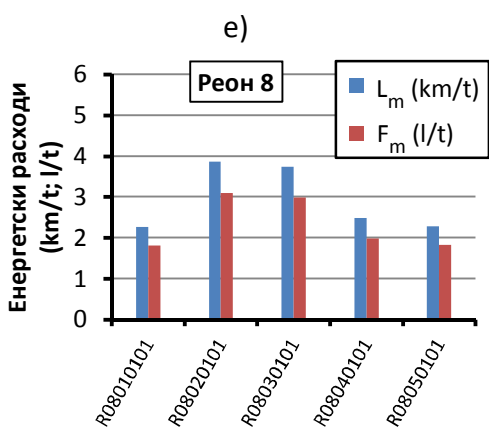
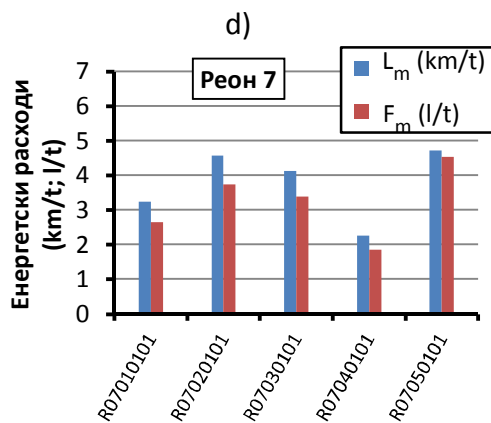
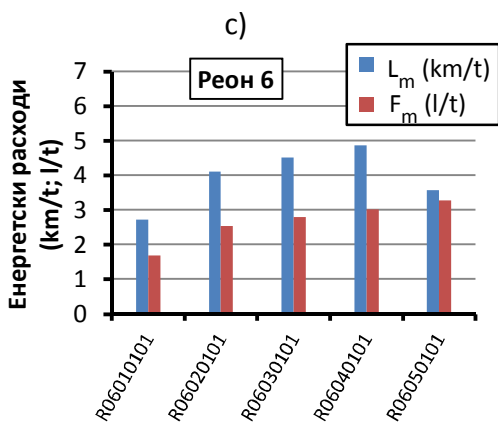
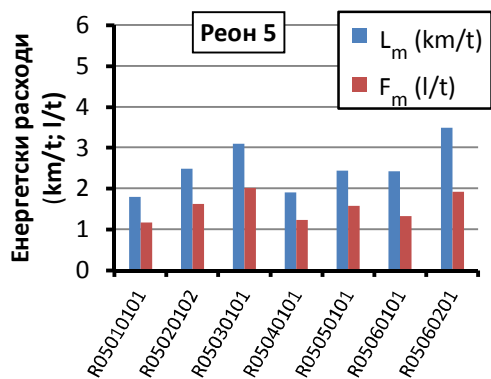
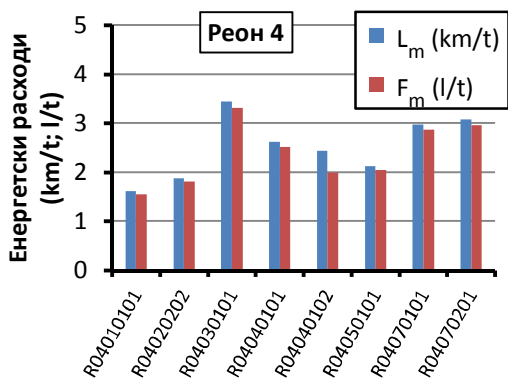
Енергетски расходи процеса сакупљања и транспорта отпада у оквиру осталих десет градских реона приказани су на слици 6.3.



a)

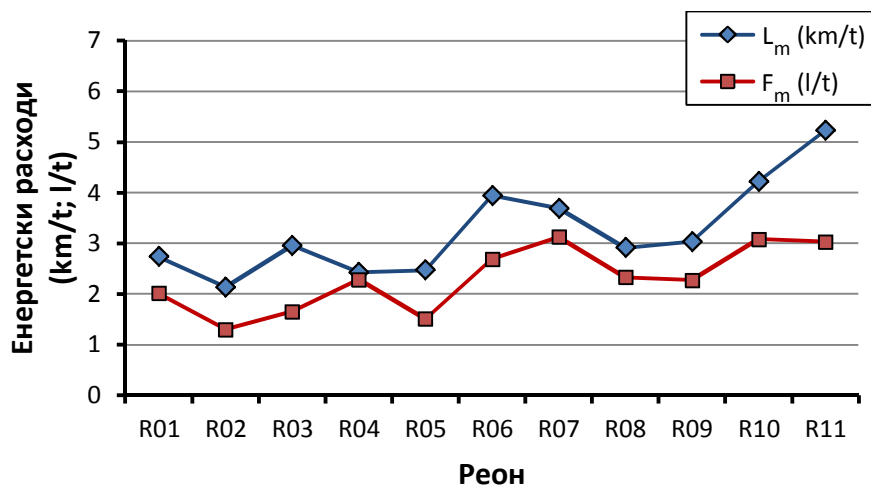


b)



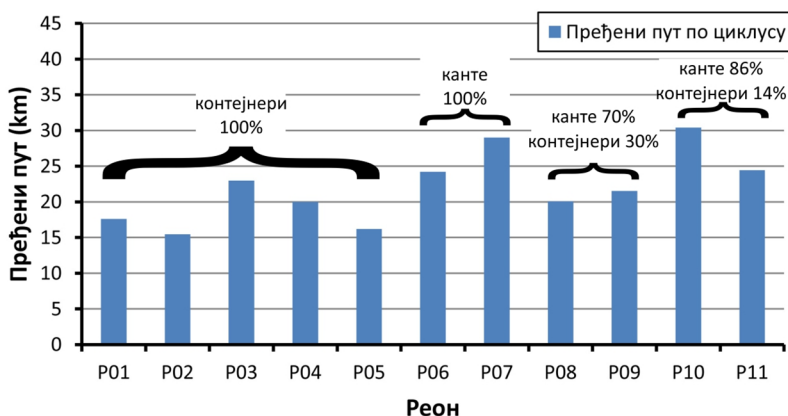
Слика 6.3 Енергетски расходи сакупљања и транспорта отпада по реонима

Анализом приказаних дијаграма уочава се да енергетски расходи процеса сакупљања и транспорта отпада могу битно да се разликују, па чак и у оквиру истог реона. Најутицајнији фактори, који доводе до ових одступања, су значајне варијације у саставу отпада, као и различити облици становања (индивидуални или колективни), који се могу јавити у оквиру исте зоне града. Просечне вредности енергетских расхода по реонима дате су на слици 6.4.



Слика 6.4 Упросечени енергетски расходи процеса сакупљања отпада по реонима

Поређењем вредности енергетских расхода по реонима, долази се до закључка да је у првих пет градских реона број пређених километара и утрошених литара горива, по тони прикупљеног отпада, прилично уједначен. Реони 6 – 11 обухватају делове града у којима преовлађује индивидуални тип становања, где се отпад претежно одлаже у канте запремине 140 литара. Овакав вид сакупљања отпада значајно увећава енергетске расходе комуналних возила. Ово постаје још очигледније уколико се размотри просечан број пређених километара по циклусу сакупљања отпада у различитим реонима. На дијаграму са слике 6.5, види се да у реонима, у којима као посуде за сакупљање отпада преовлађују канте, возило пређе знатно већи број километара него у реонима где су распоређени контејнери. На просечан број пређених километара, по циклусу сакупљања отпада, поред саме структуре реона, утиче и удаљеност реона од депоније на коју се отпад одлаже.



Слика 6.5 Просечан број километара циклуса по реонима

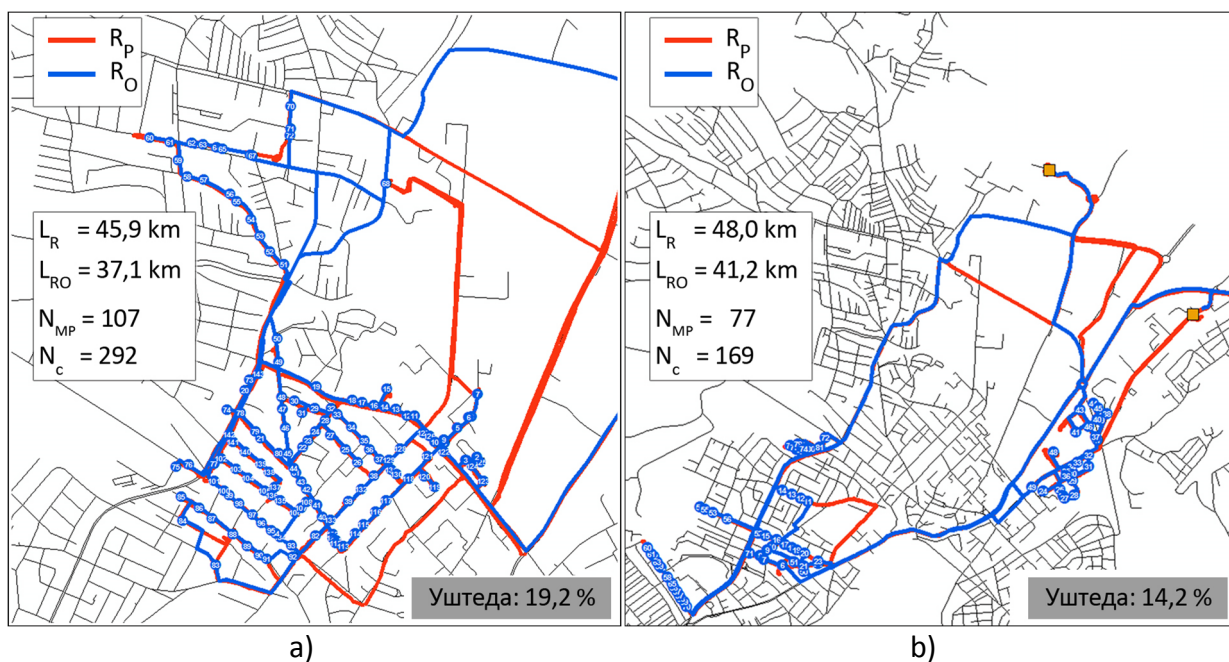
6.2 Анализа уштеда енергетских расхода

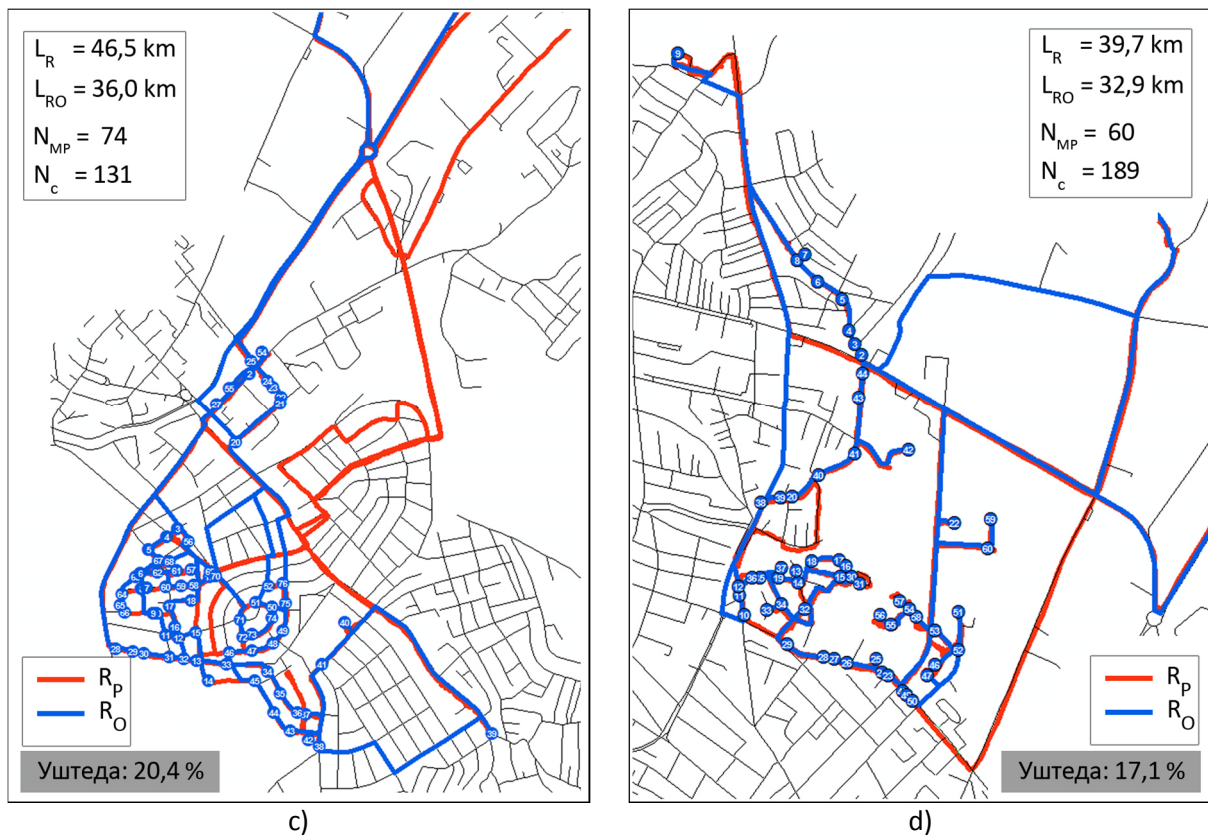
Према дефинисаној методологији описаној у одељку 5.3.1, извршена је оптимизација свих регистрованих путања из просторне базе података о путањама комуналних возила, у оквиру 11 градских реона. Свака путања је детаљно анализирана, а за оптимизацију су коришћена два приступа.

Први приступ је оптимизација комплетне руте комуналног возила, при чему се у оквиру нових путања мења редослед обиласка места прикупљања, без обзира на претходно дефинисане припадности ових локација појединим циклусима. Улазни параметар је капацитет возила и када се ово ограничење достигне, сматра се да возило одлази на депонију, чиме практично започиње нови циклус сакупљања отпада.

