

Integralni pristup upravljanju sustavom prikupljanja komunalnog otpada

Anita Erdelez, Jure Margeta, Snježana Knezić

Ključne riječi

komunalni otpad,
kruti otpad,
prikupljanje otpada,
upravljanje,
integralni pristup,
optimizacija,
otok Brač

Key words

municipal waste,
solid waste,
waste collection,
management,
integrated approach,
optimisation,
Brač island

Mots clés

déchets municipaux,
déchets solides,
collecte des déchets,
gestion,
approche intégrale,
optimisation,
île de Brač

Ключевые слова

коммунальные отходы,
сбор отходов,
управление,
интегральный подход,
оптимизация,
остров Брач

Schlüsselworte

Kommunalabfall,
fester Abfall,
Abfallansammlung,
Leitung,
integraler Zutritt,
Optimierung,
Insel Brač

A. Erdelez, J. Margeta, S. Knezić

Pregledni rad

Integralni pristup upravljanju sustavom prikupljanja komunalnog otpada

Polazi se od tvrdnje da je prikupljanje otpada značajan trošak u sustavu upravljanja otpadom. Prikazan je integralni pristup u rješavanju problema optimizacije sustava prikupljanja otpada, kao značajnog dijela cijelog sustava. Optimizacija je razmatrana na tri razine: operativnoj - izbor ruta prikupljanja i prijevoza otpada, taktičkoj - izbor lokacija pretovarnih stanica i strateškoj - izbor tehnologije. Postupak je dijelom ispitan na sustavu prikupljanja otpada otoka Brača.

A. Erdelez, J. Margeta, S. Knezić

Subject review

An integrated approach to municipal waste collection system management

The paper starts with an assertion that waste collection is a significant cost element of the waste management system. An integrated approach to optimisation of waste collection, regarded as a significant portion of an overall system, is presented. The optimisation is considered at three levels: operative - selection of waste collection and transport routes, tactical - selection of transfer station sites, and strategic - selection of an appropriate technology. The procedure has partly been tested at the waste collection system used on the Brač island.

A. Erdelez, J. Margeta, S. Knezić

Ouvrage de syntèse

L'approche intégrale à la gestion du système de collecte des déchets municipaux

L'ouvrage commence par l'affirmation que la collecte des déchets constitue un coût considérable dans le système de gestion des déchets. Une approche intégrale à l'optimisation de la collecte des déchets, considérée comme une part considérable du système tout entier, est présentée. L'optimisation est considérée à trois niveaux: niveau opérationnel - sélection des routes de collecte et de transport des déchets, niveau tactique - sélection des points appropriés pour les stations de transfert, et niveau stratégique - sélection de la technologie adéquate. La technologie a partiellement été soumise à l'épreuve pratique sur le système de collecte des déchets de l'île de Brač.

A. Эрделез, Й. Маргета, С. Кнезич

Обзорная работа

Интегральный подход к управлению системой сбора коммунальных отходов

В статье исходит из утверждения, что сбор отходов является значительным расходом в системе управления отходами. Показан интегральный подход при решении проблемы оптимизации системы сбора отходов, как значительной части целой системы. Оптимизация рассматривалась на трёх уровнях: оперативном - выбор маршрута сбора и транспорта отходов, тактическом - выбор локаций перегрузочных станций и стратегическом - выбор технологии. Способ частично испытан на системе сбора отходов острова Брача.

A. Erdelez, J. Margeta, S. Knezić

Übersichtsarbeit

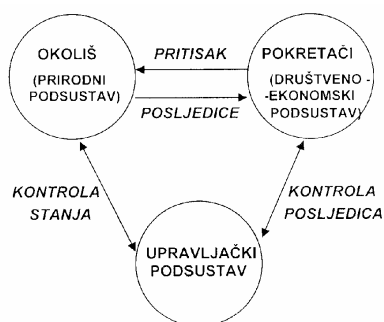
Integraler Zutritt zur Leitung des Systems der Kommunalabfallansammlung

Man geht von der Behauptung aus dass die Abfallansammlung ein bedeutender Kostenaufwand im System der Abfalleitung ist. Dargestellt ist der integrale Zutritt bei der Lösung des Problems der Optimierung des Abfallansammlungssystems, als eines bedeutenden Teils des ganzen Systems. Die Optimierung betrachtete man auf drei Niveaus: dem operativen - Auswahl der Route der Abfallansammlung und dessen Transports, dem taktischen - Auswahl der Lage der Umladestellen, und dem strategischen - Auswahl der Technologie. Das Verfahren ist zum Teil am System der Abfallansammlung der Insel Brač gepriift.

Autori: Mr. sc. **Anita Erdelez**, dipl. ing. građ., IGH, Poslovni centar Split; prof. dr. sc. **Jure Margeta**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Snježana Knezić**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

1 Uvod

Sustav gospodarenja otpadom složen je i promjenjiv (slika 1.). Složenost se očituje u velikom broju čimbenika koji utječu na značajke njegova tri osnovna podsustava: društveno-ekonomskoga, ekološkoga i upravljačkoga. Promjenjivost se očituje u variranju tih čimbenika, a posebno količina i karakteristika otpada, karakteristika prometne mreže kojom se kreću komunalna vozila, itd. Složeni problemi uspješno se rješavaju primjenom teorije sustavskog inženjerstva [10]. Sustavsko je inženjerstvo interdisciplinarni pristup i predstavlja sredstva kojima se omogućava realizacija i primjena uspješnih sustava. Može se promatrati kao primjena inženjerskih tehnika na projektiranje sustava, ali i kao primjena sustavnog pristupa u inženjerskim nastojanjima [13]. Sustavski pristup sistematično pridružuje dijelove sustava u jedinstvenu cjelinu.



Slika 1. Shema gospodarenja otpadom

Gospodarenje komunalnim otpadom sustavom upravljanja otpadom ima svrhu zadovoljavanja globalnih ciljeva utvrđene strategije gospodarenja otpadom uglavnom postojećom infrastrukturom uz neprekidno optimaliziranje. Sagledavajući cjeloviti sustav upravljanja otpadom uočava se da prikupljanje i daljinski prijevoz otpada čine 36 % - 65 % ukupnih troškova zbrinjavanja otpada [6], zbog čega ih se uvijek nastoji racionalizirati odnosno optimalizirati.

Izbor tehnologije zbrinjavanja otpada čvrsto je vezan sa sustavom prikupljanja i daljinskog prijevoza budući da transportni troškovi i problemi utječu i na njezin izbor. Tehnologije poput termičke obrade omogućavaju lokaciju pogona termičke obrade unutar područja prikupljanja, što rezultira niskim troškovima prijevoza. S druge strane, zbrinjavanje otpada na sanitarno odlagalište zahtijeva lokaciju odlagališta na većoj udaljenosti od naselja odnosno područja prikupljanja, što rezultira višim transportnim troškovima. Stoga je nužno problem cjelovito rješavati dajući podjednaku važnost prikupljanju, daljinskom prijevozu i konačnom zbrinjavanju otpada.

