

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Vladimir D. Simić

**MODELIRANJE I UPRAVLJANJE  
SYSTEMIMA ZA RECIKLAŽU VOZILA**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC  
ENGINEERING

Vladimir D. Simić

**MODELLING AND CONTROL OF  
VEHICLE RECYCLING SYSTEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

## **INFORMACIJE O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

**Mentor:** vanredni profesor, prof. dr, Branka Dimitrijević, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

**Komentor:** redovni profesor, prof. dr, Milorad Vidović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

### **Članovi komisije:**

Redovni profesor, prof. dr, Dušan Teodorović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

Vanredni profesor, prof. dr, Ranko Nedeljković, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

Vanredni profesor, prof. dr, Milan Stanojević, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka

### **Datum odbrane:**

## IZJAVE ZAHVALNOSTI

Ova disertacija je delimično podržana od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije kroz projekat TR 36006 za period 2011-2014.



## **REZIME:**

Na samom početku disertacije je primenom metode analize sadržaja dat pregled svih onih inženjerskih tema iz oblasti reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa (ELV) za koje je procenjeno da su u direktnoj ili indirektnoj vezi sa predmetom kojim se ona bavi. Prikupljena literatura je organizovana u dve osnovne podoblasti: Operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila i teorijski aspekt reciklaže vozila. Kako bi što jasnije mogli biti identifikovani pravci daljeg istraživanja i uočeni eventualni nedostaci već objavljenih radova, pregled literature je upotpunjen tabelom glavne klasifikacije oblasti reciklaze vozila, tabelom raspodele prikupljenih radova prema mestu objavljivanja i tabelom raspodele radova na temu reciklaze vozila u međunarodnim časopisima u periodu 1997-2013. godina.

U disertaciji je prvo formulisan i testiran model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju. U okviru prateće studije slučaja razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost EU sistema za reciklažu vozila, i priložena diskusija o uticaju tehnološkog razvoja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila. Pored toga, izvršene su sledeće analize: analiza uticaja Direktive Evropske Unije o vozilima na kraju životnog ciklusa (EU ELV direktiva) na proces donošenja reciklažnih odluka, analiza uticaja raspoloživih finansijskih instrumenata na profitabilnost i ekološku efikasnost fabrike za reciklažu vozila, analiza dva pristupa za upravljanje ekološkom efikasnošću reciklažnog sistema, i analiza uticaja EU ELV direktive i uslova poslovanja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila. Kontrolu efikasnosti reciklažnog sistema treba sprovoditi na nivou čitavog sistema, jer to ni u kom slučaju neće ugroziti ciljeve koje je EU ELV direktiva propisala. U slučaju važećih kvota, najbolji ekološki rezultati biće ostvarivani pri visokoj ceni odlaganja ostataka drobljenja automobila (ASR) na deponiju i niskoj ceni prerade u postrojenju za napredni termalni tretman. Sa druge strane, posle 1. januara 2015. godine zemlje članice EU treba da povećaju cene odlaganja na deponije i učine sve da snize troškove naprednog termalnog tretmana i spaljivanja ukoliko žele da minimiziraju dalju degradaciju životne sredine. Povećanje cene odlaganja na deponiju neće uvek smanjiti količinu ostataka drobljenja automobila koja se rutira ka deponijama. Štaviše, do 1. januara 2015. godine pomenuto poskupljenje neće imati efekta pri visokim cenama spaljivanja i naprednog termalnog tretmana, a posle ovog

datuma ono će biti opravdano samo ukoliko cena naprednog termalnog tretmana bude niska. Analizom strukture troškova fabrike za reciklažu vozila zaključeno je da na nju u značajnoj meri utiču zakonska regulativa i finansijski uslovi poslovanja.

U disertaciji je potom formulisan i testiran model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila sa namerom da se pronađu odgovori na sledeća ključna pitanja: Da li savremeno opremljena fabrika za reciklažu vozila može poslovati profitabilno? Da li su propisane kvote ekološke efikasnosti uopšte dostižne? Kako će započeta promena u dizajnu vozila uticati na fabrike za reciklažu vozila? Predloženi model se bavi problemima taktičkog planiranja reciklaže i izbora materijala u evropskom sistemu za reciklažu vozila. Formulirani model obezbeđuje optimalne odluke u pogledu naručivanja, skladištenja, sortiranja, transporta, naprednog termalnog tretmana, sagorevanja i odlaganja na deponiju. Posmatran je specijalan slučaj uticaja promene dizajna vozila na poslovanje fabrika za reciklažu vozila, odnosno uticaj smanjenja težine vozila supstituisanjem crnih metala sa aluminijumom. Na osnovu analize rezultata testiranja predloženog modela i dobijenih odgovora je zaključeno da je transformacija fabrika za reciklažu vozila ne samo neophodna, već i potpuno opravdana, ali i da je konačan uspeh EU ELV direktive sasvim izvestan. Stabilnost dobijenih rezultata je potvrđena analizom njihove osetljivosti na promene cena aluminijuma i bakra. Analiza osetljivosti količine naručenih olupina na visinu ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila je ukazala na značajnu, skoro linearnu međuzavisnost.

U disertaciji je prezentovan model kratkoročnog planiranja reciklaže ostataka drobljenja automobila (ASR) u japanskom zakonodavnom okruženju. Priložena numerička studija je ilustrovala potencijale i primenljivost formulisanog modela, poslužila za analizu uticaja japanskog Zakona o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa (japanski ELV zakon), i dala uvid u finansijske i ekološke performanse japanskog sistema za reciklažu vozila. Sprovedene analize osetljivosti cene metala, iznosa ASR depozita, troškova transporta, troškova sortiranja, cene olupina vozila, cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na deponiju su demonstrirale i verifikovale predloženi model i njegove potencijale. Cena sortiranih otpadnih metala predstavlja najznačajniji reciklažni parametar. Uvođenje strožije ASR reciklažne kvote će povećati uticaj samo cene naprednog termalnog tretmana, dok će uticaj ostalih reciklažnih parametara biti umanjen. Promena dizajna vozila, posmatrana sa aspekta supstituisanja crnih metala sa

aluminijumom, neće ugroziti japanski sistem za reciklažu vozila. Savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila predstavljaju i ekonomski i ekološki daleko bolje rešenje za reciklažu ostataka drobljenja automobila od tradicionalno opremljenih fabrika za reciklažu vozila. Japanski ELV zakon ne utiče ni na količinu ASR-a koja se generiše operacijom drobljenja olupina, ni na količinu ASR-a koju sakupljaju proizvođači automobila. On ima ključan uticaj na donošenje odluke o reciklazi ASR-a, jer će povećanje reciklažne kvote za 20% uticati da se količina ASR-a koja se odlaže na deponije smanji za oko 50%. Strožija ASR reciklažna kvota je lako dostižna i njeno uvođenje neće značajnije uticati na promenu nivoa profitabilnosti savremeno opremljenih fabrika za reciklažu vozila. Istaknuti su pravci daljeg razvoja ovog modela. Trenutno loše stanje u Republici Srbiji po pitanju reciklaže vozila i jasno izražena tendencija da se kreira ekonomski održiv reciklažni sistem predstavljaju glavne motive za projektovanje i modeliranje sistema koji bi na duže staze bio najisplativiji sa aspekta ostvarenog profita i najefikasniji sa aspekta ekološke efikasnosti. Pristupom intervalnog linearnog programiranja formulisan je i testiran model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti. On je primenjen na studiju slučaja u kojoj je analiziran vremenski period 2013-2016. godina, ispitana 3 regulatorna slučaja i 3 trenda cena otpadnih metala, ali i istovremeno analizirana dostupnost finalnih odredišta izolovanih otpadnih tokova. Ilustrovani su potencijali i primenjivost razvijenog modela. Prezentovani su podaci o profitabilnosti i efikasnosti projektovane savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila. Ispitan je uticaj Pravilnika o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (u daljem tekstu Pravilnik) na procese naručivanja olupina vozila, sortiranja generisanih frakcija materijala, alokacije sortiranih metala i izolovanog otpada. Analizirana je Strategija upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period 2010-2019. godine. Formulirani model može da kreira optimalne planove naručivanja, sortiranja, alokacije metala i otpada. Ako posle 1. januara 2015. godine ne bude postojala mogućnost spaljivanja izolovanih otpadnih materijala u Republici Srbiji, tada će fabrika za reciklažu vozila sasvim sigurno morati da obustavi svoj rad zbog nemogućnosti da se dostigne kvotu obnavljanja od 85%. Prema tome, izgradnja i puštanje u rad spaljivaonice(a) do kraja 2014. godine predstavlja ključni izazov za republičke vlasti. Dostupnost postrojenja za napredni termalni tretman predstavlja

potreban uslov za dostizanje kvota obnavljanja i reciklaže od 95% i 85%, respektivno, planiranih u okviru druge faze primene Pravilnika. Zbog toga je neophodna revizija Strategije upravljanja otpadom u Republici Srbiji za period 2010-2019. godine, jer ona nije predvidela izgradnju postrojenja ovog tipa. Uočeno je da trend promene berzanskih cena otpadnih metala ima presudan uticaj na iznos ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila. Analiza alokacije izolovanih otpadnih materijala je ukazala na veoma ograničen, čak i nepovoljan uticaj prve faze primene Pravilnika na projektovani sistem za reciklažu vozila u Republici Srbiji. Identifikovano je da ograničavanje obnavljanja energije na 5% može utrostručiti količinu otpadnih materijala koji se odlažu na deponije. Druga faza primene Pravilnika će rasteretiti deponije od otpadnih materijala generisanih u procesu reciklaže vozila, jer će se odlagati od 2 do 10 puta manja količina u odnosu na slučaj kada nema pravne regulative, i od 6 do 8 puta manja količina u odnosu na prvu fazu primene Pravilnika. Istaknuto je i prodiskutovano nekoliko važnih pravaca daljeg istraživanja oblasti reciklaže vozila.

**Ključne reči:** reciklaža; vozila na kraju životnog ciklusa; fabrika za reciklažu vozila; Republika Srbija; EU; Japan; EU ELV direktiva; linearno programiranje; intervalno linearno programiranje.

**Naučna oblast:** Saobraćaj

**Uža naučna oblast:** “Rukovanje materijalom i eko logistika” i “Operaciona istraživanja u saobraćaju”

**UDK broj:**

**ABSTRACT:**

At the very beginning of doctoral dissertation, applying the content analysis method gives an overview of all the subjects from the end-of-life vehicle (ELV) recycling domain that were estimated as being directly or indirectly related to the subject that the dissertation considers. The literature is organized into two main sub-areas; namely, operational research in the vehicle recycling domain and theoretical aspect of vehicle recycling. In order to identify as clearly as possible the directions of further research and observe possible shortcomings of the already published papers, literature review has been appended with the major classification scheme of vehicle recycling domain, a table of the collected papers classified according to the place where they were published, and distribution list of papers on vehicle recycling in international journals in the period 1997-2013.

The dissertation firstly formulates and tests the short-term processing planning model for vehicle recycling factories in the EU legislative and global business environments. As part of the supplementary numerical case study, profitability and eco-efficiency of the EU vehicle recycling system were considered, and the discussion about the influence of technological development on the cost structure of vehicle recycling factory has been submitted. Additionally, the following analyses have been made: analysis of the impact of the EU Directive on end-of-life vehicles (EU ELV Directive) on decision making process regarding recycling, analysis of the impact of available financial instruments on profitability and eco-efficiency of vehicle recycling factory, analysis of two approaches for the control of the vehicle recycling system efficiency, and analysis of the impact of the EU ELV Directive and business conditions on the cost structure of vehicle recycling factory. The control of the recycling system efficiency should be done at the system level because it will in no way jeopardise the EU ELV Directive objectives. Considering valid quotas, the best ecological result will be attained at high cost for land-filling of automobile shredder residue (ASR) and low cost for processing in an advanced thermal treatment (ATT) plant. On the other hand, after January 1, 2015, EU member states will have to raise their costs for landfill disposal and do what is in their power to lower ATT costs and municipal solid waste incineration costs if they want to minimise further environmental degradation. The increase in landfill disposal cost will not always reduce the quantity of automobile shredder

residues routed to landfills. Moreover, until January 1, 2015, the above mentioned rise in price will have no effect with high incineration and advanced thermal treatment costs, and after this date, the increase in the landfill disposal cost will be justified only if the advanced thermal treatment cost is low. Analysis of the cost structure of vehicle recycling factory led to conclusion that it is in great extent influenced by legislation and financial business conditions.

The dissertation then formulates and tests the model for material selection in the EU vehicle recycling system in order to find out answers to the following key questions: Can contemporary equipped vehicle shredding factories conduct profitable business? Are prescribed eco-efficiency quotas actually attainable? How will the commenced change in vehicle design influence vehicle shredding factories? The proposed model tackles tactical recycling planning and material selection problems in the European vehicle recycling system. The formulated model provides optimal procurement, storage, processing, transportation, advanced thermal treatment, incineration and landfill disposal decisions. A special case of how the change in vehicle design impacts the business of vehicle recycling factories was observed, i.e. the impact of reducing vehicle weight with substituting ferrous metals with aluminium. Based on the proposed model test results analysis and obtained answers, it is concluded that vehicle recycling factory transformation is not only necessary but entirely justified and that the final success of the EU ELV Directive is realistic. The stability of the obtained results has been confirmed by the analysis of their sensitivity to changes in aluminium and copper prices. Sensitivity analysis of the quantities of procured vehicle hulks to the amounts of the resulting profit from the vehicle recycling factory pointed out the significant, almost linear interdependence.

The dissertation presents the short-term automobile shredder residue recycling planning model in the Japanese legislative environment. The submitted numerical case study illustrates the potentials and applicability of the formulated model. It was used for the analysis of the impact of the Japanese Law on recycling of end-of-life vehicles (Japanese ELV Law), and gave insights into financial and ecological performances of the Japanese vehicle recycling system. The implemented sensitivity analyses of metal prices, ASR deposit value, transportation costs, processing costs, vehicle hulk cost, advanced thermal treatment cost and landfill disposal cost demonstrated and validated

the proposed model and its potentials. Metal prices present the most significant recycling parameter. Introducing stringent ASR quota increases only the influence of the ATT cost parameter, whereas the influence of other recycling parameters will be reduced. The change in vehicle design, which was observed from the aspect of substituting ferrous metals with aluminium, will not jeopardize Japanese vehicle recycling system. Contemporary equipped vehicle shredding factories represent economically and ecologically far better solution for the recycling of automobile shredder residue than traditionally equipped vehicle shredding factories. Japanese ELV Recycling Law influences neither quantity of ASR generated in hulk shredding operation nor quantity of ASR collected by automaker. It has the crucial influence on making decisions about ASR recycling, since the 20% increase in ASR recycling quota will cause approximately 50% decrease in the quantity of disposed ASR. The stringent ASR quota is easily attainable and introducing it will not substantially influence the change in the profitability level of contemporary equipped vehicle shredding factories. The directions of the further development of this model have been pointed out.

Current, not so bright, situation in the Republic of Serbia regarding the recycling of ELVs and a noticeable tendency towards creation of economically sustainable recycling system represent major motives for projection and modelling of vehicle recycling system that would be the most cost-effective and eco-efficient in the long run. Interval linear programming approach is used to formulate and test the model for long-term planning of vehicle recycling in the Republic of Serbia under uncertainty. The model is applied to a numerical case study; a four-year-planning horizon (2013-2016) is considered, three legislative cases and three scrap metal price trends are analyzed, availability of final destinations for sorted waste flows is explored. Potential and applicability of developed model are illustrated. Detailed insights on profitability and eco-efficiency of the projected contemporary equipped vehicle recycling factory are presented. The influences of the Ordinance on the management of ELVs in the Republic of Serbia (Serbian ELV Ordinance) on the vehicle hulks procuring, sorting generated material fractions, sorted waste allocation and sorted metals allocation decisions are examined. The Serbian Waste management strategy for period 2010-2019 is analysed. The formulated model can create optimal plans for procuring vehicle hulks, sorting generated material fractions, allocating sorted waste flows and allocating sorted metals.

If after January 1, 2015, there is no possibility of incineration of sorted waste material in the Republic of Serbia, the vehicle recycling factory will most definitely have to cease their operations due to inability to reach the 85% recovery quota. Therefore, constructing and activating municipal solid waste incinerator(s) till the end of 2014 presents the key challenge for the republic authorities. Availability of plant for advanced thermal treatment is the necessary condition for recovery and recycling quotas of 95% and 85% respectively, which were planned in the second phase of the Serbian ELV Ordinance implementation. That is why the revision of the Waste management strategy for period 2010-2019 is recommended as it didn't predict the construction of plant of this type. It is identified that the trend in scrap metal prices change has crucial effect on the amount of profit made by vehicle recycling factory. Analysis of the allocation of isolated waste materials pointed to a very limited, even adverse effect of the first implementation phase of the Serbian ELV Ordinance on the projected vehicle recycling factory. It has been identified that restricting energy recovery to 5% can triple the quantity of land-filled waste materials. The second implementation phase of the Serbian ELV Ordinance will relieve landfills of waste materials generated in vehicle recycling process, since 2-10 times smaller quantity will be disposed compared to the case when there is no legislation, and 6-8 times smaller quantity compared to the first implementation phase of the Serbian ELV Ordinance. Several important recommendations for the future research of the vehicle recycling research area are highlighted and discussed.

**Keywords:** recycling; end-of-life vehicles; vehicle recycling plant; Republic of Serbia; EU; Japan; EU ELV Directive; linear programming; interval linear programming.

**Scientific field:** Traffic

**Specialized scientific field:** "Material handling and eco logistics" and "Operations Research in Traffic"

**UDK number:**



## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Pregled literature.....	8
2.1. Operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila.....	10
2.1.1. Modeliranje procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa.....	10
2.1.1.1. Deterministički modeli.....	10
2.1.1.2. Stohastički modeli.....	16
2.1.2. Analiza životnog ciklusa vozila.....	20
2.1.3. Modeliranje ostalih problema iz oblasti reciklaže vozila.....	23
2.2. Teorijski aspekt reciklaže vozila.....	24
2.2.1. Reciklažne prakse širom sveta.....	25
2.2.2. Zakonodavno orijentisano istraživanje.....	26
2.2.2.1. Direktiva Evropske Unije o vozilima na kraju životnog ciklusa...27	
2.2.2.2. Japansko i kinesko zakonodavstvo.....	28
2.2.2.3. Komparativna analiza zakonodavnih rešenja u oblasti reciklaže vozila.....	30
2.2.2.4. Proširena odgovornost proizvođača vozila.....	30
2.2.3. Reciklaža materijala i dorada.....	31
2.3. Glavna klasifikacija oblasti reciklaže vozila i raspodele objavljenih radova.....	32
3. Modeliranje i upravljanje sistemima za reciklažu vozila Evropske Unije.....	37
3.1. Model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju.....	38
3.1.1. Notacija modela.....	41
3.1.2. Formulacija modela.....	43
3.1.3. Numerička studija.....	46
3.1.3.1. Sakupljanje podataka.....	46
3.1.3.1.1. Efikasnost entiteta sortiranja.....	47

3.1.3.1.2. Kapacitet i cena entiteta sortiranja.....	48
3.1.3.1.3. Cena odlaganja na deponiju.....	49
3.1.3.1.4. Troškovi naručivanja i cene sortiranih metala.....	51
3.1.3.1.5. Parametri postrojenja za napredni termalni tretman.....	52
3.1.3.1.6. Parametri spaljivaonica gradskog otpada.....	53
3.1.3.1.7. Cena transporta.....	54
3.1.3.2. Opis scenarija.....	55
3.1.3.2. Rezultati i diskusija.....	57
3.2. Model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila.....	65
3.2.1. Notacija modela.....	68
3.2.2. Formulacija modela.....	71
3.2.3. Numerička studija.....	73
3.2.3.1. Sakupljanje podataka.....	74
3.2.3.2. Rezultati i diskusija.....	79
3.2.3.2.1. Analize osetljivosti.....	85
4. Modeliranje i upravljanje japanskim sistemom za reciklažu vozila.....	90
4.1. Model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju.....	91
4.1.1. Notacija modela.....	96
4.1.2. Formulacija modela.....	100
4.2. Numerička studija .....	102
4.2.1. Sakupljanje podataka.....	103
4.2.2. Rezultati i diskusija.....	109
4.2.2.1. Analize osetljivosti.....	113
5. Modeliranje i upravljanje sistemom za reciklažu vozila u Republici Srbiji.....	119
5.1. Metodologija.....	123
5.1.1. Intervalno linearno programiranje.....	123

5.1.1.1. Osnove intervalnog linearnog programiranja – definicije i aritmetika.....	124
5.1.1.1.1. Definicije.....	124
5.1.1.1.2. Intervalna aritmetika.....	126
5.1.1.2. Algoritmi za rešavanje problema intervalnog linearnog programiranja.....	127
5.1.1.2.1. GLP algoritam.....	128
5.1.1.2.2. BWC algoritam.....	129
5.1.2. Model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti.....	131
5.1.2.1. Notacija modela.....	131
5.1.2.2. Formulacija modela.....	134
5.1.2.3. Numerička studija.....	137
5.1.2.3.1. Sakupljanje podataka.....	140
5.1.2.3.2. Rezultati i diskusija.....	147
6. Zaključak.....	155
7. Literatura.....	162
Prilog 1.....	189
Prilog 2.....	191
Prilog 3.....	192
Biografija autora.....	198

## 1. UVOD

Upravljanje posebnim tokovima otpada (vozila na kraju životnog ciklusa, otpad od električnih i elektronskih proizvoda, otpadne gume, istrošene baterije i akumulatori, otpadno ulje i dr.) je trenutno jedna od najvažnijih ekoloških tema u svetu. Vozila na kraju životnog ciklusa (ELV<sup>1</sup>) su ona vozila koja više nisu bezbedna za dalju upotrebu i kao takva se ne mogu registrovati (Olugu i Wong, 2012). Posmatrano sa aspekta obima, ona predstavljaju otpadni tok najvišeg prioriteta. Pitanje njihove reciklaže privlači ogromnu pažnju svetske javnosti, ne samo zbog velikog porasta njegovog obima, već i zbog potencijalnog prisustva opasnih materija u ovom otpadnom toku. Vozila na kraju životnog ciklusa se smatraju izuzetno važnom ekološkom temom (Li i Yu, 2011), jer sa jedne strane, njihova efikasna reciklaža može značajno smanjiti dalju degradaciju životne sredine, dok sa druge strane, ova vrsta otpada sadrži mnoge vredne metale (Jekel i Tam, 2007).

Značajan deo automobilske industrije se početkom ovog milenijuma našao pred ozbiljnim izazovima usled stupanja na snagu prvo Direktive Evropske Unije o vozilima na kraju životnog ciklusa (EU ELV direktiva) (EU, 2000), a zatim i japanskog Zakona o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa (japanski ELV zakon) (MoE, 2002). Štaviše, automobilska industrija se nalazi na istorijskoj prekretnici, jer opstanak velikog broja proizvođača vozila zavisi od njihove spremnosti da u potpunosti ispune proklamovane ekološke zahteve, pre svega u pogledu reciklaže vozila.

Evropska Unija i Japan poseduju najmodernije reciklažne sisteme i najsavremeniju zakonsku regulativu iz oblasti reciklaže ELV-a. EU ELV direktiva je postavila nekoliko progresivnih ciljeva, pre svega u pogledu sakupljanja, ponovnog korišćenja i reciklaže delova, komponenti i materijala vozila, koje je svaka zemlja članica EU u obavezi da dosegne (EU, 2000). Ona je potpuno izmenila poslovnu filozofiju evropskog sistema za reciklažu vozila, koji je bio isključivo profitno orijentisan i kao takav korišćen decenijama unazad. Pored Evropske Unije, problem reciklaže vozila je privukao izuzetnu pažnju i u Japanu. Osnovni ciljevi japanskog ELV zakona su stvaranje efikasnijeg sistema za reciklažu vozila, smanjivanje količine otpada koji generišu vozila tokom svog životnog ciklusa i unapređenje stope reciklaže vozila

---

<sup>1</sup> ELV - *engl.* end-of-life vehicle

(Zhao i Chen, 2011). Problem reciklaže vozila je u poslednjih nekoliko godina postao veoma aktuelan i u Republici Srbiji. Vlada je donošenjem Nacionalne strategije upravljanja otpadom sa programom približavanja Evropskoj Uniji (MERS, 2013), Zakona o upravljanju otpadom (Republika Srbija, 2010a), Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b) i Pravilnika o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa, svrstala Republiku Srbiju u krug zemalja koje su odgovorno i planski pristupile dugoročnom rešavanju problema reciklaže vozila.

U Evropskoj Uniji je samo tokom 2010. godine bilo generisano 8.51 miliona tona ELV-a, od čega je 7.38 miliona tona i 7.11 miliona tona bilo obnovljeno i reciklirano, respektivno (EDCW, 2013). U nameri da značajnije smanji količinu otpada koju stvaraju vozila na kraju životnog ciklusa, Evropski parlament i Veće su 18. septembra 2000. godine usvojili EU ELV direktivu (2000/53/EC) (EU, 2000). Ova direktiva definiše vozilo na kraju životnog ciklusa kao bilo koje vozilo iz kategorije M<sub>1</sub> (tj. vozilo namenjeno prevozu putnika koje, ako se izuzme sedište za vozača, nema više od 8 sedišta) ili N<sub>1</sub> (tj. vozilo koje je namenjeno transportu robe i čija maksimalna masa nije veća od 3.5 t), ili vozilo na tri točka (EU, 2000). U skladu sa EU ELV direktivom 1. januara 2006. godine na snagu su stupile ekološke kvote koje i danas važe, tj. stopa obnavljanja<sup>2</sup> vozila ne može biti manja od 85% (uz stopu obnavljanja energije<sup>3</sup> ne veću od 5%), dok stopa ponovnog korišćenja<sup>4</sup> i reciklaže<sup>5</sup> ne može biti manja od 80%. Pored toga, 1. januara 2015. godine biće uvedene još rigoroznije ekološke kvote, tj. stopa

---

<sup>2</sup> Obnavljanje otpada mora biti realizovano bez ugrožavanja ljudskog zdravlja i bez upotrebe procesa ili metoda koje mogu naneti štetu životnoj sredini. U operacije obnavljanja se ubrajaju: 1. primena kao goriva za generisanje toplotne energije, 2. regeneracija rastvarača, 3. reciklaža organskih supstanci koje nisu bile korišćene kao rastvarači, 4. reciklaža metala, 5. reciklaža ostalih neorganskih materijala, 6. regeneracija kiselina ili baza, 7. obnavljanje komponenti korišćenih za smanjivanje zagađivanja, 8. obnavljanje komponenti iz katalizatora, 9. rafiniranje ulja, 10. tretman tla u cilju poboljšanja njegovih ekoloških karakteristika, 11. upotreba otpada koji nastaje iz tačaka 1-10 (EU, 1975)

<sup>3</sup> Obnavljanje energije se definiše kao: "samostalno ili u mešavini direktno spaljivanje gorivog otpada u cilju generisanja toplotne energije" (EU, 2000)

<sup>4</sup> Ponovno korišćenje se definiše kao: "bilo koja operacija koja omogućava da se komponente vozila na kraju životnog ciklusa koriste u istu svrhu" (EU, 2000)

<sup>5</sup> Reciklaža se definiše kao: "prerada otpadnih materijala u nekom proizvodnom procesu u cilju njihove ponovne upotrebe u istu ili neku drugu svrhu" (EU, 2000)

obnavljanja vozila ne može biti manja od 95% (uz stopu obnavljanja energije ne veću od 10%), dok stopa ponovnog korišćenja i reciklaže ne može biti manja od 85% (EU, 2000). Prikazane kvote ekološke efikasnosti predstavljaju najvažnije instrumente EU ELV direktive, pa je analiza njihovog trenutnog i budućeg uticaja na EU sistem za reciklažu vozila od izuzetnog značaja.

Vozila na kraju životnog ciklusa čine jedan od najznačajnijih otpadnih tokova u Japanu, jer ih je samo u fiskalnoj<sup>6</sup> 2008. godini bilo reciklirano 3.58 miliona (MoE, 2010). U ovoj državi je prema poslednjim podacima registrovano oko 58.3 miliona vozila (JAMA, 2011), čiji procenjeni radni vek iznosi samo 11 godina (Kumar i Yamaoka, 2007). Pored toga, ako se ima u vidu i manjak kapaciteta industrijskih deponija, koji potvrđuje 176.39 miliona m<sup>3</sup> preostalog prostora (MoE, 2011), potpuno je jasno zašto je u Japanu reciklaža vozila postala tema kojoj se pridaje ogroman značaj (Kumar i Sutherland, 2009).

Japansko Ministarstvo za međunarodnu trgovinu i industriju (sadašnje Ministarstvo za ekonomiju, trgovinu i industriju) je u pokušaju da smanji količinu otpada koji generišu vozila u maju 1997. godine objavilo Inicijativu za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa (Togawa, 2008). Inicijativa je propisala (samo na volonterskoj bazi) specifične numeričke ciljeve, kao što su (METI, 2010): unapređenje stope reciklaže vozila na minimum 95% težine prosečnog vozila do 2025. godine, i smanjivanje količine ostataka drobljenja automobila (ASR<sup>7</sup>) koji se odlažu na deponije na 1/5 od vrednosti zabeležene 1996. godine. Na bazi ove inicijative i EU ELV direktive, Vlada Japana je u julu 2002. godine usvojila Zakon o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa (MoE, 2002). On je stupio na snagu u januaru 2005. godine i propisao odgovornosti proizvođača vozila i profesionalnih uvoznika (ubuduće kolektivno nazivanih proizvođači) za sakupljanje i reciklažu ASR-a, vazdušnih jastula i hlorofluorouglenika/fluorouglijovodonika (CFC/HFC) generisanih u toku procesa reciklaže vozila. Japanski ELV zakon pokriva sva putnička i komercijalna vozila na četiri točka, uključujući sve tipove vozila od mini automobila do velikih kamiona i autobusa (MoE, 2002). Zbog toga se može zaključiti da japanski ELV zakon ima znatno

---

<sup>6</sup> U Japanu fiskalna godina traje od 1. aprila do 31. marta naredne godine

<sup>7</sup> ASR - *engl.* automobile shredder residue

širi delokrug od EU ELV direktive, koja pokriva “samo” vozila klase M<sub>1</sub> ili N<sub>1</sub>, i vozila na tri točka. Najvažniji segment japanskog ELV zakona predstavlja novouvedena kvota na reciklažu ASR-a. Počev od fiskalne 2010. godine na snagu je stupila jedinstvena ekološka kvota, tj. stopa reciklaže ASR-a ne može biti manja od 50%. Pored toga, počev od fiskalne 2015. godine biće uvedena strožija ekološka kvota, tj. stopa reciklaže ASR-a ne može biti manja od 70% (Sakai i ostali, 2007). Reciklaža ASR-a ima ključnu važnost za dostizanje ciljeva japanskog ELV zakona. Ona predstavlja veliki izazov za japansku industriju za reciklažu vozila, pa je analiza trenutnog i budućeg uticaja ASR kvote na japanski reciklažni sistem od posebne važnosti.

U Republici Srbiji trenutno ne postoji sistem za reciklažu vozila već se ovaj proces realizuje samo u nekoliko skromnih postrojenja za reciklažu metalnog otpada (Republika Srbija, 2010b), koja ni u kom slučaju nisu dovoljno opremljena da uspešno odgovore na ovaj izuzetno kompleksan zadatak. Sa druge strane, problemu reciklaže vozila se pridaje sve više pažnje, posebno od 2008. godine kada je usvojen novi Zakon o upravljanju otpadom (Republika Srbija, 2010a). Međutim, iako je član 55 ovog zakona posvećen upravljanju vozilima na kraju životnog ciklusa, naša zakonska regulativa se ne može smatrati savremenom. Zbog toga je u Strategiji upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b), donetoj u maju 2010. godine, posebna pažnja poklonjena problemu reciklaže vozila. Ovom strategijom je jasno naglašena potreba da se što skorije uspostavi ekonomski održiv sistem za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa. Pravilnik o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (MERS, 2010) je stupio na snagu 24.12.2010. godine i u prilogu 3, a po ugledu na EU ELV direktivu, propisao ekološke zahteve u vezi sa ponovnom upotrebom, tretmanom i reciklažom ELV-a. Detaljnije, od 1. januara 2015. godine stopa reciklaže i stopa obnavljanja ne smeju biti manje od 80% i 85%, respektivno, dok stopa obnavljanja energije ne može biti veća od 5%. Pored toga, za 1. januar 2019. godine planirano je uvođenje još oštrijih kvota: minimalne stope reciklaže i obnavljanja od 85% i 95%, respektivno, maksimalna stopa obnavljanja energije od 10%. Konačno, Vlada Republike Srbije je planirala da do 2019. godine investira 31 milion EUR u razvoj sistema za reciklažu vozila i na taj način pokuša da ispuni prethodno navedene kvote ekološke efikasnosti (MERS, 2010). Imajući ovo u

vidu, kao i to da Republika Srbija ima status kandidata za članstvo u Evropskoj Uniji, od velike je važnosti što skorije uspostaviti ekonomski i ekološki održiv sistem za reciklažu ELV-a uz poštovanje dobre prakse i implementaciju tehnoloških rešenja reciklažnih sistema EU i Japana kao najrazvijenijih.

Disertacija je organizovana na sledeći način: Pregled referentne literature metodom analize sadržaja je dat u drugom poglavlju. U poglavlju 3 su date formulacije i studije slučaja *modela kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju*, i *modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila*. U poglavlju 4 je data formulacija *modela kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju* i priložena studija slučaja. U poglavlju 5 je prezentovan *model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u uslovima neizvesnosti* prilagođen situaciji nepostojanja funkcionalnog reciklažnog sistema i data studija slučaja Republike Srbije. U poslednjem, šestom poglavlju su data zaključna razmatranja, preporuke i pravci daljeg istraživanja.