Други приступ подразумева оптимизацију сваког од постојећих циклуса сакупљања отпада у оквиру анализираних руте. У овом случају, локације места прикупљања остају придружене постојећим циклусима, а оптимизацијом се долази до енергетски ефикаснијих путања у оквиру сваког циклуса појединачно.

На слици 6.6 приказано је неколико карактеристичних примера оптимизованих рута, односно најефикаснијих путања комуналних возила којима је остварена највећа уштеда у пређеном путу. Слика 6.6а приказује карактеристичну руту која припада првом градском реону. Њеном оптимизацијом број пређених километара се смањује са $R_P = 45,9$ km, на $R_O = 37,1$ km, по рути, што представља уштеду од 19,2%. Рута се састоји из два циклуса сакупљања, опслужује 107 места прикупљања (N_{MP}) на којима се налазе 292 контејнера (N_C). Променом редоследа обиласка места прикупљања као и избором енергетски мање захтевних улица долази до остваривања уштеда, што се може уочити и на осталим приказаним примерима (слика 6.6b – 6.6d).





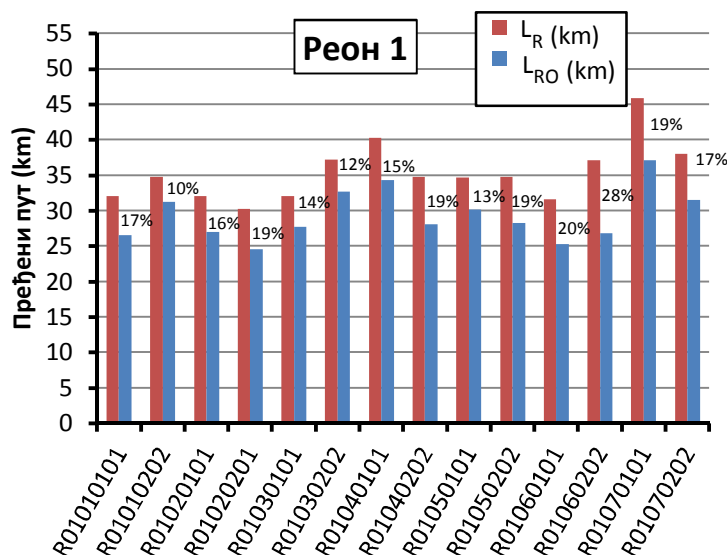
Слика 6.6 Карактеристични примери оптимизација рута

Резултати оптимизације градског реона 1 дати су у табели 6.4. Ознаке рута су у складу са базом података о путањама комуналних возила. L_R представља дужину постојеће руте, L_{RO} дужину оптимизоване руте добијене прорачуном, док је L_S остварена уштеда у километрима по рути, а L_{SP} уштеда изражена у процентима.

Табела 6.4 Оптимизација пређеног пута комуналних возила градског реона 1

| Ознака руте | L_R (km) | L_{RO} (km) | L_S (km) | L_{SP} (%) |
|-------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|
| R01010101 | 32,1 | 26,6 | 5,5 | 17,13 |
| R01010202 | 34,8 | 31,3 | 3,5 | 10,06 |
| R01020101 | 32,1 | 27,0 | 5,1 | 15,89 |
| R01020201 | 30,3 | 24,6 | 5,7 | 18,81 |
| R01030101 | 32,1 | 27,7 | 4,4 | 13,71 |
| R01030202 | 37,2 | 32,7 | 4,5 | 12,10 |
| R01040101 | 40,3 | 34,3 | 6,0 | 14,89 |
| R01040202 | 34,8 | 28,1 | 6,7 | 19,25 |
| R01050101 | 34,7 | 30,2 | 4,5 | 12,97 |
| R01050202 | 34,8 | 28,3 | 6,5 | 18,68 |
| R01060101 | 31,6 | 25,3 | 6,3 | 19,94 |
| R01060202 | 37,1 | 26,8 | 10,3 | 27,76 |
| R01070101 | 45,9 | 37,1 | 8,8 | 19,17 |
| R01070202 | 38,0 | 31,5 | 6,5 | 17,11 |
| Σ | 495,8 | 411,5 | 84,3 | 17,00 |

Као што се из претходне табеле може видети, уштеде у броју пређених километара, добијене оптимизацијом у оквиру реона 1, крећу се у границама од 10,06 до 27,76%. Укупна остварена уштеда износи 17% или 84,3 километра на недељном нивоу, односно нешто преко 4.380 километара годишње. Дијаграмски приказ остварених уштеда по рутама у оквиру реона 1 дат је на слици 6.7.



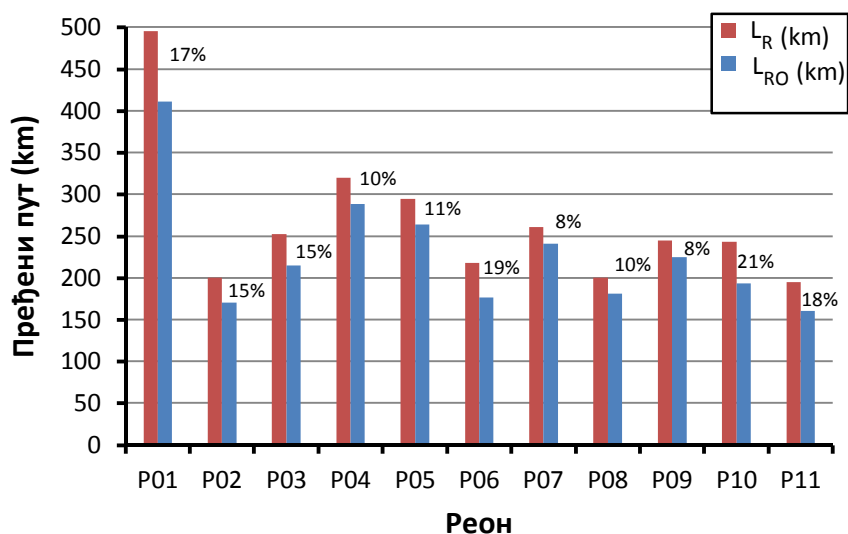
Слика 6.7 Дијаграмски приказ остварених уштеда у реону 1 (L_R – дужина постојеће руте, L_{RO} – дужина оптимизоване руте)

Укупне уштеде остварене оптимизацијом путања возила, по реонима, дате су у табели 6.5.

Табела 6.5 Оптимизација пређеног пута комуналних возила по реонима

| Реон | L_R (km) | L_{RO} (km) | L_S (km) | L_{SP} (%) |
|----------|---------------|------------------|---------------|-----------------|
| R01 | 495,8 | 411,5 | 84,3 | 17,00 |
| R02 | 200,8 | 170,6 | 30,2 | 15,02 |
| R03 | 252,8 | 215,3 | 37,5 | 14,83 |
| R04 | 320,1 | 288,5 | 31,6 | 9,87 |
| R05 | 295,2 | 264,2 | 31,0 | 10,50 |
| R06 | 218,0 | 176,5 | 41,5 | 19,04 |
| R07 | 261,0 | 240,9 | 20,1 | 7,70 |
| R08 | 200,9 | 181,6 | 19,3 | 9,61 |
| R09 | 245,3 | 225,0 | 20,3 | 8,28 |
| R10 | 243,3 | 193,3 | 50,0 | 20,55 |
| R11 | 195,5 | 160,7 | 34,8 | 17,80 |
| Σ | 2928,7 | 2528,1 | 400,6 | 13,68 |

Процентуално највећа уштеда је остварена у реону 10, а најмања у реону 7. Просечна остварена уштеда у пређеном путу оптимизованог система, у односу на постојећи, износи 13,7%. Дијаграмски приказ остварених уштеда, по реонима, дат је на слици 6.8.



Слика 6.8 Дијаграмски приказ остварених уштеда по реонима (L_R – дужина постојећих рута, L_{RO} – дужина оптимизованих рута)

Укупна уштеда која је остварена оптимизацијом износи 400,6 километара на недељном нивоу. Ово у пракси значи да возила могу да обаве исти задатак и прикупе исту количину отпада, као у постојећем систему, а да при томе пређу годишње 20.830 километара мање.

Смањењем броја пређених километара по тони сакупљеног отпада остварују се велике, како економске, тако и еколошке уштеде. У наредном делу текста посебна пажња ће бити посвећена процени остварених еколошких уштеда оптимизованог у односу на постојећи систем.

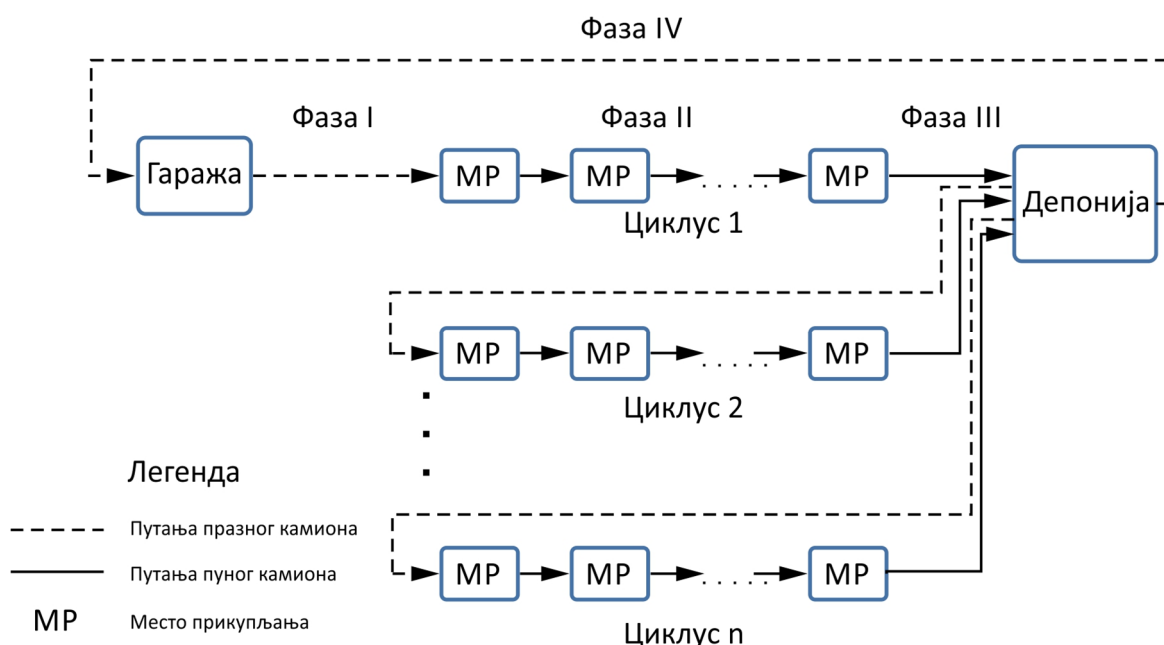
6.3 Анализа еколошких уштеда унапређеног система за сакупљање отпада

Сектор транспорта представља један од највећих емитера гасова стаклене баште, нарочито угљен-диоксида. Сходно томе и комунална возила која врше сакупљање и транспорт отпада су велики загађивачи животне средине. Имајући у виду чињеницу да возни парк ЈКП „Чистоћа“ чине возила просечне старости 15 година, која углавном погоне дизел мотори који испуњавају Еуро I норму о емисионим гасовима, уштеде оптимизованог система рута још више добијају на значају. Постоје различите методе за прорачун емисије гасова стаклене баште у процесу сакупљања и транспорта отпада. У последњих неколико година се, поред уобичајених метода за рутирање, развија и посебна група алгоритама под називом Green routing (зелено рутирање) (Sbihi and Eglese, 2007), која у први план ставља еколошке уштеде приликом транспорта. Најтачнији метод за прорачун уштеда подразумева детаљну анализу сваке руте. Овакав прорачун укључује велики број параметара и у наставку текста, биће детаљно објашњен на примеру једне оптимизоване руте возила.

Један од начина за анализу идентификовања оптерећења животне средине и оцену утицаја на животну средину јесте примена концепта оцењивања животног циклуса (енгл. Life Cycle Assessment – LCA). Овај концепт може се успешно применити и на систем управљања комуналним отпадом. У наставку ће бити дат кратак опис LCA методологије, чијом применом је извршена анализа утицаја на животну средину процеса сакупљања и транспорта отпада за два сценарија, за постојећи и за оптимизовани систем.

6.3.1 Процена смањења емисије гасова стаклене баште унапређеног система за сакупљање отпада на примеру једне руте

Главне активности у процесу сакупљања и транспорта комуналног отпада могу се поделити у четири основне фазе. На слици 6.9 је шематски приказано кретање комуналног возила у процесу сакупљања и транспорта отпада по фазама.



Слика 6.9 Процес сакупљања и транспорта отпада по фазама

На почетку радног дана возило креће из гараже комуналног предузећа. Возило тада, празно, путује до реона града у коме се врши сакупљање отпада. Ово представља I фазу у процесу сакупљања и транспорта отпада.

Фаза II почиње доласком возила на локацију где се врши прикупљање отпада (MP), односно до места где је смештен први контејнер. Возило се зауставља код места прикупљања и наставља да ради на празном ходу док радници комуналне службе привуку контејнер до возила. Затим се контејнер, уз помоћ хидраулике на возилу, подиже и његов садржај се празни у товарни простор где се прикупљени отпад сабија. Радници, затим, враћају контејнер и понављају поступак док се не испразне сви контејнери који се налазе на том месту прикупљања. Након тога, возило убрзава и креће се до следеће локације за прикупљање отпада, где се зауставља и на претходно

описани начин понавља се поступак. Фаза II траје све док се комунално возило не напуни.

Када се возило напуни, почиње фаза III, када се оно усмерава ка депонији или неком другом објекту за истовар отпада (трансфер станица или постројење за третман отпада). Тиме се завршава један циклус сакупљања отпада.