Prikupljanje otpada i odgovarajući lokalni prijevoz obuhvaćaju prikupljanje otpada s lokacija njegova privre-

menog odlaganja, koje su u neposrednoj blizini proizvođača otpada, i prijevoz otpada do lokacije njegova daljnjeg zbrinjavanja, bilo da se radi o lokaciji konačnog zbrinjavanja otpada ili lokaciji pretovarne stanice. Daljinski prijevoz ima regionalni karakter, a funkcija mu je smanjenje troškova prijevoza otpada i povećanje iskorišćavanja manjih komunalnih vozila u poslovima prikupljanja otpada. Osnovu sustava s daljinskim prijevozom čine pretovarne stanice u kojima se otpad iz manjih komunalnih vozila kojima je prikupljen dodatno zbija i pretovaruje u 3 - 6 puta obujamski veća vozila kojima se odvozi u udaljene centre.

Procjena potrebe daljinskog prijevoza i pretovarnih stanica temelji se na usporedbi troškova prijevoza sustava bez daljinskog prijevoza i s njim. Najznačajnija prednost koju donosi daljinski prijevoz u usporedbi s lokalnim su niži troškovi prikupljanja budući da se stvara znatna ušteda vremena rada vozila za prikupljanje. Iskustva su pokazala da je uvođenje daljinskog prijevoza u sustav ekonomski opravdano kad je udaljenost središta nastajanja otpada od središta njegova zbrinjavanja veća od 28 km [14].

Jedna od bitnih smjernica Strategije gospodarenja otpadom RH [12] jest zatvaranje svih neuređenih odlagališta i otvaranje regionalnih ili županijskih središta za gospodarenje otpadom. S obzirom na to da se radi o regionalnom rješenju, prijevoz i prijevozniki troškovi postaju važan element. U okviru Strategije, Splitsko-dalmatinska županija namjerava realizirati jedinstveni Centar za gospodarenje otpadom za područje cijele županije. U smislu smanjenja prijevoznih troškova na pojedinim lokacijama u županiji, izgradit će se pretovarne stanice za komunalni otpad. Trenutačno svaki od otoka u županiji ima jedno ili više odlagališta na kojima se zbrinjava otpad. Kako je otok sam po sebi integralna cjelina, trebalo bi najprije unutar otočkog sustava osigurati djelotvorno funkcioniranje sustava za zbrinjavanje otpada, a tek potom integrirati ga u jedinstveni županijski sustav koji uključuje i pomorski prijevoz.

Cilj rada jest analizirati mogućnosti integralnog pristupa upravljanju otpadom radi optimizacije sustava prikupljanja otpada primjenom principa sustavskog inženjerstva. Sukladno toj ideji u radu je predložena metodologija i modeli optimizacije sustava prikupljanja otpada koji su dijelom testirani na primjeru otoka Brača.

2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Optimizacija sustava prikupljanja otpada u svijetu je već dugi niz godina predmetom istraživanja, no samo u nekim segmentima tog sustava. Naglasak je na optimizaciji putova kojima se kreću komunalna vozila, a nešto manje na optimizaciji regionalnih sustava uvođenjem pretovarnih stanica.

Optimizacija putova prikupljanja otpada pripada modelu Problem usmjeravanja vozila – PUV (*vehicle routing problem*) [9]. Primjena PUV modela kod problema optimizacije putova prikupljanja otpada dovela je do Problema periodičnog usmjeravanja vozila s pretvornim stanicama – PUV-PS (*periodic vehicle routing problem with intermediate facilities*) modela koji uključuje većinu ograničenja realnih problema: omogućava obnavljanje kapaciteta vozila u jednom danu u tzv. međuskладиštu, daje tjedni raspored prikupljanja, itd. [1]. Geografski informacijski sustav (GIS) je također pronašao primjenu u određivanju "najjeftinijih"/najkraćih «ruta» prikupljanja otpada na putu prema odlagalištu [4], no njegova je primjena ograničena na manja područja prikupljanja gdje se zbog malih godišnjih količina otpada po regiji otvara mogućnost njihova združivanja [15].

Optimizacija u smislu izbora lokacija pretovarnih stanica također je godinama predmet zanimanja raznih autora. Optimizacijski model u ovome je slučaju Problem lokacije pogona (s definiranim/ndefiniranim kapacitetom pogona) – PLP (*capacitated/un Capacitated warehouse/facility/plant location problem*). Primjena PLP-a pri izboru lokacija pretovarnih stanica/odlagališta rezultirala je konkretnim modelima za izbor najpovoljnijih lokacija između više lokacija odlagališta otpada i više lokacija pretovarnih stanica, uz uvjet da se minimiziraju troškovi transporta [5, 7].

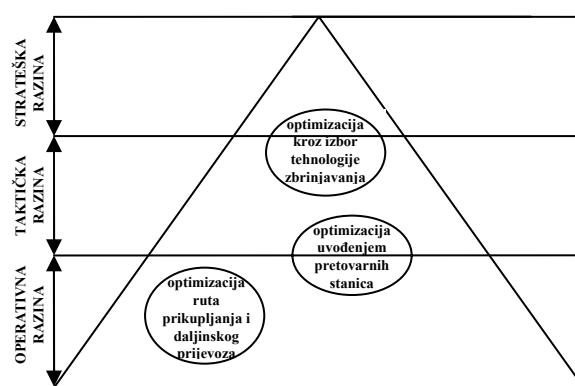
Kad se govori o izradi PUV i PLP optimizacijskih modela kod sustava prikupljanja otpada treba uzeti u obzir niz realnih ograničenja. Ograničenja problema čine kapacitet i broj vozila, trajanje smjene, promjenjivost prometnih uvjeta, promjenjivost u nastajanju otpada, ograničeno vrijeme skladištenja otpada u kontejnerima i dr. To dovodi do vrlo složenih modela koje je teško efikasno primijeniti. Primjena egzaktnih metoda rješavanja modela ograničena je na jednostavne modele, dok se složeniji modeli moraju rješavati primjenom heurističkih metoda od kojih su se najefikasniji pokazali *tabu-search* [1] i genetski algoritmi [9]. Ponekad se, kako bi se zaobišla uporaba heurističkih algoritama, pribjegava pojednostavnjenju problema rješavanjem u više faza [11]. Očito je da nema univerzalnog rješenja optimizacije, te se svaki problem mora individualno rješavati.

3 Razine optimizacije

Optimizacija sustava prikupljanja otpada u literaturi najčešće se vidi u interesima komunalnih poduzeća koja su izravno uključena u optimizaciju [6]. U ovom radu naglašen je sustavski pristup rješavanju problema pa se i optimizacija uočava u nešto širem kontekstu, odnosno u cjelovitom sustavu odlučivanja i upravljanja. Pod optimizacijom sustava podrazumijeva se optimizacija sustava s aspekta minimizacije troškova unutar sustava i po-

većanja efikasnosti funkcioniranja sustava, dok njezine mogućnosti ovise o ograničenjima unutar sustava prikupljanja odnosno sustava upravljanja otpadom. Sustavski pristup podrazumijeva djelovanje podsustava prema ostvarenju ciljeva višeg sustava, a ne samo vlastitih [10]. Kako bi se postigla optimizacija sustava prikupljanja otpada, sustav upravljanja podijeljen je na tri vrlo jasne razine upravljanja odnosno optimizacije (slika 2.):

1. strateška razina: optimizacija sustava prikupljanja otpada izborom tehnologije zbrinjavanja otpada
2. taktička razina: optimizacija sustava prikupljanja otpada izborom lokacija pretovarnih stanica
3. operativna razina: optimizacija sustava prikupljanja otpada izborom «ruta» prikupljanja i prijevoza otpada.