Detaljnije, u poglavlju 2 je predstavljen pregled svih onih inženjerskih tema iz oblasti reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa za koje je procenjeno da su u direktnoj ili indirektnoj vezi sa predmetom ove disertacije. Prikupljena literatura je organizovana u dve osnovne podoblasti: operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila i teorijski aspekt reciklaže vozila. Podoblast operacionih istraživanja je podeljena na 3 kategorije: modeliranje procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa, analiza životnog ciklusa vozila i modeliranje ostalih problema iz oblasti reciklaže vozila. Sa druge strane, reciklažne prakse širom sveta, zakonodavno orijentisano istraživanje, reciklaža materijala i dorada, su kategorije u okviru kojih referentni radovi sa teorijskog aspekta analiziraju problem reciklaže vozila. Kako bi se što jasnije identifikovale teme koje su privukle najveću pažnju i prostor za dalji istraživački rad, pregled literature je upotpunjen tabelom glavne klasifikacije oblasti reciklaže vozila, tabelom raspodele prikupljenih radova prema mestu objavljivanja (časopisi, međunarodne konferencije, poglavlja u knjigama, studije, izveštaji i teze) i tabelom raspodele radova na temu reciklaže vozila po međunarodnim časopisima u periodu 1997-2013. godina.



Poglavlje 3 je posvećeno modeliranju i upravljanju sistemom za reciklažu vozila u Evropskoj Uniji. Formulirana su 2 optimizaciona modela linearnog programiranja: *model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju*, i *model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila*. Za oba razvijena modela je priložena numerička studija slučaja, pre svega kako bi se mogli ilustrovati potencijali i primenjivosti predloženih modela. U okviru studije slučaja modela kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost EU sistema za reciklažu vozila, i priložena diskusija o uticaju tehnološkog razvoja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila. Pored toga, izvršene su sledeće analize: analiza uticaja EU ELV direktive na proces donošenja reciklažnih odluka, analiza uticaja raspoloživih finansijskih instrumenata na profitabilnost i ekološku efikasnost fabrike za reciklažu vozila, analiza dva pristupa za upravljanje ekološkom efikasnošću reciklažnog sistema, i analiza uticaja EU ELV direktive i uslova poslovanja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila. U okviru studije slučaja modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost reciklažnog sistema, i priložena je diskusija o uticaju promene dizajna vozila (posmatranog sa aspekta supstituisanja crnih metala aluminijumom) na restrukturiranje fabrika za reciklažu vozila. Pored toga, izvršene su sledeće analize: analiza uticaja EU ELV direktive na proces donošenja reciklažnih odluka, analiza uticaja EU ELV direktive na plan proizvodnje fabrike za reciklažu vozila, analiza uticaja promene dizajna vozila na proces donošenja reciklažnih odluka, analiza osetljivosti predloženog matematičkog modela na promenu udela pojedinih tipova vozila u pripadajućim klasama. Konačno, stabilnost ovog modela je ispitana sprovođenjem analiza osetljivosti na promenu cene bakra, cene aluminijuma i veličinu narudžbine ELV-a.

Poglavlje 4 je posvećeno modeliranju i upravljanju japanskim sistemom za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa. Prvo je formulisan *model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju*, a zatim priložena odgovarajuća studija slučaja. U okviru pomenute studije, razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost japanskog sistema za reciklažu vozila. Pored toga, izvršene su analize uticaja japanskog ELV zakona i promene dizajna vozila na proces donošenja

reciklažnih odluka. Stabilnost razvijenog modela je ispitana sprovođenjem analiza osetljivosti svih 7 reciklažnih parametara, odnosno: cena metala, iznos ASR depozita, troškovi transporta, troškovi sortiranja, cena olupina vozila, cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na industrijsku deponiju.

Poglavlje 5 je posvećeno projektovanju, modeliranju i upravljanju sistemom za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji. Prvo je formulisan *model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u uslovima neizvesnosti* primenom metode intervalnog linearnog programiranja, a zatim priložena studija slučaja Republike Srbije. U okviru studije slučaja, razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost budućeg srpskog sistema za reciklažu vozila, i analiziran uticaj koji bi pravna regulativa mogla imati na njega. Pored toga, izvršene su analize uticaja dostupnosti postrojenja za napredni termalni tretman i spaljivaonice gradskog otpada.

## 2. PREGLED LITERATURE

U ovoj disertaciji, za pregled referentne literature usvojen je metod analize sadržaja. Analiza sadržaja je obzervaciona istraživačka metoda koja se koristi za sistematsku evaluaciju sadržaja svih formi snimljene komunikacije (Pokharel i Mutha, 2009). Ona se pokazala kao veoma efikasan pristup za kategorizaciju naučne literature.

U okviru pregleda literature pretraživane su sledeće baze podataka: ACS Publications, ASCE Library, ASME Digital Library, Cambridge JOURNALS, EBSCOhost, EmeraldInsight, Google Scholar, IEEE Xplore, Inderscience, IntegraConnect, IOPScience, J-STAGE, JSTOR, ProQuest, RSCPublishing, SAGE journals, ScienceDirect, SciVerse, SpringerLink, i WILEY. Pored toga, reference koje su citirane u svakom pronađenom relevantnom radu su dalje istraživane kako bi se eventualno pronašli dodatni izvori informacija koji su u skladu sa predmetom ove disertacije.

Usled sve većeg značaja oblasti reciklaže vozila, nekoliko preglednih radova, koji pokrivaju neki od segmenata ove veoma široke oblasti naučnog istraživanja je već objavljeno.

Jody i Daniels (2006) su dali pregled vrhunskih naučnih radova i studija iz oblasti reciklaže ASR-a, otpadnog toka koji je ujedno i najveća prepreka za ostvarivanje ciljeva EU ELV direktive i japanskog ELV zakona, i detaljno opisali nekoliko postojećih i nadolazećih tehnoloških rešenja za njegovu efikasnu preradu. Oni su izneli zaključak da ekološki i ekonomski efikasno rešenje ASR problema treba tražiti u sistemu koji bi obuhvatio više tehnoloških rešenja.

Nourreddine (2007) je dao veoma upotrebljiv pregled mogućih ruta reciklaže vozila na kraju životnog cilusa i procesa prerade ostataka drobljenja automobila.

Kumar i Sutherland (2008) su dali pregled značajnijih radova iz oblasti reciklaže vozila i identifikovali nekoliko ozbiljnih ograničenja postojećih matematičkih modela: neadekvatno opisivanje složenih materijalnih i novčanih tokova, minimizacija efekata tržišnih faktora i zanemarivanje uticaja koji zakonodavni aspekt može imati na sistem za reciklažu vozila. U skladu sa tim, autori su istakli potrebu za razvojem sveobuhvatnih i detaljnih modela sistema za reciklažu vozila, važnost implementacije realnih tržišnih

uticaja, i potrebu za ispitivanjem merodavnosti i uticaja postojeće zakonske regulative. Izneta je preporuka da centralna tema budućih istraživanja ove oblasti treba da bude analiza dugoročnog uticaja otpada koji generiše industrija za reciklažu vozila.

Bari i ostali (2011) su dali pregled radova na temu automobilske otpada objavljenih tokom 2010. godine. Go i ostali (2011) su prezentovali pregled radova o vozilima na kraju životnog ciklusa analizirajući pristupe za njihovu reciklažu i metode za demontažu. Vermeulen i ostali (2011) su dali kritički pregled dosadašnjih tehnoloških rešenja vezanih za preradu vozila na kraju životnog ciklusa iz sledećih oblasti: demontaža i drobljenje ELV-a, mehanički, termalni i termohemijski tretman ASR-a. Oni su izneli zaključak da intenzivnija reciklaža i obnavljanje vozila na kraju životnog ciklusa u kombinaciji sa ponovnom upotrebom materijala izolovanih iz ASR-a može garantovati siguran uspeh u dostizanju reciklažne kvote EU ELV direktive od 85%. Pored toga, naznačeno je da buduća kvota obnavljanja EU ELV direktive od 95% ipak može biti dosegnuta, ali samo u kombinaciji gore pomenutog i naprednog termalnog tretmana ASR-a. Amza i ostali (2011) su dali kratak pregled osnovnih tehnika za reciklažu vozila. Pored toga, oni su deo rada posvetili poređenju moderno opremljenih i tradicionalnih fabrika za reciklažu vozila.

Zorpas i Inglezakis (2012) su dali kratak osvrt na sam problem prerade ASR-a i pregled pristupa za njegovo rešavanje, tj. za minimizaciju količine ASR-a koja se odlaze na deponije. Pregled radova na temu automobilske otpada objavljenih tokom 2011. godine dali su Kindzierski i ostali (2012). Mayyas i ostali (2012) su istraživali brojne aspekte održivosti automobilske industrije kroz pregled brojnih studija posvećenih određenim fazama životnog ciklusa vozila. Autori su posebnu pažnju poklonili fazi kraja životnog ciklusa vozila opisujući razne metrike održivosti i modele korišćene za kvantifikaciju negativnog uticaja vozila na životnu sredinu.

Kao što se može videti iz analize sadržaja prethodno objavljenih preglednih radova, tematski okvir svakog od njih je jasno ograničen samo na određeni segment problema reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa.

U ovom poglavlju biće predstavljen pregled svih onih inženjerskih tema iz oblasti reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa za koje je procenjeno da su u neraskidivoj vezi sa predmetom ove disertacije. Prikupljena literatura je organizovana u

dve osnovne podoblasti: (1) *Operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila* i (2) *Teorijski aspekt reciklaže vozila*. U obe osnovne podoblasti radovi su klasifikovani prvo u pripadajuće kategorije, a zatim i podkategorije gde je to bilo potrebno (slika 1).

## **2.1. Operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila**

U ovom delu pregleda literature, analiziran je sadržaj onih referentnih radova u kojima su autori koristili razne metode operacionih istraživanja kako bi modelirali neki od aspekata veoma kompleksnih sistema za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa. U tom smislu, kreirane su sledeće kategorije: (1) *Modeliranje procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa*; (2) *Analiza životnog ciklusa vozila*; i (3) *Modeliranje ostalih problema iz oblasti reciklaže vozila*.

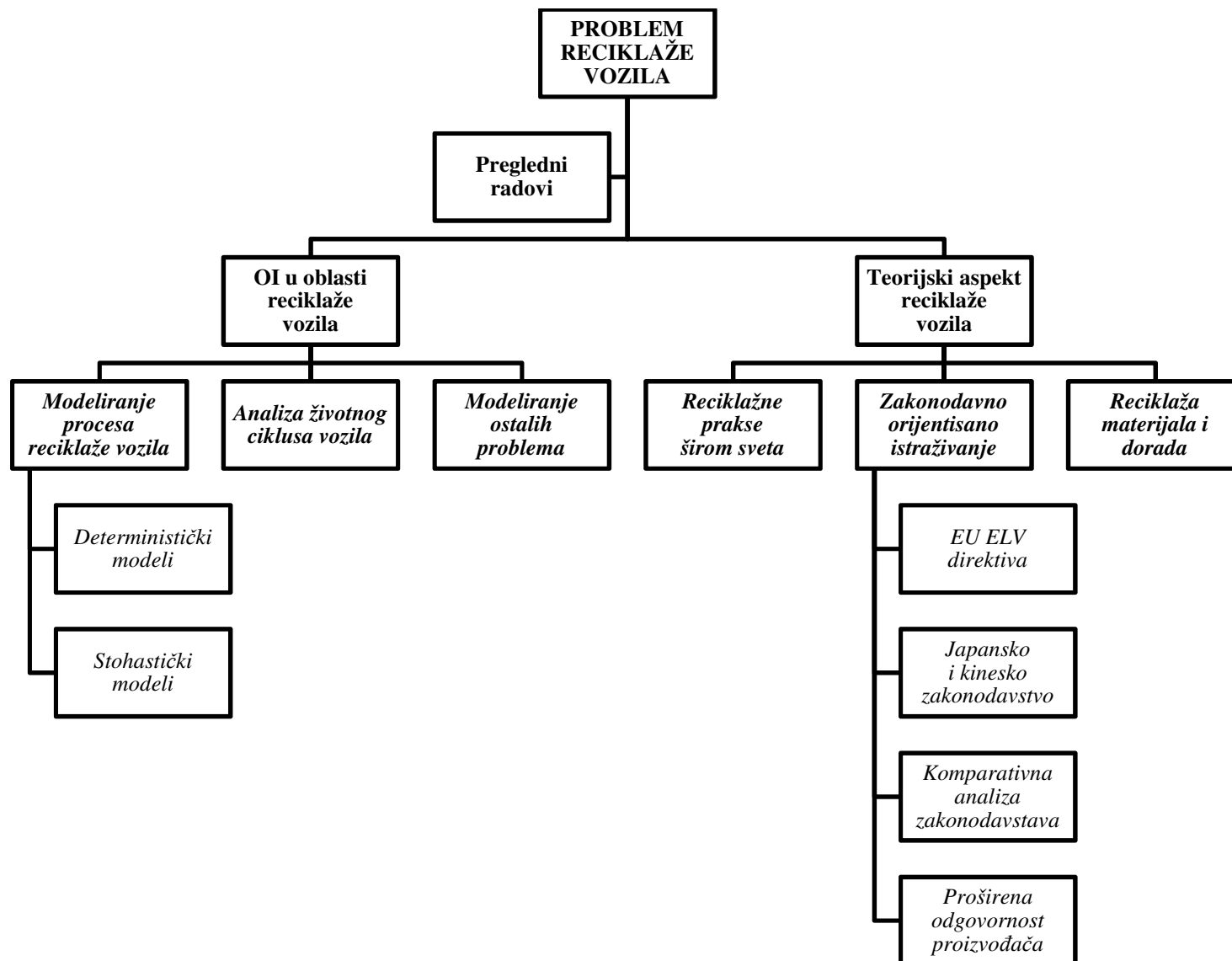
### **2.1.1. Modeliranje procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa**

Ova kategorija referentnih radova je od posebne važnosti, jer su pripadajući radovi u direktnoj vezi sa izabranom temom ove disertacije. Zbog toga je njihovom pregledu poklonjena posebna pažnja, naznačeni su uočeni nedostaci i istaknut prostor daljeg istraživanja.

Generalno gledano, postojeći procesno orijentisani modeli reciklaže vozila se mogu klasifikovati u dve podkategorije: (1) *Deterministički modeli*; (2) *Stohastički modeli*.

#### **2.1.1.1. Deterministički modeli**

U literaturi se može pronaći značajan broj raznovrsnih determinističkih matematičkih modela. Njihova analiza omogućava identifikovanje dosadašnjih trendova razvoja i pravaca daljeg istraživanja ovog izuzetno dinamičnog segmenta oblasti reciklaže vozila.



Slika 1. Klasifikacija oblasti reciklaže vozila.

Isaacs i Gupta (1997) su prvi modelirali sistem za reciklažu vozila primenom metode Ciljnog programiranja. Oni su predložili alat za analizu vrednosti više strategija odlaganja ELV-a na deponije uzimajući u obzir dva kriterijuma: profitni i ekološki. Kroz numerički primer su analizirane karakteristike pogona za demontažu i fabrike za reciklažu vozila u slučaju sledećih scenarija reciklaže plastično intenzivnih vozila: povećanje udela plastike u materijalnom sastavu vozila, obavezna demontaža plastike (minimum 25%), i povećanje cene odlaganja plastike na deponije. Gupta i Isaacs (1997) su rešavali problem planiranja reciklaže vozila metodom Ciljnog programiranja. Ovi autori su analizirali profitni i ekološki kriterijum reciklaže ELV-a, i predložili individualne modele pogona za demontažu i tradicionalno opremljene fabrike za reciklažu vozila za slučajeve prerade čelično intenzivnih i plastično intenzivnih vozila. Zaključeno je da povećanje udela plastike u materijalnom sastavu vozila neće dovesti u pitanje opstanak industrije za reciklažu vozila, ali da će pogoršati rezultate njenog poslovanja.

Infrastruktura za reciklažu vozila predstavlja nezavistan poslovni sistem koji se bavi sakupljanjem, preradom i upravljanjem vozilima na kraju životnog ciklusa na jedan ekološki odgovoran način. Ona treba da omogući ponovnu upotrebu automobilskih delova, komponenti i materijala vršenjem pre svega funkcija sortiranja, i alokacije metala i otpadnih materijala. Boon i ostali (2001) su koristili Ciljno programiranje kako bi modelirali infrastrukturu za reciklažu vozila i ispitali profitabilnost i obim materijalnih tokova u slučaju sledećih scenarija reciklaže aluminijumsko intenzivnih vozila: porast cene obojenih metala, detaljnija demontaža, porast cene sortiranja i promena dizajna vozila (tj. povećanje udela aluminijuma u materijalnom sastavu vozila). Autori su zaključili da je postojeća reciklažna infrastruktura, generalno govoreći, sposobna da profitabilno prerađuje ovu kategoriju ELV-a.

Johnson and Wang (2002) su kreirali dva tipa optimizacionih modela: američki, koji je isključivo profitno orijentisan i EU model, gde se optimizacija vrši u odnosu na prethodno definisanu stopu obnavljanja vozila. U slučaju američkog modela, stope obnavljanja su iznosile 89.4% i 75.1% pri reciklaži prevremenog vozila na kraju životnog ciklusa (vozilo koje se nalazi na kraju životnog ciklusa zbog težih oštećenja prouzrokovanih saobraćajnim udesom) i pravog vozila na kraju životnog ciklusa (vozilo najčešće staro oko 11 godina (Kumar i Yamaoka, 2007)), respektivno. U slučaju EU

modela bez mogućnosti obnavljanja energije (tj. nisu dostupne spaljivaonice i postrojenja za napredni termalni tretman) 85% obnavljanja vozila je bilo moguće ostvariti samo ukoliko se recikliraju pneumatici i vrši dorada vrednijih delova. U slučaju EU modela sa mogućnošću obnavljanja energije, ostvarene stope obnavljanja su iznosile 96.1% i 85% pri reciklaži prevremenog i pravog vozila na kraju životnog ciklusa, respektivno. Autori su zaključili da tradicionalna fabrika za reciklažu vozila ne može dostići stopu obnavljanja od 95% težine prosečnog vozila na kraju životnog ciklusa. Međutim, ozbiljan nedostatak EU modela predstavlja izostavljanje ostalih kvota propisanih EU ELV direktivom. Detaljnije, u EU modelu u obzir nisu uzete reciklažna kvota (tj.  $\geq 80\%$  i  $\geq 85\%$  od 2006. i 2015. godine, respektivno) i kvota koja se odnosi na dozvoljeno obnavljanje energije (tj.  $\leq 5\%$  i  $\leq 10\%$  od 2006. i 2015. godine, respektivno).

Boon i ostali (2003) su metodom Ciljnog programiranja formulisali infrastrukturu za reciklažu vozila. Prethodna formulacija koju su dali Isaacs i Gupta (1997) je proširena, kako bi se mogao uspešno proceniti obim materijalnih tokova i iznos profitabilnosti u slučaju reciklaže mikrovozila (vozila specijalne namene opremljena motorom sa unutrašnjim sagorevanjem) i tzv. "čistih" vozila (električnih vozila sa 2 sedišta i hibridno električnih vozila sa 2 ili 4 sedišta). Istaknuta je mogućnost profitabilnog poslovanja, ali i upozoreno na značajno manji nivo ostvarenog profita nego u slučaju reciklaže tradicionalnih, čelično intenzivnih vozila. Pored toga, autori su kao moguće prepreke identifikovali nerazvijenost tržišta polovnih delova i izuzetno skup proces reciklaže baterija iz električnih vozila.

Choi i ostali (2005) su predložili model mešovitog celobrojnog programiranja za taktičko planiranje reciklaže u tradicionalnoj američkoj fabrici za reciklažu vozila. Autori su model bazirali na dijagramu toka materijala fabrike za reciklažu vozila u Indijanapolisu, SAD. Dantec (2005) je kreirala jednostavan tehničko-troškovni model pogona za demontažu i reciklažu vozila kako bi ispitala osetljivost cene procesuiranja na regionalne prakse prisutne u SAD-u.

Ferrao i Amaral (2006) su predložili jednostavne analitičko troškovne modele pogona za demontažu i tradicionalne fabrike za reciklažu vozila, kako bi procenili uticaj koji će prva faza (01.01.2006-31.12.2014. godine) primene EU ELV direktive imati na profitabilnost evropskog sistema za reciklažu vozila. Oni su kao najvažnije činioce



profita tradicionalne fabrike za reciklažu vozila identifikovali efikasnost sortiranja crnih metala, njihovu trenutnu berzansku cenu i udeo koji crni metali imaju u materijalnom sastavu vozila. Zaključeno je da poštovanje važećih EU ELV kvota ekološke efikasnosti neće uticati da se značajnije smanji nivo ostvarenog profita tradicionalne evropske fabrike za reciklažu vozila. Ferrao i ostali (2006) su upotrebili podatke prikupljene u okviru eksperimentalnog drobljenja olupina vozila na kraju životnog ciklusa za razvoj tehničkog modela i procenu performansi ekološke efikasnosti nekoliko reciklažnih strategija. Oni su zaključili da mehaničko sortiranje ASR-a može pružiti mogućnost sveobuhvatnije reciklaže i osigurati dostizanje važećih kvota EU ELV direktive. Coates i Rahimifard (2006) su prezentovali strateški troškovni model industrije za reciklažu vozila i analizirali mogućnosti za njegovu primenu prilikom donošenja reciklažnih odluka.

Williams i ostali (2007) su proširili model mešovitog celobrojnog programiranja koji su predložili Choi i ostali (2005), kako bi u bazni model ugradili opcije višestruke reciklaže na sorteru vrtložnom strujom i mešanja sortiranih materijalnih tokova. Prezentovana je analiza osetljivosti profita tradicionalne američke fabrike za reciklažu vozila na promenu cena obojenih i crnih metala, koja nesumnjivo ima značajnu praktičnu vrednost. Međutim, iako autori kao glavni doprinos svog rada ističu mogućnost modela da kombinuje pošiljke sortiranog lakog i teškog ASR-a, treba istaći da se mešanje već sortiranih materijala samo zbog jeftinijeg transporta u krajnjoj liniji može smatrati potpuno neracionalnim. Izneta kritika posebno dobija na težini ako se zna da dijagram toka materijala koji su autori analizirali nije obuhvatio niti jedno odredište za sortirane materijale. Coates i Rahimifard (2007) su istakli da je upotreba sofisticiranih metodoloških pristupa neophodna, kako bi se ekonomski aspekt aktivnosti reciklaže vozila mogao sa uspehom proceniti i optimizirati.

Qu i Williams (2008) su formulisali problem vrednovanja olupina vozila na kraju životnog ciklusa i planiranja pogona za reciklažu vozila opremljenih samo drobilicama. Autori su razvili aproksimativne funkcije naručivanja kada susedne fabrike vrednuju olupine vozila nezavisno, i poredili tržišnu sa optimalnom strategijom vrednovanja olupina vozila u slučaju konstantnog, rastućeg i opadajućeg trenda cena crnih metala i olupina vozila. Predloženi model nelinearnog programiranja je rešavan korišćenjem komercijalnog MINOS solvera u okruženju GAMS Distribution 21.3.

Miemczyk (2008) je ukazao na manjak operacionih modela primenljivih na oblast saobraćajne ekologije i posebno naglasio značaj koji analiza efekata ekološke regulative može imati na izbor reciklažnih strategija.

Li i ostali (2011) su predstavili matematički model za identifikovanje ekonomski efikasnih strategija sortiranja i njihovog uticaja na upotrebljivost otpada u slučaju individualne reciklažne firme. Model je primenjen na problem sortiranja livenih/kovanih legura za tipičnu evropsku sekundarnu proizvodnju aluminijuma iz 4 vrste tokova otpadnih materijala, među kojima i aluminijumsko intenzivnih vozila na kraju životnog ciklusa.

Simić i Dimitrijević (2012b) su predstavili problem taktičkog planiranja u okviru fabrika za reciklažu vozila koje funkcionišu u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju. Autori su analizirali uticaj koji EU ELV direktiva ima na poslovanje fabrika za reciklažu vozila i zaključili da buduće kvote ekološke efikasnosti neće ugroziti njihovu profitabilnost. Pored toga, oni su preporučili da upravljanje efikasnošću reciklažnog sistema treba vršiti na nivou sistema u celini, jer to ni na koji način neće ugroziti ciljeve EU ELV direktive. Simić i Dimitrijević (2012a) su proširili model linearnog programiranja koji su predložili Simić i Dimitrijević (2012b) kako bi u njega uključili problem izbora olupine vozila na kraju životnog ciklusa i problem promene dizajna vozila, ali i dali odgovore na sledeća pitanja: Da li moderno opremljena fabrika za reciklažu vozila može poslovati profitabilno? Da li su kvote ekološke efikasnosti, propisane EU ELV direktivom, zaista i dostižne? Na koji način će započeta promena u dizajnu vozila uticati na poslovanje fabrika za reciklažu vozila? Da bi to uradili, autori su prvo formulisali model moderno opremljene evropske fabrike za reciklažu vozila, a zatim ga opsežno testirali isključivo na realnim podacima. Oni su došli do zaključka da je procesna transformacija fabrika za reciklažu vozila, od tradicionalno do moderno opremljenih, ne samo neophodna već i potpuno opravdana, i istakli da su sve kvote ekološke efikasnosti dostižne.

Simić (2013) je predložio model planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u kratkom roku (do 1 godine) za tradicionalne japanske fabrike za reciklažu vozila i japanske proizvođače automobila. Formulirani model je primenjen na numeričkoj studiji u okviru koje su ispitana dva zakonodavna slučaja japanskog Zakona o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa.

Iako je primetno da je objavljen veći broj radova u kojima su predloženi razni deterministički modeli procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa, identifikovan je značajan prostor daljeg razvoja ove oblasti. On se pre svega odnosi na modeliranje i upravljanje EU i japanskim sistemima za reciklažu vozila, pošto su njihove karakteristike i regulative koje važe u tom regionu i državi, respektivno, do sada bili mahom zanemarivani. S tim u vezi, razvoj odgovarajućih modela linearnog programiranja bi mogao pomoći da se iznađu novi načini za unapređenje profitabilnosti i ekološke efikasnosti EU i japanskog sistema za reciklažu vozila. Pored toga, ovi modeli bi mogli biti upotrebljeni da se dođe do odgovora na sledeća aktuelna pitanja, koja su za sada ostala bez odgovora: Da li savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila mogu poslovati profitabilno? Da li su dostižne kvote ekološke efikasnosti procesa reciklaže vozila propisane EU ELV direktivom i japanskim ELV zakonom? Kako će započeta promena u dizajnu vozila uticati na poslovanje fabrika za reciklažu vozila? Kako zakonodavna regulativa, uslovi poslovanja i tehnološki razvoj utiču na strukturu troškova fabrika za reciklažu vozila? Na koji način treba upravljati ekološkom efikasnošću reciklažnog sistema?

#### *2.1.1.2. Stohastički modeli*

Neizvesnost predstavlja ključni faktor uticaja na *dugoročno* planiranje procesa reciklaže vozila. Štaviše, veliki broj parametara sistema je pod stalnim uticajem neizvesnosti (Wu i ostali, 2010).

Simulacija je jedna od veoma korišćenih metoda za istpitivanje uticaja koji brojni faktori mogu imati na ukupne performanse sistema za reciklažu vozila. Van Schaik i ostali (2002) su prvi predložili dinamički optimizacioni model za reciklažu vozila. Oni su simulirali dužinu životnog ciklusa vozila u Holandiji, kao Wejbulovu funkciju raspodele verovatnoća godine proizvodnje i demontaže vozila, i njihovu težinu, kao funkciju raspodele verovatnoća godine proizvodnje i težinskog razreda. Pretpostavljeno je postojanje 15 klasa težine, da se mlevenjem olupine vozila sve generisane čestice mogu grupisati u 5 klasa težine, i da reciklažnu mešavinu čine 5 materijalnih tokova (tj. liveni aluminijum, kovani aluminijum, čelik, bakar i ostali

materijali). Međutim, predloženi model je ilustriran samo za slučaj reciklaže aluminijuma izolovanog iz vozila na kraju životnog ciklusa.

Van Schaik i Reuter (2004) su kritički posmatrali definicije reciklabilnosti i obnovljivosti propisane EU ELV direktivom. Oni su proširili pomenute definicije implementiranjem funkcija raspodele verovatnoća težine, dužine životnog ciklusa i materijalnog sastava vozila. Pored toga, primenom pristupa sistemske dinamičke simulacije, oni su simulirali dužinu životnog ciklusa vozila u Holandiji, kao Wejbulovu funkciju raspodele verovatnoća godine proizvodnje i demontaže vozila; njihovu težinu, kao funkciju raspodele verovatnoća godine proizvodnje i težinskog razreda; i njihov materijalni sastav, kao funkciju raspodele verovatnoća godine proizvodnje, težinskog razreda i odgovarajuće klase materijalnog sastava. Pretpostavljeno je postojanje 21 klase težine i 41 klase materijalnog sastava, kao i da reciklažnu mešavinu čine 5 materijalnih tokova (tj. čelik, aluminijum, ostali obojeni metali, polimeri i ostalo). Autori su zaključili da vrednost dostignutih stopa reciklaže i obnavljanja u značajnoj meri zavisi od pomenutih parametara dizajna vozila.

Bandivadekar i ostali (2004) su kreirali simulacioni model materijalnih tokova i ekonomske razmene, kako bi ispitali efekte koje promene u dizajnu vozila mogu imati na američki sistem za reciklažu vozila. Analizirane su tri kategorije vozila: čelično intenzivna, aluminijumsko intenzivna i plastično intenzivna. Autori su zaključili da je u slučaju plastično intenzivnih vozila neophodna detaljna demontaža ukoliko se želi osigurati ekonomska održivost postojećeg reciklažnog sistema. Pored toga, ustanovljeno je da buduća japanska ASR kvota ( $\geq 70\%$  od 01.04.2015. godine) i buduće EU ELV kvote reciklaže i obnavljanja ( $\geq 85\%$  i  $\geq 95\%$ , respektivno od 01.01.2015. godine) neće biti dostižne bez fundamentalnih promena u pogledu opremljenosti postojećih fabrika za reciklažu vozila.

Van Schaik i Reuter (2005) su sa teorijskog i praktičnog aspekta analizirali efekte koje može imati dizajn vozila na vrednost stope reciklaže. Iznet je izrazito kritički stav da su praktično beskorisne ne samo definicije reciklabilnosti i obnovljivosti vozila koje su propisane EU ELV direktivom, već i ISO 22628 metode za izračunavanje ostvarenih stopa reciklaže i obnavljanja.

Drobilica predstavlja najskuplju i najvažniju mašinu svake fabrike za reciklažu vozila. Castro i ostali (2005) su razvili simulacioni model, kako bi opisali vezu dizajna

vozila i nivoa oslobađanja materijala u okviru operacije drobljenja olupine vozila na kraju životnog ciklusa. Autori su variranjem količine, veličine i tipa spojeva zaključili da je uticaj dizajna vozila veliki. Pored toga, preporučeno je da treba smanjiti količinu spojeva ukoliko se želi postići viši nivo oslobađanja materijala, kao i da treba u što je moguće većoj meri supstituisati hemijske sa fizičkim spojevima, jer ovi prvi ne mogu biti raskinuti operacijom drobljenja vozila.

Amaral i ostali (2006) su razvili dinamički model portugalskog sistema za reciklažu vozila i izneli zaljučak da je instalacija opreme za mehaničko sortiranje materijalnih tokova generisanih procesom drobljenja olupina vozila na kraju životnog ciklusa jeftinija od manuelne demontaže delova i/ili komponenti u odgovarajućim pogonima.

Reciklabilnost vozila determinišu ne samo karakteristike korišćenih materijala, već i kvalitet reciklažnih (među)tokova (koji zavisi od mineralne klase, raspodele veličina čestica i nivoa njihovog oslobađanja) i efikasnost operacija fizičkog sortiranja. Reuter i ostali (2006) su na bazi detaljnog dijagrama toka materijala u sistemu za reciklažu vozila formirali model celobrojnog nelinearnog programiranja, koji broji oko 83000 promenljivih i 80000 ograničenja. Autori su analizirali 8 reciklažnih scenarija i zaključili da buduća stopa obnavljanja od 95% nije realno dostižna. Štaviše, oni su uočili da ni relaksiranje kvote obnavljanja za čak 5% ne bi moglo značajnije da popravi situaciju po pitanju identifikovane (ne)fleksibilnosti i (ne)tržišnosti sistema za reciklažu vozila. Sa druge strane, važno je pomenuti da stopa obnavljanja od 85% nije bila postignuta samo u slučaju scenarija budućeg dizajna automobila. Međutim, ozbiljan nedostatak predloženog optimizacionog modela predstavlja činjenica da pri njegovom formulisanju nije uzeta u razmatranje kvota EU ELV direktive vezana za obnavljanje energije.

Kumar i Yamaoka (2007) su korišćenjem pristupa systemske dinamičke simulacije analizirali lanac snabdevanja kružnog toka japanske automobilske industrije i utvrdili da će primena japanskog Zakona o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa uticati da se izvoz polovnih vozila poveća u značajnijem obimu.

Ignatenko i ostali (2008) su proširili rad Reuter i ostali (2006) implementiranjem uticaja koji obnavljanje energije ima na proces reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa. Usled toga je dodatno povećana složenost izvornog modela i procesnih ruta.

Autori su kao potencijalna tehnološka rešenja za napredni termalni tretman ASR-a izabrali procese TwinRec, Thermoselect, Reshment i CITRON. Za odabrane scenarije ostvarena stopa obnavljanja se kretala od 88% do 91%, a identifikovano je i dodatno komplikovanje ruta prerade nastalo usled potrebe za intenzivnijim mehaničkim sortiranjem ASR-a. Iznet je zaključak da buduća EU ELV stopa obnavljanja (stupa na snagu 01.01.2015. godine) može biti dostignuta samo ukoliko ograničenje u pogledu obnavljanja energije bude ukinuto.