Нови циклус почиње поласком возила са депоније и усмеравањем ка новој локацији за прикупљање отпада, што је аналогно претходно дефинисаној фази I. Сваки следећи циклус се, на описани начин, понавља и завршава истоваром отпада. На крају радног дана празно возило се од депоније одвози до гараже, и овај пут представља фазу IV у процесу сакупљања и транспорта отпада.

Фазе I, III и IV представљају транспорт отпада. Возило се креће дуж мреже улица града, у фазама I и IV празно, а у фази III оптерећено масом сакупљеног отпада. Транспорт отпада најчешће се описује, у енергетском смислу, бројем утрошених литара горива по километру пређеног пута. У оваквим условима могу се, у прорачунима потрошње горива и емисије издувних гасова, користити спецификације које дају произвођачи возила, као што су: просечна потрошња возила и припадајуће емисије издувних гасова у зависности од оптерећења возила (празно или пуно возило) за услове вожње у урбаној средини.

Фаза II представља сакупљање отпада, при чему се возило креће од једног до другог места прикупљања. Потрошња горива и емисије гасова у оваквим условима вожње битно се разликују од потрошње и емисија у фазама транспорта отпада. Услови под којима возила раде приликом сакупљања отпада се разликују у зависности од реона града, али варирају и унутар једног реона (различито време потребно за пражњење контејнера, различито растојање између места прикупљања, итд). У овој фази, због свега наведеног, за процену потрошње горива и емисија гасова потребно је детаљно анализирати сваку руту и у прорачун увести већи број параметара.

Када се говори о потрошњи горива, увек се полази од растојања, које одређено возило треба да пређе, као најбитнијег параметра који утиче на количину потрошеног горива. У процесу сакупљања и транспорта комуналног отпада, поред пређеног пута, на потрошњу горива утичу и други фактори, као што су брзина возила, убрзање, нагиб пута, број заустављања, оптерећење возила, итд.

У фази сакупљања отпада, возило троши гориво у вожњи, прелазећи растојања између места прикупљања, као и у раду на празном ходу, приликом пражњења контејнера. Сходно томе, укупна емисија (E_i) полутанта i може се добити као збир емисија датог полутанта током вожње ($E_{i,d}$) и током мировања са мотором на празном ходу ($E_{i,idle}$), што је представљено следећом релацијом:

$$E_i = E_{i,d} + E_{i,idle} \quad (6.6)$$

Време у коме возило стоји у месту (t_{idle}), док се врши пражњење контејнера ($t_{c,idle}$) и депоновање отпада ($t_{l,idle}$), веома често износи више од 50% од укупног времена трајања процеса сакупљања и транспорта отпада. Према подацима доступним у

литератури (Larsen et al., 2009), потрошња горива ($A_{c,idle}$), приликом рада комуналног возила на празном ходу, износи 2 до 4 литра на сат. При том режиму, емисија полутаната ($e_{i,idle}$), настала сагоревањем једног литра дизел горива приказана је табелом 6.6.

Табела 6.6 Емисија полутаната сагоревањем једног литра дизела на празном ходу

| Полутант | CO | CO ₂ | NO _x | PM |
|------------------|-----|-----------------|-----------------|-----|
| $e_{idle} (g/l)$ | 4,0 | 2.629 | 30,4 | 0,9 |

Укупна емисија полутанта i приликом рада мотора на празном ходу износи:

$$E_{i,idle} = \frac{t_{idle}}{60} \cdot A_{c,idle} \cdot e_{i,idle} \quad (6.7)$$

Количина емитованих издувних гасова - полутаната зависи од пређеног пута и оперативних услова под којим ради мотор комуналног возила. Према истраживањима Zsigraiova et al. (2013), могуће је извршити процену емисије, у режиму кретања возила, коришћењем следећих релација:

$$E_{i,d} = \sum_{vehicle\ route} (E_{i,hot} + E_{i,cold}) \quad (6.8)$$

$$E_{i,hot} = \varepsilon_{i,c} L_{tr} \quad (6.9)$$

$$\varepsilon_{i,c} = \left(k_1 + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \right) * \left[\left(k_2 + rv + sv^2 + tv^3 + \frac{u}{v} - 1 \right) z + 1 \right] \quad (6.10)$$

$$E_{i,cold} = \varepsilon_{i,cold} N \quad (6.11)$$

где $E_{i,d}$, $E_{i,hot}$ и $E_{i,cold}$ представљају укупну емисију полутанта i , емисију полутанта i приликом рада мотора са постигнутом радном температуром и емисију полутанта i приликом хладног старта мотора, респективно. У претходним једначинама ознака $\varepsilon_{i,c}$ представља емисиони фактор полутанта i за рад загрејаног мотора коригован оптерећењем возила (gr/km), L_{tr} је пређени пут (km); v је брзина возила (km/h); k_1 , a , b , c , d , e , f , и k_2 , r , s , t , u су коефицијенти који зависе од укупне масе возила, док z представља удео транспортованог терета; $\varepsilon_{i,cold}$ је емисиони фактор полутанта i (gr/cold start) приликом хладног старта мотора а N представља број хладних стартава мотора.

Вредности коефицијената из једначине 6.10, за возила укупне масе од 7,5 до 16 тона дате су табелом 6.7, за возила укупне масе од 16 до 32 тоне табелом 6.8, док су коефицијенти који се јављају у једначини 6.11 приказани у табели 6.9 (Zsigraiova et al., 2013).

Иако убрзања и успорења возила имају значајан утицај на потрошњу горива и емисију гасова, у оквиру приказаног математичког модела, ови параметри нису узети у обзир. Међутим, утицај различитих брзина возила по фазама сакупљања и транспорта отпада улази у прорачун. Самим тим, овим приступом, долази се до прецизнијих резултата у поређењу са применом појединих комерцијалних софтвера, који као улазне

параметре, најчешће користе само број потрошених литара горива по тони отпада и количину прикупљеног отпада.

Табела 6.7 Коефицијенти за тешка возила у распону 7,5 - 16 тона

| Полутант | Параметар |
|-----------------|---|
| CO | $k_1 = 3,08; a = -0,0135; b = 0; c = 0; d = -37,7; e = 1560;$ $f = -5736; k_2 = 1,03; r = 9,77e^{-4}; s = 0; t = 0, u = 0$ |
| CO ₂ | $k_1 = 871; a = -16; b = 0,143; c = 0; d = 0; e = 32031;$ $f = 0; k_2 = 1,26; r = 0; s = 0; t = -2,03 e^{-7}; u = -1,14$ |
| NO _x | $k_1 = 2,59; a = 0; b = -6,65 e^{-4}; c = 8,56 e^{-6}; d = 140; e = 0;$ $f = 0; k_2 = 1,19; r = 0; s = 0; t = 0; u = -0,977$ |
| PM | $k_1 = 0,0541; a = 1,51 e^{-3}; b = 0; c = 0; d = 17,1; e = 0;$ $f = 0; k_2 = 1,02; r = 2,34 e^{-3}; s = 0; t = 0; u = 0$ |

Табела 6.8 Коефицијенти за тешка возила у распону 16 - 32 тоне

| Полутант | Параметар |
|-----------------|---|
| CO | $k_1 = 1,53; a = 0; b = 0; c = 0; d = 60,6; e = 117;$ $f = 0; k_2 = 1,17; r = 0; s = 0; t = 0, u = -0,755$ |
| CO ₂ | $k_1 = 765; a = -7,04; b = 0; c = 6,32 e^{-4}; d = 8334; e = 0;$ $f = 0; k_2 = 1,27; r = 0; s = 0; t = 0; u = -0,483$ |
| NO _x | $k_1 = 9,45; a = -0,107; b = 0; c = 7,55 e^{-6}; d = 132; e = 0;$ $f = 0; k_2 = 1,28; r = 0; s = 0; t = 0; u = -0,874$ |
| PM | $k_1 = 0,184; a = 0; b = 0; c = 1,72 e^{-7}; d = 15,2; e = 0;$ $f = 0; k_2 = 1,24; r = 0; s = 0; t = 0; u = -1,06$ |

Табела 6.9 Коефицијенти за хладан старт

| Полутант | Тип возила (маса у тонама) | Параметар $\varepsilon_{i,cold}$ (gr/cold start) |
|-----------------|----------------------------|--|
| CO | 7,5-16 | 6 |
| | 16-32 | 6 |
| CO ₂ | 7,5-16 | 300 |
| | 16-32 | 500 |
| NO _x | 7,5-16 | -2 |
| | 16-32 | -5 |
| PM | 7,5-16 | 0,6 |
| | 16-32 | 0,6 |

У наставку текста, биће извршена процена смањења емисија гасова стаклене баште на примеру оптимизоване руте, која је детаљно описана у одељку 5.3.1. Изабрана рута састоји се из три циклуса сакупљања отпада. Као што је раније описано, први циклус започиње поласком возила из гараже и усмеравањем ка реону града у коме се налазе контејнери које је потребно испразнити – фаза I, затим се возило креће унутар зоне прикупљања отпада – фаза II и кад се напуни, отпад се одвози до депоније где се истоварује – фаза III. Након тога почиње циклус 2. На крају радног дана, депоновањем отпада прикупљеног у циклусу 3 возило се усмерава у гаражу – фаза IV. Укупан пут који возило пређе у току трајања приказане руте износи 59,2 километара, док је пређени пут по фазама у оквиру сваког циклуса дат у табели 6.10. Поред тога, у поменутој

табели је дат и преглед броја опслужених места прикупљања (N_{MP}) и испразњених контејнера (N_c) за сва три циклуса.

Анализом табеле 6.10, може се закључити да је зона града, у оквиру које се врши прикупљање отпада за приказану руту, прилично удаљена од депоније, и да возило две трећине од укупног пута прелази у фазама I и III.

Табела 6.10 Број пређених километара и испразњених контејнера постојеће руте по циклусима и фазама процеса сакупљања и транспорта отпада

| | $L_{tr}(km)$ | | | | N_{MP} | N_c |
|----------|--------------|---------|----------|---------|----------|-------|
| | Фаза I | Фаза II | Фаза III | Фаза IV | | |
| Циклус 1 | 5,9 | 4,2 | 6,4 | | 17 | 70 |
| Циклус 2 | 7,2 | 11 | 5,6 | | 44 | 96 |
| Циклус 3 | 6,2 | 3,5 | 5,8 | 3,4 | 27 | 42 |
| Σ | 19,3 | 18,7 | 17,8 | 3,4 | 88 | 208 |

Детаљном анализом и обрадом података добијених снимањем кретања возила GPS мерном опремом, дефинисане су просечне брзине кретања возила у оквиру сваке од фаза процеса сакупљања и транспорта отпада, као и време које је возило провело у кретању или мировању. Ови подаци су били неопходни за прорачун емисије гасова насталих сагоревањем горива, а у складу са методологијом описаном једначинама (6.7 - 6.11).

Табела 6.11 Детаљна анализа првог циклуса постојеће руте

| | L_{tr} (km) | v (km/h) | t_{tr} (min) | N_c | t_{idle} (min) |
|-----------------|---------------|------------|----------------|-------|------------------|
| Гаража – MP01 | 5,928 | 25,9 | 13,8 | 2 | 2,0 |
| MP01 – MP02 | 0,133 | 6,2 | 1,3 | 1 | 0,5 |
| MP02 – MP03 | 1,107 | 20,7 | 3,2 | 3 | 2,2 |
| MP03 – MP04 | 0,040 | 4,8 | 0,5 | 4 | 2,0 |
| MP04 – MP05 | 0,093 | 4,0 | 1,4 | 3 | 2,0 |
| MP05 – MP06 | 0,277 | 11,9 | 1,4 | 7 | 6,6 |
| MP06 – MP07 | 0,107 | 10,7 | 0,6 | 6 | 5,3 |
| MP07 – MP08 | 0,067 | 10,0 | 0,4 | 6 | 2,8 |
| MP08 – MP09 | 0,467 | 11,2 | 2,5 | 3 | 2,3 |
| MP09 – MP10 | 0,141 | 17,0 | 0,5 | 8 | 8,2 |
| MP10 – MP11 | 0,660 | 28,3 | 1,4 | 2 | 1,2 |
| MP11 – MP12 | 0,171 | 17,1 | 0,6 | 6 | 6,2 |
| MP12 – MP13 | 0,093 | 11,2 | 0,5 | 5 | 3,8 |
| MP13 – MP14 | 0,107 | 10,7 | 0,6 | 8 | 5,2 |
| MP14 – MP15 | 0,133 | 10,0 | 0,8 | 1 | 1,2 |
| MP15 – MP16 | 0,235 | 10,8 | 1,3 | 3 | 2,3 |
| MP16 – MP17 | 0,293 | 16,0 | 1,1 | 2 | 2,2 |
| MP17 – депонија | 6,451 | 21,8 | 17,7 | - | 9,8 |

У табели 6.11, приказани су резултати спроведене анализе процеса сакупљања отпада на примеру једног циклуса постојеће руте. При томе су, на основу података прикупљених мерењем, за сваку фазу циклуса, добијене просечне брзине кретања комуналних возила – v (km/h). Ове вредности узимају у обзир пређени пут – L_{tr} (km) и

време кретања возила - t_{tr} (min). Време рада возила на празном ходу – t_{idle} (min) (пражњење контејнера и истовар отпада на депонији) не улази у прорачун.

Из табеле 6.11, може се уочити да је фази кретања возила од гараже до првог места прикупљања (Гаража – МР01 : фаза I) остварена просечна брзином од 25,9 km/h. Када се попуњено возило усмерава према депонији у циљу истовара (МР17 – депонија: фаза III), просечна брзина возила је 21,8 km/h, и она је нешто мања у односу на фазу I, што је и очекивано, јер је возило додатно оптерећено масом прикупљеног отпада.