Slika 2. Piramida upravljanja sustavom gospodarenja otpadom s aspekta optimizacije sustava prikupljanja otpada

Prvi se slučaj pojavljuje tijekom dugoročnoga planiranja sustava upravljanja otpadom odnosno kada se analizira strategija razvoja bilo zbog zastarjelosti sustava, bilo zbog novih zakonskih okvira, razvoja novih tehnologija itd. U ovom slučaju nužno je sagledati sve elemente sustava gospodarenja otpadom kako bi se odredile smjernice za dugoročni razvoj sustava. Izbor tehnologije zbrinjavanja znatno utječe na organizaciju prijevoznikoga sustava pa time i na troškove, što posredno ima širi utjecaj na okoliš. Kod različitih tehnologija različiti su predmet prijevoza, različita su odredišta te udaljenosti tih odredišta. Što je više odvojenih frakcija otpada koje treba odvojeno zbrinuti, složeniji je prijevoznički sustav. Optimizacija sustava prikupljanja otpada izborom tehnologije zbrinjavanja otpada zamišljena je kao istodobni odabir tehnologije zbrinjavanja i sustava prikupljanja otpada uz sagledavanje utjecaja na sva tri podsustava gospodarenja otpadom: (I) prirodni, (II) društveno-ekonomski i (III) upravljački. Radi se o sustavskom pristupu rješavanju problema budući da je samo takav pristup pretpostavka za rješavanje ovako složenoga inženjerskoga problema. U ovom slučaju u proces odlučivanja potrebno je uključiti višekriterijalni pristup s više optimizacijskih kriterija koji se moraju istodobno uzeti u obzir.

Niža (taktička) razina optimizacije sustava prikupljanja otpada izborom lokacije pretovarne stanice pojavljuje se kada je regionalni sustav gospodarenja otpadom formiran i/ili kada je područje prikupljanja postalo veliko. Tada je uvođenje pretovarnih stanica u sustav od bitne važnosti za racionalizaciju rada i smanjenje troškova. Taktičke odluke osiguravaju realizaciju strateških odluka, a kriterij njihova vrednovanja je uspješnost sustava.

Najniža razina optimizacije (operativna) optimizacijom «ruta» jest zapravo trajni zadatak svakoga komunalnog poduzeća i tu razinu optimizacije trebalo bi provoditi u pravilu svakih 5 godina. Optimizacija «ruta» je nužna jer se tijekom vremena stalno mijenjaju značajke urbanog područja - osnovni čimbenici sustava koji utječu na učinkovitost prijevoza: broj stanovnika, količina otpada, vrsta prijevoznih sredstava, prometni uvjeti, itd.

4 Testiranje primjene integralnog pristupa u optimizaciji sustava prikupljanja otpada na primjeru otoka Brača

4.1 Opće značajke područja

Otok Brač pripada skupini srednjodalmatinskih otoka Splitsko-dalmatinske županije i među njima je najveći. Dug je oko 40 km, širok prosječno 10 - 12 km i ukupne ploštine 394,41 km². Od kopna je Bračkim kanalom udaljen 6 do 13 km. U 22 otočka naselja 2001. godine popisano je 14.031 stanovnik. Otok je 2003. godine imao službeno zabilježeno 815.520 turističkih noćenja.

Na otoku Braču danas ne postoji integralni sustav gospodarenja otpadom. Gospodarenje otpadom svodi se na odlaganje komunalnog otpada na neuređeno odlagalište Košer u općini Pučišća. Osim općine Pučišća odlagalištem se koriste i druge općine na otoku te grad Supetar (slika 3.).



Slika 3. Prikaz položaja naselja i odlagališta

Lokacija odlagališta Košer županijskim je prostornim planom predviđena kao lokacija centralnog odlagališta za otok Brač. U smislu integralnog sustava gospodare-

nja otpadom županije (županijski centar) središnje odlagalište na otoku Braču prenamjenit će se u pretovarnu stanicu odnosno međuskladište za otok Brač. Budući da zasad još uvijek nije u pojedinostima cjeloviti sustav gospodarenja otpadom u županiji, odlagalište Košer će sljedećih 3 - 5 godina zadržati svoju primarnu funkciju, nakon čega će se zatvoriti, sanirati i prenamijeniti u pretovarnu stanicu. Optimizacija sustava prikupljanja otpada otoka Brača izrađena je na razini naselja kao izvorišta otpada za stanje u 2005. godini. U analizama količina otpada uzeto je da je broj stanovnika svih naselja isti kao i 2001. i pretpostavljen je rast broja turističkih noćenja od 3 %.

U analizu se ušlo sa sljedećim pretpostavkama:

- svaki stanovnik svakoga dana proizvede 1 kg otpada
- svako naselje predstavlja po jednu točku nastajanja otpada (22 klijenta)
- svako turističko noćenje ima za posljedicu 1 kg otpada
- sva turistička noćenja ostvarena su ravnomjerno u tromjesečnom ljetnom razdoblju
- optimizacija se obavlja za dnevne količine otpada nastale u ljetnim mjesecima kada su ostvarena turistička noćenja
- otpad u rastresitom stanju u kontejnerima za otpad ima masu od 120 kg/m³.

Analiza količina otpada po naseljima nalazi se u tablici 1.

4.2 Definiranje matematičkih modela

Budući da je na otoku Braču, za koji je u ovom radu testirana optimizacija sustava prikupljanja otpada, tehnologija odlaganja otpada već određena kao optimalna tehnologija zbrinjavanja otpada, optimizacija je rađena samo na taktičkoj i operativnoj razini.

Na taktičkoj razini optimizacije uporabljen je PLP model cjelobrojnog programiranja, a na operativnoj razini VRP model cjelobrojnog programiranja.

4.2.1 PLP model

Matematički model kojim je opisan problem izbora lokacije pretovarne stanice jest PLP model koji općenito za zadani skup alternativnih lokacija pretovarnih

stanica i skup klijenata koji se poslužuju iz tih pretovarnih stanica određuje kojim će se pretovarnim stanicama koristiti i koji klijenti će se posluživati iz koje pretovarne

Tablica 1. Analiza količina otpada po naseljima

Naselje	Broj stanovnika 2005.	Broj turističkih noćenja 2005.	Dnevna količina otpada od stanovništva		Dnevna količina otpada od turista (15.6-15.9)		Ukupna dnevna količina otpada (15.6 - 15.9)	
			kg/dan	m ³ /dan	kg/dan	m ³ /dan	kg/dan	m ³ /dan
MIRCA	306	0	306	3	0	0	306	3
SPLITSKA	381	0	381	3	0	0	381	3
SUPETAR	3016	265397	3016	25	2949	25	5965	50
ŠKRIP	186	0	186	2	0	0	186	2
BOL	1647	358805	1647	14	3987	33	5634	47
MURVICA	14	0	14	0	0	0	14	0
BOBOVIŠĆA	71	0	71	1	0	0	71	1
LOŽIŠĆA	167	0	167	1	0	0	167	1
MILNA	862	54402	862	7	604	5	1466	12
DONJI HUMAC	166	0	166	1	0	0	166	1
DRAČEVICA	96	0	96	1	0	0	96	1
NEREŽIŠĆA	606	0	606	5	0	0	606	5
DOL	178	0	178	1	0	0	178	1
POSTIRA	1375	60888	1375	11	677	6	2052	17
GORNJI HUMAC	276	0	276	2	0	0	276	2
PRAŽNICA	346	0	346	3	0	0	346	3
PUČIŠĆA	1602	8708	1602	13	97	1	1699	14
NOVO SELO	179	0	179	1	0	0	179	1
POVLJA	364	0	364	3	0	0	364	3
SELCA	952	49295	952	8	548	5	1500	12
SUMARTIN	482	0	482	4	0	0	482	4
SUTIVAN	759	67691	759	6	752	6	1511	13
Ukupno	14031	865185	14031	115	9613	81	23644	196

stanice tako da se minimizira ukupni trošak posluživanja svih klijenata [2]. U radu razmatrane mogućnosti taktičke razine optimizacije posljedica su raspoloživih modela i metoda rješavanja. Donesena je odluka da se postojeći modeli [5, 7] koji se spominju u pregledu literature u radu ne rabe iz sljedećih razloga:

1. radi se o modelima koji nemaju ograničenje da jedan klijent/naselje mora svoj otpad zbrinuti u točno jednom odlagalištu/pretovarnoj stanici, što ne odgovara realnom problemu
2. za rješavanje tih modela razvijene su metode za koje je potrebna posebna programska podrška.