Kumar i Sutherland (2009) su u svom radu koristili simulacioni model materijalnih tokova i ekonomske razmene koji su prethodno predložili Bandivadekar i ostali (2004). Dobijeni rezultati simulacije su ukazali na to da će promena u dizajnu vozila smanjiti profitabilnost pogona za demontažu i povećati profitabilnost fabrike za reciklažu vozila. Pošto je ovo bio prvi rad u kojem je ustanovljeno da promena u dizajnu vozila može pozitivno uticati na poslovanje fabrika za reciklažu vozila autori su ovakav rezultat detaljno obrazložili. Naime, takav ishod je opravdan dodatnim prihodom koji se može ostvariti povećanom prodajom aluminijuma prethodno izolovanog iz aluminijumsko intenzivnih vozila. Što se tiče ekološke efikasnosti američkog sistema za reciklažu vozila, zaključeno je da visoke stope reciklaže i obnavljanja vozila mogu biti dostignute samo ako tradicionalne fabrike za reciklažu vozila budu investirale u nabavku savremene opreme za mehaničko sortiranje.

Kibira i Jain (2011) su koristili pristup sistemske dinamičke simulacije za analizu uticaja koji hibridna i električna vozila mogu imati na profitabilnost infrastrukture za reciklažu vozila.

U sistemu za reciklažu vozila je gotovo nemoguće sve ulazne podatke izraziti u determinističkom obliku. Sa druge strane, njihovo sagledavanje kao intervalnih vrednosti je sasvim prirodno, bilo da se planiranje vrši na godišnjem ili višegodišnjem nivou. Pristup za rešavanje takvog problema se naziva intervalno linearno programiranje i važno je napomenuti da on nije ranije bio korišćen za rešavanje problema reciklaže otpada. Prema tome, u svetlu istaknutih ograničenja prethodno objavljenih radova iz ove podkategorije, dodatni pravac istraživanja ove disertacije biće razvoj metodologije za primenu intervalnog linearnog programiranja u oblasti reciklaže vozila. To će obuhvatiti:

- (a) Razvoj modela intervalnog linearnog programiranja za dugoročno planiranje reciklaže vozila.
- (b) Primena razvijenog modela intervalnog linearnog programiranja za kreiranje studije slučaja Republike Srbije.

### ***2.1.2. Analiza životnog ciklusa vozila***

Analiza životnog ciklusa (LCA) predstavlja sistematski i sveobuhvatan pristup za optimizaciono modeliranje, projektovanje vozila i zaštitu životne sredine (Kim i ostali, 2003). LCA je jedan od najkorišćenijih metoda za procenu ekološke održivosti vozila, jer se njena primena u funkciji podrške odlučivanja procesu (re)dizajniranja delova i/ili komponenti i dalje smatra nezaobilaznom. Analizom emisije gasova i potrošnje resursa “od kolenke do groba” (tj. od faze vađenja sirovina, preko faza proizvodnje, distribucije i upotrebe, pa sve do faza reciklaže i finalnog odlaganja) procenjuje se ekološki profil vozila. Značajan procenat radova je upravo koristio LCA metod za evaluaciju mnogobrojnih alternativnih pristupa za rešavanje problema reciklaže vozila i/ili pripadajućeg podproblema upravljanja ostacima drobljenja automobila.

Kasai (2000) se osvrnuo na praksu primene LCA u Japanu i dao pregled nekoliko studija koje je sproveo tamošnji proizvođač vozila ISUZU. Castro i ostali (2003) su primenom LCA procenili ekološki uticaj prosečnog vozila namenjenog prevozu putnika u Holandiji sa posebnim osvrtom na demontažnu i reciklažnu praksu. Oni su potvrdili dominaciju faze upotrebe vozila (udeo od preko 90%).

Schmidt i ostali (2004) su koristili LCA pristup kako bi poredili 3 scenarija težine generičkih putničkih automobila od 1000 kg, 900 kg i 750 kg, respektivno. Utvrđeno je da relativna važnost faze kraja životnog ciklusa vozila ne prelazi 5%, osim u slučaju generisanja otpada (udeo do 40%). Tehnologija reciklaže vozila nema značajniji uticaj na ukupan ekološki profil vozila, već samo na smanjenje generisanja otpada za 25-50%. Pomenuti autori su, imajući u vidu da se smanjenje težine vozila primarno postiže supstitucijom onih materijala u odnosu na čije karakteristike su tradicionalne fabrike za reciklažu vozila u prošlosti bile projektovane (tj. crni metali se zamenjuju pre svega aluminijumom), naglasili da mora postojati određeni kompromis

između vrednosti EU ELV kvota ekološke efikasnosti i razmatranih dizajnerskih rešenja.

Krinke i ostali (2006) su poredili ekološku efikasnost Volkswagen-SiCon procesa, jednog od uveliko industrijski dostupnih tehnoloških rešenja za napredni termalni tretman ASR-a, i reciklažnog scenarija sveobuhvatne demontaže (plastike) praćene mehaničkom reciklažom. Rezultati LCA su pokazali da je Volkswagen-SiCon proces u značajnoj meri ekološki efikasniji. Međutim, ekonomska analiza ove dve startegije za reciklažu vozila je izostala. Boughton i Horvath (2006) su poredili odlaganje ASR-a na deponiju (bazni scenario) sa 3 alternativna rešenja: obnavljanje materijala u pogonu za napredni termalni tretman, mineralni dodatak pri proizvodnji cementa i hidroliza. LCA metoda je označila drugu alternativu kao najbolju među analiziranim.

Jeong i ostali (2007) su koristili LCA metodu za procenu ekološke održivosti Južnokorejske infrastrukture za preradu ELV-a i identifikovanje potencijalnih mogućnosti za njeno unapređenje. Autori su analizirali sledeće scenarije: zatečeno stanje (78% obnavljanja), detaljnija demontaža (85% obnavljanja), obnavljanje energije i sveobuhvatnija reciklaža (95% obnavljanja). Istaknuto je da povećanje stope obnavljanja ELV-a unapređuje ekološku efikasnost sistema u celini, kao i da drugi scenario generalno predstavlja najprihvatljiviju alternativu.

Huang i ostali (2008) su primenom LCA metode analizirali ekološki uticaj koji ima reciklaža vozila na Tajvanu. Oni su simulirali 3 izabrana modela ELV-a i primetili da postojeći reciklažni sistem može smanjiti njihov štetan uticaj za samo 5%.

Metod troškova životnog ciklusa (LCC) se može koristiti uporedo sa LCA metodom, kako bi istovremeno mogla biti identifikovana i ekonomska dimenzija životnog ciklusa vozila. Kim i ostali (2008 a,b) su primenili metode LCA i LCC za kvantifikaciju ekoloških i ekonomskih uticaja aluminijsko intenzivnih vozila na kraju životnog ciklusa i preporučili kreiranje zasebnog lanca snabdevanja kružnog toka za ovakav tip ELV-a.

Lewicki (2009) je koristio LCA kako bi procenio posledice intenzivnije reciklaže vozila u Poljskoj razmatrajući 4 scenarija: 25%, 33%, 50% i 75% svih vozila na kraju životnog ciklusa se reciklira, respektivno.



Ciacci i ostali (2010) su upotreбили LCA metodu kako bi okarakterisali i kvantifikovali štetnost nekih strategija upravljanja ostacima drobljenja automobila. Oni si zaključili da napredni termalni tretman ASR-a predstavlja strategiju čija primena može obezbediti dostizanje kvota ekološke efikasnosti ustanovljenih EU ELV direktivom.

Morselli i ostali (2011) su koristili LCA kako bi rangirali nekoliko scenarija za upravljanje ostacima drobljenja automobila, tj. odlaganje na deponiju, izolovanje obojenih metala, spaljivanje, izolovanje plastike pa spaljivanje frakcije koja preostane, i identifikovali da je odlaganje ASR-a na deponiju daleko najlošiji izbor.

Passarini i ostali (2012) su LCA metod upotreбили za procenu uticaja koji promena sastava otpadnih materijalnih tokova može imati na efikasnost reciklažnog sistema. Oni su otkrili da moderno opremljene fabrike za reciklažu vozila koje imaju mogućnost da izolovane otpadne tokove prosleđuju pogonima za napredni termalni tretman predstavljaju veoma dobro rešenje problema reciklaže vozila, jer se kombinacijom intenzivne reciklaže (koja se odvija u fabrici za reciklažu vozila) sa obnavljanjem materijala i energije (koje se odvija u pogonu za napredni termalni tretman) može značajno smanjiti količina koja se odlaže na deponije. Vermeulen i ostali (2012) su predložili skup od 7 indikatora održivosti za evaluaciju i poređenje industrijskih procesa za tretman otpadnih materija. Priložena je i studija slučaja ASR otpadnog toka. Zaključeno je da reciklaža u kombinaciji sa obnavljanjem energije (koje se realizuje u spaljivaonici gradskog otpada) predstavlja najbolju strategiju, jer jedino ona pruža mogućnost dostizanja buduće kvote obnavljanja EU ELV direktive od 95%.

Iako je u ovom poglavlju dat širok pregled brojnih primera primene LCA metode na rešavanje određenih aspekata problema reciklaže vozila, treba reći da se njena generalna primenljivost može smatrati veoma diskutabilnom. Štaviše, neki autori kao na primer Reuter i ostali (2006) tvrde da tako jednostavan pristup modeliranju sistema ne može pružiti dovoljnu dubinu za razumevanje, optimizaciju i unapređenje kompletnog sistema kakav je sistem za reciklažu vozila. Sa druge strane, integracija socio-ekonomskih karakteristika i LCA metode se može posmatrati kao veoma obećavajući (i dovoljno robustan) metodološki pristup za modeliranje i predviđanje složenih reciklažnih sistema. U tom smislu, procena održivosti životnog ciklusa (LCSA)

(Finkbeiner i ostali, 2010), koja sjedinjuje LCA metod, metod procene socijalnog ciklusa (SLCA) i LCC metod, tj.  $LCSA=LCA+SLCA+LCC$ , može biti posmatrana kao smernica za buduća interesovanja.

### ***2.1.3. Modeliranje ostalih problema iz oblasti reciklaže vozila***

Sodhi i ostali (1999) su formulisali opšti problem sortiranja materijala u fabrici za reciklažu vozila i rešili ga metodom Dinamičkog programiranja. Oni su istražili slučajeve jednog ciljnog materijala (potreban samo jedan sorter teškim medijumom) i svih sadržanih materijala (potrebno je da fabrika za reciklažu vozila poseduje nekoliko sortera teškim medijumom). Kao poseban doprinos rada treba istaći njegovu primenjivost prilikom donošenja odluke o tome koje specifične gustine treba da imaju težnosti koje ispunjavaju sortere teškim medijumom fabrika za reciklažu vozila tako da njihova efikasnost bude što je moguće veća.

Knight i Sodhi (2000) su razvili matematički model koji omogućava evaluiranje podesnosti određenog proizvoda za mehaničku reciklažu na bazi maksimalnog nivoa profita koji može biti ostvaren u procesu sortiranja otpadnih materijala.

Sakkas and Manios (2003) su primenili pristup generalizovanog troškovnog modeliranja, kako bi kreirali ekonomski presek reciklažne prakse u Grčkoj.

Ladjouze i Rahimifard (2004) su prezentovali strukturu troškova sistema za reciklažu vozila u Velikoj Britaniji i predložili jednostavan alat za podršku odlučivanju u procesu reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa.

Giannouli i ostali (2007) su razvili metodologiju i model za procenu količine otpada koji proizvedu vozila tokom svog radnog veka, ali i ona koja se nalaze na kraju životnog ciklusa.

Coates i Rahimifard (2008) su integrisali tehnike poput ABC i regresione analize, i predložili alat za ekonomsku evaluaciju sistema za reciklažu vozila, koji omogućava reciklažnim operaterima da procene ekonomske posledice koje mogu imati njihove investicione i upravljačke odluke. Fuse i Kashima (2008) su razvili evaluacioni metod baziran na ulazno-izlaznoj analizi reciklaže vozila, kako bi odredili optimalni dizajn Tajlandskog sistema za reciklažu polovnih vozila uvezenih iz Japana.

Coates i Rahimifard (2009) su razvili Post-fragmentation separation model, koji simulira rad opreme za sortiranje u fabrici za reciklažu vozila. Model na osnovu ulaznih materijalnih sastava frakcija generisanih u procesu reciklaže vozila određuje najverovatniju rutu za svaki pojedinačni materijalni tok.

Mathieux i Brissaud (2010) su predložili metod za kreiranje analize materijalnog toka proizvoda na kraju životnog ciklusa. Priložena je studija slučaja u kojoj je detaljno analiziran tok aluminijuma koji potiče iz evropskih komercijalnih vozila na kraju životnog ciklusa. Međutim, sami autori su naglasili da implementacija njihove metode zahteva jako puno terenskog rada na sakupljanju ulaznih podataka. Carcangiu i ostali (2010) su koristili tzv. metodu Otkazni mod, efekti i kritička analiza, kako bi kvantifikovali preovlađujuću demontažnu praksu u Sardiniji, Italija.

Hedayati i Subic (2011) su razvili metodološki okvir za donošenje odluka vezanih za procesuiranje vozila na kraju životnog ciklusa koga čine 4 osnovne faze: faza kreiranja benčmarking studije, faza izbora primarnog skupa alternativnih strategija, faza evaluacije alternativa i faza modeliranja sistema za reciklažu vozila. Studija slučaja, koja ilustruje primenu predložene metodologije u australijskom kontekstu, je takođe priložena.

Modaresi i Müller (2012) su razvili dinamički model materijalnog toka globalnog automobilskeg sistema, kako bi procenili verovatnoću i opseg potencijalnih viškova otpadnog aluminijuma. Autori su izneli preporuku da je potrebno što skorije pristupiti instalaciji naprednih tehnologija sortiranja otpada koji potiče iz vozila na kraju životnog ciklusa. Nakamura i ostali (2012) su koristili pristup hibridne ulaz-izlaz analize kako bi kvantifikovali kvalitet i gubitke u vezi sa reciklažom crnih metala iz vozila na kraju životnog ciklusa. Iranpour i ostali (2012) su prvo diskutovali o manama kineske industrije za reciklažu vozila, a potom ilustrovali tri Kini prilagođena vrednosna modela: model dorade delova/komponenti, model reciklaže vozila do sekundarnih sirovina i model procesnih otpadnih tokova do sekundarnog proizvoda.

## **2.2. Teorijski aspekt reciklaže vozila**

U ovom delu pregleda literature, posebna pažnja biće poklonjena referentnim radovima koji sa teorijskog aspekta analiziraju problem reciklaže vozila na kraju

životnog ciklusa. Prikupljeni radovi su klasifikovani u 3 kategorije: (1) *Reciklažne prakse širom sveta*; (2) *Zakonodavno orijentisano istraživanje*; (3) *Reciklaža materijala i dorada*.

### **2.2.1. Reciklažne prakse širom sveta**

Kim i ostali (2004) su primenom metode anketiranja pokušali da utvrde vrednosti stopa obnavljanja i reciklaže vozila u Južnoj Koreji, kao i stanje u kojem se tamošnji sistem nalazi, a sve u svrhu podrške uspostavljanju odgovarajuće ELV regulative. Nakajima i Vanderburg (2005) su poredili nemački i američki sistem za reciklažu ELV-a u smislu njihovog uticaja na životnu sredinu i istakli da nije opravdano isticati nemački sistem kao ugledni, jer on ne obezbeđuje obnavljanje maksimalne moguće količine materijala.

Edwards i ostali (2006b) su opisali reciklažnu infrastrukturu i praksu Velike Britanije i zaključili da dostizanje kvota ekološke efikasnosti propisanih EU ELV direktivom zavisi od dostupnosti naprednih tehnologija sortiranja. Muhamad Zameri i Blount (2006) su iscrpno opisali reciklažne prakse koje se primenjuju u EU, SAD-u, Japanu i Australiji.

Joung i ostali (2007) su analizirali status reciklaže vozila u Južnoj Koreji i zaključili da bi instalacija savremene opreme za sortiranje materijalnih tokova u fabrikama za reciklažu vozila mogla maksimizirati njihovu efikasnost i u značajnoj meri povećati stopu reciklaže. Dalmijn i De Jong (2007) su analizirali razvoj procesa reciklaže vozila u EU i zaključili da je izvoz ELV-a u Kinu isplativiji od njihove prerade.

Togawa (2008) je predstavio karakteristike japanskog sistema za reciklažu vozila i analizirao neke od posledica donošenja ELV zakona. Autor je posebno skrenuo pažnju na značajan porast izvoza polovnih automobila koji se javio pošto je japanski ELV zakon stupio na snagu.

Paul (2009) je analizirao prakse za upravljanje vozilima na kraju životnog ciklusa u Severnoj Americi. Uočeno je da su demontažeri izuzetno vični u rasklapanju delova i njihovoj kasnijoj preprodaji, kao i da je postojeća infrastruktura veoma efikasna u pogledu prerade materijala značajne vrednosti i velikog obima. Beck (2009) je opisao

reciklažni koncept koji je razvila Auto recycling Nederland, monopolistička kompanija iz oblasti demontaže i reciklaže vozila u Holandiji. Chen i Zhang (2009) su se bavili problemom reciklaže vozila u Kini i izvestili o progresu tamošnje reciklažne industrije.

Chen i ostali (2010) su detaljno opisali karakteristike sistema za reciklažu vozila na Tajvanu i njegove reciklažne performanse koristeći kao indikatore proizvodni kapacitet, energetska efikasnost i stopu reciklaže. Zaključeno je da usavršavanje i optimizacija procesa taktičkog i operativnog planiranja reciklaže vozila predstavlja neophodnost ukoliko se sortirani materijali žele učiniti konkurentnijim. Espartero i ostali (2010) su analizirali status reciklaže vozila u Španiji i zaključili da ova država svakako nije najefikasnija članica EU, ali da je ipak odlikuje zadovoljavajuća efikasnost. Serrona i ostali (2010) su razmatrali statuse koje reciklaža vozila na kraju životnog ciklusa ima u Kini, Mongoliji i na Filipinima, istovremeno poredeći ih sa odgovarajućim iskustvima iz Japana i Južne Koreje.

Altay i ostali (2011) su diskutovali o važećoj praksi u oblasti reciklaže vozila u Turskoj i izneli očekivanje da bi usvajanje posebne regulative moglo otvoriti brojna radna mesta. Barakat i Urbanic (2011) su opisali sistem za reciklažu vozila u Ontariu, Kanada, i bliže definisali sve njegove učesnike.

Upravljanje i reciklaža vozila na kraju životnog ciklusa se u Italiji odvija u hiljadama objekata potpuno posvećenih tretmanu otpadnih materija. Berzi i ostali (2013) su analizirali trenutne prakse za upravljanje otpadnim tokom vozila na kraju životnog ciklusa širom EU, a posebnu pažnju posvetili stanju u Italiji.

### ***2.2.2. Zakonodavno orijentisano istraživanje***

Globalna i sve prisutnija briga o zaštiti životne sredine je širom sveta dovela do usvajanja niza zakonodavnih mera, koje su uticale da se poslovna filozofija u skoro svim industrijskim granama značajno izmeni. Svetska automobilska industrija se početkom ovog milenijuma našla pred izazovima usled stupanja na snagu prvo EU ELV direktive, a zatim i japanskog Zakona o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa. Danas se automobilska industrija nalazi na istorijskoj prekretnici, jer opstanak svakog proizvođača vozila zavisi upravo od njegove spremnosti da u potpunosti ispuni izuzetno

rigorozne ekološke zahteve, pre svega u pogledu prerade vozila na kraju životnog ciklusa.

Zbog svega prethodno izrečenog, pregled zakonodavno orijentisanih referentnih radova je ne samo relevantan, posmatrano sa tematskog aspekta ove disertacije, nego i potreban za formiranje jedne šire slike o analiziranom problemu. Svi prikupljeni referentni radovi su klasifikovani u 4 podkategorije: (1) *Direktiva Evropske Unije o vozilima na kraju životnog ciklusa*; (2) *Japansko i kinesko zakonodavstvo*; (3) *Komparativna analiza zakonodavnih rešenja u oblasti reciklaže vozila*; (4) *Proširena odgovornost proizvođača vozila*.

#### 2.2.2.1. *Direktiva Evropske Unije o vozilima na kraju životnog ciklusa*

U nameri da se značajnije smanji količina otpada koji stvaraju vozila na kraju životnog ciklusa, Evropski parlament je usvojio 2000/53/EC direktivu, poznatiju kao EU ELV direktiva (EU, 2000). Ova direktiva je snažno uticala na to da otpadni tok vozila na kraju životnog ciklusa privuče veliku pažnju (naučne) javnosti i dovela do razvoja mnogih tehnoloških rešenja namenjenih efikasnijoj reciklaži i obnavljanju vozila, koja u protivnom ne bi ni postojala (ECE, 2005).

Pojava napuštanja vozila na kraju životnog ciklusa stvara velike probleme industriji za reciklažu vozila, jer može prouzrokovati njen rad smanjenim kapacitetom. Uzroci ove pojave su: značajno smanjenje cene otpadnog metala, slabosti sistema za registraciju vozila, porast broja polovnih vozila i veliki troškovi daljeg održavanja vozila. Smith i ostali (2004) su analizirali pojavu napuštanja vozila u Velikoj Britaniji i zaključili da EU ELV direktiva na nju negativno utiče.

Muhamad Zameri i Zakuan (2006) su razmatrali uticaj koji EU ELV direktiva ima na automobilsku industriju i dali veoma kratak pregled referentne literature. Oni su zaključili da je investiranje u izgradnju/razvoj infrastrukture za reciklažu vozila od ključne važnosti za dostizanje ambicioznih vrednosti kvota ekološke efikasnosti propisanih za 2015. godinu. Mazzanti i Zoboli (2006) su na primeru EU ELV direktive istraživali uticaj uvođenja instrumenta besplatnog preuzimanja ELV-a od poslednjih vlasnika na ponašanje ostalih učesnika u lancu snabdevanja kružnog toka vozila.

Gerrard i Kandlikar (2007) su identifikovali mnoštvo pozitivnih efekata koje je primena EU ELV direktive proizvela: promena materijalnog sastava vozila, intenzivnija primena koncepata dizajn za demontažu i dizajn za ponovnu upotrebu, povećanje stope reciklaže materijala, unapređenje dostupnosti informacija i sl.

Smith i Crotty (2008) su primenom metode upitnika analizirali uticaj EU ELV direktive na rad britanskih proizvođača delova za automobile. Oni su uspeali da identifikuju samo kratkoročni uticaj pomenute direktive na inoviranje njihovih proizvoda.

Tavoularis i ostali (2009) su razmatrali započeti proces implementacije EU ELV direktive u Rumuniji i istakli da glavne prepreke predstavljaju ilegalni otpadi i mali kapacitet tržišta sekundarnih materijala.

Santini i ostali (2011) su izvestili o reciklažnoj kampanji sprovedenoj na uzorku od 630 pravih ELV-a realizovanoj u 18 pogona za demontažu i jednoj italijanskoj fabrici za reciklažu vozila. Iznet je zaključak da je trenutno važeća reciklažna kvota dosegnuta, pošto je utvrđeno da ona iznosi 80,8%.

Nicolli i ostali (2012) su sproveli ekonometrijsku analizu uticaja EU ELV direktive na proces inoviranja u oblasti reciklaže vozila i utvrdili da je njena uloga bila ključna.

Blume i Walther (2013) su analizirali uticaj pravne reglative na nemačku industriju za reciklažu vozila i zaključili da buduće kvote ekološke efikasnosti EU ELV direktive predstavljaju glavnu pokretačku snagu njenog daljeg razvoja.

#### 2.2.2.2. *Japansko i kinesko zakonodavstvo*

U Japanu je reciklaža vozila tema kojoj se već više od decenije pridaje ogroman značaj (Kumar i Sutherland, 2009), pre svega zbog manjka kapaciteta industrijskih deponija (MoE, 2011). Vlada Japana je 2002. godine usvojila Zakon o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa (MoE, 2002), koji je obavezao proizvođače vozila i uvoznike da moraju sakupljati i reciklirati ostatke drobljenja automobila, vazdušne jastuke i hlorofluorouglenike/hidrofluorouglenike (sadržane u uređajima za klimatizaciju). Prema tome, osnovna namena ovog zakona je kreiranje novog, modernijeg sistema za reciklažu vozila, sposobnog da ih maksimalno efikasno preradi (Zhao i Chen, 2011).

Ogushi i Kandlikar (2005) su istraživali efekte japanskog ELV zakona na reciklažu vozila iz perspektive životnog ciklusa proizvoda. Za prikupljanje podataka su korišćene metode anketiranja i pregleda zvaničnih izveštaja 6 vodećih proizvođača automobila u Japanu. Identifikovani su brojni pozitivni efekti: promena materijalnog sastava vozila u smislu eliminisanja zabranjenih opasnih materija, primena koncepata dizajn za demontažu i dizajn za reciklažu pri projektovanju novih vozila, povećanje nivoa reciklaže materijala i unapređenje dostupnosti informacija.

Broj vozila u Kini je u ogromnom porastu, pa otuda i ne čudi što je njihova reciklaža postala ozbiljan ekološki i socijalni problem. Međutim, praksa koja dominira kineskom industrijom za reciklažu vozila u mnogome se razlikuje od one koja se uspešno primenjuje u EU i Japanu, a nastala je kao direktna je posledica jeftine radne snage. U februaru 2006. godine je usvojena Tehnološka politika obnavljanja motorih vozila, tzv. kineska ELV politika. Detaljnije, prema kineskoj politici za obnavljanje motornih vozila, počev od 1. januara 2010. godine stopa obnavljanja mora iznositi minimum 85% težine prosečnog vozila iz kategorija:  $M_2$  (vozilo namenjeno prevozu putnika,  $\leq 8$  sedišta (bez sedišta vozača) i maksimalna masa  $\leq 5$  tona),  $M_3$  (vozilo namenjeno prevozu putnika,  $> 8$  sedišta (bez sedišta vozača) i maksimalna masa  $> 5$  tona),  $N_2$  (vozilo namenjeno transportu robe, maksimalna masa  $\leq 12$  tona) i  $N_3$  (vozilo namenjeno transportu robe, maksimalna masa  $> 12$  tona), od čega minimum 80% težine prosečnog vozila mora biti ponovo upotrebljeno i reciklirano. Što se tiče vozila iz kategorija  $M_1$  i  $N_1$ , stopa obnavljanja mora iznositi minimum 80% težine prosečnog vozila, od čega minimum 75% težine prosečnog vozila mora biti ponovo upotrebljeno i reciklirano. U drugoj fazi primene kineske ELV politike, koja startuje 1. januara 2012. godine, stopa ponovne upotrebe i obnavljanja mora iznositi minimum 90% težine prosečnog vozila, od čega minimum 80% težine prosečnog vozila mora biti ponovo upotrebljeno i reciklirano. Konačno, od 1. januara 2017. godine, stopa obnavljanja će biti povećana na minimum 95% težine prosečnog vozila, od čega minimum 85% težine prosečnog vozila mora biti ponovo upotrebljeno i reciklirano (SEPAC, 2006).

Chen (2005) je dao pregled kineskog zakonodavstva u oblasti reciklaže vozila, sa posebnim osvrtom na izazove i mogućnosti pred kojima se tamošnja industrija nalazi. Chen (2006) je dao detaljan pregled kineske ELV politike i istakao da postoje ogromne



prepreke za njenu uspešnu primenu. Zhao i Chen (2011) su dali kratak pregled japanskih i kineskih pravnih dokumenata o reciklaži vozila, istovremeno poredeći njihove sisteme za reciklažu vozila.

#### *2.2.2.3. Komparativna analiza zakonodavnih rešenja u oblasti reciklaže vozila*

Kanari i ostali (2003) su opisali praksu za reciklažu vozila koja se primenjuje u EU i poredili japanski Zakon o reciklaži vozila na kraju životnog ciklusa sa EU ELV direktivom. Gesing (2004) je dao pregled tehnologija za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa i uporedio regulativne okvire SAD-a, EU i Japana.

Sakai i ostali (2007) su poredili japanski ELV zakon sa EU ELV direktivom. Pored toga, autori su detaljno opisali sistem za reciklažu vozila u Japanu i naglasili značaj koji je uvođenje reciklažnog depozita imalo za njegovu ekonomsku održivost.

Che i ostali (2011) su prezentovali komparativnu analizu pravnih dokumenata o reciklaži vozila Japana, Koreje i Kine, i dali nekoliko praktičnih preporuka. Sakai i ostali (2011) su analizirali trenutnu situaciju, istorijsku pozadinu i efektivnost u pogledu ekoloških pravnih akata EU, Japana, SAD, Koreje, Kine i Vijetnama. Pored toga, karakteristike ovih pravnih akata su diskutovane do detalja, a pravci daljeg usavršavanja predloženi.

Wang i Chen (2013) su poredili regulativu u oblasti reciklaže vozila Kine, EU, Japana i Južne Koreje sa ciljem da unaprede kineski pristup. Kao rezultat toga autori su predložili tzv. Korisnik-proizvođač-fond-reciklaža razvojni model za finansijsku podršku demontažnim i reciklažnim preduzećima, promociju preuzimanja ELV-a i ograničavanje ilegalne trgovine.

#### *2.2.2.4. Proširena odgovornost proizvođača vozila*

U Evropskoj Uniji vozila na kraju životnog ciklusa predstavljaju prioritetan otpadni tok čije se upravljanje bazira na konceptu (ekonomski) proširene odgovornosti proizvođača. Upravo je EU ELV direktiva bila ta koja je prva implementirala koncept proširene odgovornosti proizvođača (EPR) u sektor reciklaže vozila i zbog toga

predstavlja blistavi primer koji trebaju da slede i ostale industrijske grane (Xiang i Ming, 2011).

Forslind (2005) se bavio ispitivanjem uticaja primene proširene odgovornosti proizvođača, orijentisane na uvođenje ekonomskih stimulacija i (su)finansiranja sistema za reciklažu vozila, na postojeće reciklažere u Švedskoj. Manomaivibool (2008) je iz perspektive proširene odgovornosti proizvođača istražio uticaj upravljanja reciklažnom mrežom na ekološku efikasnost programa za upravljanje vozilima na kraju životnog ciklusa u Ujedinjenom Kraljevstvu i Švedskoj. Wilts i ostali (2011) su primetili da postojeći proizvodno orijentisani ERP pristupi koji proračun stopa ekološke efikasnosti baziraju na masi vozila (kao na primer EU ELV direktiva) ne mogu kreirati adekvatne ekonomske stimulacije za kvalitetnu reciklažu dragocenih metala.

### ***2.2.3. Reciklaža materijala i dorada***

Plastika je jeftin, lak i veoma fleksibilan materijal. Međutim, njeno efikasno sortiranje predstavlja ogroman izazov za reciklažnu industriju. Bellmann i Khare (1999) su analizirali položaj plastike u automobilske industriji sa aspekta EU ELV direktive i zaključili da je spaljivanje plastike ekonomski najprihvatljivija alternativa, iako mehanička reciklaža predstavlja višestruko energetski efikasniji pristup. Autori navode da bi se izgradnjom centara za preradu mogla značajno unaprediti efikasnost procesa obnavljanja plastičnih materijala, jer bi integrisanje demontažnih i reciklažnih funkcija tada bilo moguće.

Bellmann i Khare (2000) su detaljno analizirali mnogobrojne ekonomske aspekte reciklaže vozila. Oni su utvrdili da reciklabilnost vozila (tj. stepen do kog se vozilo na kraju životnog ciklusa može efikasno reciklirati posmatrano sa ekonomske tačke gledišta) zavisi od njegovog materijalnog sastava, tražnje na tržištima polovnih delova, trenutnih berzanskih cena otpadnih (tj. sekundarnih) metala, cene odlaganja ASR-a na deponiju, cene sortiranja, troškova transporta sortiranih materijala i sl.

Bakar se može naći u elektro-instalacijama, motoru i elektronskim uređajima automobila. Brahmst (2006) je istraživao praksu mehaničke reciklaže bakra iz vozila na kraju životnog ciklusa u SAD-u.

Agbo (2011) je kvantifikovao sirovinski potencijal polovnih vozila uvezenih u Nigeriju, koja predstavlja važno odredište evropskih ELV-a.

Hatayama i ostali (2012) su istraživali proces evolucije reciklaže aluminijuma do 2050. godine, fokusirajući se na hibridno električna vozila, električna vozila i upotrebu moderne tehnologije sortiranja. Autori su demonstrirali ograničenja tradicionalnih, isključivo profitno orijentisanih reciklažnih sistema i potvrdili validnost odluke o uvođenju moderno opremljenih sistema za sortiranje otpada. Pored toga, rezultati studije slučaja, koju su autori priložili, ukazali su na to da ako se sortiranje otpadnih materijala vrši u slučaju vozila na kraju životnog ciklusa ono može smanjiti zahteve za primarnim aluminijumom za 15-25%. Reck i Graedel (2012) su analizirali potencijalne izazove pri reciklaži metala i zaključili da najkorisnije aktivnosti u pogledu podizanja stope reciklaže predstavljaju primene savremene reciklažne metodologije i koncepta dizajn za reciklažu. Fiore i ostali (2012) su zaključili da instalacija savremene opreme za sortiranje u fabrike za reciklažu vozila i dostupnost naprednih tehnologija obnavljanja pružaju mogućnosti za daleko intenzivniju reciklažu i obnavljanje ostataka drobljenja automobila.

Automobilski sektor ima dobro poznatu istoriju dorade delova. Dorada delova vozila je njihova transformacija iz dotrajalog u stanje "kao nov". Međutim, ova operacija je veoma zahtevna, jer uključuje demontažu (tj. sistematsko rasklapanje dela na sklopove i komponente), čišćenje, obnavljanje i ponovno sastavljanje dotrajalog dela. Seitz (2007) je dao pregled motiva za doradu motora putničkog automobila: etička i moralna odgovornost, zakonodavstvo, profitabilnost, udeo na tržištu i zaštita brenda, posleprodajne aktivnosti i sl. Jaafar i ostali (2009) su ispitivali efikasnost industrije za doradu komercijalnih vozila u Maleziji korišćenjem metode intervjua, i ustanovili da njenu osnovnu slabost predstavlja nepostojanje odgovarajućeg komunikacionog mehanizma između relevantnih subjekata.