У оквиру фазе II, (МР01 – МР02, МР02 – МР03, ... ,МР16 – МР17) која представља кретање возила између места прикупљања, просечна брзина се прерачунава према следећој релацији:

$$v = \frac{60 \cdot \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} L_{i,tr}}{\sum_{i=1}^{N_{MP}-1} t_{i,tr}} \quad (6.12)$$

где, $L_{i,tr}$ представља растојање између два суседна места прикупљања, $t_{i,tr}$ време за које возило пређе то растојање, а N_{MP} је број места прикупљања.

Да би се дефинисали адекватни подаци за симулацију и прорачун емисије издувних гасова комплетне руте, претходна процедура (табела 6.11) је спроведена и за преостале припадајуће циклусе. У табели 6.12, приказане су одговарајуће упросечене вредности брзина на нивоу комплетне руте, по претходно дефинисаним фазама процеса прикупљања отпада.

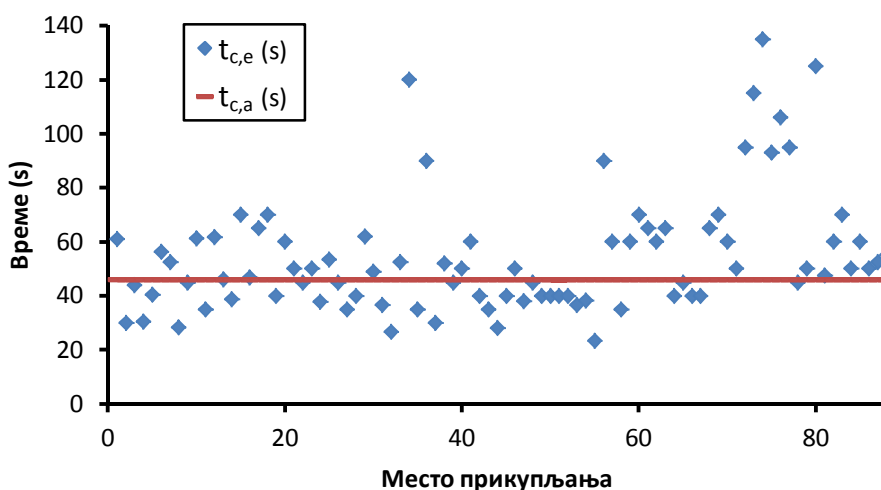
Табела 6.12 Карактеристике кретања комуналног возила по фазама процеса сакупљања и транспорта отпада

| | | Циклус 1 | Циклус 2 | Циклус 3 | Рута |
|-------------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|--------------|
| Фаза I | $L_{tr}(km)$ | 5,9 | 7,2 | 6,2 | 19,3 |
| | $t_{tr}(min)$ | 13,7 | 15,6 | 11,5 | 40,8 |
| | $v(km/h)$ | 25,9 | 27,7 | 32,2 | 28,4 |
| Фаза II | $L_{tr}(km)$ | 4,2 | 11,0 | 3,5 | 18,7 |
| | $t_{tr}(min)$ | 18,2 | 45,5 | 15,6 | 79,3 |
| | $t_{c,idle}(min)$ | 55,6 | 64,5 | 38,6 | 158,7 |
| | $v(km/h)$ | 13,8 | 14,5 | 13,5 | 14,2 |
| Фаза III | $L_{tr}(km)$ | 6,4 | 5,6 | 5,8 | 17,8 |
| | $t_{tr}(min)$ | 17,6 | 15,2 | 13,4 | 46,2 |
| | $t_{l,idle}(min)$ | 9,8 | 7,8 | 5,2 | 22,8 |
| | $v(km/h)$ | 21,8 | 22,2 | 26,0 | 23,1 |
| Фаза IV | $L_{tr}(km)$ | - | - | 3,4 | 3,4 |
| | $t_{tr}(min)$ | - | - | 6,5 | 6,5 |
| | $v(km/h)$ | - | - | 31,4 | 31,4 |
| $\sum t_{tr}$ | | | | | 172,8 |
| $\sum t_{idle}$ | | | | | 181,5 |
| $t_R = \sum t_{tr} + \sum t_{idle}$ | | | | | 354,3 |

Увидом у вредности из табеле 6.12, може се закључити да је укупно време трајања руте (t_R) 5 сати и 54,3 минута, при чему је возило било у покрету (t_{tr}) 2 сата и 52,8 минута. Преостало време, 3 сата и 1,5 минута, возило је било у празном ходу (t_{idle}), у фази пражњења контејнера ($t_{c,idle}$) и депоновања отпада ($t_{l,idle}$). На слици 6.10, дијаграмски је приказано јединично време пражњења контејнера ($t_{c,e}$) на свих 88 места прикупљања, као и просечно време пражњења ($t_{c,a}$) добијено према следећој формули:

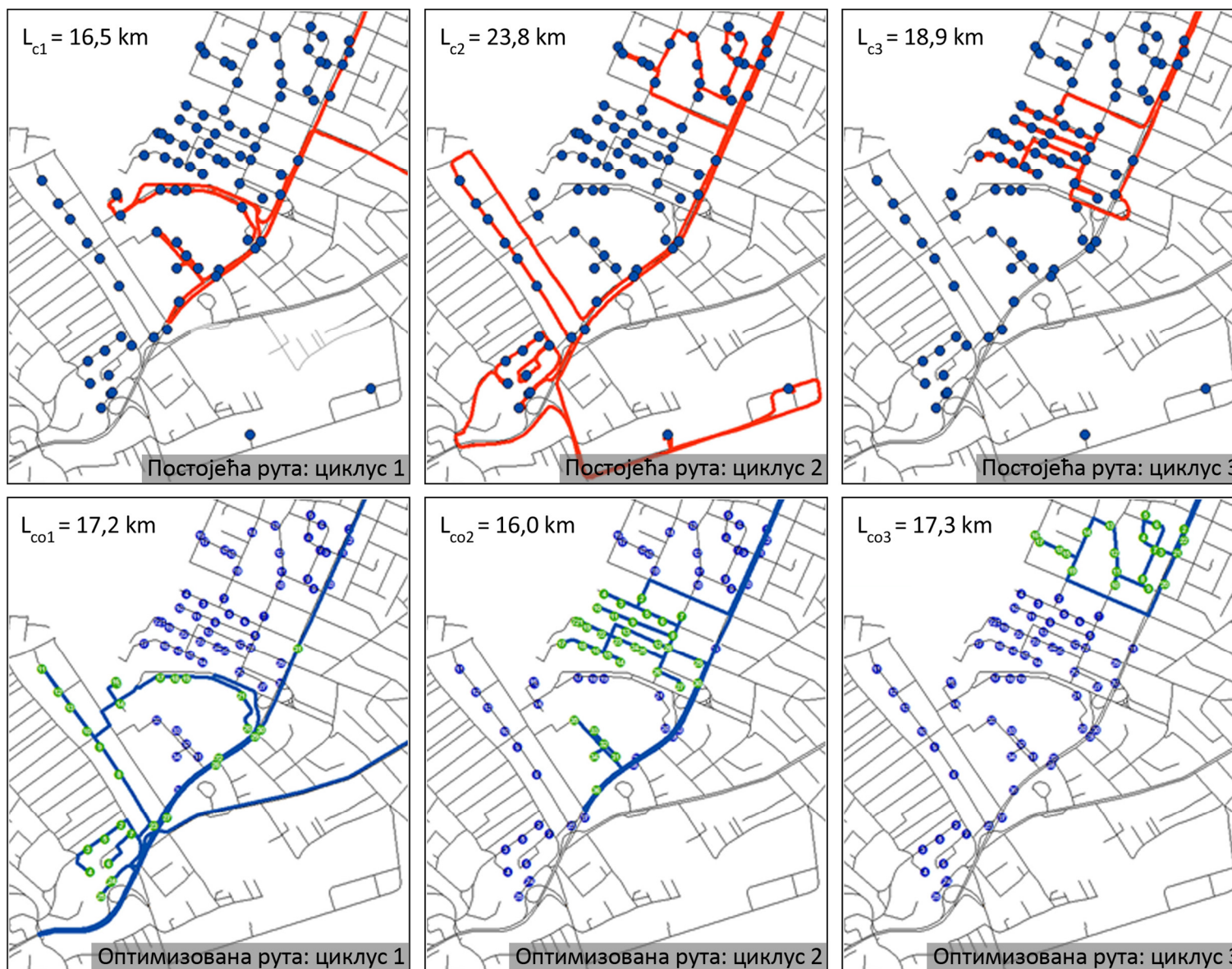
$$t_{c,a} = \frac{t_{c,idle}}{N_c} \quad (6.6)$$

Просечно време потребно да се испразни један контејнер износи 46 секунди. Са дијаграма се види да постоје локације где је за пражњење контејнера потребно значајно више времена од просечног. Овакви случајеви се јављају на местима прикупљања где су евидентирани веће количине отпада одложеног изван контејнера. Отуда, радницима је потребно одређено време да ручно прикупе расути отпад и одложе га у комунално возило.



Слика 6.10 Време пражњења контејнера

Упоредни приказ остварене уштеде у пређеном путу комуналног возила, у оквиру постојеће и оптимизоване руте, по припадајућим циклусима, дат је на слици 6.11. Треба напоменути да је вршена оптимизација комплетне руте комуналног возила, при чему се у оквиру нових путања мењао редослед обиласка места прикупљања, без обзира на претходно дефинисане припадности ових локација појединим циклусима.



$$L_R = L_{c1} + L_{c2} + L_{c3}$$

$$L_R = 59,2 \text{ km}$$

$$L_{RO} = L_{co1} + L_{co2} + L_{co3}$$

$$L_{RO} = 50,5 \text{ km}$$

Слика 6.11 Упоредна анализа постојеће и оптимизоване руте са 3 циклуса

(L_R – дужина постојеће руте; L_{RO} – дужина оптимизоване руте; L_{Ci} – дужина постојећег циклуса, L_{COi} – дужина оптимизованог циклуса)

На сличан начин, као што је приказано табелом 6.10, за сценарио постојеће руте, у табели 6.13 дат је преглед карактеристичних параметара кретања возила дуж оптимизоване руте по циклусима и фазама сакупљања отпада.

Табела 6.13 Број пређених километара и испражњених контејнера оптимизоване руте по циклусима и фазама процеса сакупљања и транспорта отпада

| | $L_{tr}(km)$ | | | | N_{MP} | N_c |
|----------|--------------|---------|----------|---------|----------|-------|
| | Фаза I | Фаза II | Фаза III | Фаза IV | | |
| Циклус 1 | 5,6 | 6,8 | 4,8 | | 30 | 80 |
| Циклус 2 | 5,5 | 5,1 | 5,4 | | 35 | 78 |
| Циклус 3 | 5,8 | 2,5 | 5,6 | 3,4 | 21 | 45 |
| Σ | 16,9 | 14,4 | 15,8 | 3,4 | 86 | 203 |

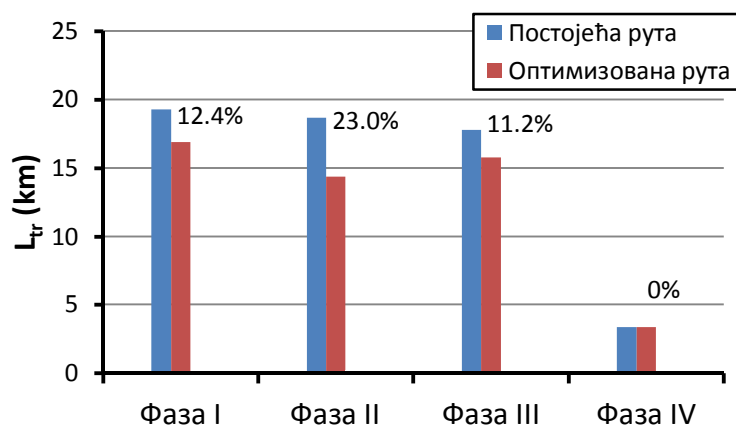
Из табеле 6.13 се види да је број опслужених места прикупљања (N_{MP}) оптимизоване руте мањи за два у односу на постојећу руту дефинисану табелом 6.10. Ове две локације (са укупно пет контејнера) су припојене другој, енергетски ефикаснијој рути, на начин који је описан у одељку 5.3.1. Такође, прегледом претходно поменутих табела, може се закључити да је број места прикупљања по циклусима, постојеће и оптимизоване руте, различит, што је последица приступа који је коришћен приликом вршења оптимизације.

Упоредна анализа броја пређених километара по фазама процеса сакупљања и транспорта отпада, постојеће и оптимизоване путање комуналног возила, дата је табелом 6.14. Овде је такође приказана и остварена уштеда по фазама, како на нивоу руте, тако и на годишњем нивоу. Остварена уштеда, на нивоу целе руте, износи 14,7%, док је процентуална уштеда по фазама дата дијаграмски на слици 6.12.

Табела 6.14 Број пређених километара постојеће и оптимизоване руте по фазама

| | $L_{tr}(km)$ | | | | | Σ |
|-------------------|--------------|---------|----------|---------|---|----------|
| | Фаза I | Фаза II | Фаза III | Фаза IV | | |
| Постојећа рута | 19,3 | 18,7 | 17,8 | 3,4 | | 59,2 |
| Оптимизована рута | 16,9 | 14,4 | 15,8 | 3,4 | | 50,5 |
| Уштеда (km) | по рути | 2,4 | 4,3 | 2,0 | 0 | 8,7 |
| | годишње | 249,6 | 447,2 | 208,0 | 0 | 904,8 |

Према претходној табели, остварена уштеда у броју пређених километара на годишњем нивоу, оптимизоване руте у односу на постојећу, која износи 904,8 километара је еквивалентна уштеди од око 500 литара горива или 650€, обзиром да комунално возило које је изучавано има просечну потрошњу од 55,6 l/100km. Анализирана рута представља само једну од укупно 70 различитих евидентираних и оптимизованих рута, којима се креће 17 аутосмеђара, па се сходно томе претходни подаци мултиплицирају и указују на остваривање великих економских бенефита.