Formulacija problema prilagodila se raspoloživoj WinQSB [16] programskoj podršci. WinQSB je programska podrška za rješavanje problema iz područja operativnih istraživanja, poslovnog odlučivanja i sl. Jedna od opcija podrške jest rješavanje PLP modela. WinQSB pri izboru lokacije pretovarne stanice ne dovodi nužno do najpovoljnijega rješenja, već do jednog iz skupa dobrih rješe-

nja. Funkcija cilja odabrane PLP aplikacije ima sljedeći oblik:

$$\text{Min}F = \text{Min}(\sum_{i,j} c_{ij}d_{ij}w_{ij} + \sum_{i,k} c_{ik}d_{ik}v_{ik}),$$

gdje su:

w_{ij} - količina robe između lokacije i i postojeće lokacije j

v_{ik} - količina robe između lokacije i i nove lokacije k

c_{ij}/c_{ik} - trošak prijevoza po jedinici udaljenosti između lokacije i i postojeće lokacije j /nove lokacije k

d_{ij}/d_{ik} - udaljenost između lokacije i i postojeće lokacije j /nove lokacije k .

Budući da se radi o izboru lokacije koja je pri unosu podataka u model nepoznata, u proračunu udaljenosti između postojećih i novih lokacija primijenjen je *Euclidean distance* izraz za proračun udaljenosti koji ima sljedeću definiciju: ako (x_i, y_i) i (x_j, y_j) predstavljaju koordinate

dviju lokacija i i j , tada se model udaljenosti proračunava izrazom

$$d_{ij} = \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{0.5}$$

Nedostatak je primjene ovog modela što se zadržava na izboru najpovoljnije lokacije, a ne rješava problem dodjeljivanja klijenata izabranim lokacijama.

4.2.2 PUV model

Odlagalište Košer središnje je odlagalište za sav komunalni otpad (baza). Kao podloga za izbor putova prikupljanja jest mreža postojećih prometnica. Pretpostavljeno je da su za prikupljanje na raspolaganju komunalna vozila od 17 m^3 koja imaju koeficijent zbijanja otpada 1:3 (što znači da u vozilo od 17 m^3 može stati 51 m^3 otpada iz kontejnera).

Problem optimizacije putova pokušao se u ovome radu riješiti na više načina, polazeći od raspoloživih metoda rješavanja modela. PUV je naziv za čitavu lepezu problema kod kojih se mora odrediti skup putova za određeni broj vozila koja imaju bazu u jednoj ili više ishodišnih točaka (baze), a za neki broj geografski disperziranih gradova ili klijenata. Cilj VRP-a jest dolaženje do skupa klijenata s poznatom potražnjom na „najjeftinijem“ putu koji počinje i završava u bazi.

U prvom koraku postavljen je klasični PUV model [11]:

Parametri:

Q - kapacitet komunalnog vozila ($Q = 51 \text{ m}^3$)

N - broj klijenata/naselja odnosno zaustavljanja vozila ($N = 22$, broj naselja na otoku Braču)

d_i - količina otpada po klijentu/naselju i , $i > 0$

c_{ij} - udaljenost između klijenta/naselja i te klijenta/naselja j .

Varijable:

$$X_{ij, i \neq j} = \begin{cases} 1, & \text{ako vozilo ide od naselja } i \text{ do naselja } j \\ 0, & \text{ostalo} \end{cases}$$

gdje su $i, j \in \{0, 1, \dots, 22\}$, s nulom kao ishodištem (lokacija Košer).

Funkcija cilja:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^{22} \sum_{j=0, j \neq i}^{22} C_{ij} X_{ij}$$

gdje je C_{ij} matrica udaljenosti.

Ograničenja:

1. sva naselja moraju biti posjećena

$$\sum_{i=1, i \neq j}^{22} X_{ij} = 1, \quad \forall j, j \in \{1, \dots, 22\}$$

2. svako komunalno vozilo mora napustiti naselje

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{22} X_{ij} = 1, \quad \forall i, i \in \{1, \dots, 22\}$$

3. eliminacija putova kojima i početna i završna točka nije odlagalište Košer

$$\sum_{i=0}^{22} \sum_{j=0, j \in S}^{22} X_{ij} \leq |S| - 1$$

4. eliminacija putova na kojima nije poštovano ograničenje kapaciteta komunalnog vozila

$$\sum_{i=0}^{22} \sum_{j=0, j \in T}^{22} X_{ij} \leq |T| - k$$

T – skup naselja (uključujući odlagalište) što zajedno imaju količinu otpada koja prelazi kapacitet kom. vozila, tj. svaki skup koji zadovoljava ograničenje

$$\sum_{i \in T} d_i > Q, \quad Q = 51 \text{ m}^3$$

gdje je k najmanji broj naselja koja se moraju oduzeti iz skupa T kako bi se izbjegla prekapacitiranost vozila.

Budući da je rješenje ovakvog modela vrlo složeno, problem se pojednostavnio uvođenjem višefaznog pristupa [11]. Ideja je da se iz skupa svih mogućih putova prebroje sve one koje zadovoljavaju zadana ograničenja. Dobiiveni podskup putova predstavlja ulazne parametre za revidirani model optimizacije koji će iz tog podskupa izabrati najpovoljnije «rute» koristeći se linearnim programiranjem. Primjenom ovakvog pristupa pojavio se problem već u prvoj fazi rješavanja - pronalaženju podskupa zadovoljavajućih putova uporabom implicitnog algoritma prebrojavanja. Kako na raspolaganju nije bilo gotovog implicitnog algoritma prebrojavanja za rješavanje problema, odustalo se od ideje rješavanja modela uporabom tog algoritma.

Sve navedeno rezultiralo je uporabom heurističke metode u rješavanju PUV modela – algoritma Clarke & Wright - aproksimativne metode za rješavanje problema pronalaženja najpovoljnijih putova za više vozila različitih kapaciteta koja se rabe za isporuku robe iz jedne baze do velikog broja klijenata [8]. Matricu udaljenosti između klijenata čine najkraće udaljenosti. Clark & Wright algoritam vozilima dodjeljuje klijente (odnosno količinu robe koju klijent prima ili daje) na način da je ukupni prijedni put minimalan. Radi se o jednostavnom, ali efikasnom postupku pronalaženja gotovo najpovoljnijega rješenja (*near-optimal solution*). Broj klijenata može se mjeriti u tisućama i model ne gubi na svojoj efikasnosti.