### **2.3. Glavna klasifikacija oblasti reciklaže vozila i raspodele objavljenih radova**

U tabeli 1 je data glavna klasifikacija oblasti reciklaže vozila iz koje se jasno može identifikovati velika zastupljenost pristupa operacionih istraživanja za rešavanje brojnih problema iz posmatrane naučne oblasti.

**Tabela 1.** Glavna klasifikacija oblasti reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa.

<b>Klasifikacija i podklasifikacija</b>	<b>Literatura</b>	<b>Ukupno</b>
<b>Pregledni radovi</b>	[Jody i Daniels (2006), Nourreddine (2007), Kumar i Sutherland (2008), Bari i ostali (2011), Go i ostali (2011), Vermeulen i ostali (2011), Amza i ostali (2011), Zorpas i Inglezakis (2012), Kindziarski i ostali (2012), Mayyas i ostali (2012)]	<b>10</b>
<b>Operaciona istraživanja u oblasti reciklaže vozila</b>	[Isaacs i Gupta (1997), Gupta i Isaac (1997), Sodhi i ostali (1999), Kasai (2000), Knight i Sodhi (2000), Boon i ostali (2001), Johnson and Wang (2002), Van Schaik i ostali (2002), Boon i ostali (2003), Castro i ostali (2003), Sakkas and Manios (2003), Van Schaik i Reuter (2004), Bandivadekar i ostali (2004), Schmidt i ostali (2004), Ladjouze i Rahimifard (2004), Choi i ostali (2005), Dantec (2005), Van Schaik i Reuter (2005), Castro i ostali (2005), Ferrao i Amaral (2006), Amaral i ostali (2006), Ferrao i ostali (2006), Coates i Rahimifard (2006), Reuter i ostali (2006), Krinke i ostali (2006), Boughton i Horvath (2006), Williams i ostali (2007), Coates i Rahimifard (2007), Kumar i Yamaoka (2007), Jeong i ostali (2007), Giannouli i ostali (2007), Qu i Williams (2008), Miemczyk (2008), Ignatenko i ostali (2008), Huang i ostali (2008), Kim i ostali (2008 a,b), Fuse i Kashima (2008), Kumar i Sutherland (2009), Lewicki (2009), Coates i Rahimifard (2009), Ciacci i ostali (2010), Mathieux i Brissaud (2010), Carcangiu i ostali (2010), Li i ostali (2011), Kibira i Jain (2011), Morselli i ostali (2011), Hedayati i Subic (2011), Simić i Dimitrijević (2012b), Simić i Dimitrijević (2012a), Passarini i ostali (2012), Vermeulen i ostali (2012), Modaresi i Müller (2012), Nakamura i ostali (2012), Iranpour i ostali (2012), Simić (2013)]	<b>56</b>
<b>Modeliranje procesa reciklaže vozila</b>	[Isaacs i Gupta (1997), Gupta i Isaac (1997), Boon i ostali (2001), Johnson and Wang (2002), Van Schaik i ostali (2002), Boon i ostali (2003), Van Schaik i Reuter (2004), Bandivadekar i ostali (2004), Choi i ostali (2005), Dantec (2005), Van Schaik i Reuter (2005), Castro i ostali (2005), Ferrao i Amaral (2006), Amaral i ostali (2006), Ferrao i ostali (2006), Coates i Rahimifard (2006), Reuter i ostali (2006), Williams i ostali (2007), Coates i Rahimifard (2007), Kumar i Yamaoka (2007), Qu i Williams (2008), Miemczyk (2008), Ignatenko i ostali (2008), Kumar i Sutherland (2009), Li i ostali (2011), Kibira i Jain (2011), Simić i Dimitrijević (2012b), Simić i Dimitrijević (2012a), Simić (2013)]	<b>29</b>
<b>Deterministički modeli</b>	[Isaacs i Gupta (1997), Gupta i Isaac (1997), Boon i ostali (2001), Johnson and Wang (2002), Boon i ostali (2003), Choi i ostali (2005), Dantec (2005), Ferrao i Amaral (2006), Ferrao i ostali (2006), Coates i Rahimifard (2006), Williams i ostali (2007), Coates i Rahimifard (2007), Qu i Williams (2008), Miemczyk (2008), Li i ostali (2011), Simić i Dimitrijević (2012b), Simić i Dimitrijević (2012a), Simić (2013)]	<b>18</b>
<b>Stohastički modeli</b>	[Van Schaik i ostali (2002), Van Schaik i Reuter (2004), Bandivadekar i ostali (2004), Van Schaik i Reuter (2005), Castro i ostali (2005), Amaral i ostali (2006), Reuter i ostali (2006), Kumar i Yamaoka (2007), Ignatenko i ostali (2008), Kumar i Sutherland (2009), Kibira i Jain (2011)]	<b>11</b>
<b>Analiza životnog ciklusa vozila</b>	[Kasai (2000), Castro i ostali (2003), Schmidt i ostali (2004), Krinke i ostali (2006), Boughton i Horvath (2006), Jeong i ostali (2007), Huang i ostali (2008), Kim i ostali (2008 a,b), Lewicki (2009), Ciacci i ostali (2010), Morselli i ostali (2011), Passarini i ostali (2012), Vermeulen i ostali (2012)]	<b>14</b>
<b>Modeliranje ostalih problema iz oblasti reciklaže vozila</b>	[Sodhi i ostali (1999), Knight i Sodhi (2000), Sakkas and Manios (2003), Ladjouze i Rahimifard (2004), Giannouli i ostali (2007), Fuse i Kashima (2008), Coates i Rahimifard (2009), Mathieux i Brissaud (2010), Carcangiu i ostali (2010), Hedayati i Subic (2011), Modaresi i Müller (2012), Nakamura i ostali (2012), Iranpour i ostali (2012)]	<b>13</b>

<b>Teorijski aspekt reciklaže vozila</b>	[Bellmann i Khare (1999), Bellmann i Khare (2000), Kanari i ostali (2003), Kim i ostali (2004), Smith i ostali (2004), Gesing (2004), Nakajima i Vanderburg (2005), Ogushi i Kandlikar (2005), Chen (2005), Forslind (2005), Edwards i ostali (2006b), Muhamad Zameri i Blount (2006), Muhamad Zameri i Zakuan (2006), Mazzanti i Zoboli (2006), Chen (2006), Brahmst (2006), Seitz (2007), Joung i ostali (2007), Dalmijn i De Jong (2007), Gerrard i Kandlikar (2007), Sakai i ostali (2007), Togawa (2008), Smith i Crotty (2008), Manomaivibool (2008), Paul (2009), Beck (2009), Chen i Zhang (2009), Tavoularis i ostali (2009), Jaafar i ostali (2009), Chen i ostali (2010), Espartero i ostali (2010), Serrona i ostali (2010), Altay i ostali (2011), Barakat i Urbanic (2011), Santini i ostali (2011), Zhao i Chen (2011), Che i ostali (2011), Sakai i ostali (2011), Wilts i ostali (2011), Agbo (2011), Nicolli i ostali (2012), Blume i Walther (2013), Hatayama i ostali (2012), Reck i Graedel (2012), Fiore i ostali (2012), Wang i Chen (2013), Berzi i ostali (2013)]	<b>47</b>
<b>Reciklažne prakse širom sveta</b>	[Kim i ostali (2004), Nakajima i Vanderburg (2005), Edwards i ostali (2006b), Muhamad Zameri i Blount (2006), Joung i ostali (2007), Dalmijn i De Jong (2007), Togawa (2008), Paul (2009), Beck (2009), Chen i Zhang (2009), Chen i ostali (2010), Espartero i ostali (2010), Serrona i ostali (2010), Altay i ostali (2011), Barakat i Urbanic (2011), Berzi i ostali (2013)]	<b>16</b>
<b>Zakonodavno orijentisano istraživanje</b>	[Kanari i ostali (2003), Smith i ostali (2004), Gesing (2004), Ogushi i Kandlikar (2005), Chen (2005), Forslind (2005), Muhamad Zameri i Zakuan (2006), Mazzanti i Zoboli (2006), Chen (2006), Gerrard i Kandlikar (2007), Sakai i ostali (2007), Smith i Crotty (2008), Manomaivibool (2008), Tavoularis i ostali (2009), Santini i ostali (2011), Zhao i Chen (2011), Che i ostali (2011), Sakai i ostali (2011), Wilts i ostali (2011), Nicolli i ostali (2012), Blume i Walther (2013), Wang i Chen (2013)]	<b>22</b>
<b>EU ELV direktiva</b>	[Smith i ostali (2004), Muhamad Zameri i Zakuan (2006), Mazzanti i Zoboli (2006), Gerrard i Kandlikar (2007), Smith i Crotty (2008), Tavoularis i ostali (2009), Santini i ostali (2011), Nicolli i ostali (2012), Blume i Walther (2013)]	<b>9</b>
<b>Japansko i kinesko zakonodavstvo</b>	[Ogushi i Kandlikar (2005), Chen (2005), Chen (2006), Zhao i Chen (2011)]	<b>4</b>
<b>Komparativna analiza zakonodavstava</b>	[Kanari i ostali (2003), Gesing (2004), Sakai i ostali (2007), Che i ostali (2011), Sakai i ostali (2011), Wang i Chen (2013)]	<b>6</b>
<b>Proširena odgovornost proizvođača vozila</b>	[Forslind (2005), Manomaivibool (2008), Wilts i ostali (2011)]	<b>3</b>
<b>Reciklaža materijala i dorada</b>	[Bellmann i Khare (1999), Bellmann i Khare (2000), Brahmst (2006), Seitz (2007), Jaafar i ostali (2009), Agbo (2011), Hatayama i ostali (2012), Reck i Graedel (2012), Fiore i ostali (2012)]	<b>9</b>
		<b>113</b>

U tabeli 2 je prikazana raspodela prikupljenih radova prema mestu objavljivanja. Detaljnije, u ovom pregledu literature je analizirano 113 radova i to: 89 radova iz časopisima, 14 radova objavljenih na međunarodnim konferencijama, 6 poglavlja iz knjiga, 2 studije, 1 izveštaj i 1 teza. Prema tome, oko 89% prikupljene literature su činili radovi publikovani u naučnim časopisima.

**Tabela 2.** Raspodela radova na temu reciklaže vozila prema mestu objavljivanja.

Mesto objavljivanja radova	Godina objavljivanja													Ukupno
	Pre 2003	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
Časopis	10	4	6	5	9	10	7	6	4	10	14	4	89	
Konferencija	–	–	1	2	3	–	3	2	1	2	–	–	14	
Poglavlje u knjizi	–	–	–	–	–	–	1	1	2	2	–	–	6	
Ostalo (studija, izveštaj, teza)	–	–	–	1	2	1	–	–	–	–	–	–	4	
<b>Ukupno</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>113</b>	

U tabeli 3 je prikazana raspodela radova na temu reciklaže vozila u međunarodnim časopisima u periodu 1997-2013. godina. Ona je kreirana sa ciljem da se identifikuju primarni (broj radova > 10% od ukupnog broja radova u međunarodnim časopisima), sekundarni (5-10%) i tercijarni (3-5%) međunarodni časopisi za oblast reciklaže vozila, tj. oni naučni časopisi koji su najviše posvećeni njenom razvoju.

**Tabela 3.** Raspodela radova na temu reciklaže vozila u međunarodnim časopisima.

Časopis	Godina objavljivanja													Ukupno
	Pre 2003	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
Journal of Cleaner Production***	–	–	–	1	–	2	2	1	–	1	1	2	10	
Resources, Conservation and Recycling***	–	–	2	–	1	1	–	1	1	1	2	–	9	
Waste Management**	–	–	1	–	–	–	–	1	1	–	3	1	7	
JOM**	–	1	1	1	1	1	–	1	–	–	–	–	6	
Journal of Industrial Ecology**	2	1	–	–	1	–	–	–	1	–	–	–	5	
Journal of Material Cycles and Waste Management*	–	–	–	–	–	2	1	–	–	1	–	–	4	
The International Journal of Life Cycle Assessment*	1	1	1	–	–	–	–	–	1	–	–	–	4	
Ostali (36 časopisa)	7	1	1	3	6	4	4	2	–	7	8	1	44	
<b>Ukupno (43 časopisa)</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>89</b>	

Beleške: Primarni časopisi \*\*\*, sekundarni časopisi \*\*, tercijarni časopisi \*.

Ostali časopisi - Advanced Materials Research; Bulletin of Science, Technology & Society; Business Strategy and the Environment; Car Recycling; CIRP Annals – Manufacturing Technology; Computers & Industrial Engineering; Ecological Economics; Environmental Economics and Policy Studies; Environmental Science and Technology; European Journal of Operational Research; International Journal of Automotive Technology; International Journal of Mineral Processing; International Journal of Production Economics; International Journal of Production Research; International Journal of Sustainable Design; International Journal of Sustainable Manufacturing; International Journal of Technology, Policy and Management; Journal of Environmental Sciences; Journal of Hazardous Materials; Journal of Industrial and Engineering Chemistry; Journal of Manufacturing Systems; Journal of Manufacturing Technology Management; Jurnal mekanikal; Minerals Engineering; Modern Traffic and Transportation Engineering Research; Nigerian Journal of Technology; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Science; Scientific Problems of Machines Operation and

Maintenance; Technological Forecasting and Social Change; Technology in Society; Technovation; Waste Management & Research; Water Environment Research.

Iz tabele 3 se može videti da je 7 istaknutih naučnih časopisa objavilo oko 51% od ukupnog broja razmatranih radova od 1997. godine. Detaljnije, u pomenutim časopisima je publikovano oko 56% i 49% radova u prethodnoj deceniji (2013. godina nije uzeta u obzir zbog nekompletnosti podataka) i poslednjih 5 godina, respektivno.

Daljom analizom prikupljene literature i tabele 3, uočen je trend da u poslednjih nekoliko godina brojni vrhunski međunarodni časopisi proširuju svoje tematske okvire kako bi privukli radove iz oblasti reciklaže vozila, kao na primer Science i Environmental Science and Technology. Ovo samo dodatno ide u prilog stavu da je reciklaža vozila problem globalnih razmera i izuzetne aktuelnosti.

Konačno, u skladu sa motivacijom, koja je posebno naglašena u uvodnom delu, i identifikovanim pravcima za dalje istraživanje u oblasti reciklaže vozila, u ovoj disertaciji će biti formulisana i stestirana 4 optimizaciona modela:

- *Model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju.*
- *Model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila.*
- *Model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju.*
- *Model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti.*

### 3. MODELIRANJE I UPRAVLJANJE SISTEMIMA ZA RECIKLAŽU VOZILA EVROPSKE UNIJE

Modeliranje sistema za reciklažu vozila u EU obuhvatiće razvoj dva modela matematičkog programiranja:

- *Model kratkoročnog (taktičkog) planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju.*
- *Model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila.*

Osnovni naučni ciljevi razvoja *modela kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju* su:

- Optimizacija ekonomske i ekološke efikasnosti EU industrije za reciklažu vozila (tj. ostvarene stope obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije), i
- Analiza uticaja EU ELV direktive.

Sporedni ciljevi su:

- Analiza uticaja raspoloživih finansijskih instrumenata (tj. troškova odlaganja na deponiju, troškova naprednog termalnog tretmana i troškova sagorevanja u spaljivaonici otpada) na profitabilnost i ekološku efikasnost fabrika za reciklažu vozila.
- Analiza dva pristupa za upravljanje ekološkom efikasnošću reciklažnog sistema (tj. upravljanje na nivou podsistema i upravljanje na nivou sistema - integracija reciklažnog sistema).
- Analiza uticaja EU ELV direktive i uslova poslovanja na strukturu troškova fabrika za reciklažu vozila.
- Analiza uticaja tehnološkog razvoja na strukturu troškova fabrika za reciklažu vozila.

Pregledom referentne literature, prezentovane u poglavlju 2, identifikovan je dodatni prostor za dalje istraživanje koje se odnosi na uključivanje problema izbora materijala i promene dizajna vozila u proces modeliranja sistema za reciklažu vozila. U



skladu sa tim, u ovom poglavlju, biće formulisan i testiran i *model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila*.

Osnovni naučni ciljevi razvoja ovog modela su:

- Analiza uticaja promene dizajna vozila na proces donošenja reciklažnih odluka.
- Ispitivanje potrebe za restrukturiranjem fabrika za reciklažu vozila kao posledice promene dizajna vozila.

Sporedni cilj razvoja modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila je analiza uticaja EU ELV direktive na proces planiranja prerade savremeno opremljene EU fabrike za reciklažu vozila.

### **3.1. Model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju**

Modeliranje sistema za reciklažu vozila mora biti bazirano na sveobuhvatnoj analizi vrednosti i reciklabilnosti svih materijalnih tokova, jer samo na taj način može biti osiguran izbor optimalnog plana proizvodnje, i sa ekonomskog i sa ekološkog aspekta. Detaljni dijagram toka materijala predstavlja polaznu tačku za formulaciju modela planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju. Dijagram toka materijala, prikazan na slici 2, sadrži mrežu raznovrsnih jediničnih operacija koje su neophodne prilikom sortiranja velikog broja materijalnih tokova. Pored toga, bilo koja od ruta za reciklažu vozila (slika 2) može predstavljati potencijalno rešenje analiziranog problema planiranja, pa je njena sveobuhvatna analizira nezaobilazna.

Kada se naručene olupine dopreme u fabriku za reciklažu vozila, one se istovaraju iz transportnih sredstava i prenose u skladište. Olupine vozila koje su planirane za reciklažu se sukcesivno preuzimaju iz skladišnog prostora i prenose do drobilice<sup>8</sup>, koja predstavlja najvažniji deo opreme svake fabrike za reciklažu vozila. Ona drobi olupine vozila u komade veličine pesnice, kako bi metali bili odvojeni od ostalih materijala (Jody i Daniels, 2006). Na krov drobilice se često postavlja ventilacioni odvod, koji ima zadatak da usisava laki ASR. Ova frakcija može biti ili dalje sortirana

---

<sup>8</sup> Engl. Shredder

ili transportovana do postrojenja za napredni termalni tretman. Ukoliko se izabere prva mogućnost, tada drugi magnetski sorter ovaj materijalni tok razvrstava na obojeni miks i drugu frakciju crnih metala. Obojeni miks može biti ili dalje sortiran kako bi iz njega bili izolovani obojeni metali, poslat u postrojenje za napredni termalni tretman ili odložen na deponiju. Ukoliko se izabere prva mogućnost, tada drugi sorter vrtložnom strujom<sup>9</sup> razdvaja ovaj materijalni tok na obojene metale 2 i drugu frakciju nemetala, koja potom biva rutirana ka optimalnom odredištu. Frakcija teških materijala se usmerava na prvi magnetski sorter, koji razdvaja crne metale 1 od frakcije teškog ASR-a. Da bi se udovoljivo zahtevima tržišta, obe frakcije crnih metala se prvo duž konvejera moraju ručno prečistiti od eventualnih nešistoća (pre svega od izolovanih bakarnih žica), pa se tek onda prodaju železarama. Što se tiče frakcije izolovanih bakarnih žica, pretpostavljene su dve rute, izvoz i (ručna) reciklaža u zemljama sa jeftinom radnom snagom ili specifičnim proizvodnim zahtevima, i odlaganje na deponije. Spaljivanje ove frakcije zajedno sa gradskim otpadom nije ni uzeto u razmatranje zbog njegove finansijske neodrživosti (Bellmann i Khare, 1999) i ekološke neprihvatljivosti. Teški ASR se upućuje na prvi sorter vrtložnom strujom, koji ga razdvaja na obojene metale 1 i prvu frakciju nemetala. Kao što se može videti sa slike 2, prva i druga frakcija obojenih metala se zatim rutiraju na sorter teškim medijumom<sup>10</sup>. On je ispunjen medijumom specifične gustine 3.5 tone/m<sup>3</sup> (Coates i Rahimifard, 2009) i razdvaja frakciju bogatu aluminijumom od frakcije bogate bakrom. Frakcija bogata aluminijumom može biti ili odmah prodana ili rutirana na treći sorter vrtložnom strujom radi njenog prečišćavanja od organskih jedinjenja, gume, plastike i ostalih materijala (OGPO). Izolovana OGPO frakcija može biti spaljena zajedno sa gradskim otpadom ili odložena na deponiju. Detaljan opis cenovnih i procesnih karakteristika entiteta sortiranja, spaljivaonice gradskog otpada i postrojenja za napredni termalni tretman je dat u prvoj numeričkoj studiji (poglavljje 3.1.3).

---

<sup>9</sup> *Engl.* Eddy current sorter

<sup>10</sup> *Engl.* Heavy media sorter



### 3.1.1. Notacija modela

U modelu kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju je korišćena sledeća notacija.

#### Indeksi i skupovi

$t$	indeks vremenskog perioda; $t \in \{1, \dots, T\}$
J	skup materijala
S	skup skladišta
M	skup miksera
R	skup sortera (tj. drobilica, oprema za sortiranje i procesi ručnog sortiranja)
F	skup odredišta koja vrše reciklažu materijala (tj. postrojenja za napredni termalni tretman)
D	skup odredišta koja vrše obnavljanje energije (tj. postrojenja za napredni termalni tretman i spaljivaonica)
P	skup proizvođača raznovrsnih metala u zemlji članici EU ili inostranstvu
L	skup deponija
$O = F \cup D \cup L \cup P$	skup odredišta (tj. postrojenje za napredni termalni tretman, spaljivaonica, deponije i proizvođači raznovrsnih metala)
$N = S \cup M \cup R \cup O$	skup entiteta (tj. drobilica, oprema za sortiranje, procesi ručnog sortiranja, skladišta, mikseri i odredišta)
$A \subseteq \{(i, j) \mid i \in N, j \in N\}$	skup materijalnih tokova
$\Gamma_i = \{j \mid (i, j) \in A\}, i \in N$	skup entiteta koji slede $i$ -ti entitet
$\Gamma_j^{-1} = \{i \mid (i, j) \in A\}, j \in N$	skup entiteta koji prethode $j$ -tom entitetu

$g_{ij} \in J$	materijal na toku $(i,j)$ (atribut toka)
$K_i, K_i \subset J, i \in R$	skup materijala izolovanih $i$ -tim entitetom sortiranja
$\Psi_{ik} = \{j   j \in \Gamma_i, g_{ij} = k\}, i \in R, k \in K_i$	skup entiteta na koje je materijal $k$ prosleđen sa entiteta $i$

### Parametri

$T$	broj analiziranih vremenskih perioda
$\Pi_{i0}, i \in S$	težina početnih zaliha olupina vozila u skladištu $i$
$W_{min}$	nivo sigurnosnih zaliha
$C_j, j \in R$	kapacitet sortera $j$ po vremenskom periodu
$E_{ik}, i \in R, k \in K_i$	efikasnost entiteta sortiranja $i$ u slučaju materijala $k$ u procentima
$E_j^R, j \in F$	reciklažna efikasnost odredišta $j$ u procentima
$E_j^E, j \in D$	energetska efikasnost odredišta $j$ u procentima
$Q_R$	reciklažna kvota
$Q_{R'}$	kvota obnavljanja (tj. reciklaže i obnavljanja energije)
$Q_E$	kvota obnavljanja energije
$R_{ijt}, j \in P, i \in \Gamma_j^{-1}$	prihod po jedinici težine od prodaje metala sortiranih entitetom $i$ proizvođaču metala $j$ u vremenskom periodu $t$
$C_j^A, j \in D$	cena (naprednog) termalnog tretmana u određenom postrojenju $j$ po jedinici težine

$C_{ij}^L, j \in L, i \in \Gamma_j^{-1}$	cena odlaganja na deponiju $j$ otpadnog materijala izolovanog entitetom $i$ po jedinici težine
$C_t^P$	cena naručivanja olupina vozila po jedinici težine u vremenskom periodu $t$
$C^I$	cena skladištenja po jedinici težine $i$ u vremenskom periodu
$C_j^S, j \in R$	cena sortiranja na entitetu $j$ po jedinici težine
$C_{ij}^T, j \in O, i \in \Gamma_j^{-1}$	cena transporta od entiteta $i$ do odredišta $j$ po jedinici težine
<i>Promenljive</i>	
$W_{it}, i \in S, t \in \{0, 1, \dots, T\}$	težina olupina vozila koje se na kraju vremenskog perioda $t$ nalaze u skladištu $i$
$P_{it}, i \in S$	težina olupina vozila istovarenih u skladište $i$ u vremenskom periodu $t$
$X_{ijt}, i \in \mathbb{N} \setminus O, j \in \Gamma_i$	težina materijala prosleđenog od entiteta $i$ do entiteta $j$ u vremenskom periodu $t$

### 3.1.2. Formulacija modela

Predloženi model se bavi problemom taktičkog planiranja proizvodnje u evropskoj fabrici za reciklažu vozila. Na osnovu notacije izložene u poglavlju 3.1.1, problem je formulisan kao linearni program.

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} R_{ijt} X_{ijt} - \sum_{j \in D} C_j^A \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} - \sum_{j \in L} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} C_{ij}^L X_{ijt} - C_t^P \sum_{i \in S} P_{it} \right. \\ \left. - C^I \sum_{i \in S} W_{it} - \sum_{j \in R} C_j^S \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} - \sum_{j \in O} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} C_{ij}^T X_{ijt} \right] \quad (1)$$

pri ograničenjima:

$$W_{it} = P_{it} + W_{it-1} - \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (2)$$

$$W_{i0} = \Pi_{i0}, \quad \forall i \in S \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} W_{it} \geq W_{min}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \leq C_j, \quad \forall j \in R; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \Psi_{ik}} X_{ijt} = E_{ik} \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} X_{j it}, \quad \forall i \in R; \forall k \in K_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (6)$$

$$\sum_{i \in F} X_{j it} = \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt}, \quad \forall j \in M; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (7)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in F} E_j^R \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \geq Q_R \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in F} E_j^R \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in D} E_j^E \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \geq Q_{R'} \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in D} E_j^E \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \leq Q_E \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (10)$$

$$P_{it} \geq 0, W_{it} \geq 0, \quad \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (11)$$

$$X_{ijt} \geq 0, \quad \forall i \in N \setminus O; \forall j \in \Gamma_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (12)$$

Kriterijumska funkcija (1) teži da maksimizira profit evropske fabrike za reciklažu vozila tokom planskog horizonta. U kriterijumskoj funkciji, prvi deo predstavlja prihod ostvaren od prodaje sortiranih metala, drugi deo se odnosi na

troškove (naprednog) termalnog tretmana izolovanih otpadnih materijala, treći deo izračunava troškove odlaganja izolovanih otpadnih materijala na deponije, četvrti deo predstavlja troškove naručivanja<sup>11</sup>, peti deo se odnosi na troškove skladištenja olupina vozila koje nisu raspoređene za reciklažu, šesti deo izračunava troškove drobljenja i sortiranja, i poslednji deo se odnosi na troškove transporta sortiranih materijala do finalnih odredišta.

Ograničenja bilansa zaliha su definisana jednačinama (2). Detaljnije, težina uskladištenih olupina vozila na kraju perioda  $t$  se određuje tako što se suma težina poručenih i raspoloživih olupina vozila umanji za težinu olupina vozila planiranih za reciklažu u analiziranom planskom periodu. Jednačina (3) definiše vrednost nivoa početnih zaliha. Dostupnost olupina vozila i isporuka naručenih pošiljaka može zavisiti ne samo od stanja na berzi metala, već i od saobraćajnih i vremenskih uslova (Qu i Williams, 2008). Zbog toga, fabrika za reciklažu vozila teži da u svakom trenutku raspolaže dovoljnim brojem olupina vozila i obezbedi poštovanje minimuma procesa rada (ograničenja (4)). Jednačine (5) predstavljaju kapacitivna ograničenja raspoloživih entiteta sortiranja. Ograničenja (6) održavaju materijalni bilans svih entiteta sortiranja, i smatraju se najznačajnijom komponentom modela materijalnog toka. Definisanje miksera u modelu planiranja proizvodnje fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju je u funkciji kombinovanja raznovrsnih otpadnih materijala u jedinstvenu ASR miks frakciju, koja se potom transportuje do postrojenja za napredni termalni tretman. Prema tome, ograničenja (7) opisuju operacije mešanja otpadnih materijala. Ograničenja (8)-(10) osiguravaju poštovanje specifičnih kvota u pogledu ekološke efikasnosti procesa reciklaže vozila definisanih u EU ELV direktivi. Pomenuta ograničenja obezbeđuju da procenat reciklaže ne može biti manji od propisane reciklažne kvote (ograničenja (8)), procenat obnavljanja ne može biti manji od propisane kvote obnavljanja (ograničenja (9)), i procenat obnavljanja energije ne može biti veći od propisane kvote obnavljanja energije (ograničenja (10)). Pored toga, ekološku efikasnost fabrike za reciklažu vozila (tj. ostvarene stope obnavljanja, reciklaže, i obnavljanja energije) treba izračunavati po ISO

---

<sup>11</sup> *Troškovi naručivanja* predstavljaju iznos koji fabrika za reciklažu isplaćuje pogonima za demontažu vozila ili berzanskim dilerima (ukoliko je ponuda olupina ELV-a na domaćem tržištu manja od tražnje fabrike za reciklažu vozila određene količine ELV-a se naručuju na svetskom tržištu sekundarnih metala) za dopremljene količine presovanih i dekontaminiranih olupina ELV-a



22628 standardima, što je posebno istaknuto u radu Santini i ostali (2011). U prethodno pomenutom standardu, stope reciklaže i obnavljanja su veoma jednostavno definisane kao odnos između sume mase materijala koji su ponovo upotrebljeni/reciklirani/obnovljeni tokom demontaže i reciklaže vozila, mase izolovanih metala i mase nemetalnih ostataka koji su reciklirani/obnovljeni, i ukupne mase praznog vozila (ISO 22628:2002). Definisanje pojedinih tipova operacija (tj. njihovo tretiranje kao operacije obnavljanja, reciklaže, obnavljanja energije ili odlaganja) je u potpunosti usklađeno sa referentnim definicijama iz nove evropske Direktive o otpadu (2008/98/EC) (EU, 2008). Konačno, ograničenja (11)-(12) definišu vrednosne domene promenljivih odlučivanja.

### **3.1.3. Numerička studija**

#### *3.1.3.1. Sakupljanje podataka*

Primena modela planiranja je veoma komplikovana zbog velike količine potrebnih ulaznih podataka, i njihovo prikupljanje predstavlja veoma zahtevan i dugotrajan proces. Da bi predloženi model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju mogao biti testiran, sakupljeni su podaci iz velikog broja referentnih radova i studija. Zbog lakše preglednosti podataka njihov prikaz je dat po pripadajućim kategorijama. Sa druge strane, kako bi poređenje podataka iz različitih izvora bilo moguće, sve cene su konvertovane u evre na bazi Rojtersovih kvota od 1. marta 2011. godine, tj. 1 EUR = 1.3812 USD (Reuters, 2011) i (metrična) tona je izabrana za jedinicu mase.

Za potrebe modeliranja evropskog sistema za reciklažu vozila važno je na samom početku identifikovati karakteristike tipičnog evropskog ELV-a i što je moguće bolje ustanoviti jedan "generički ekvivalent", koji može poslužiti kao referentna tačka. Prema poslednjim podacima u EU je 2008. godine reciklirano 6.34 miliona vozila, prosečne težine 949.38 kg (EDCW, 2010). Prosečna težina vozila na kraju životnog ciklusa u EU je 2006. godine iznosila 943.1 kg<sup>12</sup> (EDCW, 2008), 2007. godine 929.5

---

<sup>12</sup> Bez podataka za Island, Maltu, Irsku i Lihtenštajn

kg<sup>13</sup> (EDCW, 2009), a 2008. godine je porasla na 949.38 kg<sup>14</sup> (EDCW, 2010). Pod pretpostavkom da se iz dalje analize isključe nekompletni podaci o broju i sudbini vozila koja su izvezena, može se zaključiti da je 2008. godine u pogonima za demontažu zemalja članica EU prosečno bilo rasklapano 20.579% vozila (ili 195.37 kg njegovih delova i komponenti), od čega je 41.760%, 51.078%, 5.751% i 1.411% bilo ponovo korišćeno, reciklirano, energetski obnovljeno i odloženo na deponije, respektivno (EDCW, 2010). Prema tome, prosečna težina dekontaminirane i presovane olupine, koja je u toku 2008. godine bila prodavana evropskim fabrikama za reciklažu vozila, iznosila je  $949.38 - 195.37 = 754.01$  kg.

#### 3.1.3.1.1. Efikasnost entiteta sortiranja

Efikasnosti pojedinih entiteta sortiranja, koji se koriste u evropskom sistemu za reciklažu vozila (slika 2), izračunate su primenom simulatora Post-fragmentation separation model (SMART, 2006; Coates i Rahimifard, 2009). Dobijene vrednosti su date u tabeli 4.

Materijalni sastavi lake i teške frakcije ASR-a su usklađeni sa studijom EPA (2010). Udeo crnih metala u lakoj ASR frakciji iznosi 5.1%, i može biti izolovan primenom drugog magnetskog sortera. Udeo druge frakcije obojenih metala u materijalnom toku obojenog miksa iznosi 6%, i za njeno izolovanje se primenjuje drugi sorter vrtložnom strujom. Udeo prve frakcije obojenih metala u materijalnom toku teškog ASR-a iznosi 66.4%, i može biti izolovan prvim sorterom vrtložnom strujom. Sorter teškim medijumom razdvaja frakciju obojenih metala na Al-bogatu frakciju i Cu-bogatu frakciju. Imajući u vidu da udeo aluminijuma u Al-bogatoj frakciji iznosi oko 89%, ovaj materijalni tok može biti ili rutiran na treći sorter vrtložnom strujom, u cilju njegovog daljeg prečišćavanja (čistoća >99.5%), ili prodat po nižoj ceni. U prvom slučaju se od aluminijuma razdvaja OGPO frakcija. Udeo bakra u materijalnom toku crnih metala mora biti manji od 0.25%. Imajući u vidu da se ručnim sortiranjem iz toka crnih metala može izdvojiti od 0.21-0.45% bakarnih žica izolovanih PVC-om (SEES, 2006), u ovoj numeričkoj studiji je pretpostavljena vrednost od 0.33%.