Слика 6.12 Уштеде у броју пређених километара по фазама

Користећи претходно описану методологију, приказану једначинама (6.6) - (6.11), просечне брзине возила и време проведено у празном ходу (табела 6.11), извршена је упоредна анализа емисије гасова током процеса сакупљања и транспорта отпада, постојеће и оптимизоване руте. Резултати извршених прорачуна, по фазама на годишњем нивоу, дати су табелом 6.15. Такође, у табели се могу уочити и остварене еколошке уштеде (у килограмима и процентуално сваког од полутанта) настале као резултат оптимизације анализираних рута.

Табела 6.15 Емисије полутаната по фазама постојеће (R_P) и оптимизоване руте (R_O)

| Полутант (kg) | | Фаза I | Фаза II | Фаза III | Фаза IV | Σ | Уштеда (kg) | Уштеда (%) |
|-----------------|-------|---------|---------|----------|---------|----------|-------------|------------|
| | | R_P | R_O | R_P | R_O | | | |
| CO | R_P | 6,2 | 15,2 | 12,0 | 1,0 | 34,4 | 4,8 | 14,0 |
| | R_O | 5,4 | 12,5 | 10,7 | 1,0 | 29,6 | | |
| CO ₂ | R_P | 1.149,6 | 3.898,5 | 2041,7 | 191,7 | 7.281,4 | 737,3 | 10,1 |
| | R_O | 1.005,1 | 3.500,0 | 1847,3 | 191,7 | 6.544,1 | | |
| NO _x | R_P | 14,4 | 50,3 | 28,5 | 2,4 | 95,5 | 10,4 | 10,9 |
| | R_O | 12,6 | 44,5 | 25,7 | 2,4 | 85,1 | | |
| PM | R_P | 1,4 | 3,3 | 2,6 | 0,2 | 7,5 | 1,0 | 13,3 |
| | R_O | 1,2 | 2,7 | 2,3 | 0,2 | 6,5 | | |

Увидом у претходну табелу, може се видети да, поред раније представљених остварених економских уштеда, оптимизацијом путање кретања возила остварују и велике еколошке уштеде. На примеру анализираних рута, оне се крећу у границама од 10,1 до 14% по посматраном полутанту. Разлика у процентима смањених емисија међу полутантима указују на предности коришћеног математичког модела, који за разлику од модела који су имплементирани у комерцијалне софтвере, не мења емисије свих полутаната линеарно у односу на количину потрошеног горива.

Коришћена методологија као главне параметре који утичу на емисију издувних гасова истиче врсту возила, пређени пут, оптерећење и просечну брзину возила. Међутим, на потрошњу горива, а самим тим и на емисију гасова, утиче и читав низ других фактора, који у претходни прорачун нису били укључени. Као главни недостатак приказане

методологије, може се сматрати то што је емисија гасова заснована на просечним брзинама. У процесу сакупљања и транспорта отпада (нарочито у фази II), комунална возила веома често успоравају и убрзавају, па се при таквом режиму вожње, емисије гасова знатно разликују у односу на режим када се возило креће константном брзином. Такође, оваква врста прорачуна не укључује разлике у потрошњи горива између возила сличних карактеристика (маса и носивости), које могу знатно да варирају услед разлика у старости возила, начину одржавања итд. Све претходно наведено утиче на тачност добијених резултата.

Поред претходно коришћеног модела, у литератури је могуће пронаћи одређени број математичких модела за одређивање емисије гасова при различитим условима вожње. Demir (2012) је у свом раду извршио компаративну анализу десет различитих емисионих модела. Резултати добијени рачунарским симулацијама указују да, код свих тестираних модела, оптерећење возила, брзина и убрзање имају велики утицај на потрошњу горива и емисију гасова.

У оквиру прорачуна еколошких уштеда оптимизованог система сакупљања и транспорта отпада на територији града Крагујевца, потрошња горива и емисије припадајућих гасова, при различитим режимима рада комуналних возила нису биле предмет детаљног испитивања. У циљу добијања прецизнијих резултата анализа, ови параметри биће разматрани у неком од наредних истраживања.

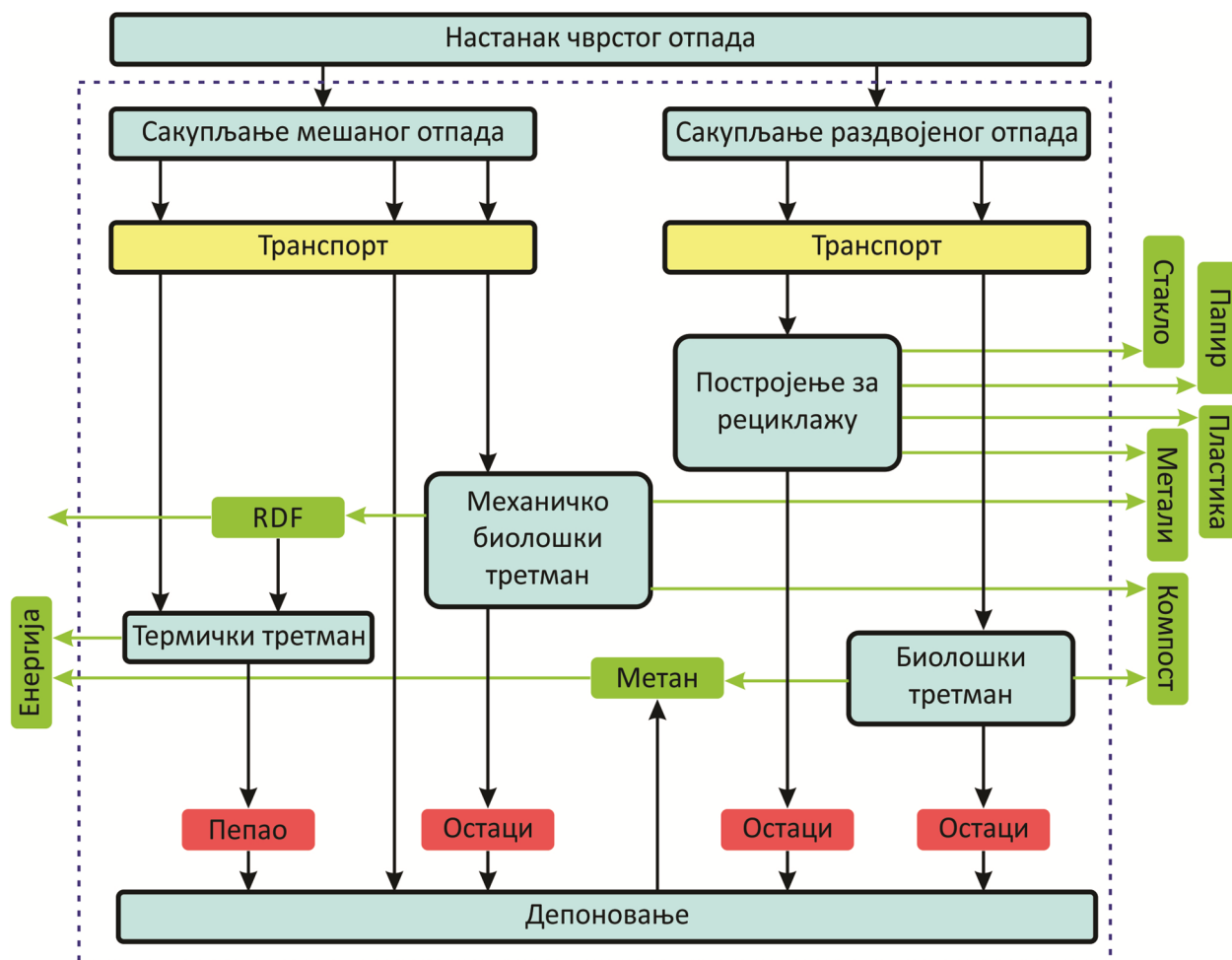
6.3.2 Анализа остварених еколошких уштеда применом EASETECH софтвера

Оцењивање животног циклуса (LCA) представља метод за анализу и квантификацију могућих утицаја производа на животну средину, током целокупног животног века производа, почевши од екстракције сировина, преко производње и употребе и поступања на крају животног века производа, рециклирања и коначног одлагања. LCA је само једна од неколико постојећих техника за испитивање и оцену утицаја одређеног производа или процеса на животну средину. Оно што овој методи даје предност у односу на остале је њен јединствени концепт „од колевке па до гроба“, односно, праћење утицаја током целокупног животног циклуса производа, при чему се унутар граница система евидентирају сви улази, излази и емисије у свим фазама и операцијама животног циклуса.

LCA метод је заузео значајно место у области управљања чврстим комуналним отпадом. Са циљем да се смањи утицај отпада на животну средину и здравље становништва, кроз промоцију ефикасног и одрживог коришћења природних ресурса, Европска унија је 2005. године донела документ под називом „Тематска стратегија превенције и рециклаже отпада“ (Commission Of The European Communities, 2005) у оквиру које је наглашена и потреба за увођењем новог аналитичког инструмента за доношење одлука у политици управљања отпадом као што је Оцењивање животног циклуса - LCA.

Животни циклус отпада почиње када се производ одбаци, а завршава се када отпадни материјал деградира или када бива враћен у технолошки систем кроз рециклажу и

замену других производа. Један од могућих шематских приказа животног циклуса чврстог комуналног отпада приказан је на слици 6.13 (Abeliotis, 2011).



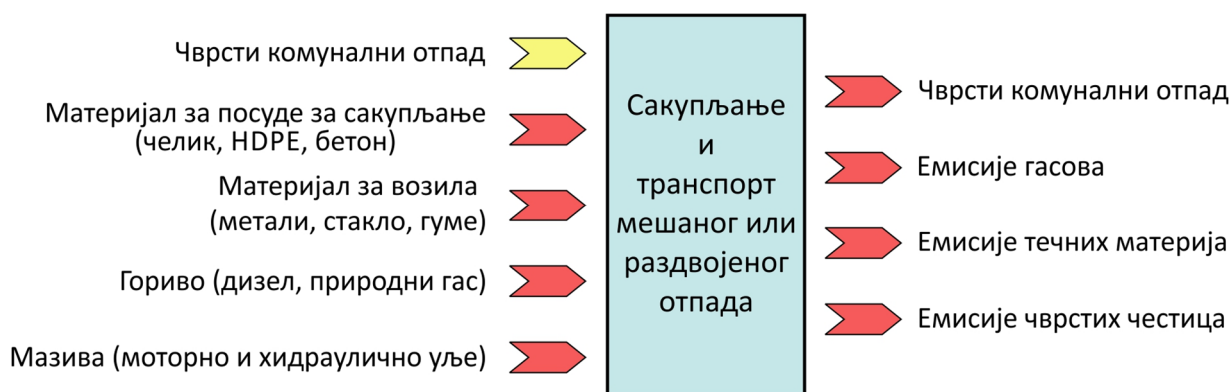
Слика 6.13 Комплетан животно циклус чврстог комуналног отпада

Као што је претходно наглашено, LCA метода евидентира све улазе, излазе и емисије у свим фазама система за управљање чврстим отпадом. Обзиром да је акценат овог истраживања стављен на сакупљање и транспорт отпада у наставку ће бити приказани улази и излази система који се односе на ове фазе система.

У оквиру процеса сакупљања и транспорта отпада, улазе представљају генерисани комунални отпад, као и материјали и енергија за потребну инфраструктуру (посуде за привремено складиштење комуналног чврстог отпада и возила потребна за сакупљање и транспорт).

Излази из ових процеса су чврсти комунални отпад (са измењеним физичким особинама, као што је нпр. густина), као и емисије у ваздух, емисије отпадних вода и емисије чврстих честица.

На слици 6.14 приказани су улази и излази у фазама сакупљања и транспорта отпада (Abeliotis, 2011).



Слика 6.14 Улази и излази у фазама сакупљања и транспорта отпада

У току израде LCA студије, потребно је узети у обзир следеће параметре релевантне за фазе сакупљања и транспорта отпада:

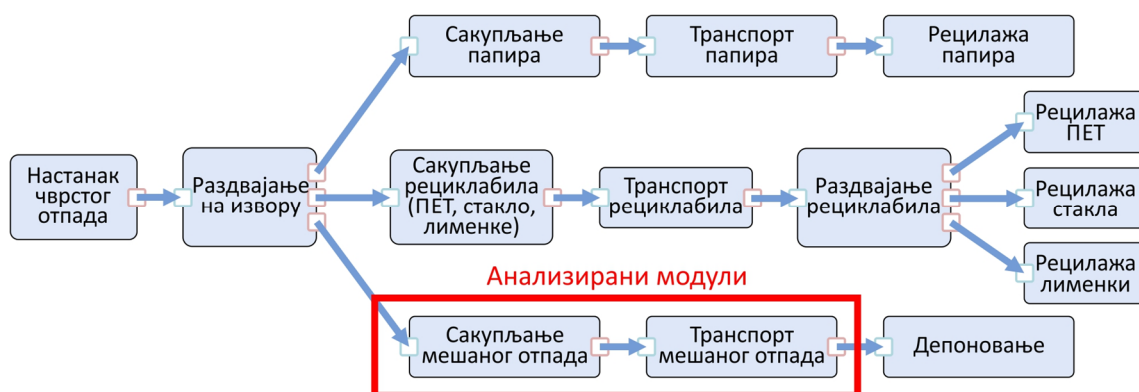
- систем одвојеног сакупљања,
- материјал од кога су израђени контејнери односно посуде за сакупљање,
- учесталост сакупљања,
- дужине рута,
- тип комуналног возила,
- врста погонског горива комуналног возила,
- густина фракција отпада у контејнерима и комуналним возилима,
- величина контејнера,
- просечна попуњеност контејнера приликом пражњења.

Утицај процеса сакупљања и транспорта отпада на животну средину, примарно је везан за сагоревање горива у моторима возила која врше његово сакупљање и транспорт. У ширем контексту, на животну средину утичу и потрошња кочионих облога и гума, цурење уља, бука и непријатни мириси, али такође и производња и одржавање возила и посуда за сакупљање отпада. Обзиром да највећи утицај имају продукти сагоревања горива, у наставку текста је, коришћењем приступа оцењивања животног циклуса, анализирана разлика у емисијама издувних гасова и утицаја на животну средину оптимизованог система рута возила за сакупљање и транспорт отпада у односу на постојећи систем.