Polazno rješenje PUV-a sastoji se od uporabe n vozila i dodjeljivanja jednog vozila svakom od klijenata. Ukupna duljina svih putova ovog rješenja jest:

$$2 \sum_{i=1}^N d(D, i),$$

gdje je $d(D, i)$ udaljenost između baze D i klijenta i

Ako se u sljedećem koraku jedno vozilo iskoristi za posluživanje dvaju klijenata na jednome putu, ukupna se udaljenost smanjuje za

$$s(i, j) = 2d(D, i) + 2d(D, j) - [d(D, i) + d(i, j) + d(D, j)] \\ = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j)$$

Veličina $s(i, j)$ poznata je pod nazivom "ušteda" (*savings*) i rezultat je kombiniranja klijenata i i j u jedinstveni put. Što je veći $s(i, j)$, to je korisnije kombinirati i i j u jedinstveni put. Klijenti i i j ne mogu se kombinirati ako se njihovim kombiniranjem krši ograničenje PUV-a. Ograničenja PUV-a mogu biti najveći dopušteni kapacitet vozila, najveća udaljenost koju vozilo može prijeći, najveći broj klijenata na jednome putu itd.

4.3 Rezultati

4.3.1 Taktička razina optimizacije: izbor lokacije pretovarne stanice

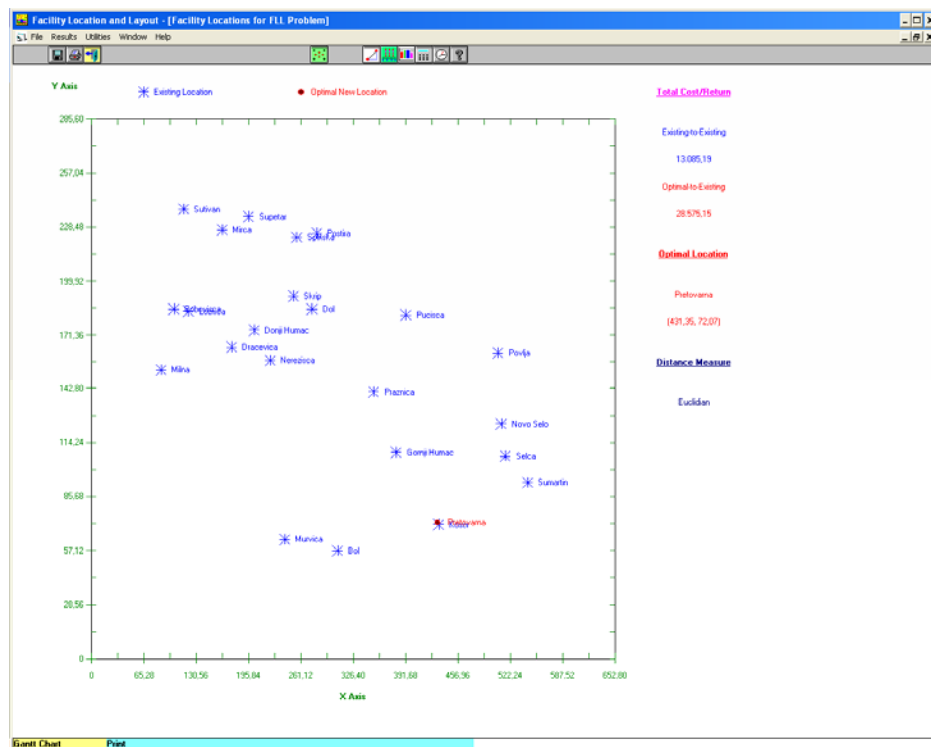
Sustav prikupljanja otpada na otoku Braču određen je lokacijama naselja koja svakodnevno stvaraju otpad i lokacijom odlagališta Košer kao jedinstvenog odlagališta za sva naselja. Svako je naselje jedna točka nastajanja otpada (22 klijenta), a odlagalište Košer je središnje odlagalište za sav komunalni otpad (baza).

Izbor lokacije pretovarne stanice polazi od sljedećih postavki:

- lokacija odlagališta Košer zadana je kao lokacija središnjega odlagališta
- provedbom analize koja se temelji na rezultatima dosadašnje prakse (uvjet uvođenja pretovarne stanice u sustav jest dosegnuta udaljenost od približno 28 km između područja prikupljanja i lokacije daljnjeg zbrinjavanja otpada [14]) donesena je odluka da za sva naselja koja su od središnjega odlagališta udaljena više od 28 km u prijevozu treba pretovariti otpad uvođenjem pretovarne stanice u sustav. Polazeći od geografskog razmještaja naselja koja zadovoljavaju navedeni uvjet u odnosu na lokaciju odlagališta Košer (Splitska, Supetar, Bobovišća, Ložišća, Milna, Dol, Postira, Sutivan) te postojeće mreže prometnica na otoku, donesena je odluka da se gradi jedna pretovarna stanica
- iz svih ostalih naselja otpad će se dovoziti izravno na središnje odlagalište.

Optimizacija je rađena na dnevnoj bazi prikupljanja i prijevoza otpada.

Nakon analize izlaznih podataka zaključak je da je s aspekta prijevoznih troškova izgradnja pretovarne stanice na otoku Braču nepotrebna budući da je model pretovarnu stanicu locirao na lokaciju središnjega odlagališta Košer (uporabom izraza *Euclidian distance* za proračun udaljenosti - slika 4.). Uvođenje pretovarne stanice stvara nov investicijski trošak (pretovarna stanica i vozila za daljinski prijevoz) kao i operativni trošak rada pretovarne stanice koji nisu uključeni u analizu.



Slika 4. Grafički prikaz rezultata izbora lokacije u programskoj podršci WINQSB

4.3.2 Operativna razina optimizacije: izbor «ruta» prikupljanja i prijevoza otpada

Za potrebe istraživanja promatrano je 9 lokacija nastajanja otpada. Sva naselja pojedine općine ili grada združena su u središte nastajanja otpada koji je lociran u administrativnom sjedištu općine ili grada kojih je na Braču 8. Supetar je radi ograničenja kapaciteta komunalnog vozila podijeljen na Supetar 1 i Supetar 2, što čini ukupno 9 središta nastajanja otpada. Ovako združene količine otpada prikazane su u tablici 2. Matrica udaljenosti C između 9 naselja i odlagališta prikazana je u tablici 3.

Rješavanje problema izvedeno je u dva koraka:

1. U 1. koraku matrica udaljenosti predstavlja matricu troškova budući da se u rješavanje modela krenulo s

pretpostavkom da je trošak puta proporcionalan udaljenosti (faktor proporcionalnosti jednak je 1). Takav pristup podrazumijeva jednake uvjete na svim dionicama prometne mreže, što u stvarnosti nije slučaj.

2. U 2. koraku matrica udaljenosti/troškova korigirala se unošenjem popravnih faktora za svaku od dionica prometne mreže koja je u nekom nagibu.

Može se reći da matrica troškova/udaljenosti u 1. koraku pretpostavlja da se radi o prometnoj mreži koju čine vodoravni pravci ujednačene kvalitete habajućeg sloja i neometanog prometa. Ovakvi idealni uvjeti prometne mreže prihvatljivi su na istraživačkoj razini osobito kada se radi o velikim udaljenostima koje umanjuju lokalne značajke.