---

<sup>13</sup> Bez podataka za Island i Maltu

<sup>14</sup> Bez podataka za Island, Maltu, Estoniju i Bugarsku

**Tabela 4.** Efikasnost entiteta sortiranja  $i$  u slučaju materijalnog toka  $j$ .

$i$	$j$	$E_{ij}$ (%)
1	2	81.47
	3	18.53
2	4	89.89
	5	10.11
3	6	5.1
	7	94.9
4	8	67.6
	9	32.4
5	10	9.66
	11	90.34
6	12	85.53
	13	14.47
7	14	89.38
	15	10.62
8	16	99.67
	17	0.33

#### 3.1.3.1.2. Kapacitet i cena entiteta sortiranja

Taktički plan se može kreirati za vremenski period od 1 meseca do 1 godine (Bostel i ostali, 2005). Za potrebe testiranja predloženog modela je kreiran jednomesečni plan proizvodnje fabrike za reciklažu vozila, koji obuhvata 4 planska perioda u trajanju od po nedelju dana ili 50 radnih časova.

Pri projektovanju kapaciteta fabrike za reciklažu vozila treba voditi računa o tome da na godišnjem nivou mora biti prerađeno minimum 85,000 olupina vozila, kako bi povráaj investicija u nabavljenu opremu mogao biti ostvaren (Sakkas i Manios, 2003). Što se tiče drobilice, kao najvažnijeg elementa svake fabrike za reciklažu vozila, treba pomenuti da su u EU trenutno veoma popularne one od 2000 ks. Takođe, na kapacitet drobljenja može uticati materijalni sastav olupina vozila, brzina dolaznog konvejera i sl. Prema specifikacijama jednog od vodećih svetskih proizvođača opreme za reciklažu otpada, u slučaju modela HS6090 i HS80115 sa 2000 ks, brzina drobljenja može varirati u intervalu od 25.4-40.6 tona/h i 61.0-81.3 tona/h, respektivno (Harris shredders, 2009). Sa druge strane, tipična brzina sortera vrtložnom strujom se kreće između 18.3-30.5 tona/h (Bandivadekar i ostali, 2004; Williams, 2006; Williams i ostali, 2007; Kumar i Sutherland, 2008). Imajući u vidu da je analizirani proces sortiranja očigledno kontinualan (slika 2), brzine magnetskih sortera, procesa ručnog sortiranja i sortera teškim medijumom se mogu izračunati na osnovu pretpostavljenog

materijalnog sastava naručenih i uskladištenih olupina vozila, i usvojenih brzina drobilice i sortera vrtložnom strujom (tabela 5).

**Tabela 5.** Brzina, kapacitet i cena sortiranja.

Indeks entiteta sortiranja	Brzina sortiranja (tona/h)	Kapacitet sortiranja (tona/nedelja)	Cena sortiranja (EUR/toni)
1	80	4000	26.25
2	65.2	3260	4.33
3	65.2	3260	4.33
4	30	1500	9.42 <sup>a</sup>
5	30	1500	9.42
6	30	1500	70.60
7	30	1500	9.42 <sup>a</sup>
8	59.4	2970	1.67

<sup>a</sup> Prosečna vrednost troškova iz Nijhof i Rem (1999) i Bandivadekar i ostali (2004)

Operativna cena drobljenja olupine vozila obuhvata troškove investicija, radne snage, energije, materijala i održavanja. Na osnovu opsežnog pregleda referentne literature identifikovane su sledeće tri cenovne klase:

- Niske cene - 6.4 EUR/toni (Williams i ostali, 2007) i 9.6-10.7 EUR/toni (Qu i Williams, 2008).
- Srednje cene - 20-25 EUR/toni (Liljenroth, 2004) i 30 EUR/toni (Sakkas i Manios, 2003).
- Visoke cene - 47.6-72.1 EUR/toni (GHK/BioIS, 2006).

Odlučeno je da se za operativnu cenu drobljenja usvoji iznos od 26.25 EUR/toni, kao prosečna vrednost iz srednje cenovne klase.

Cene magnetskog sortiranja su određene prema podacima iz kataloga MAS Magnetics (2011) i predstavljene u tabeli 5. Cena sortiranja teškim medijumom se kreće od 66.6-74.6 EUR/toni (Hoberg i ostali, 1999; Manouchehri, 2007), što je u skladu sa preporukom da finansijsko izdvajanje za napredno sortiranje ne bi trebalo da premaši iznos od 100 EUR/toni (CEC, 2007). Cena ručnog sortiranja frakcije crnih metala direktno zavisi od njenog materijalnog sastava. Ona može varirati između 1.25 i 1.33 EUR/toni u slučaju prosečnog kapaciteta sortiranja od 2325 tona po planskom periodu (Williams i ostali, 2007). Imajući u vidu da veći kapacitet procesa ručnog sortiranja zahteva upošljavanje većeg broja radnika, usvojen je iznos od 1.675 EUR/toni.

Skladište fabrike za reciklažu vozila je definisano preko 3 parametra. Ako se pretpostavi da su početne zalihe olupina vozila i nivo sigurnosnih zaliha jednaki, i da imaju vrednosti kao maksimalni dnevni kapacitet drobilice, dolazi se do iznosa od 800 tona. Sa druge strane, ako kapitalni trošak zaliha iznosi 0.48 %/nedelja (Williams i ostali, 2007), dobija se vrednost od 0.82 EUR/toni.

### 3.1.3.1.3. Cena odlaganja na deponiju

Na visinu izdataka za odlaganja ASR-a na deponije utiču cena odlaganja i vrednost opšte takse na aktivnosti zagađivanja. U Francuskoj, cena odlaganja i vrednost opšte takse na aktivnosti zagađivanja iznose 40-45 EUR/toni i 9.15 EUR/toni, respektivno (GHK/BioIS, 2006). U Danskoj je najavljeno dvo-etapno uvođenje takse na odlaganje ASR-a na deponije, tj. prvo će od 1. januara 2012. godine bazna cena od 26.67 EUR/toni biti uvećana na 50 EUR/toni (taksa od 21.33 EUR /oni), i konačno od 1. januara 2015. godine cena će iznositi 90 EUR/toni (taksa od 63.33 EUR/toni) (Moakley i ostali, 2010). Istovremeno, primetan je i kontinuirani rast cena odlaganja ASR-a na deponije u SAD-u, tj. od 23.5 EUR/toni (Isaacs i Gupta, 1997; Boon i ostali, 2001, 2003) i 36.2-43.4 EUR/toni (Kanari i ostali, 2003), do 53.4 EUR/toni (Bandivadekar i ostali, 2004).

Pri usvajanju referentne cene, mora se uzeti u obzir da ona zavisi od specifične gustine ASR-a, koja se određuje kao proizvod specifičnih gustina i udela svih otpadnih materijala koji ga čine. Na primer, za specifičnu gustinu od 300-350 kg/m<sup>3</sup> (Bandivadekar i ostali, 2004) cena može iznositi od 36.2 EUR/toni do 53.8 EUR/toni. Prema tome, ako odnos generalne specifične gustine prve frakcije nemetala (tabela P1.5), druge frakcije nemetala (tabela P1.6), obojenog miksa (tabela P1.7), OGPO frakcije (tabela P1.8) i izolovanih bakarnih žica iznosi 1:0.711:1.0118:0.7349:5.771<sup>15</sup>, tada se u razmatranje mogu uvesti sledeća 2 slučaja:

- *Slučaj 1* - niske cene odlaganja ASR-a. Ako se pretpostavi da cena odlaganja na deponiju prve frakcije nemetala iznosi 35 EUR/toni (GHK/BioIS, 2006; CEC, 2007; Hjelmars i ostali, 2009), tada će cene odlaganja druge frakcije nemetala, obojenog

---

<sup>15</sup> Odnosno, 1.276 t/m<sup>3</sup> : 0.908 t/m<sup>3</sup> : 1.291 t/m<sup>3</sup> : 0.938 t/m<sup>3</sup> : 7.364 t/m<sup>3</sup>

miksa, OGPO frakcije i izolovanih bakarnih žica biti 24.89 EUR/toni, 35.41 EUR/toni, 25.72 EUR/toni i 201.98 EUR/toni, respektivno.

- *Slučaj 2* - visoke cene odlaganja ASR-a. Ako se pretpostavi da cena odlaganja na deponiju prve frakcije nemetala iznosi 115 EUR/toni (GHK/BioIS, 2006; CEC, 2007; Hjelm i ostali, 2009), tada će cene odlaganja druge frakcije nemetala, obojenog miksa, OGPO frakcije i izolovanih bakarnih žica biti 81.78 EUR/toni, 116.36 EUR/toni, 84.51 EUR/toni i 663.66 EUR/toni, respektivno.

#### 3.1.3.1.4. Troškovi naručivanja i cene sortiranih metala

Cena olupina vozila tokom planskog horizonta ne treba biti posmatrana kao deterministička veličina, iako su je neki autori kao takvu posmatrali. Na primer, Isaacs i Gupta (1997) i Boon i ostali (2001, 2003) navode vrednost od 35.6 EUR/toni, dok Bandivadekar i ostali (2004) ističu vrednost 35.6-71.2 EUR/toni. Visina nadoknade koju evropska fabrika za reciklažu vozila isplaćuje za dekontaminiranu i presovanu olupinu vozila treba da zavisi od trenutnog stanja na berzama sekundarnih metala. S tim u vezi, Qu i Williams (2008) su uočili da cena olupine vozila predstavlja oko 50% cene otpadnih crnih metala. U ovoj numeričkoj studiji, cena olupine vozila je određena kao minimalna cena “auto-školjki” na onim berzama metala koje se njihovom trgovinom bave, tj. berze u Bostonu, Los Anđelesu, San Francisku, Filadelfiji i Njujorku (tabela 6).

**Tabela 6.** Cene olupina vozila i sortiranih metala od februara do marta 2011. godine (EUR/toni).

Datum	O olupina vozila	Crni metal	Al-bogata frakcija	Al frakcija	Cu-bogata frakcija	Izolovane bakarne žice
11/02/2011	171.02	327.78	1428.57	1714.28	2292.61	13,812.0
18/02/2011	171.02	327.78	1452.51	1743.01	2292.61	13,812.0
25/02/2011	171.02	327.78	1452.51	1743.01	2292.61	13,812.0
04/03/2011	171.02	327.78	1452.51	1743.01	2314.56	13,812.0

Prodajne cene sortiranih metala su određene na sledeći način (tabela 6):

- Cena crnih metala je određena kao prodajna cena za “crni izdrobljeni auto-otpad” sa berze metala u Birminghamu (AMM, 2011).
- Cena Al-bogate frakcije je određena kao cena za “oboјenu auto-frakciju (90% aluminijuma) za sekundarne topionice” (AMM, 2011).

- Uvedena je pretpostavka da je cena Al frakcije veća za 20% od cene Al-bogate frakcije, jer nju čini više od 99% otpadnog aluminijuma.
- Cena Cu-bogate frakcije je određena kao prosečna cena za “žuti mešani mesing, strugani bakarni otpad” na osnovu ponuda 14 američkih i 2 kanadska dilera metalima (AMM, 2011).
- Prema klasifikaciji koju je dao Institut industrija za reciklažu otpada (IIRO), frakcija izolovanih bakarnih žica nosi oznaku Druid, i njena cena se određuje na bazi individualnog sporazuma između kupca i prodavca (ISRI, 2009). U skladu sa tim, analizom potražnje u posmatranom planskom horizontu, kao ubedljivo najbolja je odabrana ponuda iz Kuvajta (Recycler’s World, 2011).

#### 3.1.3.1.5. Parametri postrojenja za napredni termalni tretman

Veoma korisne preglede velikog broja procesa za napredni termalni tretman dali su Nourreddine (2007) i Srogi (2008). Međutim, trenutno nema puno tehnologija koje su svoju praktičnu primenjivost dokazale i na industrijskom nivou. Analizom karakteristika većeg broja procesa za napredni termalni tretman (GHK/BioIS, 2006), kao moguće rešenje je izabrana TwinRec tehnologija. Štaviše, Vigano i ostali (2010) su potvrdili da ova tehnologija sekvencijalne gasifikacije i sagorevanja može postići zavidne energetske i ekološke performanse.

TwinRec je tehnologija za napredni termalni tretman otpadnih materijala, koju je razvila japanska kompanija Ebara. Ova kompanija je izgradila najveće na svetu postrojenje za gasifikaciju otpada u gradu Kuala Lumpur, Malezija, koje poseduje 5 procesnih linija i ima maksimalan kapacitet od 1500 tona otpada po danu (ili 62.5 tona/h) (Selinger i Steiner, 2004). Međutim, treba pomenuti da u Evropi trenutno ne postoje TwinRec postrojenja (Simić i Dimitrijević, 2012b). TwinRec tehnologija funkcioniše na atmosferskim uslovima, bez trošenja fosilnih goriva (osim pri njenom pokretanju) i kiseonika (Ignatenko i ostali, 2008). Projektovana je tako da može uspešno kombinovati reciklažu materijala i obnavljanje energije iz otpadnih tokova. TwinRec postrojenje za napredni termalni tretman je sposobno da preradi širok spektar otpadnih materijala, kao što su elektronski otpad, otpadna plastika, ostaci drobljenja, industrijski nusproizvodi, gradski otpad i sl. (Selinger i ostali, 2003b). Na primer, ASR može biti

bez ikakvih prepreka prerađen direktno, odnosno u formi u kojoj je dopremljen iz fabrika za reciklažu vozila. Primenom TwinRec tehnologije se može reciklirati 40% ASR-a (od čega 12.5% crnih i obojenih metala, i 27.5% gredevinskih materijala), a energetske obnoviti čak 50% ASR-a (Ando i ostali, 2002). Iako to praktično znači dostizanje stope obnavljanja od čak 98%, treba voditi računa o tome da obnavljanje energije ne pređe u Evropi dozvoljenih 10%.

Što se tiče potrebnih parametara modela, usvojeno je da reciklažna efikasnost iznosi 33%, a energetska efikasnost iznosi 52% (GHK/BioIS, 2006). Cena naprednog termalnog tretmana primarno zavisi od ugovorene količine i može iznositi između 90-250 EUR/toni (Selinger i ostali, 2003a) ili 120-200 EUR/toni (GHK/BioIS, 2006). Zbog toga su u razmatranje uzeti sledeći slučajevi:

- *Slučaj 1* - niska cena naprednog termalnog tretmana od 90 EUR/toni.
- *Slučaj 2* - visoka cena naprednog termalnog tretmana od 200 EUR/toni.

#### 3.1.3.1.6. Parametri spaljivaonica gradskog otpada

Cena spaljivanja može zavistiti od materijalnog sastava ASR-a, stepena razvijenosti mreže spaljivaonica gradskog otpada, troškova odlaganja generisanog pepela, cene proizvedene električne energije, i sl. Cena spaljivanja plastike, uključujući 11% polivinil hlorida (PVC), iznosi između 20-49 EUR/toni, sortiranog PVC-a neverovatnih 240-400 EUR/toni (Bellmann i Khare, 1999), a lake frakcije ASR-a između 140-190 EUR/toni (EPA, 2010). Cena spaljivanja otpada u Švajcarskoj se naplaćuje između 149-259 EUR/toni (CEC, 2007), a u Nemačkoj između 200-300 EUR/toni. U Danskoj je cena spaljivanja veoma niska, između 7-55 EUR/toni, jer u ovoj državi postoji veoma razvijena mreža spaljivaonica gradskog otpada (Moakley i ostali, 2010). Gesing (2004) je istakao da se spaljivanjem 1 tone ASR-a može proizvesti oko 30 GJ električne energije i generisati 0.3 tone pepela. Sa druge strane, neke studije prilikom analize izdovljivosti procesa sagorevanja u spaljivaonicama gradskog otpada koriste jedinstvenu cenu od 100 EUR/toni (CEC, 2007), neke cenovni interval od 30-250 EUR/toni (Lundqvist i ostali, 2010), a neke cenovne klase (Liljenroth, 2004). U ovoj numeričkoj studiji su analizirana sledeća dva slučaja:



- *Slučaj 1* - niska cena sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada od 80 EUR/toni.
- *Slučaj 2* - visoka cena sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada od 250 EUR/toni.

Prema novoj evropskoj Direktivi o otpadu (2008/98/EC), spaljivaonica gradskog otpada se može klasifikovati kao postrojenje za obnavljanje energije samo ukoliko njena energetska efikasnost nije manja od 60% ili 65% u slučaju njene izgradnje pre 1. januara 2009. godine ili posle 31. decembra 2008. godine, respektivno (EU, 2008). Prema tome, samo ukoliko je sagorevanje ASR-a realizovano u sertifikovanoj spaljivaonici gradskog otpada ta operacija može biti okarakterisana kao obnavljanje energije. Pošto su u svom radu Ciacci i ostali (2010) procenili da energetska efikasnost spaljivaonice gradskog otpada u slučaju sagorevanja mešavine ASR-a i gradskog otpada iznosi 75.96%, ta vrednost je u ovoj numeričkoj studiji korišćena prilikom izračunavanja efikasnosti obnavljanja i efikasnosti obnavljanja energije.

#### 3.1.3.1.7. Cena transporta

Cena transporta predstavlja veoma važan element u strukturi troškova fabrike za reciklažu vozila. Williams i ostali (2007) i Qu i Williams (2008) su pretpostavili sledeće iznose: laki obojeni metali (21.4 EUR/toni i 24.9 EUR/toni), teški obojeni metali (17.8 EUR/toni i 21.4 EUR/toni), crni metali (20.0 EUR/toni i 21.5 EUR/toni), i ASR (10.7 EUR/toni i 14.3 EUR/toni). U nekim studijama je korišćena jedinstvena cena transporta od 15 EUR/toni (CEC, 2007), dok je u drugim predložen interval očekivanih vrednosti od na primer, 10-15 EUR/toni, za slučaj transporta ASR-a (GHK/BioIS, 2006). U ovoj numeričkoj studiji, cena transporta je procenjena uzimajući u obzir generalne specifične gustine tovara koje treba transportovati (određene kao proizvod specifičnih gustina i udela svih materijala koji ih čine (tabele P1.1-P1.4 date u prilogu 1)), maksimalnu težinu i zapreminu po tovaru, i odgovarajuću dužinu transporta. Ukoliko se uvedu pretpostavke da maksimalna težina i zapremina po tovaru iznose 30 tona i 12 m<sup>3</sup>, respektivno, da se svi metali transportuju na jednake udaljenosti, i da cena po tovaru iznosi 500 EUR, tada su cene transporta crnih metala, lakih obojenih metala, aluminijuma i teških obojenih

metala međusobno jednake i iznose 16.67 EUR/toni<sup>16</sup>. Sa druge strane, ako se pretpostavi da se najbliža deponija i spaljivaonica gradskog otpada nalaze na dvostruko manjem rastojanju (tj. da cena po tovaru iznosi oko 250 EUR), tada cene transporta obojenog miksa, prve i druge frakcije nemetala, OGPO frakcije, i izolovanih bakarnih žica iznose 16.13 EUR/toni<sup>17</sup>, 16.32 EUR/toni<sup>18</sup>, 22.96 EUR/toni<sup>19</sup>, 22.21 EUR/toni<sup>20</sup>, i 8.33 EUR/toni<sup>21</sup>, respektivno.

Da bi minimizirali negativan ekološki uticaj procesa transporta, Ciacci i ostali (2010) su u svom radu pretpostavili da je TwinRec postrojenje udaljeno 5 km od fabrike za reciklažu vozila. Ako se ovakvo ekološko rešenje usvoji u ovoj numeričkoj studiji, tada se bez ikakvih nedoumica može pretpostaviti da cena transporta ASR miksa frakcije do postrojenja za napredni termalni tretman iznosi 10 EUR/toni (GHK/BioIS, 2006).

Izvoz izolovanih bakarnih žica u cilju njihove (ručne) reciklaže, pre svega u Indiju, Kinu, Rusiju, Kuvajt i sl. (Recycler's World, 2011), može obezbediti određenu finansijsku korist fabrici za reciklažu vozila. Međutim, prilikom donošenja odluke o izboru neke od ponuda, mora se ozbiljno voditi računa o segmentu transportnih troškova. Ako se u obzir uzme da se ugovori ove vrste najčešće potpisuju na (minimum) mesečnom nivou, kao i da interkontinentalni prevoz mora imati intermodalni karakter, tada se može pretpostaviti da cena transporta iznosi oko 100 EUR/toni.

---

<sup>16</sup> 16.67 EUR/toni=500 EUR/30 tona, jer se u svakom tovaru prevozi tačno po 30 tona ili crnih metala (zauzeto 3.81 m<sup>3</sup> tovarnog prostora) ili lakih obojenih metala (zauzeto 11.98 m<sup>3</sup> tovarnog prostora) ili aluminijuma (zauzeto 11.15 m<sup>3</sup> tovarnog prostora) ili teških obojenih (zauzeto 3.35 m<sup>3</sup> tovarnog prostora)

<sup>17</sup> 16.13 EUR/toni=250 EUR/15.495 tona, jer se zbog male generalne specifične gustine frakcije obojenog miksa (tabela P1.7) po tovaru može transportovati samo 15.495 tona (tovarni prostor pun)

<sup>18</sup> 16.32 EUR/toni=250 EUR/15.314 tona, jer se zbog male generalne specifične gustine prve frakcije nemetala (tabela P1.5) po tovaru može transportovati samo 15.314 tona (tovarni prostor pun)

<sup>19</sup> 22.96 EUR/toni=250 EUR/10.89 tona, jer se zbog male generalne specifične gustine druge frakcije nemetala (tabela P1.6) po tovaru može transportovati samo 10.89 tona (tovarni prostor pun)

<sup>20</sup> 22.21 EUR/toni=250 EUR/11.254 tona, jer se zbog male generalne specifične gustine frakcije organskih jedinjenja, gume, plastike i ostalih materijala (tabela P1.8) po tovaru može transportovati samo 11.254 tona (tovarni prostor pun)

<sup>21</sup> 8.33 EUR/toni=250 EUR/30 tona, jer se u svakom tovaru prevozi tačno po 30 tona izolovanih bakarnih žica čija generalna specifična gustina iznosi 7.364 t/m<sup>3</sup> (zauzeto 4.07 m<sup>3</sup> tovarnog prostora)

### 3.1.3.2. Opis scenarija

Evropskom direktivom o vozilima na kraju životnog ciklusa su propisane specifične kvote u pogledu ekološke efikasnosti koje sistem za reciklažu vozila mora da zadovolji, a da pri tome nije poklonjena pažnja činjenici da su pogoni za demontažu vozila, s jedne strane, i fabrike za reciklažu vozila, sa druge strane, potpuno nezavisni u svom poslovanju. Zbog toga se nameće pitanje *da li kontrolu efikasnosti treba sprovoditi na nivou podsistema ili sistema u celini*. Da bi na njega u ovoj disertaciji moglo biti odgovoreno, formirani su sledeći scenariji:

- *Scenario a - analiza efikasnosti reciklaže vozila na nivou podsistema*. Ovaj pristup dodatno umanjuje ionako nezavidnu fleksibilnost sistema za reciklažu vozila, jer uvodi 6 dodatnih ograničenja u odnosu na pojedine stope ekološke efikasnosti prerade (tj. po 3 za demontažne pogone i fabrike za reciklažu vozila).
- *Podscenario a-1 - važeće kvote* (važe od 1. januara 2006. godine). Fabrika za reciklažu vozila mora osigurati da stopa reciklaže i stopa obnavljanja ne budu manje od 80% i 85%, respektivno, kao i da stopa obnavljanja energije ne pređe 5% (tj.  $Q_R=80\%$ ,  $Q_{R'}=85\%$  i  $Q_E=5\%$ ).
- *Podscenario a-2 - buduće kvote* (stupaju na snagu 1. januara 2015. godine). Fabrika za reciklažu vozila mora osigurati da stope reciklaže i obnavljanja ne budu manje od 85% i 95%, respektivno, kao i da stopa obnavljanja energije ne pređe 10% (tj.  $Q_R=85\%$ ,  $Q_{R'}=95\%$  i  $Q_E=10\%$ ).
- *Scenario b - sistemski pristup* (tj. integracija sistema za reciklažu vozila). Ovaj pristup menja (osim u graničnom slučaju) pravne uslove poslovanja fabrike za reciklažu vozila, jer se ekološke kvote modifikuju u zavisnosti od ostvarene efikasnosti pogona za demontažu. Granični slučaj se javlja samo kada stope obnavljanja energije i odlaganja na deponije pogona za demontažu iznose tačno 5% i 15%, respektivno. U tom slučaju scenariji a-1 i b-1 se neće razlikovati. Kada je određena stopa podsistema za demontažu iznad ili ispod propisane sistemske vrednosti tada odgovarajuća kvota može biti relaksirana ili pooštrena, respektivno.
- *Podscenario b-1 - važeće kvote*. Poznato je da pogoni za demontažu u najvećoj meri spaljuju preumatike, velike plastične delove i istočene fluide (osim goriva). Imajući u vidu da je apsolutna stopa obnavljanja energije pogona za demontažu u

2008. godini iznosila 1.18%<sup>22</sup> (EDCW, 2010), za “novu” kvotu obnavljanja energije fabrike za reciklažu vozila se može usvojiti vrednost od  $Q_E=4.81\%$ <sup>23</sup>. Uvođenje rigoroznije energetske kvote je neizbežno, jer su pogoni za demontažu ostvarili relativnu stopu obnavljanja energije od 5.75%<sup>24</sup> i tako premašili granicu od 5%. Sa druge strane, ako se zna da je apsolutna stopa odlaganja na deponije pogona za demontažu u 2008. godini iznosila samo 0.29% (EDCW, 2010), za “novu”, u značajnoj meri relaksiranu kvotu obnavljanja fabrike za reciklažu vozila se može usvojiti vrednost od  $Q_{R'}=81.48\%$ <sup>25</sup>. Konačno, vrednost “nove” reciklažne kvote se određuje kao razlika  $Q_{R'}$  i  $Q_E$ , pa je  $Q_R=76.67\%$ .

- *Podscenario b-2 - buduće kvote.* Uzimajući u obzir prethodno pomenute apsolutne stope odlaganja na deponije i obnavljanja energije pogona za demontažu iz 2008. godine, dobijaju se kvote obnavljanja, obnavljanja energije i reciklaže od 94.07%<sup>26</sup>, 11.10%<sup>27</sup> i 82.97%, respektivno.

<sup>22</sup> *Apsolutna stopa obnavljanja energije pogona za demontažu=(Udeo obnavljanja energije\*Težina delova i komponenti ELV-a koji se rasklapaju u pogonima za demontažu)/Prosečna težina ELV-a=(0.0571\*195.37 kg)/949.38 kg=0.01175≈0.0118*

<sup>23</sup> *“Nova” važeća kvota obnavljanja energije fabrika za reciklažu vozila=(Važeća kvota obnavljanja energije prema EU ELV direktivi\*Prosečna težina ELV-a – Relativna stopa obnavljanja energije u pogonima za demontažu\*Prosečna težina delova i komponenti koji se rasklapaju u pogonima za demontažu)/Prosečna težina dekontaminirane i presovane olupine koja se prodaje fabrikama za reciklažu vozila=(0.05\*949.38 kg-0.0575\*195.37 kg)/754.01 kg=0.04807≈0.0481*

<sup>24</sup> Dato u uvodnom delu poglavlja 3.1.3.1

<sup>25</sup> *“Nova” važeća kvota obnavljanja fabrika za reciklažu vozila=(Važeća kvota obnavljanja prema EU ELV direktivi\*Prosečna težina ELV-a – (Prosečna težina delova i komponenti koji se rasklapaju u pogonima za demontažu – Apsolutna stopa odlaganja na deponije pogona za demontažu\*Prosečna težina ELV-a))/Prosečna težina dekontaminirane i presovane olupine koja se prodaje fabrikama za reciklažu vozila=(0.85\*949.38 kg–(195.37 kg–0.0029\*949.38 kg))/754.01 kg=0.814785≈0.8148*

<sup>26</sup> *“Nova” buduća kvota obnavljanja fabrika za reciklažu vozila=(Buduća kvota obnavljanja prema EU ELV direktivi\*Prosečna težina ELV-a – (Prosečna težina delova i komponenti koji se rasklapaju u pogonima za demontažu – Apsolutna stopa odlaganja na deponije pogona za demontažu\*Prosečna težina ELV-a))/Prosečna težina dekontaminirane i presovane olupine koja se prodaje fabrikama za reciklažu vozila=(0.95\*949.38 kg–(195.37 kg–0.0029\*949.38 kg))/754.01 kg=0.940696≈0.9407*

<sup>27</sup> *“Nova” buduća kvota obnavljanja energije fabrika za reciklažu vozila=(Buduća kvota obnavljanja energije prema EU ELV direktivi\*Prosečna težina ELV-a – Relativna stopa obnavljanja energije u pogonima za demontažu\*Prosečna težina delova i komponenti koji se rasklapaju u pogonima za demontažu)/Prosečna težina dekontaminirane i presovane olupine koja se prodaje fabrikama za reciklažu vozila=(0.10\*949.38 kg-0.0575\*195.37 kg)/754.01 kg=0.11101≈0.111*

### 3.1.3.3. Rezultati i diskusija

U ovom delu su dati rezultati testiranja predloženog modela na scenarijima od a-1 do b-2, i uslovima poslovanja koji se mogu javiti u pojedinim zemljama članicama EU (tj. pri niskim ili visokim cenama odlaganja na deponije, sagorevanja u spaljivaonicama gradskog otpada, i prerade u postrojenjima za napredni termalni tretman). Svi kreirani test problemi su optimalno rešeni primenom CPLEX 12.2 solvera na Toshiba Qosmio laptopu sa Intel Core i5-430M procesorom.

Izvršeno testiranje modela planiranja proizvodnje fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju je pokazalo da se u toku svakog planskog perioda naručuje tačno ona količina olupina koja je jednaka maksimalnom kapacitetu drobilice (4000 tona/nedelja), kao i da fabrike za reciklažu vozila teže da ostvare što je moguće veći kvantitet i viši kvalitet sortiranih metalnih tokova. Tako na primer, Al-bogata frakcija se uvek dodatno prečišćava, jer dodatni prihod uvek prevazilazi troškove njenog sortiranja i naknadnog manipulisanja OGPO frakcijom. Sa druge strane, mogućnost izvoza izolovanih bakarnih žica ima potpuni primat nad njihovim odlaganjem na deponiju.

Optimalni profiti i stope obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije za 32 analizirana test problema su dati u tabeli 7. Testiranje predloženog modela je dalo odgovor na pitanje koji to finansijski uslovi najviše pogoduju poslovanju fabrika za reciklažu vozila, posmatrano sa ekološkog aspekta. U slučaju važećih kvota, fabrika za reciklažu vozila će postizati najbolje ekološke rezultate pri visokoj ceni odlaganja na deponiju i niskoj ceni prerade u postrojenju za napredni termalni tretman. U oba analizirana pristupa, ostvarene stope reciklaže iznose po 83.96%, dok je u slučaju sistemskog pristupa stopa obnavljanja energije bila manja za 0.19% (usled relaksiranja ove kvote). Sa druge strane, najlošiji ekološki rezultat je zabeležen pri niskim cenama spaljivanja i odlaganja na deponiju, i visokoj ceni prerade u postrojenju za napredni termalni tretman, jer se tada obnavlja tačno onoliko materijala koliko je neophodno. Treba pomenuti da iako postoji više slučajeva kada je ostvarena stopa obnavljanja jednaka propisanoj kvoti obnavljanja, navedeni rezultat se smatra najlošijim zbog toga što je i ostvarena stopa reciklaže tada bila najmanja. U slučaju budućih kvota, najbolji ekološki rezultati se postižu pri visokoj ceni odlaganja na deponiju, i niskim cenama

spaljivanja i naprednog termalnog tretmana. U oba analizirana pristupa, ostvarene stope reciklaže iznose po 86.91%, dok je u slučaju sistemskog pristupa stopa obnavljanja energije bila nešto veća (usled relaksiranja ove kvote). Sa druge strane, najlošiji ekološki rezultat je zabeležen pri niskoj ceni spaljivanja i visokoj ceni prerade u postrojenju za napredni termalni tretman, jer se tada obnavlja i reciklira samo onoliko materijala koliko je neophodno. Što se tiče profita, on se nalazi u intervalu od 134.18 EUR/toni prerađenih olupina vozila (test problem 16) do 162.23 EUR/toni prerađenih olupina vozila (test problemi 17 i 19).

**Tabela 7.** Profiti i ekološke efiksanosti numeričke studije modela kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju.