За ову сврху коришћен је LCA софтвер EASETECH, развијен на Техничком Универзитету у Данској (DTU). Његов назив представља акроним за Environmental Assessment System for Environmental TEChnologies, док му је основни циљ оцењивање животног циклуса комплексног система управљања чврстим отпадом кроз токове хетерогених материјала. Токови отпада прате се кроз све фазе, од настанка, до поновне употребе или коначног одлагања. Као резултат добија се утицај на животну средину, који може да се прикаже интегрално, као утицај читавог система управљања отпадом, или сваког модула засебно.

У раду са поменутиим софтверским пакетом, потребно је формирати блок шему, у складу са специфичностима градског система за управљање отпадом. Слика 6.15

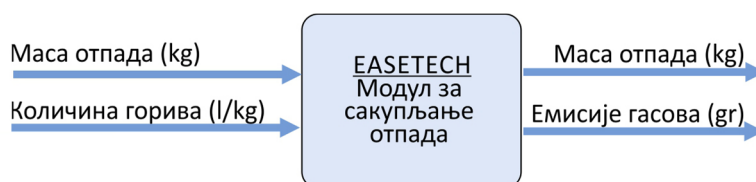
приказује дефинисану општу шему управљања отпадом у граду Крагујевцу у којој се сваки од модула засебно моделира у циљу процене утицаја на животну средину. Тако се за први модул, настанак чврстог отпада, уносе параметри везани за количину генерисаног отпада и његов морфолошки састав. У оквиру следећег модула, потребно је дефинисати податке о процентима раздвајања појединих фракција отпада на извору његовог настанка. По аналогији, за сваки од модула, морају се задати вредности кључних параметара процеса који посматрани модул покрива.



Слика 6.15 Шематски приказ система управљања чврстим отпадом у Крагујевцу

У оквиру овог рада, рађена је детаљна анализа само блокова везаних за сакупљање и транспорт мешаног отпада (што је истакнуто на претходној слици), јер су ови модули оптимизовани, на начин који је раније описан. Стога ће, у наставку текста, акценат бити стављен на дефинисање управо модула за сакупљање и транспорт мешаног комуналног отпада.

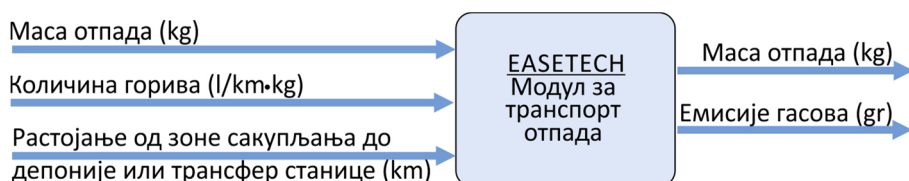
Модул за сакупљање отпада, одговара фази II са слике 6.9. Кључни параметри овог процеса, у оквиру софтверског пакета, су маса прикупљеног отпада као и количина потрошеног горива по килограму отпада, што је приказано шематски на слици 6.16. Излазе из овог дела система представљају маса отпада, али и емисије које се јављају. При томе је, у овом истраживању, посебна пажња посвећена емисијама гасова, док су емисије чврстих и течних материја занемарене. На основу дефинисаних улазних података, математички модел прорачунава емисије издувних гасова и утицај на животну средину.



Слика 6.16 Улази и излази модула за сакупљање отпада

Што се тиче транспорта отпада, односно фаза I, III и IV, са слике 6.9, ситуација је нешто другачија, па се моделирање овог процеса врши у складу са шемом датом сликом 6.17. Као кључни улазни параметри, овог модула, јављају се маса отпада, количина потрошеног горива по километру и килограму отпада, као и растојање депоније или

трансфер станице од зоне у којој се отпад сакупља. Излази из овог модула су, као и за модул сакупљања отпада, маса отпада и емисије гасова.



Слика 6.17 Улази и излази модула за транспорт отпада

Недостатак овог софтверског пакета је потреба за познавањем потрошње горива при свакој од фаза процеса сакупљања и транспорта отпада. Услед ограничења у мерној опреми и неопходности да се дође до података о поменутој потрошњи горива, недостатак је превазиђен посматрањем модула за сакупљање и транспорт отпада као једне целине, у којој су, због што квалитетније апроксимације, као улазни подаци коришћени маса отпада и количина потрошених литара по тони прикупљеног отпада (F_m). Поменути параметри дефинисани за сваку руту понаособ, као и за комплетан систем сакупљања и транспорта отпада приказани су у одељку 6.1

У наредном делу приказане су уштеде у емисијама гасова из процеса сакупљања и транспорта отпада, оптимизованог у односу на постојећи систем, најпре на нивоу једне руте, а затим и за читав град.

За упоредну анализу емисије гасова постојеће руте возила дефинисане табелом 6.10 и оптимизоване (табела 6.13), неопходни параметри процеса сакупљања и транспорта отпада, за покретање прорачуна, дати су у табели 6.16. Такође, у складу са подацима са којима се располагало у оквиру овог истраживања, уведена је и претпоставка да се смањењем броја пређених километара и енергетски расходи смањују у истој мери.

Табела 6.16 Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада постојеће и оптимизоване руте

| Рута | m_R (kg) | L (km) | A_c (l/100km) | F_m (l/t) |
|--------------|------------|----------|-----------------|-------------|
| Постојећа | 22.200 | 59,2 | 55,6 | 1,48 |
| Оптимизована | 22.200 | 50,5 | 55,6 | 1,26 |

На основу дефинисаних улазних података, математичким моделом софтверског пакета, прорачунате су емисије издувних гасова посматране руте у два сценарија, постојећем и оптимизованом. Резултати прорачуна, као и остварене уштеде у емисији полутаната, дате су табелом 6.17. Приказане вредности су на годишњем нивоу.

Табела 6.17 Остварене уштеде у емисији полутаната оптимизоване у односу на постојећу руту сакупљања и транспорта отпада

| | CO ₂ (kg) | CO (kg) | NO _x (kg) |
|-------------------|----------------------|---------|----------------------|
| Постојећа рута | 8.861,8 | 13,5 | 102,4 |
| Оптимизована рута | 7.559,1 | 11,5 | 87,4 |
| Уштеда (kg) | 1.302,7 | 2,0 | 15,0 |

Увидом у претходну табелу, види се да се оптимизацијом само једне руте на годишњем нивоу оствари уштеда од преко 1.300 kg CO₂, али и незанемарљиве количине других гасова. Уколико се упореде вредности издувних гасова возила које се креће постојећом рутом (меродаван је CO₂, јер за разлику од осталих полутаната, директно зависи само од потрошње горива (Kirby, et al., 2000)), добијених коришћењем методологије дефинисане у одељку 6.3.1 (табела 6.15) и прорачуна коришћењем математичког модела имплементираног у софтвер EASETECH (табела 6.17), може се увидети да су вредности добијене софтверском анализом за 17,8% веће. Ово се објашњава чињеницом да се у претходном прорачуну није узиман у обзир режим промене рада мотора возила, већ константне брзине дуж сваке од фаза циклуса сакупљања и транспорта отпада. Са друге стране, остварене процентуалне уштеде у емисији гасова, као последица детаљног анализирања комплетне руте, веродостојније су у односу на коришћење софтвера.

На сличан начин, који је приказан на примеру једне руте, извршена је процена уштеде емисије гасова из процеса сакупљања и транспорта отпада, за целокупан систем рута. Улазни параметри, како постојећег, тако и оптимизованог система дати су табелом 6.18.

Табела 6.18 Параметри процеса сакупљања и транспорта отпада постојећег и оптимизованог система

| Систем | m_R (kg) | L (km) | A_c (l/100km) | F_m (l/t) |
|--------------|------------|----------|-----------------|-------------|
| Постојећи | 983.400 | 2.928,7 | 72,3 | 2,15 |
| Оптимизовани | 983.400 | 2.528,1 | 72,3 | 1,86 |

У табели 6.19 приказани су резултати моделирања емисије издувних гасова постојећег и оптимизованог система за сакупљање и транспорт чврстог отпада на територији града Крагујевца, као и уштеде у емисијама на годишњем нивоу.

Табела 6.19 Емисије гасова у процесу сакупљања и транспорта отпада постојећег и оптимизованог система, на годишњем нивоу

| | CO ₂ (kg) | CO (kg) | NO _x (kg) |
|--------------------------------|----------------------|---------|----------------------|
| Постојећи систем | 289.068,0 | 439,6 | 3341,0 |
| Оптимизовани систем | 250.068,0 | 380,3 | 2890,2 |
| Уштеда (kg на годишњем нивоу) | 39.000,0 | 59,3 | 450,8 |

Из претходне табеле може се уочити да комунална возила, кретањем по дефинисаним оптимизованим рутама, смањују емисију CO₂ у атмосферу за 39 тона, на годишњем нивоу.

7. Закључна разматрања

Основни циљ истраживања, у оквиру докторске дисертације, био је формирање ефикасне методологије за мониторинг и оптимизацију процеса сакупљања и транспорта чврстог отпада. Примена развијене методологије треба да омогући смањење специфичне потрошње домаћих и увозних енергетских потенцијала и ресурса, као и очување животне средине.

Да би се успешно реализовао постављени циљ истраживања, остварен је читав низ неопходних предуслова. Имајући у виду чињеницу да за град Крагујевац није постојала база података о систему за управљање чврстим отпадом, као један од основних предуслова, развијен је и имплементиран општи модел базе података о ресурсима комуналног система за сакупљање и транспорт чврстог отпада. Значајан део активности, у оквиру израде ове дисертације, био је усмерен на прикупљање и обраду неопходних података о кључним елементима овог система. У том смислу, формиране су одговарајуће базе података, међу којима треба нарочито истаћи:

- базу података о местима прикупљања,
- базу података о путањама комуналних возила.

За формирање поменутих база података коришћена је GPS мерна опрема, док су мерења вршена на терену, уз праћење возила ЈКП „Чистоћа“. Када је реч о бази података о местима прикупљања, треба напоменути да је евидентирано 3.052 контејнера за сакупљање комуналног отпада распоређених на 1.451 локацију, а да је за њено формирање било потребно два месеца. Креирање базе података о путањама комуналних возила подразумевало је евидентирање свих различитих путања којима се креће 17 аутосмећара у оквиру 11 градских реона. Током креирања ове базе, што је трајало четири месеца, прикупљени су сви релевантни подаци потребни за дефинисање енергетских расхода и параметара процеса сакупљања и транспорта чврстог отпада на територији града Крагујевца, којима се дефинише матрица трошкова система за прикупљање отпада на тренутном нивоу.

Дефинисањем методологије за одређивање енергетски ефикаснијих путања кретања комуналних возила, што је остварено кроз формирање база података и повезивање са елементима географског информационог система и оптимизационим алатима, створени су услови за приступање симулацијама и проналажење варијантних решења система рута возила. Применом оптимизационог модела, уочено је, на примеру једне изабране руте, да се могу остварити велике уштеде у пређеном путу оптимизоване у односу на постојећу руту. Уштеда у броју пређених километара за посматрану руту износи 14,7% или 8,7 km по рути. Обзиром да се посматрано возило креће датом рутом два пута недељно, уштеда на годишњем нивоу, оптимизацијом само једне руте, износи преко 900 km.

Након што се формирана методологија показала као успешна, коришћењем математичког модела имплементираних у софтвер ArcGIS, извршена је детаљна

анализа и оптимизација свих рута, из базе података о путањама комуналних возила. Укупан број пређених километара оптимизованог система у односу на постојећи смањен је за 13,7%, односно са 2.928,7 на 2.528,1 km у оквиру недељног циклуса сакупљања и транспорта отпада. Ово у пракси значи да возила могу да обаве исти задатак и прикупе исту количину отпада, као у постојећем систему, а да при томе пређу годишње 20.830 километара мање. Имајући у виду да просечна потрошња горива аутосмећара износи 72,3 l/100km, остварена уштеда је еквивалентна уштеди од преко 15.000 литара горива или 19.500€ на годишњем нивоу. Поред тога, мањи број пређених километара значи и уштеду у одржавању возила, мању потрошњу уља, гума и резервних делова.

Приликом избора оптималне путање возила традиционално се користе критеријуми најкраћег пута или времена путовања. Међутим, постоје случајеви када најкраћи или најбржи пут није уједно и најекономичнији. Стога је, у оквиру овог истраживања развијен и имплементиран модел у оквиру кога се као критеријум за оптимално решење тражи рута дуж које ће возило имати најмању потрошњу горива. И код овог модела коришћене су могућности ГИС-а, а за добијање најекономичније путање, у прорачун је укључен фактор потрошње горива, који се формира у зависности од класе улица којима се возило креће. Развијени модел, показао је да иако је путања добијена коришћењем овог приступа за 400 метара дужа од најкраће путање, возило које пролази дату путању троши 5% мање горива. Треба напоменути да је, за дефинисање класа улица и проверу веродостојности резултата, потребно урадити експериментално испитивање потрошње горива за сваку од постојећих класа улица, што би могао бити предмет неког од наредних истраживања.

Један од значајних резултата истраживања представља имплементација GPS-GPRS система за мониторинг процеса сакупљања и транспорта отпада. Након избора произвођача опреме и софтвера за праћење возила, једно демо возило је опремљено поменути системом. Праћење возила вршено је у току годину дана и обзиром да се овакав вид контроле сакупљања и транспорта отпада показао као веома успешан, али и неопходан за вршење мониторинга, након што су обезбеђена средства за његову уградњу, 20 возила из возног парка ЈКП „Чистоћа“ је опремљено поменути системом.