Tablica 2. Ukupna količina otpada po općinama i gradu

Naselje	Broj stanovnika 2005.	Broj turističkih noćenja 2005.	Dnevna količina otpada od stanovništva		Dnevna količina otpada od turista (15.6-15.9)		Ukupna dnevna količina otpada (15.6-15.9)	
			kg/dan	m ³ /dan	kg/dan	m ³ /dan	kg/dan	m ³ /dan
SUPETAR*	3889	265397	3889	32	2949	25	6838	58
BOL	1661	358805	1661	14	3987	33	5648	47
MILNA	1100	54402	1100	9	604	5	1704	14
NEREŽIŠĆA	868	0	868	7	0	0	868	7
POSTIRA	1553	60888	1553	13	677	6	2230	18
PUČIŠĆA	2224	8708	2224	19	97	1	2321	19
SELCA	1977	49295	1977	16	548	5	2525	20
SUTIVAN	759	67691	759	6	752	6	1511	13
Ukupno	14031	865185	14031	115	9613	81	23644	196

* Supetar (58 m³/dan) čine Supetar 1 (51 m³/dan) i Supetar 2 (7 m³/dan)

Tablica 3. Matrica udaljenosti – 9 naselja

NASELJE	KOŠER	SUPETAR1	SUPETAR2	BOL	MILNA	NEREŽIŠĆA	POSTIRA	PUČIŠĆA	SELCA	SUTIVAN
KOŠER	0	30.202	30.203	17.497	38.424	23.481	30.209	16.836	12.781	37.055
SUPETAR1	30.202 ¹	0	1	34.075	18.775	7.755	9.776	23.149	35.825	6.853
SUPETAR2	30.203	1	0	34.076	18.776	7.756	9.777	23.150	35.826	6.854
BOL	17.497	34.075	34.076	0	42.297	27.354	34.082	20.709	23.120	40.928
MILNA	38.424 ²	18.775 ⁵	18.776	42.297	0	15.112	28.551	35.110	44.047	11.922
NEREŽIŠĆA	23.481	7.755	7.756	27.354	15.112	0	10.713	20.167	29.104	14.608
POSTIRA	30.209 ³	9.776	9.777	34.082 ⁷	28.551 ⁹	10.713 ¹¹	0	13.373	35.832	16.629
PUČIŠĆA	16.836	23.149	23.150	20.709	35.110 ¹⁰	20.167 ¹²	13.373	0	22.459	30.002
SELCA	12.781	35.825 ⁶	35.826	23.120	44.047	29.104	35.832 ¹⁴	22.459	0	42.678
SUTIVAN	37.055 ⁴	6.853	6.854	40.928 ⁸	11.922	14.608 ¹³	16.629	30.002	42.678 ¹⁵	0

¹ via Pražnice, ² via Dračevica, ³ via Pučišća, ⁴ via Supetar, ⁵ via Sutivan, ⁶ via Pražnice, ⁷ via Pučišća, ⁸ via Supetar, ⁹ via Škrip, ¹⁰ via Pražnice, ¹¹ via Škrip, ¹² via Pražnice, ¹³ via Supetar, ¹⁴ via Pučišća, ¹⁵ via Supetar

Tablica 4. Popravni faktori za nagibe korišteni za izračun korigirane matrice udaljenosti [3]

Nagib uspona/pada (%)	Brzina kretanja vozila (km/h)	Popravni faktor*
1	96	2
2	80	10
3	72	22
4	56	36
5	56	62
6	56	86
7	48	110
8	32	122
9	32	151
10	24	163
11	24	196
12	24	230
13	24	260
14	24	292
15	24	324

* popravni faktor predstavlja postotno povećanje potrošnje goriva u odnosu na potrošnju na horizontalnom putu

Da bi se matrica troškova približila realnom stanju, tj. poboljšala, eksploatacijski trošak vozila podijeljen je na osnovne elemente: troškove potrošnje i vremenski ovisne troškove [3]. S aspekta optimizacije putova interesantni su troškovi potrošnje koje čine gorivo, ulje, gume te održavanje i popravci. Za troškove potrošnje razvijeni su popravni faktori troškova [3] koji se odnose na: uzdužni nagib puta, zakrivljenost, vrstu habajućeg sloja, stanje habajućeg sloja i međusobne utjecaje u prometu. Najveći dio povećanja troškova izazvanih nagibom čini pove-

ćanje potrošnje goriva. Popravni troškovi za nagibe daju se kao postotno povećanje potrošnje goriva u odnosu na potrošnju na vodoravnom putu, ovisno o stopi uspona/pada i brzini kretanja (tablica 4.).

Sukladno tome, u 2. se koraku matrica udaljenosti/troškova korigirala unošenjem popravnih faktora za svaku od dionica prometne mreže koja je u nekom nagibu. U procesu korekcije odabirani su granični popravni faktori za pojedini nagib za 5-tonsko teretno vozilo [3]. U tablici 5. dana je korigirana matrica udaljenosti.

Matrica udaljenosti može se korigirati i s aspekta zakrivljenosti između pojedinih dionica prometne mreže, stanja habajućeg sloja i međusobnih utjecaja u prometu. Kako zakrivljenost u odnosu na nagibe ima puno manji udio u povećanju troškova, u modelu je zanemarena. Povećanje troškova zbog stanja habajućeg sloja također nije uzeto u razmatranje budući da prijevoz otpada na Braču teče prometnicama ujednačene kvalitete habajućeg sloja. Međusobni utjecaji u prometu nisu uvršteni u matricu udaljenosti/troškova budući da na raspolaganju nije bilo relevantnih podataka o prometnim tokovima.

Uporabom metode algoritma Clark&Wright za rješenje modela optimizacije putova prikupljanja komunalnog otpada između središta nastajanja otpada na otoku Braču po postojećoj prometnoj mreži otoka, dobiveno je sljedeće rješenje:

Dnevno prikupljanje otpada valja provoditi u sljedećih 5 ruta:

1. ruta Košer – Supetar 1 - Košer, prikupljeno 51 m³ otpada (slika 5.)

Tablica 5. Korigirana matrica udaljenosti – 9 naselja

NASELJE	KOŠER	SUPETARI	SUPETAR2	BOL	MILNA	NEREŽIŠĆA	POSTIRA	PUČIŠĆA	SELCA	SUTIVAN
KOŠER	0	34.715	34.716	21.408	40.812	24.695	36.153	22.780	14.805	41.339
SUPETAR1	34.715 ¹	0	1	42.370	19.966	12.615	9.776	23.149	42.363	6.990
SUPETAR2	34.716	1	0	42.371	19.967	12.616	9.777	23.150	42.364	6.991
BOL	21.408	42.370	42.371	0	48.467	32.350	43.808	30.435	29.056	48.994
MILNA	40.812 ²	19.966 ⁵	19.967	48.467	0	17.742	29.742	43.182	48.459	12.976
NEREŽIŠĆA	24.695	12.615	12.616	32.350	17.742	0	16.248	27.066	32.343	19.605
POSTIRA	36.153 ³	9.776	9.777	43.808 ⁷	29.742 ⁹	16.248 ¹¹	0	13.373	43.801	16.766
PUČIŠĆA	22.780	23.149	23.150	30.435	43.182 ¹⁰	27.066 ¹²	13.373	0	30.428	30.139
SELCA	14.805	42.363 ⁶	42.364	29.056	48.459	32.343	43.801 ¹⁴	30.428	0	48.987
SUTIVAN	41.339 ⁴	6.990	6.991	48.994 ⁸	12.976	19.605	16.766	30.139	48.987 ¹⁵	0