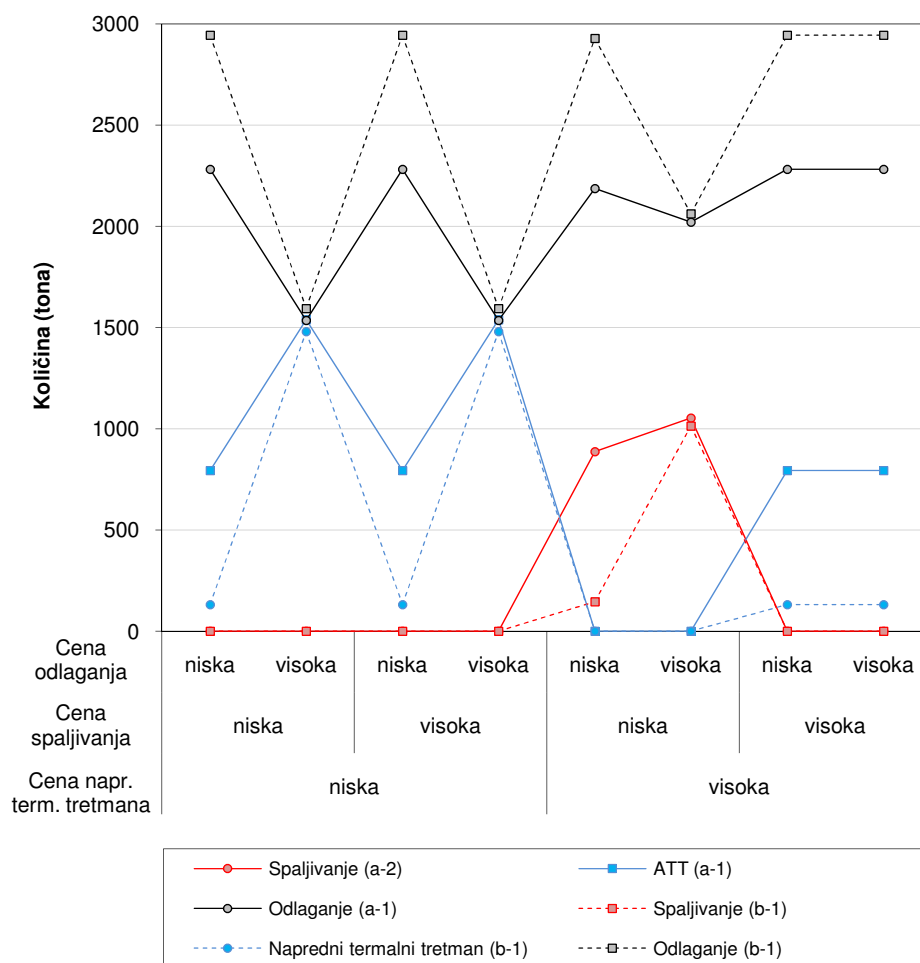
Test problem	Scenario	Pod-scenario	Cena naprednog termalnog tretmana	Cena sagorevanja	Cena odlaganja na deponiju	Profit (EUR)	Stopa reciklaže (%)	Stopa obnavljanja (%)	Stopa obnavljanja energije (%)
1	a	1	niska	niska	niska	2,562,219.75	82.42	85.0	2.58
2				visoka	visoka	2,435,785.20	83.96	88.96	5.0
3				niska	niska	2,562,219.75	82.42	85.0	2.58
4				visoka	visoka	2,435,785.20	83.96	88.96	5.0
5			visoka	niska	niska	2,553,273.60	80.79	85.0	4.21
6				visoka	visoka	2,419,306.58	80.79	85.79	5.0
7				niska	niska	2,474,944.93	82.42	85.0	2.58
8				visoka	visoka	2,344,978.81	82.42	85.0	2.58
9		2	niska	niska	niska	2,464,055.05	86.30	95.0	8.70
10				visoka	visoka	2,442,898.80	86.91	96.91	10.0
11				niska	niska	2,464,055.05	86.30	95.0	8.70
12				visoka	visoka	2,442,564.94	86.91	96.56	9.65
13			visoka	niska	niska	2,233,326.84	85.0	95.0	10.0
14				visoka	visoka	2,214,928.30	85.0	95.0	10.0
15				niska	niska	2,169,721.40	86.30	95.0	8.70
16				visoka	visoka	2,146,842.34	86.30	95.0	8.70
17	b	1	niska	niska	niska	2,595,746.03	81.05	81.48	0.43
18				visoka	visoka	2,435,508.09	83.84	88.65	4.81
19				niska	niska	2,595,746.03	81.05	81.48	0.43
20				visoka	visoka	2,435,508.09	83.84	88.65	4.81
21			visoka	niska	niska	2,594,134.52	80.79	81.48	0.69
22				visoka	visoka	2,419,235.34	80.79	85.60	4.81
23				niska	niska	2,581,355.91	81.05	81.48	0.43
24				visoka	visoka	2,406,850.73	81.05	81.48	0.43
25		2	niska	niska	niska	2,473,184.36	85.94	94.07	8.13
26				visoka	visoka	2,443,041.24	86.91	97.06	10.15
27				niska	niska	2,473,184.36	85.94	94.07	8.13
28				visoka	visoka	2,442,564.94	86.91	96.56	9.65
29			visoka	niska	niska	2,343,020.49	82.97	94.07	11.10
30				visoka	visoka	2,320,141.42	82.97	94.07	11.10
31				niska	niska	2,198,107.18	85.94	94.07	8.13
32				visoka	visoka	2,165,269.03	85.94	94.07	8.13

Naredni cilj testiranja predloženog modela je bilo ispitivanje pojedinačnog uticaja raspoloživih finansijskih instrumenata, tj. cene odlaganja na deponiju, cene sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada i cene naprednog termalnog tretmana:

- *Scenario a-1*: Sprovedeno testiranje je generalno potvrdilo stav da povećanje cena odlaganja na deponiju smanjuje količinu ASR-a koji se odlaže na deponije. Međutim, identifikovana je situacija kada ovaj značajan finansijski instrument neće promeniti planove fabrike za reciklažu vozila, tj. pri visokim cenama spaljivanja i naprednog termalnog tretmana odlaganje na deponiju maksimalne dozvoljene količine ASR-a uvek predstavlja finansijski optimalnu odluku (test problemi 7 i 8). Promena cene spaljivanja imaće efekta samo u slučaju visoke cene prerade u postrojenju za napredni termalni tretman (test problemi 5-8), dok se pri niskoj ceni naprednog termalnog tretmana, spaljivanje neće vršiti čak ni po niskoj ceni. Promena cene naprednog termalnog tretmana neće imati efekta kada su cene odlaganja na deponiju niske i cena spaljivanja visoka, jer je u tom slučaju čak i niska cena naprednog termalnog tretmana finansijski neprihvatljiva (slika 3).
- *Scenario b-1*: Implementiranje sistemskog pristupa će relaksirati važeće kvote reciklaže i obnavljanja za 3.33% i 3.52%, respektivno, ali neće proširiti domen uticaja prva dva finansijska instrumenta. Sa druge strane, jasno je da pooštavanje kvote obnavljanja energije za 0.19% neće povećati efikasnost promene cene spaljivanja, čiji uticaj je primetan samo u test problemima 21-24 (slika 3).
- *Scenario a-2*: Test problemi 9-16 reprezentuju važeći pristup za primenu druge faze zahteva EU ELV direktive. Najvažniji zaključak je da će samo u polovini analiziranih situacija povećanje cena odlaganja na deponiju doneti željeni efekat (test problemi 9-12), odnosno smanjiti ukupnu količinu ASR-a koji se odlaže na deponije. Ovakav rasplet nije neočekivan, jer smanjena mogućnost odlaganja na deponiju (tj. sa  $\leq 15\%$  na  $\leq 5\%$  prosečne težine vozila) sužava domen uticaja ovog finansijskog instrumenta. Štaviše, u svim test problemima se na deponije odlaže veća količina ASR-a indirektno (tj. posredstvom spaljivaona gradskog otpada i postrojenja za napredni termalni tretman) nego direktno. Cena spaljivanja postaje uticajni instrument, jer je dozvoljeno obnavljanje energije u značajnoj meri povećano (tj. sa  $\leq 5\%$  na  $\leq 10\%$  prosečne težine vozila). Ona neće imati uticaja samo kada su niske cene odlaganja na

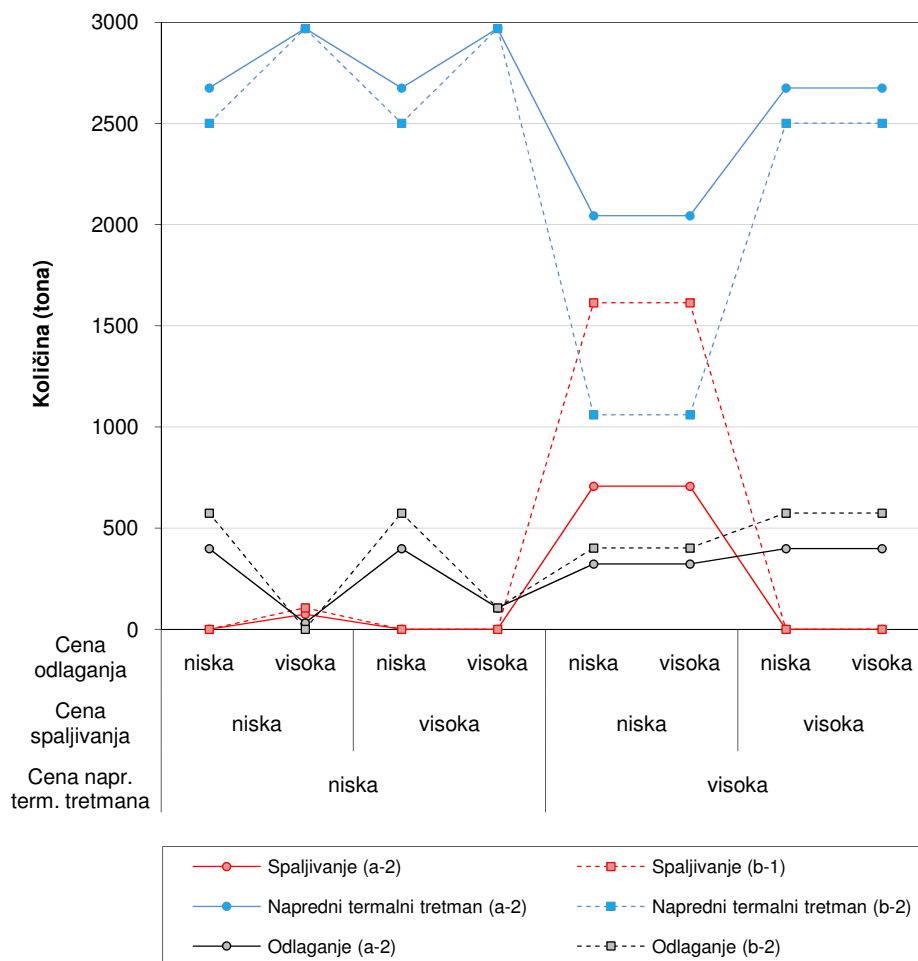
deponiju i naprednog termalnog tretmana (test problemi 9-11), jer tada spaljivanje neće biti konkurentno ni po nižoj ceni (slika 4).

- *Scenario b-2*: Implementiranje sistemskog pristupa će podići reciklažnu kvotu za čak 2.97%, dok će relaksirati buduće kvote obnavljanja i obnavljanja energije za 0.97% i 1.1%, respektivno. Sa druge strane, domeni uticaja pojedinih cena su identični onima u scenariju a-2 (slika 4).



**Slika 3.** Optimalne odluke modela planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju u slučaju važećih kvota.

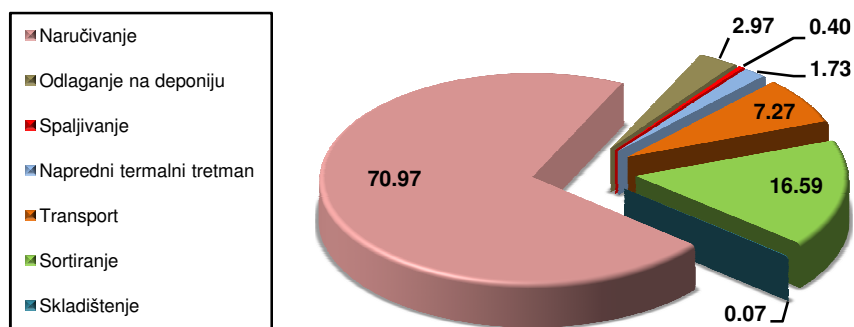




**Slika 4.** Optimalne odluke modela planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju u slučaju budućih kvota.

Na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila mogu uticati zakonska regulativa (definisanjem kvota za obnavljanje, reciklažu i obnavljanje energije) i važeći finansijski uslovi poslovanja. Zbog preglednosti dobijenih numeričkih rezultata grafički je prikazana samo struktura prosečnih troškova EU fabrike za reciklažu vozila.

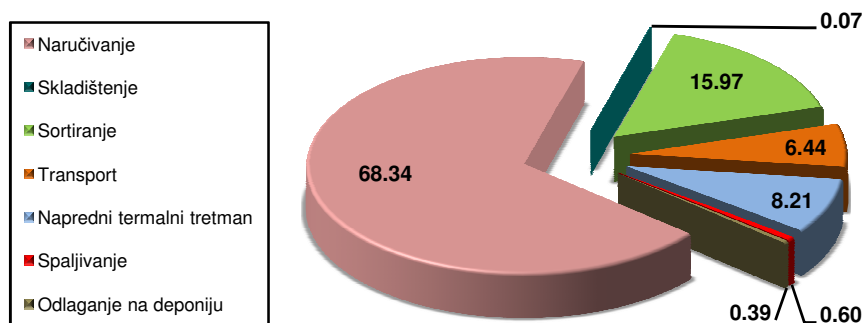
Posmatrajući prosečni udeo pojedinih kategorija troškova u slučaju test problema 1-8 i 17-24, koji predstavljaju dva moguća pristupa za primenu prve faze zahteva EU ELV direktive, može se primetiti da najznačajnije segmente čine naručivanje olupina vozila (70.97%), sortiranje (16.59%) i transport do optimalnih odredišta (7.27%) (slika 5).



**Slika 5.** Struktura prosečnih troškova EU fabrike za reciklažu vozila u slučaju važećih kvota (%).

Značaj ostalih kategorija često varira, osim u slučaju skladištenja koje uvek iznosi oko 0.07%. Udeo troškova odlaganja na deponiju se kreće od 1.47% (test problem 7) do 6.37% (test problem 24), kada se po visokoj ceni odlaže maksimalnih 2943.58 tona. Udeo troškova naprednog termalnog tretmana je najveći u slučaju test problema 7 (4.10%), jer se tada po visokoj ceni prerađuje 793.41 tona. Udeo troškova sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada je najveći u slučaju test problema 6 (2.14%), pošto se tada spaljuje maksimalnih 1053.19 tona.

Uvođenje novih, strožijih ekoloških kvota (test problemi 9-16 i 25-32) narušice postojeći i uspostaviti sledeći poredak dominantnih troškovnih segmenata: naručivanje olupina vozila (68.34%), sortiranje (15.97%), napredni termalni tretman (8.21%) i transport do optimalnih odredišta (6.44%) (slika 6). Udeo troškova odlaganja na deponiju je najmanji u slučaju test problema 26, kada nema direktnog odlaganja, a najveći u slučaju test problema 32 (1.13%), kada se po visokoj ceni na deponiju odlaže maksimalnih 573.69 tona. Sa druge strane, udeo troškova naprednog termalnog tretmana se kreće od 5.26% (test problem 30), kada se minimalnih 1059.38 tona prerađuje po niskoj ceni, do čak 12.81% (test problem 15), kada se po visokoj ceni prerađuje 2675.76 tona. Konačno, udeo troškova sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada je najveći u slučaju test problem 29 (3.22%), jer se tada spaljuje maksimalnih 1612.85 tona.



**Slika 6.** Struktura prosečnih troškova fabrike za reciklažu vozila u slučaju budućih kvota (%).

Prethodna analiza je jasno identifikovala da na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila utiču zakonska regulativa i finansijski uslovi poslovanja. Pored njih, na cene i udele reciklažnih parametara može uticati i tehnološki razvoj. Ovaj uticaj se može posmatrati sa više aspekata, od kojih se kao najvažniji mogu navesti (Simić i Dimitrijević, 2012b):

- Razvoj novih primena ASR-a.
- Razvoj novih tehnologija fizičkog sortiranja.

Što se tiče razvoja novih primena ASR-a, treba pomenuti da on može biti korišćen kao: agregat u proizvodnji asfalta za auto-puteve i avio-piste (Forton i ostali, 2006; Vermeulen i ostali, 2011), mineralni dodatak u proizvodnji cementa (Rossetti i ostali, 2006; Forton i ostali, 2006; Boughton, 2007; Mancini i ostali, 2010; Vermeulen i ostali, 2011), sirovina za izradu kućišta i poklopaca (Nourreddine, 2007; Vermeulen i ostali, 2011), alternativno gorivo u železarama (Srogi, 2008; Vermeulen i ostali, 2011) i sekundarno gorivo u industriji cementa (Boughton i Horvath, 2006; Forton i ostali, 2006; Gomes, 2006; Boughton, 2007; Srogi, 2008; Mancini i ostali, 2010; Vermeulen i ostali, 2011). Prema tome, razvoj novih primena ASR-a može imati veoma pozitivan uticaj na poslovanje fabrike za reciklažu vozila, jer on pruža velike mogućnosti za smanjivanje troškova odlaganja na deponiju. Međutim, ne bi trebalo očekivati bitnije promene udela najvažnijih cenovnih parametara (tj. naručivanja i sortiranja). Sa druge strane, udeo i iznos troškova transporta će porasti, pri čemu će pomenuti rast u najvećoj meri zavisiti od udaljenosti novih odredišta. Generalno gledano, razvoj novih mogućnosti za primenu pojedinih ASR frakcija čini ekološke kvote lakše dostižnim, pa

je smanjivanje udela troškova naprednog termalnog tretmana, sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada i odlaganja na deponiju sasvim očekivano. Takođe, treba posebno biti obazriv u slučaju onih primena koje podrazumevaju obnavljanje energije, jer je ograničenje koje je propisala EU ELV direktiva veoma strogo po tom pitanju.

Što se tiče razvoja novih tehnologija fizičkog sortiranja, treba reći da instaliranje nove opreme za sortiranje u fabrici za reciklažu vozila može povećati udeo i iznos troškova sortiranja, ali i povećati stopu reciklaže. Sa druge strane, smanjivanje količine generisanog ASR-a može sniziti udele troškova transporta, naprednog termalnog tretmana, sagorevanja u spaljivaonici gradskog otpada i odlaganja na deponiju.

### **3.2. Model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila**

U poslednjih desetak godina je sve izraženiji trend promene materijalnog sastava vozila supstituisanjem crnih metala aluminijumom i/ili kompozitornim materijalima (Cheah, 2010). Ako se ima u vidu da su fabrike za reciklažu vozila projektovane tako da što efikasnije prerade tradicionalna čelično intenzivna vozila (Simić i Dimitrijević, 2013a), jasna je potreba za sprovođenjem analize uticaja promene dizajna vozila na poslovanje evropskih fabrika za reciklažu vozila. Sa druge strane, evropska direktiva o vozilima na kraju životnog ciklusa je iz korena promenila višedecenijsku poslovnu filozofiju evropskog sistema za reciklažu vozila, koji je tradicionalno bio isključivo profitno orijentisan. Evropske fabrike za reciklažu vozila, kao dominantni učesnici sistema za reciklažu vozila, posebno su pogođene primenom EU ELV direktive. Štaviše, potrebna je potpuna transformacija njihovog proizvodnog procesa, kako bi one mogle uspešno da odgovore na propisane kvote ekološke efikasnosti (Simić i Dimitrijević, 2011a). Pomenute kvote predstavljaju najvažniji, ali i najdiskutabilniji segment EU ELV direktive, pa se analiza njihovog trenutnog i budućeg uticaja na poslovanje evropskih fabrika za reciklažu vozila nameće kao neophodnost. Prema tome, potrebna višemilionska ulaganja evropskih fabrika za reciklažu vozila u nabavku savremene opreme za sortiranje se mogu smatrati opravdanim samo ako se na sledeća pitanja mogu dobiti prihvatljivi odgovori:

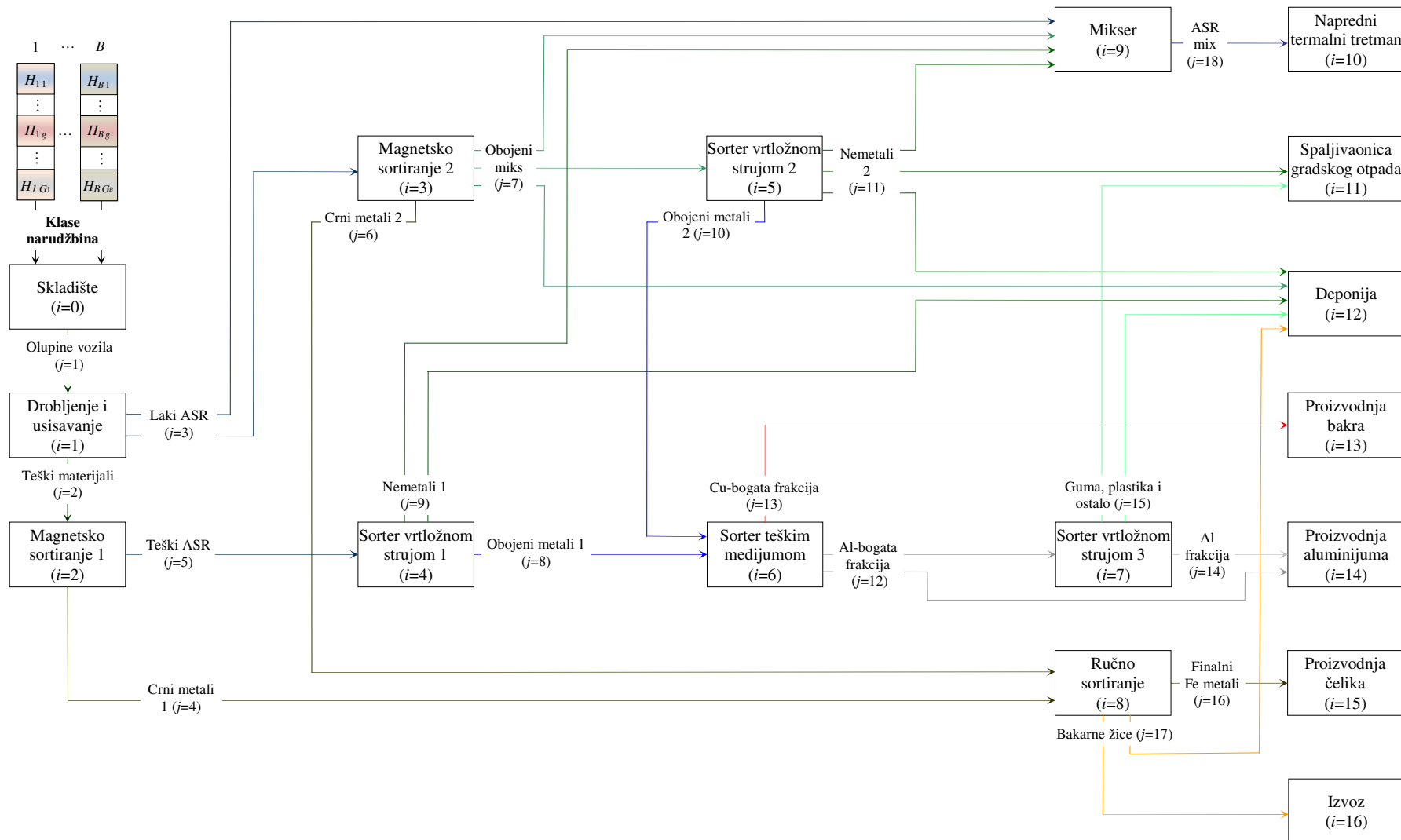
- Da li savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila mogu posloovati profitabilno?

- Kako će započeta promena u dizajnu vozila uticati na poslovanje fabrika za reciklažu vozila?
- Da li su dostižne propisane kvote ekološke efikasnosti?

Kako bi se dobili odgovori na ova veoma aktuelna pitanja, prvo je razvijen model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila, a zatim je on testiran na realnim podacima. Na osnovu svega toga je dat stav o investicionoj opravdanosti, ali i validnosti zahteva propisanih EU ELV direktivom.

Prema tome, u narednom delu ove disertacije biće prezentovan model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila. On je razvijen tako što je problem izbora materijala uključen u model planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju (koji je detaljno opisan u poglavlju 3.1). Prema tome, predloženi model se bavi problemima taktičkog planiranja prerade i izbora materijala (tj. vrsta olupina vozila) koji se naručuju u EU sistemu za reciklažu vozila. Model je formulisan kao linearni program, koji donosi optimalne odluke o naručivanju, skladištenju, sortiranju, reciklaži, naprednom termalnom tretmanu, sagorevanju u spaljivaonici gradskog otpada i odlaganju na deponiju.

Dijagram toka materijala u evropskom sistemu za reciklažu vozila i *dostupne klase narudžbina olupina vozila* su prikazani na slici 7. Pomenuti dijagram toka materijala obuhvata izuzetno širok spektar reciklažnih procesa, počev od drobljenja olupine pa sve do proizvodnje metala, i prema tome precizno oslikava konfiguraciju savremene evropske fabrike za reciklažu vozila. Kao što se može videti sa slike 7, evropskoj fabrici za reciklažu vozila je dostupno više klasa narudžbina, pri čemu u svakoj od njih može biti prisutno više od jednog tipa olupina vozila. Imajući u vidu da svaki tip olupine vozila karakteriše specifičan materijalni sastav, očigledno je da će generalni materijalni sastav svake od dostupnih klasa narudžbina isključivo zavisiti od veličine udela njoj pripadajućih tipova olupina (slika 7). Detaljan opis dijagrama toka materijala u EU fabrici za reciklažu vozila je dat u poglavlju 3.1.



Slika 7. Dijagram toka izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila.

### 3.2.1. Notacija modela

U modelu izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila je korišćena sledeća notacija.

#### Indeksi i skupovi

$t$	indeks vremenskog perioda; $t \in \{1, \dots, T\}$
J	skup materijala
B	skup klasa olupina vozila
$G_b, b \in B$	skup tipova olupina vozila u klasi $b$
S	skup skladišta
M	skup miksera
R	skup sortera (tj. drobilica, oprema za sortiranje i procesi ručnog sortiranja)
F	skup odredišta koja vrše reciklažu materijala (tj. postrojenja za napredni termalni tretman)
D	skup odredišta koja vrše obnavljanje energije (tj. postrojenja za napredni termalni tretman i spaljivaonica)
P	skup proizvođača raznovrsnih metala u zemlji članici EU ili inostranstvu
L	skup deponija
$O = F \cup D \cup L \cup P$	skup odredišta (tj. postrojenje za napredni termalni tretman, spaljivaonica, deponije i proizvođači raznovrsnih metala)
$N = S \cup M \cup R \cup O$	skup entiteta (tj. drobilica, oprema za sortiranje, procesi ručnog sortiranja, skladišta, mikseri i odredišta)
$A \subseteq \{(i, j)   i \in N, j \in N\}$	skup materijalnih tokova

$\Gamma_i = \{j   (i, j) \in A\}, i \in N$	skup entiteta koji slede $i$ -ti entitet
$\Gamma_j^{-1} = \{i   (i, j) \in A\}, j \in N$	skup entiteta koji prethode $j$ -tom entitetu
$g_{ij} \in J$	materijal na toku $(i, j)$ (atribut toka)
$K_i, K_i \subset J, i \in R$	skup materijala izolovanih $i$ -tim entitetom sortiranja
$\Psi_{ik} = \{j   j \in \Gamma_i, g_{ij} = k\}, i \in R, k \in K_i$	skup entiteta na koje je materijal $k$ prosleđen sa entiteta $i$

### *Parametri*

$T$	broj analiziranih vremenskih perioda
$\Pi_{bgi0}, b \in B, g \in G_b, i \in S$	težina početnih zaliha olupina vozila klase $b$ i tipa $g$ u skladištu $i$
$W_{min}$	nivo sigurnosnih zaliha
$\Lambda$	trajanje planskog perioda u vremenskim jedinicama
$V_{bgj}, b \in B, g \in G_b, j \in R$	brzina sortiranja u slučaju entiteta $j$ , (materijala iz) olupine vozila klase $b$ i tipa $g$
$E_{bgik}, b \in B, g \in G_b, i \in R, k \in K_i$	efikasnost entiteta sortiranja $i$ u slučaju materijala $k$ izolovanog iz klase $b$ i tipa $g$ olupina vozila u procentima
$E_j^R, j \in F$	reciklažna efikasnost odredišta $j$ u procentima
$E_j^E, j \in D$	energetska efikasnost odredišta $j$ u procentima
$Q_R$	reciklažna kvota
$Q_{R'}$	kvota obnavljanja (tj. reciklaže i obnavljanja energije)



$Q_E$	kvota obnavljanja energije
$R_{ijt}, j \in P, i \in \Gamma_j^{-1}$	prihod po jedinici težine od prodaje metala sortiranih entitetom $i$ proizvođaču metala $j$ u vremenskom periodu $t$
$C_{bgt}^P, b \in B, g \in G_b$	cena po jedinici težine naručenih olupina vozila klase $b$ i tipa $g$ u vremenskom periodu $t$
$H_{bgt}, b \in B, g \in G_b$	udeo $g$ tipa u narudžbini $b$ klase olupina vozila primljenoj tokom vremenskog perioda $t$ u procentima
$Z_{bgt}, b \in B, g \in G_b$	kapitalni trošak zaliha u slučaju klase $b$ i tipa $g$ olupina vozila, i vremenskog perioda $t$ u procentima
$C_{bgj}^S, b \in B, g \in G_b, j \in R$	cena sortiranja po jedinici težine u slučaju entiteta $j$ , (materijala iz) olupine vozila klase $b$ i tipa $g$
$C_j^A, j \in D$	cena (naprednog) termalnog tretmana u odredišnom postrojenju $j$ po jedinici težine
$C_{bgij}^T, b \in B, g \in G_b, j \in O, i \in \Gamma_j^{-1}$	cena transporta po jedinici težine od entiteta $i$ do odredišta $j$ u slučaju reciklaže olupine vozila klase $b$ i tipa $g$
$C_{ij}^L, b \in B, g \in G_b, j \in L, i \in \Gamma_j^{-1}$	cena odlaganja po jedinici težine na deponiju $j$ otpadnog materijala iz olupina vozila klase $b$ i tipa $g$ sortiranog na entitetu $i$

*Promenljive*

$W_{bgit}, b \in B, g \in G_b, i \in S, t \in \{0, 1, \dots, T\}$	težina olupina vozila klase $b$ i tipa $g$ koje se na kraju vremenskog perioda $t$ nalaze u skladištu $i$
---	---

$P_{bit}, b \in B, i \in S$	težina olupina vozila klase $b$ istovarenih u skladište $i$ u vremenskom periodu $t$
$X_{bgijt}, b \in B, g \in G_b, i \in N \setminus O, j \in \Gamma_i$	težina materijala izolovanog iz klase $b$ i tipa $g$ olupina vozila, prosleđenog od entiteta $i$ do entiteta $j$ u vremenskom periodu $t$

### 3.2.2. Formulacija modela

Predloženi model se bavi problemom taktičkog planiranja proizvodnje i izbora materijala (tj. vrsta olupina) koji se naručuju u evropskom sistemu za reciklažu vozila. Njegov cilj je da maksimizira profit koji je ostvaren tokom planskog horizonta. Formulirani model donosi optimalne odluke o naručivanju, skladištenju, sortiranju, reciklaži, naprednom termalnom tretmanu, sagorevanju u spaljivaonici gradskog otpada i odlaganju na deponiju. Na osnovu notacije izložene u poglavlju 3.2.1, problem može biti formulisan kao model linearnog programiranja.

$$\begin{aligned}
\text{Max} \quad & \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} R_{ijt} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} X_{bgijt} - \sum_{b \in B} \sum_{i \in S} P_{bit} \sum_{g \in G_b} C_{bgt}^P H_{bgt} \right. \\
& - \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} Z_{bgt} C_{bgt}^P \sum_{i \in S} W_{bgit} - \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{j \in R} C_{bgj}^S \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} \\
& - \sum_{j \in D} C_j^A \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} - \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{j \in O} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} C_{bgij}^T X_{bgijt} \\
& \left. - \sum_{j \in L} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} C_{bgij}^L X_{bgijt} \right] \tag{13}
\end{aligned}$$

pri ograničenjima:

$$W_{bgit} = P_{bit} + W_{bgit-1} - \sum_{j \in \Gamma_i} X_{bgijt}, \quad \forall b \in B; \forall g \in G_b; \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \tag{14}$$

$$W_{bgi0} = \Pi_{bgi0}, \quad \forall b \in B; \forall g \in G_b; \forall i \in S \tag{15}$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in S} W_{bgit} \geq W_{min}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (16)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} \frac{X_{bgijt}}{V_{bgj}} \leq \Lambda, \quad j \in R; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (17)$$

$$\sum_{j \in \Psi_{ik}} X_{bgijt} = E_{bgik} \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} X_{bgijt}, \quad \forall b \in B; \forall g \in G_b; \forall i \in R; \forall k \in K_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (18)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in F} X_{bgijt} = \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt}, \quad \forall j \in M; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} + \sum_{j \in F} E_j^R \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} \\ & \geq Q_R \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{bgijt}, \end{aligned} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} + \sum_{j \in F} E_j^R \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} \\ & + \sum_{j \in D} E_j^E \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} \geq Q_{R'} \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{bgijt}, \end{aligned} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (21)$$

$$\sum_{j \in D} E_j^E \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{bgijt} \leq Q_E \sum_{b \in B} \sum_{g \in G_b} \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{bgijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (22)$$

$$P_{bit} \geq 0, \quad \forall b \in B; \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (23)$$

$$W_{bgit} \geq 0, \quad \forall b \in B; \forall g \in G_b; \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (24)$$

$$X_{bgijt} \geq 0, \quad \forall b \in B; \forall g \in G_b; \forall i \in N \cup O; \forall j \in \Gamma_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (25)$$

U kriterijumskoj funkciji (13), prvi deo predstavlja prihod ostvaren od prodaje sortiranih metala, drugi deo definiše troškove naručivanja pojedinih klasa olupina vozila, treći deo se odnosi na troškove skladištenja, četvrti deo izračunava troškove drobljenja i sortiranja, peti deo se odnosi na troškove (naprednog) termalnog tretmana izolovanih otpadnih materijala, šesti deo se odnosi na troškove transporta do finalnih odredišta, i poslednji deo izračunava troškove odlaganja na deponije.

Ograničenja (14) se odnose na bilans zaliha pojedinih tipova olupina vozila. Ograničenja (15) definišu vrednosti nivoa početnih zaliha pojedinih tipova olupina vozila. Ograničenja (16) obezbeđuju poštovanje propisanog nivoa sigurnosnih zaliha.