Обзиром да просторни распоред места прикупљања и фреквенца пражњења контејнера утичу на енергетске расходе процеса сакупљања отпада, формирана је методологија којом се дефинише оптималан распоред места прикупљања у складу са демографијом, као и оптималан број контејнера на дефинисаним локацијама у складу са генерисаном количином стамбеног и комерцијалног отпада. За ову анализу одабран је централни део града из кога се отпад одвози свакодневно, за коју је формирана нова база података о објектима који се у посматраној зони налазе. Уочено је да је, применом развијене методологије, могуће покрити посматрани део града са 24% места прикупљања мање од постојећег броја, док је број неопходних контејнера смањен за 33%. При томе се просечна маса по испражњеном контејнеру повећава са 43 на 75 килограма. Приказане активности значајно смањују трошкове набавке и одржавања посуда за привремено складиштење отпада, потребно време за сакупљање отпада, али и потрошњу горива услед мањег броја заустављања и испражњених контејнера.

Обзиром да се, поред приказаних енергетско-економских уштеда, остварују и значајне еколошке уштеде, извршена је упоредна анализа постојећег и оптимизованог система, са циљем да се одреди утицај процеса сакупљања и транспорта отпада на животну средину. На примеру једне оптимизоване руте возила, у ову сврху су искоришћена два приступа. То је подразумевало примену изабраног математичког модела који захтева детаљну анализу руте и примену модела имплементираног у LCA софтвер EASETECH. Оба приступа показала су своје предности, али и одређена ограничења. Док се предност првог приступа огледала у детаљној анализи руте за коју се прорачунавају настале количине издувних гасова, недостатак је што се као један од кључних параметара користи просечна брзина возила без укључивања убрзана и успорења возила током вожње. Недостатак софтверског пакета је неопходност познавања потрошње возила приликом различитих фаза процеса сакупљања и транспорта отпада. Поменути недостаци су превазиђени уз коришћење одређених апроксимација, док су ограничења која су се јавила дала предлоге за будућа истраживања. Поред анализе једне руте, коришћењем софтверског пакета EASETECH, извршена је упоредна процена утицаја читавог система за сакупљање и транспорт чврстог отпада, у два сценарија, постојећем и оптимизованом. Уочено је да се оптимизацијом система остварује уштеда од око 39 тона CO₂, на годишњем нивоу, као и незанемарљива количина осталих издувних гасова.

У последњих неколико година приватне компаније укључују се у послове везане за управљање чврстим отпадом, што доводи до појаве конкуренције у овој области. У циљу да омогуће пружање што квалитетнијих услуга својим корисницима, али и да остану конкурентне на тржишту, комунална предузећа морају да се прилагођавају новонасталим условима и повећавају ефикасност свог пословања. Један од начина да се ово постигне је кроз унапређење енергетске ефикасности процеса сакупљања и транспорта отпада. Самим тим, истраживања спроведена током израде ове дисертације, добијају још више на значају, јер предложена методологија има велику флексибилност и широку могућност примене на друге локалне заједнице и комунална предузећа у Републици Србији.

Литература

Abekiotis K., (2011), Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management, Integrated Waste Management - Volume I, <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-i/life-cycle-assessment-in-municipalsolid-waste-management>

Agarwal Y., Mathur K., Salkin H.M., (1989), A set-partitioning-based exact algorithm for the vehicle routing problem, *Networks*, Vol. 19, pp. 731–749.

Агенција за заштиту животне средине (2010), Извештај о стању животне средине у Републици Србији за 2009. годину, Београд, Република Србија

Агенција за заштиту животне средине, (¹2013), Извештај о стању животне средине у Републици Србији за 2012. годину, Београд, Република Србија

Агенција за заштиту животне средине (²2013), Извештај о управљању амбалажом амбалажним отпадом за 2012. годину, Београд, Република Србија

Alagöz A. Z., Kocasoy, G., (2007), Improvement and modification of the routing sysem for the health-care waste collection and transportation in Istanbul, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 1461-1471

Altinkemer K., Gavish B., (1991), Parallel savings based heuristic for the delivery problem, *Operations Research*, Vol. 39, pp. 456–469.

Alvarez L., Larrucea A., Quero F., del Valle J., (2008), Optimizing the collection of used paper from small businesses through GIS techniques: The Legane’s case (Madrid, Spain), *Waste Management*, Vol. 28, pp. 282–293

Angelelli E., Speranza M. G., (¹2002), The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem: two case studies, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, pp. 944-952

Angelelli, E., Speranza, M. G., (²2002), The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. *European Journal of Operational Research* Vol. 137, pp. 233-247.

Araydin O., Gonullu M.T., (2007), Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study, *Global Nest Journal* Vol. 9, No. 1, pp. 6-11

Araydin O., Gonullu M.T., (2011), Route time estimation of solid waste collection vehicles based on population density, *Global NEST Journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 162-169

Arebey M., Hannan M.A., Basri H., Begum R.A., Abdullah H., (2010), RFID and Integrated Technologies for Solid Waste Bin Monitoring System, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010* Vol. 1, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

Aronnof S., (1989), *Geographic Information System: A management perspective*, Ottawa: WDL Publication

- Arribas C.A., Blazquez C.A., Lamas A., (2009)**, Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems, *Waste management&research*, Vol. 28, pp. 355-363
- Baker B.M., Sheasby J., (1999)**, Extensions to the generalized assignment heuristic for vehicle routing, *European Journal of Operational Research*, Vol. 119, pp. 147-157
- Baldacci R., Christofides N., Mingozzi A., (2008)**, An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts, *Mathematic Programming*, Vol 115, No. 2, pp. 351-385
- Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A., (2004)**, An exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem based on two-commodity network flow formulation, *Operations Research*, Vol. 52, pp 723-738
- Balinski M., Quandt R., (1964)**, On a integer program for a delivery problem, *Operations Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 300-304
- Bautista J., Fernandez E., Pereira J., (2007)**, Solving an urban waste collection problem using ants heuristics, *Computers & Operations Research*, Vol. 35, pp. 3020-3033
- Behrens A., Giljum S., Kovanda J., Niza S., (2007)**, The material basis of the global economy Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies, *Ecological economics*, Vol. 64, pp. 444-453
- Beltrami E. J., Bodin L., (1974)**, Networks and vehicle routing for municipal solid waste collection, *Networks*, Vol. 4, pp. 65-94
- Benjamin A. M., Beasley J. E., (2010)**, Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities, *Computer & Operations Research*, Vol. 37, pp. 2270-2280
- Bianchessi N., Righini G., (2005)**, Heuristic Algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery, *Computers & Operational Research*, Vol. 34, pp. 578-594
- Boskovic G., Jovicic N., Milasinovic M., Jovicic G., Milovanovic D., (2013)**, Methodology for reduction of GHG emissions from municipal solid waste collection and transport, *International Journal for Quality Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 641-652
- Boskovic G., Jovicic N., Milasinovic M., Vujic G., Jovicic G., Milovanovic D., (2011)**, GIS based method for optimization of municipal waste collection at the city level, *Waste-to-energy and packaging waste*, Novi Sad, Nov.30-Dec. 02, pp. 227-234
- Boskovic G., Jovicic N., Milasinovic M., Vujic G., Jovicic G., Milovanovic D., (2013)**, A GIS based technique for determination of optimal number and spatial location of waste bins – case study of Kragujevac, *International Conference 2013- Sustainable landfills and waste management*, Novi Sad 28-29. nov, pp. 67-76
- Buhrkal K., Larsen A., Ropke S., (2012)**, The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 39, pp. 241–254

Burrough P.A., (1986), Principles of geographical information system for land resources assessment, Oxford, Oxford university press

Carić T., (2006), Unapređenje organizacije transporta primjenom heurističkih metoda, doktorska disertacija, fakultet prometnih znanosti, Zagreb

Chang N.B., Wei Y.L., (1998), Sitting recycling drop-off stations in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modelling, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 114, pp.133–149

Christofides N., Mingozzi A., Toth P., (1979), The vehicle routing problem, Combinatorial Optimization, Wiley, Chichester, pp. 315-338

Clarke G., Wright J.W., (1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, Operations Research Vol. 12, pp. 568–581

Commission Of The European Communities, 2005, Annual Report 2005 on the European Community's Development Policy and the Implementation of External Assistance in 2004, Brussels, 2005

Cordeau J., Gendreau M., Laporte G., (1997), A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems, Networks, Vol. 30, pp. 105-119

Dantzig G.B., Fulkerson D.R., Johnson S.M., (1954), Solution of a large-scale travelling-salesman problem, Operations Research Vol. 2, No. 4, pp. 393-410

Dantzig G.B., Ramser J.H., (1959), The truck dispatching problem, Management Science, Vol. 6, No. 1, pp. 80-91

De Meulemeester L., Laporte G., Louveaux F. V., Semet F., (1997), Optimal Sequencing of skip collections and deliveries, Journal of the operational research society, Vol. 48, pp. 57-64

DeMers M.N., (2009), GIS, Hoboken, Wiley Publishing

Demir E., (2012), Models and algorithms for the Pollution-Routing Problem and its variations, University of Southampton, PhD Thesis

Derigs U., Kaiser R., (2007), Applying the attribute based hill climber heuristic to the vehicle routing problem, European Journal of Operational Research, Vol. 177, pp. 719-732

Dijkstra E.W., (1959), A note on two problems in connection with graph, Numerische Mathematik, Vol. 1, pp. 269-271

Dogan K., Suleyman S., (2003), Report: cost and financing of municipal solid waste collection services in Istanbul, Waste management&research, Vol. 21, No. 5, pp. 48-56

Dueck G., (1993), New optimization heuristics: The great deluge algorithm and the record-to-record travel, Journal of Computational Physics, Vol. 104, pp. 86-92

Dueck G., Scheurer T., (1990), Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm, Journal of Computational Physics, Vol. 90, pp. 161-175

Dyson B., Chang N., (2005), Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling, Waste Management, Vol. 25, pp. 669–679

EEA, 2012, The European environment State and Outlook 2010, Material resources and waste – update 2012, Copenhagen

Erdelez A., Margeta J., Knezić S., (2007), Integralni pristup upravljanja sustavom prikupljanja komunalnog otpada, Građevinar, Vol. 59, No. 6, pp. 505-516

Ericsson E., Larsson H., Brundell K., (2006), Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool, Transportation Research Part C, Vol. 14, No. 6, pp. 369-383

Ersoy H., Bulut F., (2009), Spatial and multi-criteria decision analysis-based methodology for landfill site selection in growing urban areas, Waste management and research, Vol. 27, pp. 489 -500

Eurostat data centre on waste, (2013),

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/database>, pristup oktobar 2013.

Finke G. A., Claus A., Gunn E., (1984), A two-commodity network flow approach to the traveling salesman problem, Congressus Numerantium, Vol. 41, pp. 167-178

Fisher M., Jaikumar R., (1981), A generalized assignment heuristic for vehicle routing, Networks, Vol. 11, No. 2, pp. 109-124

Foster B. A., Ryan D. M., (1976), An integer programming approach to the vehicle scheduling problem, Operational Research Vol. 27, No. 2, pp. 367–384

Fukasawa R., Longo H., Lysgaard J., Poggi de Aragao M., Reis M., Uchoa E., Werneck R. F., (2006), Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem, Mathematic Programming, Vol. 106, No.3, pp. 491-511

Galati S., (2006), Geographic Information Systems Demystified, Archen House, Norwood, Massachusetts, USA

Garvin W.M., Crandall H.W., John J.B., Spellman R.A., (1957), Application of linear programming in oil industry, Management Science Vol. 3, No. 4, pp. 407-430

Gavish B., Graves S., (1979), The traveling Salesman problem and related problems, Working Paper 7905, Graduate School of Management, University of Rochester, New York

Gavish B., Graves S., (1982), Scheduling and routing in transportation and distributions systems: Formulations and new relaxation, Working Paper, Graduate School of Management, University of Rochester, New York

Gendreau M., Potvin J.Y., Braysy O., Hasle G., Lokketangen A., (2007), Metaheuristics for the vehicle routing problem and its extensions - A categorized bibliography, Springer, Boston

Ghose M. K., Dikshit A. K., Sharma S. K., (2005), A GIS based transportation model for solid waste disposal - A case study on Asansol municipality, Waste Management, Vol. 26, pp. 1287-1293

- Ghose M.K., A.K. Dikshit A.K., Sharma S.K., (2006)**, A GIS based transportation model for solid waste disposal - A case study on Asansol municipality, Waste Management Vol. 26, No 11, pp. 1287-1293
- Gillett B.E., Miller L.R., (1974)**, A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem, Operations Research Vol. 22, No. 2, pp.340–349
- Gilljum S., Behrens A., Hinterberger F., Lutz C., Meyer B., (2008)**, Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe, Environmental science&policy Vol 2., pp. 204-216
- Glover F., (1986)**,Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, Computers & Operations Research, Vol. 13, No. 5, pp. 533–549
- Golden B., Magnanti T.L., Nguyen H.Q., (1977)**, Implementing vehicle routing algorithms, Networks, Vol. 7, pp. 113-148
- Hannan M.A., Arebey M., Begum R.A., Basri H., (2011)**, Radio Frequency Identification (RFID) and communication technologies for solid waste bin and truck monitoring system, Waste Management, Vol. 31, pp. 2406–2413
- Hannan M.A., Arebey M., Begum R.A., Mustafa A., Basri H., (2013)**, An automated solid waste bin level detection system using Gabor wavelet filters and multi-layer perception, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 72, pp. 33– 42
- Hansmann R. S., Zimmerman U. T., (2009)**, Integrated Vehicle Routing and Crew Scheduling (IVRCS) in Waste Management, Models and Algorithms for Optimization in Logistics, Dagstuhl Seminar Proceedings 09261
- Holland J. H., (1975)**, Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor
- Hopfield J. J., Tank D.W., (1985)**, Neural computation of decisions in optimization problems, Biological Cybernetics, Vol. 52, pp. 141-152
- ISWA, (2012)**, International Solid Waste Association, Globalization and waste management – Florence ISWA Congress, July 2012
- ISWA, (2014)**, International Solid Waste Association, Tech comparison: Fleet Management, Waste management world, Vol. 15, pp. 42-46
- Jovicic N., Boskovic G., Jovicic G., Vujic G., (2009)**, Improving Municipal System for Solid Waste Management Using GIS-techniques and Route Optimization, BEACON CONFERENCE - STRATEGIC WASTE MANAGEMENT PLANNING in South Eastern, European, Middle East and Mediterranean Region, Novi Sad,Dec.10 - Dec. 11, pp. 146 – 153
- Jovicic N., Boskovic G., Milasinovic M., Vujic G., Jovicic, Milovanovic D., (2010)**, Improving efficiency of Municipal waste collection: the case of Kragujevac, ISWA BEACON Public Private Partnership and Hazardous Waste in Developing Countries in SEE, Middle East and Mediterranean Region, Novi Sad, 8th-10th December, pp. 195-205