¹ via Praznice, ² via Dračevica, ³ via Pučišća, ⁴ via Ložišća, ⁵ via Sutivan, ⁶ via Praznice, ⁷ via Pučišća, ⁸ via Ložišća, ⁹ via Supetar, ¹⁰ via Praznice, ¹¹ via Škrip, ¹² via Praznice, ¹³ via Supetar, ¹⁴ via Pučišća, ¹⁵ via Ložišća

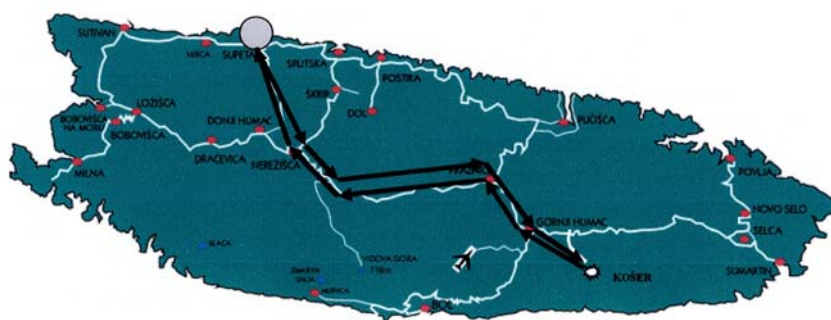
2. ruta: Košer – Supetar 2 – Postira – Pučišća – Košer, prikupljeno 44 m³ otpada (slika 6.)
3. ruta: Košer – Bol – Košer, prikupljeno 47 m³ otpada (slika 7.)
4. ruta: Košer – Milna – Sutivan – Nerežišće – Košer, prikupljeno 34 m³ otpada (slika 8.)

5. ruta: Košer – Selca – Košer, prikupljeno 20 m³ otpada (slika 9.).

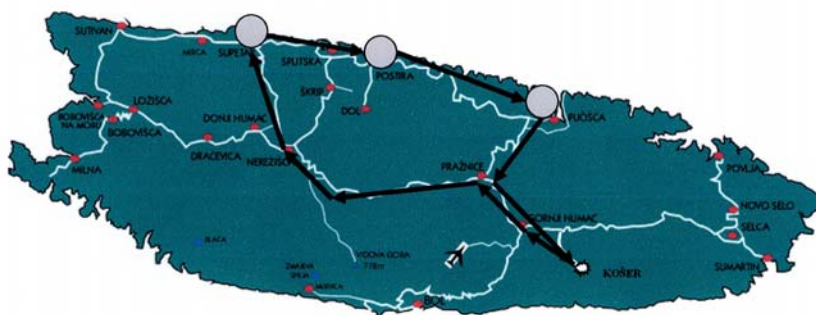
U matricu udaljenosti unesene su udaljenosti koje prikazuju najkraći mogući put između dviju promatranih točaka. Kako bi se ubrzao proces pronalaženja najkraćeg puta u prometnoj mreži između dvaju parova naselja, uporabljena je programska podrška Arcview, modul Network Analyst. Primjena Network Analysta znatno smanjuje vrijeme proračuna, što posebno dolazi do izražaja kod ovdje primijenjenog postupka poboljšanja matrice udaljenosti kada se odnosi udaljenosti mijenjaju u svakom od koraka. Network Analyst osim najkraće udaljenosti, koja je primijenjena kao funkcija cilja u ovom radu, ima mogućnost izbora "najbržeg puta", što u ovakvim analizama može biti vrlo korisno.

Iz dobivenog rješenja može se zaključiti da je za svakodnevno prikupljanje otpada s aspekta količina otpada dovoljno na raspolaganju imati 5 vozila za prikupljanje otpada. Detaljnija analiza vremena potrebnog za prikupljanje otpada po pojedinoj puti, uz uključivanje vremena potrebnog za prikupljanje otpada unutar općine/grada, pokazala bi je li moguće ovaj broj smanjiti i time povećati iskoristivost vozila. Vrijeme putovanja ključni je čimbenik i indikator prijevoza. Kraće vrijeme putovanja rezultira manjim brojem potrebnih vozila, a time i vozača i troškova prijevoza. Uključivanjem podataka o raspoloživom ljudskom potencijalu u analizu može se doći do najpovoljnijega broja smjena u radu vozila.

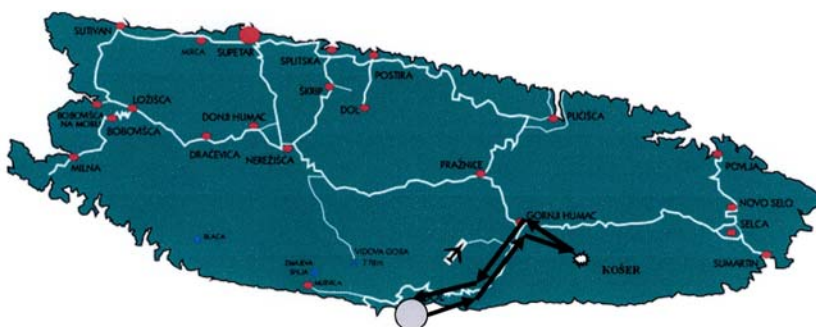
Korekcijom matrice udaljenosti popravnim faktorom za nagibe u 2. koraku dobiveni su isti rezultati najpovoljnijih putova kao i kod "idealizirane" matrice udaljenosti. Očito je da unošenje popravnog faktora za nagibe kod duljine dionica prometne mreže nema utjecaja na rezultate na primjeru Brača.



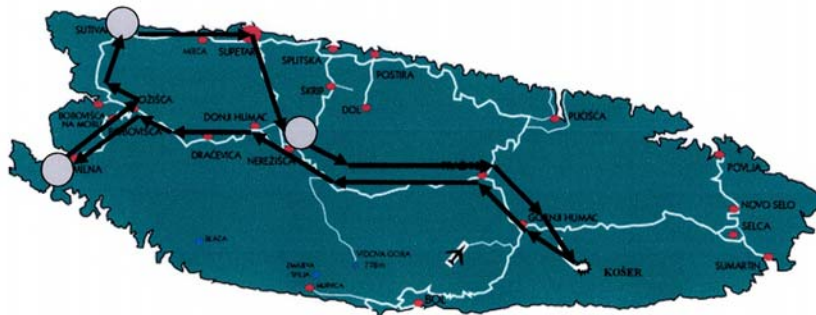
Slika 5. Prikaz prve rute: Košer-Supetar 1-Košer



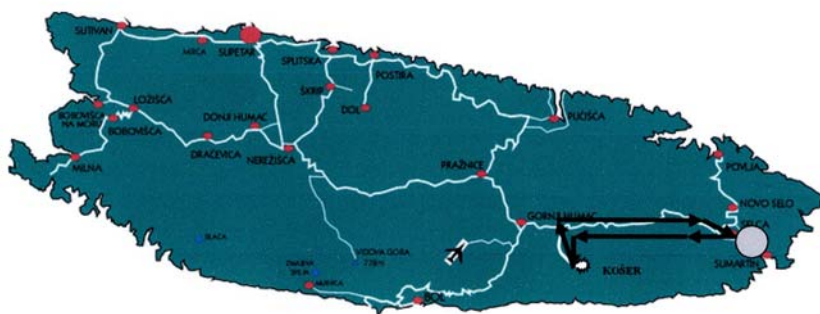
Slika 6. Prikaz druge rute: Košer-Supetar 2-Postira-Pučišća-Košer