Jednačine (17) predstavljaju kapacitivna ograničenja raspoloživih entiteta sortiranja, a ograničenja (18) održavaju njihov materijalni bilans. Operacije mešanja su opisane ograničenjima (19). Ograničenja (20)-(22) reprezentuju specifične ekološke kvote, koje su propisane u EU ELV direktivi. Njihov detaljan opis je dat u poglavlju 3.1.2. Ekološka efikasnost je u predloženom modelu računata po ISO 22628 standardima, a karakter svih operacija je određen na osnovu referentnih definicija iz nove EU direktive o otpadu (2008/98/EC). Konačno, ograničenja (23)-(25) definišu vrednosne domene promenljivih odlučivanja.

### **3.2.3. Numerička studija**

Da bi se odgovorilo na pitanja postavljena u uvodnom delu poglavlja 3.2, ispitani su sledeći scenariji:

- *Scenario 1 - važeće kvote* (važe od 1. januara 2006. godine). Fabrika za reciklažu vozila mora garantovati da stope reciklaže i obnavljanja neće pasti ispod 80% i 85%, respektivno, kao i da stopa obnavljanja energije neće preći 5% (EU, 2000).
- *Scenario 2 - buduće kvote* (stupaju na snagu 1. januara 2015. godine). Fabrika za reciklažu vozila mora garantovati da stope reciklaže i obnavljanja neće pasti ispod 85% i 95%, respektivno, kao i da stopa obnavljanja energije neće preći 10% (EU, 2000).

EU direktiva o vozilima na kraju životnog ciklusa pokriva vozila klase  $M_1$  (vozila koja su namenjena prevozu putnika i nemaju više od 8 sedišta bez sedišta vozača) i klase  $N_1$  (vozila koja su namenjena transportu robe i maksimalna masa im ne prelazi 3.5 tone), kao i vozila na tri točka (EU, 2000). U ovoj numeričkoj studiji su analizirana 2 dominantna tipa vozila iz klasa  $M_1$  i  $N_1$ : čelično intenzivna (ČI) i aluminijumsko intenzivna (AI). Prema tome, posmatran je specijalan slučaj uticaja promene dizajna vozila na poslovanje fabrika za reciklažu vozila, odnosno uticaj smanjenja težine vozila supstituisanjem crnih metala aluminijumom. Zbog toga je u okviru navedenih scenarija formiran po 121 test problem, tako što je udeo čeličnog intenzivnog tipa olupina vozila u svakoj od navedenih klasa narudžbina variran u intervalu od 0-100% sa korakom od 10%.

### 3.2.3.1. Sakupljanje podataka

U ovom delu su predstavljeni podaci koji su korišćeni u numeričkoj studiji modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila. Kako bi poređenje podataka iz različitih izvora bilo moguće, sve cene su konvertovane u evre na bazi Rojtersovih kvota od 16. maja 2011. godine, tj. 1 EUR = 1.4167 USD (Reuters, 2011) i (metrična) tona je izabrana sa jedinicu mase.

Za potrebe ilustrovanja problema izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila važno je prvo ustanoviti materijalne sastave tipičnih dekontaminiranih i presovanih tipova olupina koje pogoni za demontažu prodaju evropskim fabrikama za reciklažu vozila, a zatim što preciznije moguće definisati njihove “generičke ekvivalente”. Pored toga, u obzir moraju biti uzeti i podaci o tome šta se od delova i komponenti pojedinih tipova vozila na kraju životnog ciklusa, i u kom obimu rasklapa u pogonima za demontažu (EU, 2000; EDCW, 2011), kao i njihovi materijalni sastavi (IDIS, 2011). Liste materijala svih tipova olupina vozila analiziranih u ovoj numeričkoj studiji su priložene u tabeli 8.

**Tabela 8.** Materijalni sastav analiziranih tipova olupina vozila (%).

Klasa	Tip	Materijal										
		Gvožđe	Nerđajući čelik	Čelik (ostalo)	Aluminijum	Bakar	Mesing	Magnezijum	Cink	Plastika	Guma	Ostalo
M <sub>1</sub>	ČI <sup>a</sup>	11.64	1.64	60.09	8.31	1.47	0.26	0.22	0.27	9.77	2.66	3.66
	AI <sup>b</sup>	11.00	1.37	50.43	17.22	0.88	0.10	0.09	0.31	12.50	1.16	4.94
N <sub>1</sub>	ČI <sup>c</sup>	11.44	1.88	61.40	9.69	1.44	0.13	0.14	0.50	7.06	1.89	4.44
	AI <sup>d</sup>	6.82	1.83	54.07	17.50	1.38	0.15	0.14	0.48	11.43	1.83	4.36

<sup>a</sup> Procenjeno na osnovu podataka iz studija Cheah i ostali (2007) i Jody i ostali (2010)

<sup>b</sup> Prema podacima u Jody i ostali (2010)

<sup>c</sup> Procenjeno na osnovu podataka u Cheah i ostali (2007) i Davis i ostali (2010)

<sup>d</sup> Usvojeno iz studije Cheah i ostali (2007)

Efikasnosti svih entiteta sortiranja prikazanih na slici 7 su dobijene korišćenjem simulatora Post-fragmentation separation model (SMART, 2006; Coates i Rahimifard, 2009) (tabela 9). Pored toga, materijalni sastavi lake i teške ASR frakcije su u skladu sa preporukama iz studije Phelan i ostali (2010).

**Tabela 9.** Efikasnost entiteta sortiranja  $i$  u slučaju materijalnog toka  $j$  iz olupine klase  $f$  i tipa  $g$  (%).

$i$	1		2		3		4		5		6		7		8			
$j$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
$f$	1	1	79.75	20.25	91.03	8.97	4.67	95.33	51.18	48.82	36.47	63.53	85.04	14.96	93.99	6.01	99.67	0.33
		2	72.81	27.19	85.48	14.52	2.95	97.05	63.39	36.61	46.30	53.70	94.80	5.20	96.51	3.49	99.56	0.44
	2	1	80.64	19.36	91.55	8.45	5.17	94.83	60.26	39.74	42.51	57.49	86.47	13.53	95.57	4.43	99.77	0.23
		2	72.79	27.21	85.23	14.77	3.11	96.89	64.79	35.21	48.76	51.24	92.17	7.83	96.72	3.28	99.59	0.41

Za potrebe testiranja predloženog modela izbora materijala u sistemu za reciklažu vozila, kreiran je jednomesečni plan proizvodnje, koji obuhvata 4 planska perioda u trajanju od po nedelju dana ili 50 radnih časova. Imajući u vidu da je analizirani proces sortiranja materijalnih tokova kontinualan (slika 7), brzine magnetskih sortera, procesa ručnog sortiranja i sortera teškim medijumom se mogu izračunati na osnovu materijalnih sastava analiziranih tipova olupina vozila iz klasa  $M_1$  i  $N_1$  (tabela 8), i pretpostavljenih brzina drobilice i sortera vrtložnom strujom. Dobljene vrednosti su date u tabeli 10.

**Tabela 10.** Brzina i cena sortiranja u slučaju entiteta  $i$ , klase olupine vozila  $f$  i tipa  $g$ .

$i$	1		2		3		4		5		6		7		8		
$f$	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
$g$	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Brzina sortiranja (tona/h)	71.2 <sup>a</sup>	56.78	51.84	57.42	51.83	56.78	51.84	57.42	51.83	24.6 <sup>b</sup>	24.6	24.6	24.6	57.46	52.41	58.13	52.43
Cena sortiranja (EUR/toni)	59.85 <sup>c</sup>	3.77 <sup>d</sup>	4.13	3.73	4.13	3.77	4.13	3.73	4.13	2.50	2.50	73.94 <sup>e</sup>	2.50	1.53	1.68	1.51	1.68

<sup>a</sup> Prema specifikacijama datim u brošuri Harris shredders (2009) za model HS80115 od 2000 ks

<sup>b</sup> Usvojeno iz rada Williams i ostali (2007)

<sup>c</sup> Izračunato kao prosečna vrednost iz studije GHK/BioIS (2006)

<sup>d</sup> Prema podacima iz prodajnog kataloga (MAS Magnetics, 2011) i usvojenoj brzini sortiranja

<sup>e</sup> Na osnovu troškova datih u studiji Manouchehri (2007), pretpostavke da vreme povraćaja investicije iznosi 4 godine i usvojenoj brzini sortiranja

Proces prodaje sortiranih metala je definisan na osnovu sledećih pretpostavki: 1. Cena finalnog toka crnih metala je određena kao prodajna cena za “crni izdrobljeni auto-otpad” sa berze metala u Birminghamu (AMM, 2011); 2. Cena Al-bogate frakcije je određena kao cena za “obojenu auto-frakciju (90% aluminijuma) za sekundarne topionice” (AMM, 2011); 3. Cena Al frakcije je veća za 10% od cene Al-bogate frakcije; 4. Cena Cu-bogate frakcije je određena kao maksimalna cena za “žuti mešani mesing, strugani bakarni otpad” na osnovu ponuda 13 američkih i 2 kanadska dilera

metalima (AMM, 2011); i 5. Cena frakcije izolovanih bakarnih žica je određena na osnovu individualnog prodajnog sporazuma za analizirani planski horizont (Recycler's World, 2011). Izračunate vrednosti su date u tabeli 11.

**Tabela 11.** Cene sortiranih metala od aprila do maja 2011. godine (EUR/toni).

Datum	Crni metal	Al-bogata frakcija	Al frakcija	Cu-bogata frakcija	Izolovane bakarne žice
29/04/2011	318.45	1434.43	1577.87	2432.74	1628.27
06/05/2011	312.92	1412.72	1553.99	2432.74	
13/05/2011	304.61	1377.05	1514.75	2432.74	
20/05/2011	304.61	1372.40	1509.64	2432.74	

Cene dekontaminiranih i presovanih olupina vozila isključivo zavise od njihovog materijalnog sastava i trenutnog stanja na berzama sekundarnih metala. U ovoj numeričkoj studiji cene olupina vozila su određene u postupku koji se sastoji iz 3 koraka. U prvom koraku su za svaki planski period određeni odnosi vrednosti analiziranih tipova olupina vozila na bazi definisanih materijalnih sastava (tabela 8) i sledećih pretpostavki:

- Udeli gvožđa, nerđajućeg i drugih vrsta čelika se agregiraju, a za cenu dobijene mešavine metala usvaja prodajna cena finalnog toka crnih metala.
- Cena aluminijuma je jednaka prodajnoj ceni Al frakcije.
- Udeli bakra i mesinga se agregiraju, a za cenu dobijene mešavine obojenih metala usvaja prodajna cena Cu-bogate frakcije.
- Cena magnezijuma se određuje na osnovu vrednosti otpadnog magnezijuma (Recycler's World, 2011).
- Cena cinka se određuje kao cena za “stari cink (čist) za sekundarne topionice” (AMM, 2011).
- Udeli plastike, gume i drugih otpadnih materijala se agregiraju, a za cenu dobijene mešavine otpada usvaja vrednost iz studija GHK/BioIS (2006) i CEC (2007).

U drugom koraku je cena kategorije  $M_1$ -ČI određena kao minimalna cena za “auto-školjke” sa 5 američkih berzi metala (AMM, 2011). Imajući u vidu da  $M_1$ -ČI kategorija vozila i dalje dominira svetskom flotom (Davis i ostali, 2012), njena cena je korišćena kao bazna za određivanje vrednosti preostalih kategorija olupina vozila.

U posljednjem koraku, cene preostalih kategorija olupina vozila su izračunate množenjem bazne vrednosti i odgovarajućeg vrednosnog odnosa. Cene olupina vozila određene opisanim postupkom su priložene u tabeli 12.

**Tabela 12.** Cene olupina vozila od aprila do maja 2011. godine (EUR/toni).

Klasa		M <sub>1</sub>		N <sub>1</sub>	
Tip		ČI	AI	ČI	AI
Datum	29/04/2011	159.23	193.00	169.03	201.13
	06/05/2011	157.84	191.21	167.54	199.37
	13/05/2011	152.30	184.24	161.63	192.27
	20/05/2011	152.30	184.10	161.61	192.13

Pri usvajanju referentnih cena odlaganja na deponiju mora se imati u vidu da one zavise od osnovne cene odlaganja, vrednosti opšte takse na aktivnosti zagađivanja i specifične gustine otpadnog toka (Simić i Dimitrijević, 2012a). Cene odlaganja na deponiju, korišćene u ovoj numeričkoj studiji, date su u tabeli 13.

**Tabela 13.** Cene odlaganja na deponiju različitih otpadnih tokova u slučaju klase *f* i tipa *g* olupine vozila (EUR/toni).

Otpadni tok	Obojeni miks		Nemetali 1		Nemetali 2		Plastika, guma, ostalo		Izolovane bakarne žice		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
<i>f</i>											
<i>g</i>	1	95.66	100.77	65.0 <sup>a</sup>	70.28	55.0	54.95	48.42	46.76	240.50	240.50
	2	89.50	98.14	55.17	62.33	47.60	52.24	43.52	45.65	240.50	240.50

<sup>a</sup> Pretpostavljena vrednost na osnovu podataka iz studija GHK/BioIS (2006) i CEC (2007)

Kao i u slučaju numeričke studije rađene za model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju, i u ovoj numeričkoj studiji je kao najbolje rešenje za napredni termalni tretman frakcije ASR miksa odabrana TwinRec tehnologija. Što se tiče potrebnih parametara modela, usvojeno je da reciklažna efikasnost iznosi 33%, energetska efikasnost iznosi 52% (GHK/BioIS, 2006), a da napredni termalni tretman košta 170 EUR/toni (Selinger i ostali, 2003a).

Vrednosti parametara spaljivaonice gradskog otpada su sledeće: efikasnost obnavljanja energije iznosi 75.96% (Ciacci i ostali, 2010) i cena spaljivanja iznosi 100 EUR/toni (CEC, 2007).



Cene transporta su procenjene uzimajući u obzir generalne specifične gustine tovara, maksimalnu težinu i zapreminu po tovaru, i odgovarajuću dužinu transporta. Da bi se sve cene mogle izračinati neophodno je bilo uvesti sledeće pretpostavke:

- Maksimalna težina i zapremina po tovaru su 30 tona i 15 m<sup>3</sup>, respektivno.
- Svi sortirani metali se transportuju na jednake udaljenosti, a cena po tovaru iznosi 500 EUR.
- Najbliža deponija i spaljivaonica gradskog otpada se nalaze na dvostruko manjem rastojanju od proizvođača metala, pa cena po tovaru iznosi 250 EUR.
- TwinRec postrojenje je udaljeno 5 km od fabrike za reciklažu vozila (Ciacci i ostali, 2010).
- Cena transporta ASR miksa iznosi 10 EUR/toni (na osnovu pretpostavke 4 i preporuke iz studije GHK/BioIS (2006)).
- Cena transporta izolovanih bakarnih žica iznosi 100 EUR/toni.

Dobijene cene transporta pojedinih materijala do njihovih odredišta su date u tabeli 14.

**Tabela 14.** Cena transporta materijala sortiranog ili mešanog entitetom  $i'$  do odredišta  $i$  u slučaju reciklaže olupine vozila klase  $f$  i tipa  $g$  (EUR/toni).

$i'$	3		4		5				6		7				8					
$i$	12		12		11		12		13	14	11		12		14		12	15	16	
$f$	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$g^1$	8.33	8.33	11.88	10.99	14.04	14.06	14.04	14.06	16.67	16.67	15.95	16.52	15.95	16.52	16.67	8.33	16.67	100	100	100
$g^2$	8.63	8.33	14.00	12.39	16.22	14.78	16.22	14.78			17.75	16.92	17.75	16.92						

Za definisanje skladišnog entiteta su uvedene sledeće pretpostavke:

- Težina početnih zaliha olupina vozila i nivo sigurnosnih zaliha su jednaki, i imaju iste vrednosti kao maksimalni dnevni kapacitet drobilice (tj. 712 tona).
- Svi tipovi zaliha olupina vozila imaju isti početni udeo.
- Udeli analiziranih tipova olupina vozila u dolaznim klasama porudžbina se ne menjaju tokom planskog horizonta.
- Kapitalni trošak zaliha iznosi 0.50 %/nedelja.

### 3.2.3.2. Rezultati i diskusija

Izvršeno testiranje modela izbora materijala u sistemu za reciklažu vozila je pokazalo da se u toku svakog planskog perioda naručuje tačno ona količina olupina vozila koja je jednaka maksimalnom kapacitetu drobilice, odnosno 3560 tona/nedelja<sup>28</sup>. Pored toga, uočeno je da će bez obzira na kategoriju olupine koju prerađuje, fabrika za reciklažu vozila težiti da postigne što je moguće veći kvantitet i viši kvalitet sortiranih metalnih tokova. Inače, testiranje predloženog modela je sprovedeno na AMD Sempron 145 procesoru sa 2.81 GHz i 1.75 GB RAM-a, pri čemu su svi test problemi rešavani pomoću CPLEX 12.2 solvera.

Što se tiče scenarija 1, sve važeće ekološke kvote su ispoštovane u svim kreiranim test problemima, pri čemu su stope obnavljanja (tabela 15), reciklaže (tabela 16) i obnavljanja energije (tabela 17) prosečno iznosile 85.07%, 83.15% i 1.92%, respektivno.

**Tabela 15.** Ostvarene stope obnavljanja u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti (%).

		$H_{11r} (%)$											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
$H_{21r} (%)$	0	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	10	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	20	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	30	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	40	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	50	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	60	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	70	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01	85.01
	80	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.26	85.30	85.32	85.35	85.36
	90	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.69	85.72	85.75	85.77
	100	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.32	86.12	86.15	86.17

<sup>28</sup> Nedelju čini 5 radnih dana po 10 časova

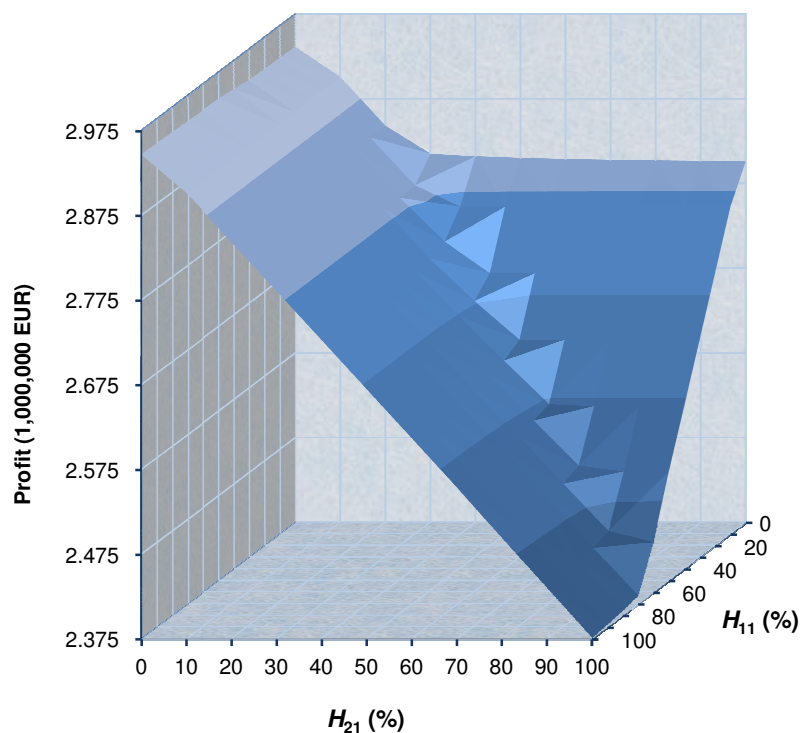
**Tabela 16.** Ostvarene stope reciklaže u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti (%).

		$H_{1lr}(\%)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_{21r}(\%)$	0	82.11	82.11	82.11	82.05	82.07	82.08	82.08	82.09	82.09	82.09	82.10
	10	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41	82.41
	20	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83	82.83
	30	81.39	82.68	83.24	83.24	83.24	83.24	83.24	83.24	83.24	83.24	83.24
	40	81.37	81.55	83.39	83.54	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66	83.66
	50	81.36	81.55	81.79	83.91	84.00	84.05	84.08	84.08	84.08	84.08	84.08
	60	81.36	81.55	81.79	82.06	84.38	84.44	84.48	84.50	84.50	84.50	84.50
	70	81.35	81.55	81.79	82.03	83.62	84.82	84.87	84.90	84.93	84.91	84.91
	80	81.35	81.55	81.79	82.03	82.26	84.36	85.26	85.30	85.32	85.35	85.36
	90	81.35	81.55	81.79	82.03	82.26	82.50	85.00	85.69	85.72	85.75	85.77
	100	81.34	81.55	81.79	82.03	82.26	82.50	82.73	85.32	86.12	86.15	86.17

**Tabela 17.** Ostvarene stope obnavljanja energije u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti (%).

		$H_{1lr}(\%)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_{21r}(\%)$	0	2.89	2.89	2.89	2.95	2.93	2.92	2.92	2.91	2.91	2.91	2.90
	10	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
	20	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
	30	3.61	2.32	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
	40	3.63	3.45	1.61	1.46	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
	50	3.64	3.45	3.21	1.09	1.00	0.95	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
	60	3.64	3.45	3.21	2.94	0.62	0.56	0.52	0.50	0.50	0.50	0.50
	70	3.65	3.45	3.21	2.97	1.38	0.19	0.15	0.11	0.09	0.10	0.10
	80	3.65	3.45	3.21	2.97	2.74	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	90	3.65	3.45	3.21	2.97	2.74	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	3.66	3.45	3.21	2.97	2.74	2.50	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00

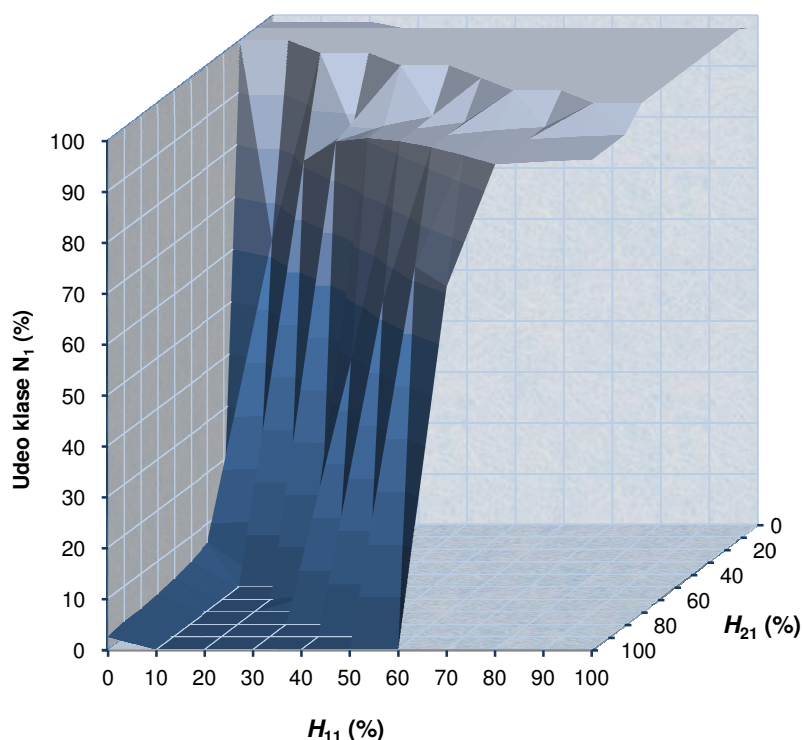
Dobijena funkcionalna zavisnost ostvarenog profita od materijalnog sastava naručenih klasa olupina vozila u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti je predstavljena na slici 8. Pored toga, vrednosti ostvarenog profita u scenariju 1 su date u tabeli P2.1 (prilog 2), koja je priložena u dodatnom materijalu. Kao što se može uočiti sa slike 8 i tabele P2.1 (prilog 2), promena udela kategorije  $M_1$ -ČI će imati značajnijeg efekta (>5%) na profitabilnost fabrika za reciklažu vozila samo kada čelično intenzivni tip olupina vozila bude imao većinski udeo u  $N_1$  klasi narudžbina. Sa druge strane, promena udela kategorije  $N_1$ -SI je uvek uticala na iznos ostvarenog profita, pri čemu se njen efekat primetno ograničava poboljšanjem kvaliteta prve klase narudžbina (tj. smanjivanjem udela koji ima kategorija  $M_1$ -SI).



**Slika 8.** Funkcionalna zavisnost ostvarenog profita od materijalnog sastava naručenih klasa olupina vozila u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti.

Sa slike 8 se može zaključiti da je ustvari udeo obojenih metala u pojedinim kategorijama olupina vozila bio taj koji je predstavljao polaznu tačku za kreiranje optimalnog plana naručivanja (slika 9) i plana prerade. To je potpuno logično, jer ako se sortirani obojeni metali mogu prodati po 4.5 (Al-bogata frakcija) do skoro 8 (Cu-bogata frakcija) puta višoj ceni od sortiranih crnih metala (tabela 11), evidentno je da će udeo koji oni imaju u olupinama vozila i trenutna situacija na berzama sekundarnih metala predstavljati jedine pokretače procesa planiranja proizvodnje analiziranih savremeno opremljenih fabrika za reciklažu vozila. U skladu sa prethodno iznetim, a prema usvojenom materijalnom sastavu pojedinih kategorija olupina vozila (tabela 8), sa aspekta udela obojenih metala (tj. “profitnog” aspekta) najpoželjniju kategoriju predstavlja N<sub>1</sub>-AI (udeo od 19.65%), a najnepoželjniju kategoriju M<sub>1</sub>-SI (udeo od 10.54%). Upravo iz tog razloga je najviši profit (od 2,947,013.93 EUR ili 206.95 EUR/toni prerađenih olupina) bio ostvaren u 1. test problemu, kada je druga klasa porudžbina bila isključivo sastavljena od aluminijumsko intenzivnog tipa olupina

vozila. Sa druge strane, najniži profit (od 2,375,890.98 EUR ili 166.85 EUR/toni prerađenih olupina) je zabeležen u 11. test problemu, kada su obe ponuđene klase bila sastavljene isključivo od čelično intenzivnih tipova olupina vozila. Konačno, pošto tipovi olupina vozila koji pripadaju drugoj klasi porudžina imaju “profitni” rang 1 i 3, ova klasa je dominirala kroz scenario 1 (prosečan udeo od 70.71%) i bila više naručivana u 88 test problema.



**Slika 9.** Optimalni plan naručivanja u slučaju važećih kvota ekološke efikasnosti.

Što se tiče scenarija 2, buduće kvote ekološke efikasnosti su ispoštovane u svim kreiranim test problemima (tabele 18 i 19), pri čemu je prosečna stopa obnavljanja iznosila 95.0%. Imajući ovo u vidu, jasno se nameće zaključak da uspeh druge faze primene EU ELV direktive nije doveden u pitanje.

**Tabela 18.** Ostvarene stope reciklaže u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti (%).

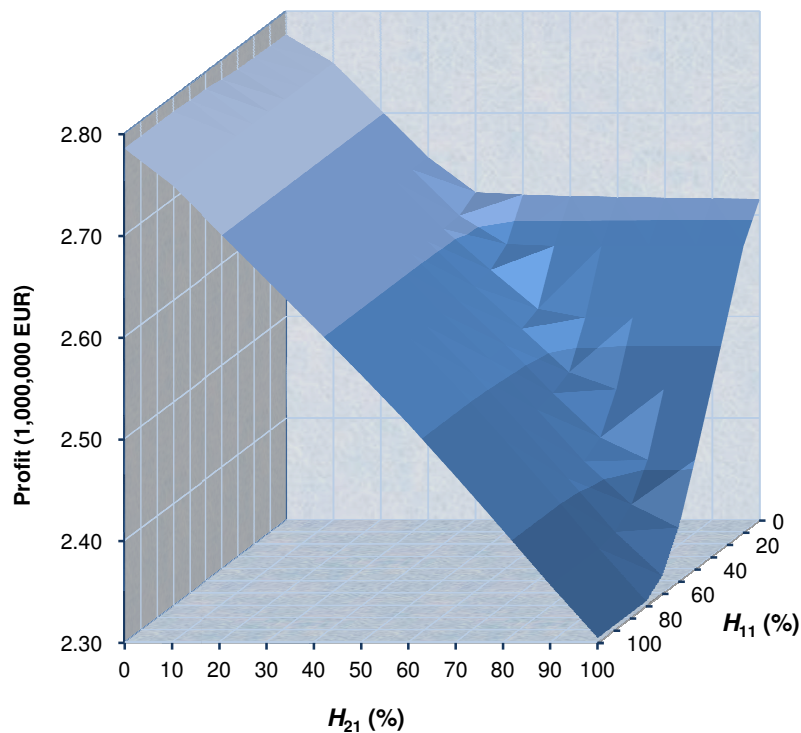
		$H_{11r}(\%)$											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
$H_{21r}(\%)$	0	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	10	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	20	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	30	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	40	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	50	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	60	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	70	85.00	85.00	85.00	85.00	85.15	85.21	85.25	85.27	85.29	85.28	85.28	85.28
	80	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.53	85.57	85.60	85.62	85.64	85.66	85.66
	90	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.90	85.93	85.95	85.97	85.99	85.99
	100	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00	86.26	86.29	86.31	86.32

U slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti, prosečna stopa obnavljanja energije je iznosila 9.87% (tabela 19), od čega su spaljivanje i napredni termalni tretman doprineli sa 7.08% i 2.79%, respektivno. Pri tome je naprednom termalnom tretmanu prosečno bilo podvrgnuto 5.36%, a spaljivanju 9.33% od ukupnog obima proizvodnje.

**Tabela 19.** Ostvarene stope obnavljanja energije u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti (%).

		$H_{11r}(\%)$											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
$H_{21r}(\%)$	0	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	10	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	20	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	30	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	40	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	50	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	60	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	70	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	9.85	9.79	9.75	9.73	9.71	9.72	9.72
	80	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	9.47	9.43	9.40	9.38	9.36	9.34
	90	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	9.10	9.07	9.05	9.03	9.01
	100	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	8.74	8.71	8.69	8.68

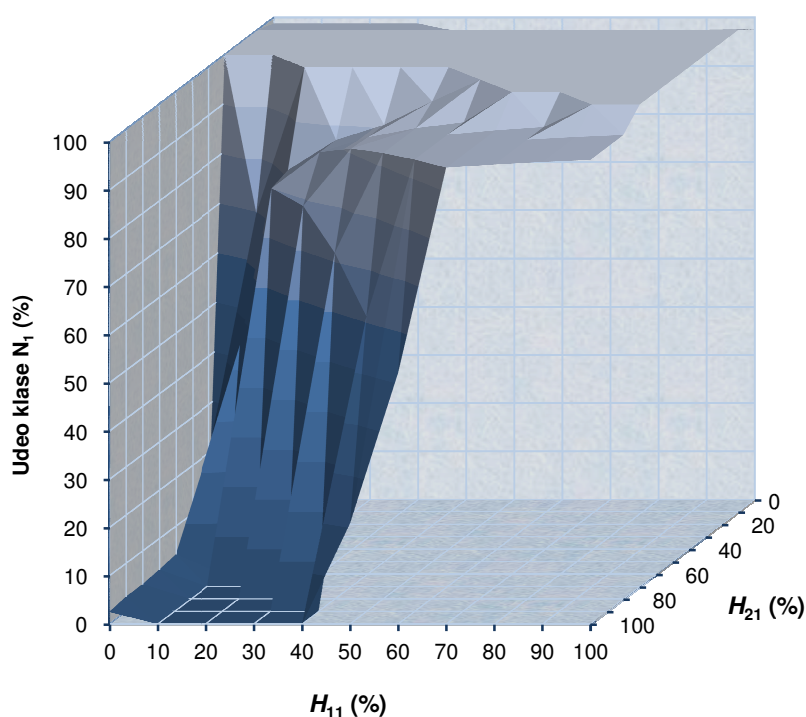
Dobijena funkcionalna zavisnost ostvarenog profita od materijalnog sastava naručenih klasa olupina vozila u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti je predstavljena na slici 10. Pored toga, vrednosti ostvarenog profita u scenariju 2 su date u tabeli P2.2 (prilog 2), koja je priložena u dodatnom materijalu. Kao što se može uočiti sa slike 10 i tabele P2.2 (prilog 2), promena udela kategorije  $N_1$ -SI je uvek značajno uticala (>5%) na visinu ostvarenog profita, pri čemu se njen efekat primetno ograničava poboljšanjem kvaliteta prve klase porudžbina. Sa druge strane, promena udela kategorije  $M_1$ -SI imaće značajnijeg efekta na profitabilnost fabrika za reciklažu vozila samo onda kada udeo kategorije  $N_1$ -SI ne bude bio manji od 70%.



**Slika 10.** Funkcionalna zavisnost ostvarenog profita od materijalnog sastava naručenih klasa olupina vozila u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti.

Što se tiče analize optimalnog plana naručivanja u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti (slika 11), druga klasa narudžbina je bila više naručivana u čak 98 test problema, uz prosečan udeo od 78.41%. Evidentna promena plana naručivanja, u smislu još izraženije dominacije 2. klase narudžbina se javila kao direktna posledica uvođenja rigoroznijih kvota ekološke efikasnosti. Zbog toga je pri određivanju optimalnog plana naručivanja posebna pažnja morala biti poklonjena ne samo prethodno pomenutom udelu obojenih metala i trenutnoj situaciji na berzama sekundarnih metala, već i vrednosti koju ima udeo ASR-a (tj. plastika, guma i ostali otpadni materijali) u analiziranim kategorijama olupina vozila. U skladu sa usvojenim materijalnim sastavom (tabela 8), sa aspekta udela ASR-a (tj. “ekološkog” aspekta) najpoželjniju kategoriju predstavlja  $N_1$ -SI (udeo od 13.39%), a najnepoželjniju  $M_1$ -AI (udeo od 18.60%). Što se tiče profitabilnosti fabrika za reciklažu vozila, najviši profit (od 2,787,360.34 EUR ili 195.74 EUR/toni prerađenih olupina) je bio ostvaren u 1. test problemu, kada je druga klasa porudžbina bila isključivo sastavljena od aluminijumsko

intenzivnog tipa olupina vozila (koji ima profitni rang 1). Sa druge strane, najniži profit (od 2,297,337.41 EUR ili 161.33 EUR/toni prerađenih olupina), ali i najbolji ekološki rezultat (vrednost stope reciklaže od 86.17%) je zabeležen u 11. test problemu, kada su obe ponuđene klase bila sastavljene isključivo od čelično intenzivnih tipova olupina vozila (koje imaju nizak “profitni” i visok “ekološki” rang). Iako je u okviru scenarija 2 generalno primetan nešto niži nivo profita, detaljnije 5.52-11.21 EUR/toni prerađenih olupina, treba očekivati da će kontinuirana promena u sastavu svetske flote vozila, koja sve više ide u korist aluminijumsko intenzivnih tipova značiti sve veću dostupnost “kvalitetnijih” narudžbina. Na taj način će se pružiti mogućnost da evropske fabrike za reciklažu vozila posle 1. januara 2015. godine čak i poboljšaju svoju profitabilnost.