Jovicic N., Boskovic G., Vujic G., Jovicic G., Despotovic M., Milovanovic D., Gordic D., (2010), Route Optimization to Increase Energy Efficiency and Reduce Fuel Consumption of Communal Vehicles, *Thermal Science*, Vol. 14, pp. S67-S78

Јовичић Н., Вујић Г., Миловановић Д., Јовичић Г., Деспотовић М., Батинић Б., Станисављевић Н., Убавин Д., Гвозденац Б., Бошковић Г., (2009), Методологија за одређивање морфолошког састава комуналног отпада, Техничко решење, Машински факултет Крагујевац

Karadimas N. V., Kolokathi M., Defteraiou G., Loumos V., (2007), Ant Colony system vs ArcGIS Network Analyst: The Case of Municipal Solid Waste Collection, 5th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development, Tenerife, Spain, December 14-16

Karadimas N., Kolokathi M., Defteraiou G., Loumos V., (2007), Municipal waste collection of large items optimized with ArcGIS network analyst, 21st European Conference on Modelling and Simulation, Prague, Czech Republik, June 4th-6th

Karadimas N., Kouzas G., Anagnostopoulos I., Loumos V., (2005), Urban solid waste collection and routing: the ant colony strategic approach, *International Journal of Simulation*, Vol. 6, No. 12-13, pp. 45-53

Karadimas N.V., Loumos V.G., (2008), GIS-based modelling for the estimation of municipal solid waste generation and collection, *Waste Management&Research*, Vol. 26, pp.337–346

Kim B.I., Kim S., Sahoo S., (2006), Waste collection vehicle routing problem with time windows, *Computers & Operations Research*, Vol. 33, pp. 3624-3642.

Kindervater G.A.P., Savelsbergh M.W.P., (1997), Vehicle routing: Handling edge exchanges, *Local Search in Combinatorial Optimization*, Wiley, Chichester, pp. 337–360

Kirby, H. R., Hutton, B., McQuaid, R. W., Raeside, R. and Zhang, X. (2000), 'Modelling the effects of transport policy levers on fuel efficiency and national fuel consumption', *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 5(4), 265–282.

Kirkpatrick S., Gellat Jr C.D., Vecchi M.P., (1983), Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680

Krausmann F., Gingrich S., Eisenmenger N., Erb K.H., Haberl. H., Fischer-Kowalski. M., (2009), Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century, *Ecological Economics* Vol. 68, No. 10, pp. 2696-2705

Крчевинац С., Чангаловић М., Ковачевић-Вујчић В., Мартић М., Вујошевић М., (2010), Операциона истраживања, Факултет организационих наука, Београд

Krikke H., le Blanc, I., Van Krieken, M., Fleuren, H., (2007), Low-frequency collection of materials disassembled from end-of-life vehicles on the value of on-line monitoring in optimizing route planning, *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, No. 2, pp. 209-228

Lakshumi A., Ramiya A., (2006), Optimal Route Analysis for Solid Waste Disposal Using GIS, *Proceedings, International Conference of Land Registration and Cadastre - MAP India*, New Delhi, India

Laporte G., Nobert Y., (1983), A branch and bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Operations Research Spektrum*, Vol 5, No. 2, pp. 77-85

Laporte G., Nobert Y., Desrochers M., (1985), Optimal routing under capacity and distance restrictions, *Operations Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1050-1073

Larsen A., Vrgoc M., Christensen T., Lieberknecht P., (2009), Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance, *Waste Management & Research* Vol. 29, pp. 652-659

Локални план управљања отпадом града Крагујевца (2012), Envitech, Крагујевац, Република Србија

Lin L.Y., Malasri S., (1998), The Use of a Genetic Algorithm in Solid Waste Collection Analysis, *Journal of Solid Waste Technology and Management*, Vol. 25, No. 1, pp. 27-32

Lo C.P., Yeung A.K.W., (2002), Concepts and Techniques of Geographic Information Systems, Prentice Hall series in Geographic Information Science, New Jersey, USA

Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D., (2005), *Geographic Information System and Science*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Chichester, England

Lysgaard J., Letchford A.N., Eglese R.W., (2004), A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem, *Mathematical Programming*, Vol. 100, pp. 423-445

Marianov V., ReVelle C., (1998), Linear, non-approximated models for optimal routing in hazardous environments, *Journal of the operational research society*, Vol. 49, No. 2, pp. 157-164

Marić M., (2011), Примена географских информационих система у археолошкој теренској документацији, Београд, Република Србија

McDougall F.R., White P., Franke M., Hindle P., (2001), *Integrated waste management: A life cycle inventory* (2nd edition), Blackwell Science, Oxford UK

Meijerink A.M.J., (1994), Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Netherlands

Милашиновић М., Бошковић Г., Јовичић Н., Бабић М., Вујић Г., Шуштершич В., Јовичић Г., (2012), Енергетски потенцијали биогаса пореклом из чврстог отпада и отпадних вода у региону Централне Србије, *Енергија, економија, екологија*, бр. 15, стр. 355-361

Mladenovic N., Hansen P., (1997), Variable neighborhood search, *Computational Operations Research*, Vol. 24, pp. 1097-1100

Muttiah R. S., Engel, B. A., Jones D. D., (1996), Waste disposal site selection using GIS-based simulated annealing, *Computers & Geosciences*, Vol. 22, No. 9, pp. 1013-1017

Naddef D., Rinaldi G., (2002), Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP. *SIAM monographs on discrete mathematics and applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 53-81

- Nagata Y., (2007)**, Edge assembly crossover for the capacitated vehicle routing problem, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4446, pp. 142-153
- Nelson M.D., Nygard K.E., Griffin J.H., Shreve W.E., (1985)**, Implementation techniques for the vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, Vol. 12, pp. 273–283
- Nguyen T.T., Wilson B.G. (2010)**, Fuel consumption estimation for curbside municipal solid waste (MSW), *Waste Management & Research*, Vol. 28, pp. 289–297
- Ntziachristos L., Samaras Z., (2000)**, COPERT III - Computer programme to Calculate Emissions from Road Transport, *Methodology and Emission Factors*, European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark
- Nuortio T., Kytöjoki J., Niska H., Bräysy O., (2006)**, Improved route planning and scheduling of waste collection and transport, *Expert systems with applications*, Vol. 30, pp. 223-232
- OECD/IEA, (2009)**, *World Energy Outlook 2009*, International Energy Agency, Paris
- Ombuki-Berman B.M., Runka A., Hanshar F.T., (2007)**, Waste collection vehicle routing problem with time windows using multi-objective genetic algorithms, *Conference Computational Intelligence*, Banff, AB, Canada, July 2-4, pp. 91–97.
- Ozemoy V.M., Smith D.R., Sicherman A., (1981)**, Evaluating Computerised Geographic Information System Using Decision Analysis, *Interfaces*, Vol. 11, pp. 92-108
- Parker H.D., (1988)**, The unique qualities of a geographic information system: a commentary, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 1547-1549
- Partyka J., Hall R., (2012)**, Vehicle routing: On the Road to Innovation, *ORMS Today*, vol. 39 No. 1
- Prins C., (2004)**, A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Computational Operations Research*, Vol 31, pp. 1985-2002
- Rada E.C., Ragazzi M., Fedrizzi P., (2013)**, Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies, *Waste Management*, Vol. 33, pp. 785–792
- Rao M.R., Zionts S., (1968)**, Allocation of transportation units to alternative trips—A column generation scheme with out-of kilter subproblems, *Operational Research*, Vol. 16, pp. 52-63
- Renauld J., Boctor F.F., Laporte G., (1996)**, An improved petal heuristic for the vehicle routing problem, *Journal of the Operational Research*, Vol. 47, pp. 329-336
- Rogge N., De Jaeger S., (2013)**, Measuring and explaining the cost efficiency of municipal solid collection and processing services, *Omega*, Vol. 41, pp. 653-664
- Rovetta A., Xiumin F., Vicentini F., Minghua Z., Giusti A., Qichang H., (2009)**, Early detection and evaluation of waste through sensorized containers for a collection monitoring application, *Waste Management*, Vol. 29, pp. 2939–2949
- Rubenstein-Montano B., Zandi I., (1999)**, Application of a genetic algorithm to policy planning: the case of solid waste, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 26, No. 6, pp. 893–907

Sahoo S., Kim S., Kim B., (2005), Routing optimization for solid waste management, *Interfaces*, Vol. 35, pp. 24-36

Sbihi, A. and Eglese, R. W. (2007), 'The Relationship between Vehicle Routing & Scheduling and Green Logistics-A Literature Survey', Lancaster University Management School

Sener B., Suzen M.L., Doyuran V., (2006), Landfill site selection by using geographic information systems, *Environmental geology*, Vol. 49, pp. 376–388

SERI, (2009), Sustainable European Research Institute, GLOBAL 2000, Overconsumption? Our use of the world's natural resources, Vienna/Brussels, www.seri.at/resource-report (accessed June 2013.)

Simonetto E. O., Borenstein D., (2007), A decision support system for the operational planning of solid waste collection, *Waste Management*, Vol. 27, No. 10, pp. 1286-1297

Службени гласник Републике Србије, (2003), Национална стратегија за управљање отпадом, Влада Републике Србије, Београд, Република Србија

Службени гласник Републике Србије, (2009), Закон о управљању отпадом, Влада Републике Србије, Београд, Србија, Службени гласник РС бр. 36

Службени гласник Републике Србије, (¹2010), Национална стратегија за управљање отпадом за период 2010-2019, Влада Републике Србије, Београд, Србија, Службени гласник РС бр. 29, стр. 13-57

Службени гласник Републике Србије, (²2010), Правилник о методологији за прикупљање података о саставу и количинама комуналног отпада на територији јединице локалне самоуправе, Влада Републике Србије, Београд, Србија, Службени гласник РС бр. 61

Smith T.R., Mannon S., Starr I.L., Estes J.E., (1987), Requirements and Principles for the Implementation and Construction of Largescale Geographic Information System, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 1, pp. 13-31

Tavares G., Zsigraiová Z., Semiao V., (2011), Multi-criteria GIS-based siting of an incineration plant for municipal solid waste, *Waste Management*, Vol. 31, pp. 1960–1972

Tavares G., Zsigraiova Z., Semiao V., Carvalho M., (2009), Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling, *Waste Management*, Vol. 29, pp. 1176-1185

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., (1993), *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill Inc., New York

Thompson P.M., Psaraftis H.M., (1993), Cyclic transfer algorithms for multi-vehicle routing and scheduling problems, *Operations Research* Vol. 41, No. 5, pp. 935-946

Toth P., Vigo D., (2002), *The Vehicle routing problem*, SIAM Monographs on Discrete mathematics and Application, Philadelphia

UNEP, (2011), Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, United Nations Environment Programme

Van Breedam A., An Analysis of the Behavior of Heuristics for the Vehicle Routing Problem for a Selection of Problems with Vehicle-Related, Customer-Related, and Time-Related Constraints, Ph.D. Dissertation, University of Antwerp

Vicentini F., Giusti A., Rovetta A., Fan X., Heb Q., Zhu M., Liu B., (2009), Sensorized waste collection container for content estimation and collection optimization, *Waste Management*, Vol. 29, pp. 1467–1472

Vijay R., Gupta A., Kalamdhad A.S., Devotta S., (2005), Estimation and allocation of solid waste to bin through geographical information systems, *Waste Management & Research*, Vol. 23, pp. 479–484

Viotti P., Poletti A., Pomi R., Innocenti C., (2003), Genetic algorithms as a promising tool for optimisation of the MSW collection routes, *Waste Management & Research*, Vol. 21, pp. 292–298.

Vujic G., Jovicic N., Redzic N., Jovicic G., Batinic B., Stanisavljevic N., Abuhress O. A., (2010), A Fast Method for the Analysis of Municipal Solid Waste in Developing Countries - Case Study of Serbia, *Environmental Engineering And Management Journal*, Vol. 9, No. 8, pp. 1021-1029

Вујић Г., Миловановић Д., (2012), Управљање отпадом, правац научних истраживања у будућности, Рециклажа и одрживи развој, Бр. 5, стр. 30-38

Wark P., Holt J., (1994), A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, pp. 1156–1167

Williams I.D., Cole C., (2013), The impact of alternate weeklz collections on waste arisings, *Science of the total environment*, Vol. 445-446, pp. 29-40

World Bank, (2012), What a waste, A global Review of Solid Waste Management, March 2012, Washington, USA

Yeomans J.S., Huang G.H., Yoogalingam R., (2003), Combining Simulation with Evolutionary Algorithms for Optimal Planning Under Uncertainty: An Application to Municipal Solid Waste Management Planning in the Regional Municipality of Hamilton-Wentworth, *Journal of Environmental Informatics*, Vol.2, pp. 11-30

Zamorano M., Molero E., Grindlay A., Rodríguez M.L., Hurtado A., Calvoa F.J., (2009), A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain), *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, pp. 123–133

Zsigraiova Z., Semiao V., Beijoco F., (2013), Operational costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal, *Waste Management* Vol. 33, pp. 793-806