Slika 7. Prikaz treće rute: Košer-Bol-Košer



Slika 8. Prikaz četvrte rute: Košer-Milna-Sutivan-Nerežišće-Košer



Slika 9. Prikaz pete rute: Košer-Selca-Košer

5 Zaključak

Sustav prikupljanja otpada je složen i promjenjiv s nizom zainteresiranih subjekata u procesu odlučivanja koji se tijekom procesa odlučivanja susreću sa problemom pravilnog uključivanja različitih ciljeva i želja u proces vrednovanja. U radu je predstavljen novi integralni pristup u optimizaciji sustava prikupljanja otpada istodobnom analizom problema na tri razine optimizacije: operativnoj, taktičkoj i strateškoj. Prednost predstavljenoga integralnog pristupa u rješavanju problema gospodarenja otpadom jest efikasno uključivanje svih varijabli u proces upravljanja sustavom različitih razina odlučivanja. Procesi i varijable koji se često mijenjaju (količine otpada, značajke prometne mreže) uključeni su u model opterećen nizom ograničenja (zadana tehnologija zbrinjavanja otpada, lokacije zbrinjavanja, raspoloživa infrastruktura sustava) na najnižoj operativnoj razini. Procesi i varijable koji se sporije mijenjaju (kreiranje regionalnih sustava gospodarenja otpadom) uključeni su u model ograničen tehnologijom zbrinjavanja otpada na taktičkoj razini. Donositelji odluke na strateškoj razini svojim odlukama usmjeravaju i ograničavaju razvojne varijable, a sve radi ostvarenja održivog razvoja regije i optimizacije ukupnog sustava gospodarenja otpadom.

Primjena integralnog pristupa na otok Brač uključila je kreiranje dvaju modela (PUV i PLP) u svrhu optimizacije postojećeg sustava prikupljanja otpada.

Novina ovog rada u odnosu prema dosad objavljenima jest uvođenje realnih ograničenja prometne mreže u Clark&Wright algoritam. Uvođenjem ovih ograničenja postiglo se "poboljšanje" matrice udaljenosti čime su "poboljšani" i dobiveni rezultati. Svakako bi kod prob

lema prijevoza otpada unutar regionalnog sustava gospodarenja otpadom u kojem su razlike u nadmorskim visinama pojedinih naselja te karakteristike prometne mreže kojom se kreću komunalna vozila izraženije, trebalo primjenjivati "korigiranu" matricu udaljenosti za dobivanje točnijih rezultata. Vrijeme putovanja ključni je čimbenik i indikator prijevoza. Uključivanjem vremena u analizu prijevoza dobile bi se

virtualne udaljenosti unutar prometne mreže izražene vremenom putovanja i time još cjelovitiji rezultati.

Analizom se došlo do zaključka da ne postoji potreba uvođenja pretovarne stanice u sustave s naseljima s relativno malim količinama otpada kada se ona nalaze na udaljenosti ne puno većoj od 30 km od lokacije zbrinjavanja otpada. Rezultati na operativnoj i taktičkoj razini optimizacije daju jasne informacije vezane uz prijevoz otpada, čime se obogaćuje baza znanja o problemu.

Obogaćena baza znanja na temelju provedene optimizacije i primjene PUV i PLP modela vrlo je vrijedna za primjenu u višekriterijalnoj analizi alternativnih lokacija odnosno kao element optimizacije na strateškoj razini rješavanja problema. Na žalost, optimacija na strateškoj razini na primjeru otoka Brača zasad je nepotrebna budući da je tehnologija odlaganja već definirana kao tehnologija zbrinjavanja otpada na otoku do realizacije županijskog centra gospodarenja otpadom. Primjenom izrađenih modela (PUV i PLP) znatno se unapređuje sustav prijevoza i cijeli proces zbrinjavanja otpada, pa bi ih stoga trebalo češće primjenjivati.

Kreiranje baze podataka koju osim prijevoza čine i druge varijable bitne za odlučivanje uz uključivanje GIS-a i višekriterijalnih metoda odlučivanja, dovest će do rezultata bitnih za donošenje strateških odluka. Jedna sveobuhvatna analiza sustava gospodarenja otpadom na strateškoj razini treba rezultirati izradom sustava za podršku odlučivanju u gospodarenju otpadom koji bi, između ostalog, donositeljima odluke omogućio vrijedne konzultacije i podršku te upozoravao na moguće posljedice izbora pojedine tehnologije zbrinjavanja otpada na prijevoz.

LITERATURA

- [1] Angelelli, E.; Speranza, M. G.: *The periodic vehicle routing problem (PVRP) with intermediate facilities*, European Journal of Operational Research 137 (2002), 233-247
- [2] Beasley, J.E.: *Operations research notes - course at Imperial College*, United Kingdom, 2005.
<http://people.brunel.ac.uk/~mastijb/jeb/or/contents.html>.
- [3] Dorsch Consult – München, *Uputstva za izradu studija o izvodljivosti puteva. Savjet republičkih i pokrajinskih organizacija za puteve* - administracija Ljubljana, 1974.
- [4] Ghose, M. K.; Dikshit, A. K.; Sharma, S. K.: *A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality*, Waste Management, (2006), Forthcoming paper

- [5] Harvey, O'Flaherty: *An analysis of solid waste transportation and disposal alternatives*. INFOR 11 (1973), 187-200.
- [6] Hickman, H. L.: *Principles of Integrated Solid Waste Management*, American Academy of Environmental Engineers, USA, 1999.
- [7] Kirca, O.; Erkip, N.: *Selecting transfer station locations for large solid waste systems*. European Journal of Operational Research, 38 (1988), 339-349
- [8] Larson, R. C.; Odoni, A. R.: *Urban operations research*, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
http://web.mit.edu/urban_or_book/www/book/
- [9] Lombardi, F.; Polettini, A.; Pomi, R.; Viotti, P.: *Optimization of collection routes: State of the art and development*. Atti SIDISA 2000, International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Trento, 18-33 settembre 2000, vol.III, 51-56.
- [10] Margeta, J.; Azzopardi, E.; Iacovides I.: *Smjernice za integralni pristup razvoju, gospodarenju i korištenju vodnih resursa*, Centar za regionalne aktivnosti programa Prioritenih akcija, Split, 1999.
- [11] Ruiz, R.; Maroto, C.; Alcaraz, J.: *A decision support system for a real vehicle routing problem*, European Journal of Operational Research, 151 (2003), 352-364
- [12] *Strategija gospodarenja otpadom*, NN 130/05
- [13] Thomé, B.: *Systems Engineering: Principles and Practice of Computer-based Systems Engineering*. Chichester: John Wiley & Sons, 1993.
- [14] *Waste Transfer Stations: A Manual for Decision-Making*, U.S. EPA, Office of solid waste and emergency response., Washington, DC, 2002.
<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/pubs/r02002.pdf>
- [15] Wasserman, G.: *The Use of GIS for Optimising Waste Collection*, Proceedings of International Symposium on Sustainable Waste Management, 9.-11. September 2003, Dundee, United Kingdom, 265-272
- [16] WinQSB, Version 2.0 - Chang, Y-L.2003. John Wiley & Sons, Inc.