**Slika 11.** Optimalni plan naručivanja u slučaju budućih kvota ekološke efikasnosti.

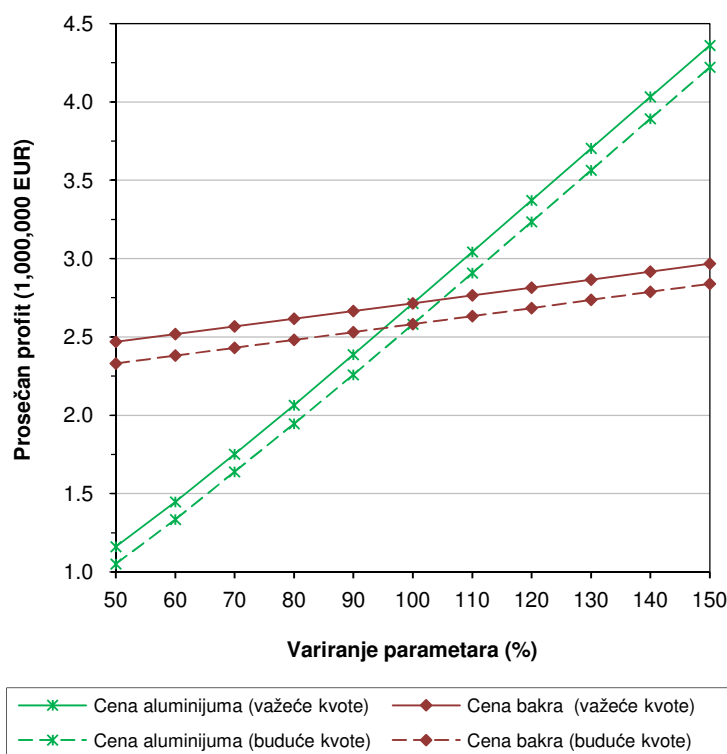
### 3.2.3.2.1. Analize osetljivosti

Kako bi bila verifikovana upotrebljivost predloženog modela i prezentovanih rezultata, potrebno je sprovesti odgovarajuće analize osetljivosti.

Prvo je ispitana stabilnost dobijenih rezultata analizom njihove osetljivosti na promene cena aluminijuma i bakra. Cene su povećane i smanjene za 50% sa korakom



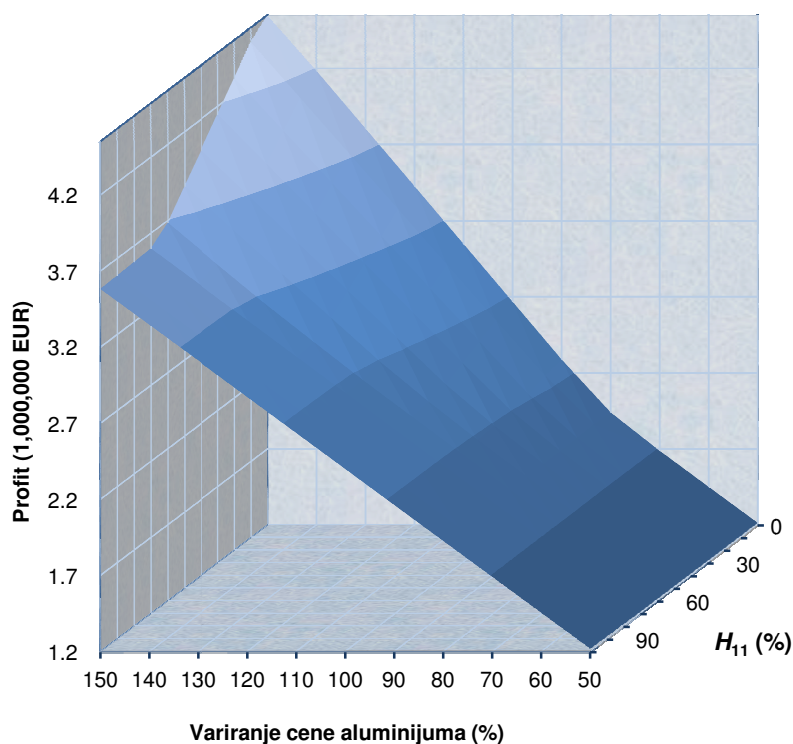
od 10% u odnosu na 121 bazni test problem (opisan u poglavlju 3.2.3). Kao rezultat toga je kreirano i optimalno rešeno novih 4840 test problema, odnosno 2420 po analiziranom scenariju. Na slici 12 je za svaku analiziranu vrednost posmatranih parametara prikazana prosečna profitabilnost odgovarajućih 121 test problema. Iako oba analizirana parametra imaju značajan uticaj na profitabilnost fabrike za reciklažu vozila, treba istaći da je uticaj promene cene aluminijuma do 10.2 puta veći od uticaja promene cene bakra. To je sasvim očekivano, jer iako je bakar skuplji od aluminijuma (tabela 11), on ima daleko manji udeo u svim analiziranim tipovima olupina vozila (tabela 8). Pored toga, analizom dobijenih rezultata je zaključeno da uvođenje rigoroznijih ekoloških kvota gotovo da neće imati nikakvog efekta na veličinu uticaja koji posmatrane cene obojenih metala imaju na rezultate modela izbora materijala u sistemu za reciklažu vozila.



**Slika 12.** Analiza osetljivosti profita fabrike za reciklažu vozila na promenu cena aluminijuma i bakra.

Veličina uticaja koji cene aluminijuma i bakra imaju na visinu ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila u značajnoj meri zavisi od materijalnog sastava olupina koje se naručuju. Sa porastom udela aluminijuma i udela bakra u olupinama

vozila, uticaj koji ima promena cene aluminijuma i promena cene bakra biće veći, respektivno. Na primer, uticaj cene aluminijuma će rasti sa smanjivanjem udela koji  $M_1$ -SI kategorija olupina vozila ima u primljenim porudžbinama (slika 13).



**Slika 13.** Funkcionalna zavisnost ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila u slučaju 90% udela čelično intenzivnih olupina u drugoj klasi narudžbina i budućih kvota.

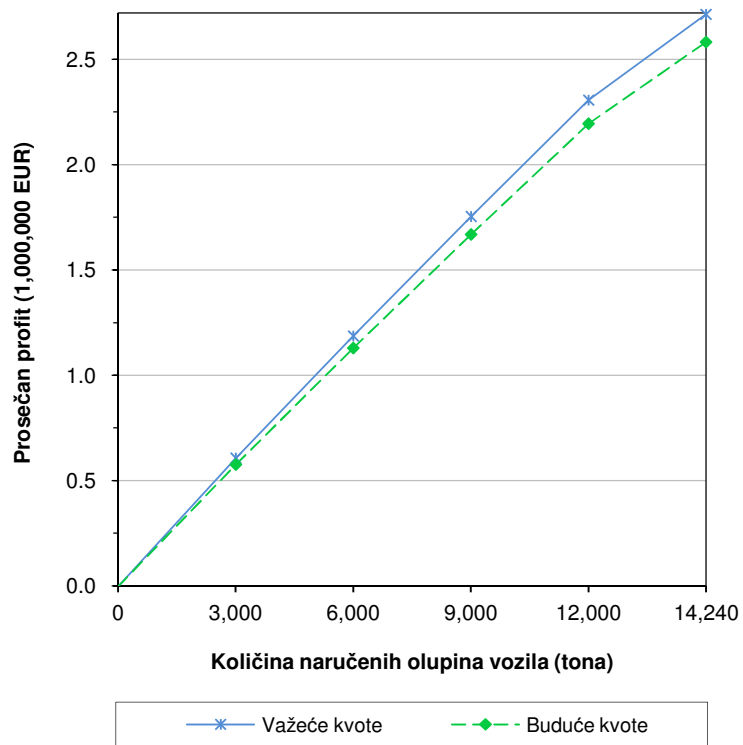
Izgradnja savremene fabrike za reciklažu vozila predstavlja veoma skupu investiciju, koja jedino može imati smisla ako stepen iskorišćenosti njenih kapaciteta ima vrednost blisku 1. Međutim, često to neće biti moguće, jer na broj dostupnih olupina vozila značajno mogu uticati sledeći faktori:

- *Izvoz.* Vozila na kraju životnog ciklusa se najviše izvoze u zemlje Istočne Evrope, bivšeg Sovjetskog Saveza i Severne Afrike (Kanari i ostali, 2003) radi njihove ponovne upotrebe kao polovnih vozila ili kao izvora delova i komponenti (Mazzanti i Zoboli, 2006). U današnje vreme, izvoz ELV-a predstavlja nesumnjivo najveću prepreku za uspostavljanje efikasnijeg reciklažnog sistema u EU. Štaviše, svake godine se izvoze milioni ELV-a koji su trebali da budu prerađeni u evropskim

fabrikama za reciklažu vozila. Na primer, u Nemačkoj, koja se smatra najvećim evropskim izvoznikom ELV-a, svake godine se izveze oko 3 miliona vozila (Amza i ostali, 2011). Upravo iz tog razloga se evropske fabrike za reciklažu vozila grčevito bore kako bi pribavile dovoljan broj olupina.

- *Napuštanje vozila.* Pojava napuštanja vozila predstavlja veoma ozbiljan ekološki problem (Edwards i ostali, 2006a). EU ELV direktiva je uticala, makar tokom prvih nekoliko godina njene primene, da se broj napuštenih vozila samo dodatno poveća (Smith i ostali, 2004). Na primer, u Velikoj Britaniji se svake godine oko 300,000 vozila ostavlja na udaljenim i teško dostupnim lokacijama (Muhamad Zameri i Blount, 2006). Štaviše, Kollamthodi i ostali (2003) su procenili da 11% od ukupnog proja ELV-a čine napuštena vozila. Međutim, treba napomenuti da je uvođenje sertifikata o uništenju vozila uspelo da ovaj problem koliko toliko stavi pod kontrolu.
- *Nelegalni operatori.* Procenjeno je da oko 1% od ukupnog proja ELV-a u EU čine vozila koja završe u posedu nelegalnih operatora (GHK/BioIS, 2006). Međutim, u nekim novijim članicama EU nelegalni tretman se smatra najvećom preprekom za uspostavljanje ekonomski održivog sistema za reciklažu vozila. Na primer, u Rumuniji oko 50% od ukupnog proja ELV-a se ili nelegalno tretira ili napušta (Tavoularis i ostali, 2009).

Zbog problema koji se mogu javiti prilikom naručivanja olupina vozila, a koji su prouzrokovani prethodno opisanim faktorima, odlučeno da se sprovede analiza uticaja količine naručenih olupina na visinu ostvarenog profita fabrika za reciklažu vozila, u slučajevima važećih i budućih ekoloških kvota. Količina naručenih olupina vozila je varirana u intervalu od 0 pa do vrednosti maksimalnog kapaciteta drobilice po planskom horizontu, koji iznosi 14,240 tona, sa korakom od 3000 tona. Kreirano je i optimalno rešeno novih 1210 test problema, odnosno 605 po analiziranom scenariju. Na slici 14 je za svaku analiziranu vrednost prikazana prosečna profitabilnost odgovarajućih 121 test problema. Za oba analizirana scenarija su uočena značajna i skoro linearna povećanja profitabilnosti fabrike za reciklažu vozila (slika 14).



**Slika 14.** Analiza osetljivosti profita savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila na promenu količine naručenih olupina vozila.

#### **4. MODELIRANJE I UPRAVLJANJE JAPANSKIM SISTEMOM ZA RECIKLAŽU VOZILA**

U Japanu i drugim visoko razvijenim ekonomijama, smanjenje količine ASR-a koji se odlaže na deponije i valorizacija otpadnih materijala kroz njihovu ponovnu upotrebu, reciklažu i/ili obnavljanje su postali ciljevi od opšted društvenog interesa. U skladu sa tim, proizvođači vozila moraju adaptirati svoj pristup pri projektovanju novih vozila i učestvovati u transformaciji postojećih sistema za njihovu reciklažu, jer samo tako mogu poslovati u skladu sa ustanovljenom ELV regulativom.

ASR je nusprodukt procesa reciklaže i čini 15-25% težine prosečnog vozila na kraju životnog ciklusa, odnosno oko 200kg. On se obično definiše kao otpadni materijalni tok koji preostane nakon dekontaminacije i demontaže ELV-a, drobljenja olupine vozila, i izdvajanja crnih metala iz frakcije generisane operacijom drobljenja (Vermeulen i ostali, 2011). On sadrži plastiku (19-31%), gumu (20%), tekstil i drugi vlaknasti materijal (10-42%), i drvo (2-5%) (Srogi, 2008; Vidović i ostali, 2011). ASR se može klasifikovati na laku ASR frakciju, generisanu drobljenjem olupine vozila i vazдушnim sortiranjem oslobođenih materijala, i tešku ASR frakciju, preostalu nakon izolovanja crnih metala iz frakcije teških materijala (Joung i ostali, 2007; Vermeulen i ostali, 2011). Razvoj tehnoloških rešenja za reciklažu i/ili obnavljanje ASR-a je veoma komplikovan, jer je to veoma heterogen otpadni materijal (Santini i ostali, 2010), tj. njegov sastav, gustina i sadržaj vlage neprekidno variraju u vremenu i prostoru (Boughton, 2007). Pored toga, faktori koji sprečavaju sveobuhvatno obnavljanje ASR-a su njegova fizička priroda, česta kontaminacija, slaba razvijenost odgovarajućih sekundarnih tržišta i značajni troškovi sortiranja (Simić i Dimitrijević, 2012b).

Stupanjem na snagu ELV zakona problem reciklaže vozila u Japanu je postao izuzetno aktuelna i veoma interesantna tema naučnog istraživanja. Najvažniji segment japanskog ELV zakona predstavlja novouvedena kvota na reciklažu ASR-a. Počev od fiskalne 2010. godine na snagu je stupila jedinstvena ekološka kvota, tj. stopa reciklaže ASR-a ne može biti manja od 50%. Počev od fiskalne 2015. godine biće uvedena strožija ekološka kvota, tj. stopa reciklaže ASR-a ne može biti manja od 70% (Sakai i ostali, 2007). Prema tome, reciklaža ASR-a ima ključnu važnost za dostizanje ciljeva

japanskog ELV zakona, pa je analiza trenutnog i budućeg uticaja ASR kvote na japanski reciklažni sistem potpuno očigledna i opravdana.

Prema tome, doprinos ovog poglavlja predstavlja razvoj modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju, kao taktičkog modela linearnog programiranja. Njegovi osnovni naučni ciljevi su:

- Analiza mogućnosti za povećanje profitabilnosti i ekološke efikasnosti (tj. ostvarene stope reciklaže ASR-a) japanske industrije za reciklažu vozila.
- Istraživanje uticaja koji japanski ELV zakon ima na poslovanje sistema za reciklažu vozila

Sporedne naučne ciljeve razvoja modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju predstavljaju:

- Analiza uticaja promene dizajna vozila na proces donošenja reciklažnih odluka.
- Određivanje ranga reciklažnih parametara (tj. cena metala, iznosa ASR depozita, transportnih troškova, troškova sortiranja, cene olupina vozila, cene naprednog termalnog tretmana i cene odlaganja na deponiju).

U skladu sa motivacijom, koja je posebno istaknuta kroz definisanje osnovnih i sporednih naučnih ciljeva, i prostora za dalje istraživanje identifikovanog u pregledu referentne naučne literature (poglavlje 2), model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju je formulisan i testiran u ovom poglavlju.

#### **4.1. Model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju**

Modeliranje procesa sortiranja ASR-a, otpadnog toka koji se nalazi u fokusu japanskog ELV zakona je neizbežno ukoliko se žele optimizirati ekonomske i ekološke performanse japanskog sistema za reciklažu vozila. Detaljni dijagram tokova materijala i novca u japanskom sistemu za reciklažu vozila predstavlja polaznu tačku za formulaciju modela kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju (slika 15). Prezentovani dijagram je razvijen sa posebnim

osvrtno na operacije koje su potrebne za sortiranje ASR-a. Prema tome, on precizno oslikava konfiguraciju japanskog sistema za reciklažu vozila.

Jedinstvenost japanskog ELV zakona se ogleda u uvođenju reciklažnih depozita. Njegov iznos propisuje i objavljuje proizvođač, i to za svaki model vozila posebno. Upravljanje novčanim sredstvima koja su prikupljena od korisnika vozila je po Zakonu povereno nezavisnoj instituciji po imenu Japanski centar za promociju reciklaže automobila (JCPRA). Iznos reciklažnog depozita zavisi od tipa vozila i predstavlja sumu nadoknada za: reciklažu sakupljenog ASR-a (ASR reciklažni depozit), sakupljanje i tretman vazdušnih jastuka (reciklažni depozit za vazdušne jastuke), istakanje i uništavanje CFC/HFC-a (FC reciklažni depozit), upravljanje tokovima informacija, i funkcionisanje JCPRA institucije (Koshiha, 2006).

Najvažniji učesnici japanskog sistema za reciklažu vozila su proizvođači, koji su odgovorni za reciklažu sakupljenih ostataka drobljenja automobila, vazdušnih jastuka i CFC/HFC-a. Korisnici (vozila) su u obavezi da dostave svoje vozilo na kraju životnog ciklusa do najbližeg registrovanog posrednika u sakupljanju, kao i da plate iznos reciklažnog depozita ili prilikom kupovine novih vozila (kupci novih vozila) ili prilikom prvog odlaska u servis (kupci polovnih vozila) ili prilikom njegove deregistracije (poslednji vlasnici). Posrednikom u sakupljanju se smatra prodavac ili servis za popravku vozila koji poseduje prefekturalnu registraciju. Oni su u obavezi da sakupljaju vozila na kraju životnog ciklusa i da ih transportuju do najbliže registrovane kompanije za obnavljanje CFC/HFC-a. Ona je dužna da istače sav CFC/HFC i da ga dostavi do odgovarajućeg postrojenja za njegovo uništavanje. Sa druge strane, kompanije za obnavljanje CFC/HFC-a su u obavezi da vozila na kraju životnog ciklusa iz kojih je istočen sav CFC/HFC predaju najbližim licenciranim demontažnim kompanijama. One rasklapaju vozila na kraju životnog ciklusa u skladu sa propisanim reciklažnim standardima i prosleđuju izvađene vazdušne jastuke do pogona za njihovu reciklažu. Demontažne kompanije sortiraju i skladište gorivo, otpadno ulje i druge štetne supstance čije odlaganje na deponije je zabranjeno (Zhao i Chen, 2011). Istovremeno, one sakupljaju vredne delove (kao što je na primer motor vozila), i prodaju ih na tržištu polovnih delova ili berzi otpadnih metala. Preostale dekontaminirane olupine, demontažne kompanije prodaju licenciranim fabrikama za reciklažu vozila radi dalje reciklaže. U Japanu su fabrike za reciklažu vozila potpuno integrisane u reciklažni sistem

i po japanskom ELV zakonu ne mogu birati olupine vozila koje će prerađivati. Svako eventualno odbijanje prijema pošiljke olupina vozila mora biti detaljno obrazloženo i dokumentovano. Štaviše, vreme skladištenja je značajno ograničeno, jer su fabrike za reciklažu dužne da primljene olupine prerade u što kraćem roku ili da ih proslede nekim drugim fabrikama za reciklažu vozila.

Od demontažnih kompanija polaze 3 moguće rute za reciklažu olupina vozila (slika 15):

1. *Drobljenje i sortiranje crnih metala u tradicionalnoj fabrici za reciklažu vozila.* Kada stigne pošiljka iz kompanija za demontažu, olupine vozila se istovaraju iz transportnih sredstava i skladište slažući na gomile. Olupine koje su planirane za reciklažu se sukcesivno prenose do drobilice, koja odvaja metale drobeći olupine na komadiće (Simić i Dimitrijević, 2011b; Williams i ostali, 2007). Ventilacioni odvod, instaliran na krovu drobilice, usisava laku ASR frakciju. Sa druge strane, tok teških materijala se magnetskim sorterom razdvaja na crne metale i tešku ASR frakciju. Kako bi tradicionalna fabrika za reciklažu vozila ispunila tržišne standarde, frakcija crnih metala se prvo ručno prečišćava od svih nešistoća, pa tek onda prodaje železarama. Frakcije lakog i teškog ASR-a se mikserom spajaju u jedinstveni materijalni tok, i isporučuju odgovarajućem proizvođaču. On donosi konačnu odluku o reciklaži sakupljenog ASR-a u izabranom postrojenju za napredni termalni tretman i/ili njegovom odlaganju na najbližoj industrijskoj deponiji.

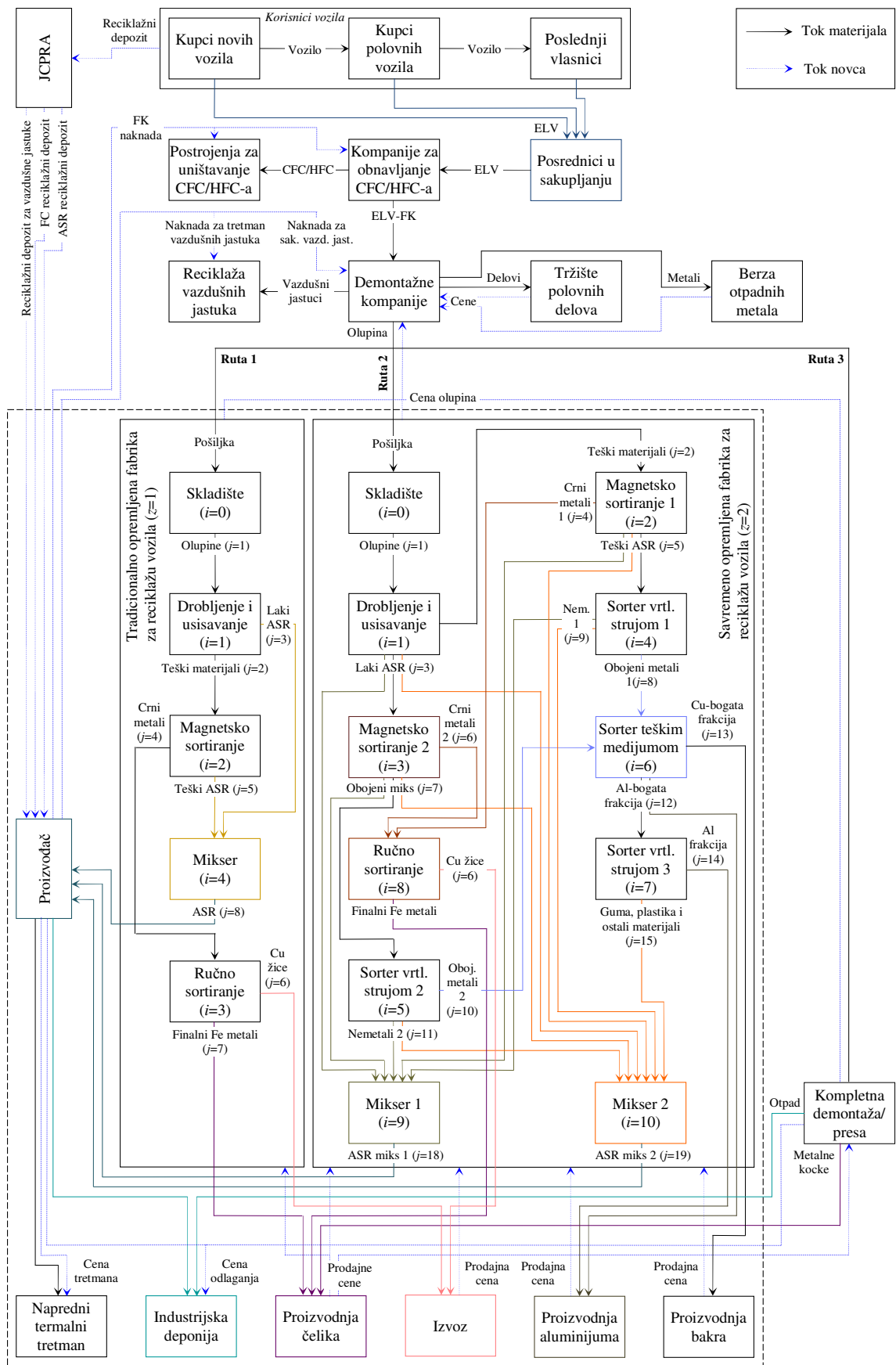
2. *Drobljenje, sortiranje raznovrsnih frakcija metala i parcijalna reciklaža generisanog ASR-a u savremeno opremljenoj fabrici za reciklažu vozila.* Savremeno opremljena fabrika za reciklažu vozila može mehanički reciklirati generisani ASR upotrebom magnetskih sortera, sortera vrtložnom strujom, sortera teškim medijumom i ostale (napredne) opreme za sortiranje. Prema tome, iz lake i teške frakcije ASR-a mogu biti izolovani određeni materijali poput aluminijuma, bakra, plastike, itd. Na primer, laka frakcija ASR-a može biti ili dalje sortirana ili miksovana. Ukoliko se izabere prva mogućnost, tada je magnetski sorter razdvaja na frakcije obojenog miksa i crnih metala. Obojeni miks može biti ili dalje prečišćavan, kako bi se izolovali obojeni metali, ili mešan. Sa druge strane, frakcija teških materijala se rutira na magnetski sorter, koji odvaja teški ASR od crnih metala. Frakcija teškog ASR-a se zatim ili prosleđuje na sorter vrtložnom strujom, koji deli obojene metale od nemetala, ili



meša. Oba toka obojenih metala se rutiraju na sorter teškim medijumom, kako bi se frakcija bogata aluminijumom razdvojila od frakcije bogate bakrom. Frakcija bogata aluminijumom može biti ili odmah prodana ili prosleđena sorteru vrtložnom strujom radi prečišćavanja od gume, plastike i ostalih materijala.

3. *Ruta totalne reciklaže.* Važan preduslov eliminisanja operacije drobljenja iz reciklažnog procesa je sveobuhvatna demontaža olupine vozila. Na primer, električne instalacije i motor moraju biti u potpunosti izvađeni iz olupine, zbog značajne koncentracije bakra u njima. Čista školjka vozila se prvo stavlja u triaksijalnu presu, koja je sabija u kockasti oblik (Fumikazu, 2007), a zatim prodaje železarama (Togawa, 2008).

U fokusu ovog poglavlja se nalazi reciklaža ASR-a u japanskom sistemu za reciklažu vozila. U skladu sa tim granica modeliranog sistema, predstavljena isprekidanom linijom na slici 15, počinje od isporuke olupina fabrikama za reciklažu vozila. Pored toga, u sklopu prezentovanog istraživanja su obuhvaćene samo prve dve reciklažne rute, jer u slučaju poslednje rute nema generisanja ASR-a.



Slika 15. Dijagram toka materijala i novca u japanskom sistemu za reciklažu vozila.

#### 4.1.1. Notacija modela

U modelu kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju je korišćena sledeća notacija.

##### Indeksi i skupovi

$t$	indeks vremenskog perioda; $t \in \{1, \dots, T\}$
$Z$	skup tipova reciklažnih kompanija <sup>29</sup>
$B_z, z \in Z$	skup reciklažnih kompanija tipa $z$
$J_{zb}, z \in Z, b \in B_z$	skup materijala u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$J_{zb}^A, J_{zb}^B \subset J_{zb}, z \in Z, b \in B_z$	skup ASR materijalnih frakcija izolovanih u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$J_{zb}^B, J_{zb}^C \subset J_{zb}, z \in Z, b \in B_z$	skup materijala koji su generisani u procesima izolovanja teške ASR frakcije u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$S_{zb}, z \in Z, b \in B_z$	skup skladišta u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$M_{zb}^C, z \in Z, b \in B_z$	skup miksera kombinovane namene <sup>30</sup> u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$M_{zb}^A, z \in Z, b \in B_z$	skup entiteta u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$ za miksovanje otpadnih tokova planiranih za preradu u postrojenjima za napredni termalni tretman

<sup>29</sup> Sve reciklažne kompanije se dele na tradicionalno opremljene i savremeno opremljene.

<sup>30</sup> Miksovani otpadni tokovi se mogu proslediti ili na preradu u postrojenja za napredni termalni tretman ili odlagati na industrijske deponije

$M_{zb}^L, z \in Z, b \in B_z$	skup entiteta u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$ za miksovanje otpadnih tokova planiranih za odlaganje na industrijskim deponijama
$M_{zb} = M_{zb}^C \cup M_{zb}^A \cup M_{zb}^L, z \in Z, b \in B_z$	skup miksera u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$R_{zb}, z \in Z, b \in B_z$	skup entiteta sortiranja reciklažne kompanije $b$ tipa $z$ (tj. drobilica, oprema za sortiranje i procesi ručnog sortiranja)
$N_{zb} = S_{zb} \cup M_{zb} \cup R_{zb}$	skup entiteta u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$ (tj. skladišta, mikseri i entiteti sortiranja)
F	skup postrojenja za napredni termalni tretman
P	skup proizvođača raznovrsnih metala
L	skup deponija
$O = F \cup L \cup P$	skup odredišta (tj. postrojenja za napredni termalni tretman, deponije i proizvođači raznovrsnih metala)
$A_{zb} \subseteq \{(i, j)   i \in N_{zb}, j \in N_{zb}\}, z \in Z, b \in B_z$	skup materijalnih tokova u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$
$\Gamma_{zbi} = \{j   (i, j) \in A_{zb}\}, z \in Z, b \in B_z, i \in N_{zb}$	skup entiteta koji slede $i$ -ti entitet u slučaju reciklažne kompanije $b$ tipa $z$
$\Gamma_{zbi}^{-1} = \{i   (i, j) \in A_{zb}\}, z \in Z, b \in B_z, j \in N_{zb}$	skup entiteta koji prethode $j$ -tom entitetu u slučaju reciklažne kompanije $b$ tipa $z$
$g_{zbi} \in J_{zb}$	materijal na toku $(i, j)$ (atribut toka) reciklažne kompanije $b$ tipa $z$

$$K_{zbi}, K_{zbi} \subset J_{zb}, z \in Z, b \in B_z, i \in R_{zb}$$

skup materijala izolovanih  $i$ -tim entitetom sortiranja reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$

$$\Psi_{zbik} = \{j \mid j \in \Gamma_{zbi}, g_{zbij} = k\}$$

,  $z \in Z, b \in B_z, i \in R_{zb}, k \in K_{zbi}$

skup entiteta reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$  na koje je materijal  $k$  prosleđen sa entiteta  $i$

$$\Omega_{zbk}, z \in Z, b \in B_z, k \in J_{zb}$$

skup entiteta reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$  koji generišu materijal  $k$

### Parametri

$T$

broj analiziranih vremenskih perioda

$U$

iznos ASR reciklažnog depozita po jedinici težine

$$\Pi_{zbi0}, z \in Z, b \in B_z, i \in S_z$$

težina početnih zaliha olupina vozila u skladištu  $i$  reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$

$$W_z^{min}, z \in Z$$

nivo sigurnosnih zaliha koji mora držati reciklažna kompanija tipa  $z$

$$C_{zbj}, z \in Z, b \in B_z, j \in R_{zb}$$

kapacitet sortiranja u slučaju entiteta  $j$  reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$  po vremenskom periodu

$$E_{zbik}, z \in Z, b \in B_z, i \in R_{zb}, k \in K_{zbi}$$

efikasnost entiteta sortiranja  $i$  reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$  u slučaju materijala  $k$  u procentima

$$E_j^R, j \in F$$

efikasnost obnavljanja (tj. reciklaže i obnavljanja energije) postrojenja za napredni termalni tretman  $j$  u procentima

$Q^A$

ASR kvota

$R_{zbijt}, z \in Z, b \in B_z, j \in P, i \in \Gamma_{z bj}^{-1}$	prihod po jedinici težine od prodaje metala sortiranih entitetom $i$ reciklažne kompanije $b$ tipa $z$ proizvođaču metala $j$ u vremenskom periodu $t$
$C_t^P$	cena olupine vozila po jedinici težine u vremenskom periodu $t$
$H_{zbt}, z \in Z, b \in B_z$	kapitalni trošak držanja zaliha u reciklažnoj kompaniji $b$ tipa $z$ i u vremenskom periodu $t$ u procentima
$C_{z bj}^S, z \in Z, b \in B_z, j \in R_{z b}$	cena sortiranja na entitetu $j$ reciklažne kompanije $b$ tipa $z$ po jedinici težine
$C_{z bij}^T, z \in Z, b \in B_z, j \in O, i \in \Gamma_{z bj}^{-1}$	cena transporta od entiteta $i$ reciklažne kompanije $b$ tipa $z$ do odredišta $j$ po jedinici težine
$C_j^A, j \in F$	cena naprednog termalnog tretmana u određišanom postrojenju $j$ po jedinici težine
$C_j^L, j \in L$	cena odlaganja ASR-a na deponiju $j$ po jedinici težine
<i>Promenljive</i>	
$W_{zbit}, z \in Z, b \in B_z, i \in S_{z b}, t \in \{0,1,\dots,T\}$	težina olupina vozila koje se na kraju vremenskog perioda $t$ nalaze u skladištu $i$ reciklažne kompanije $b$ tipa $z$
$P_{zbit}, z \in Z, b \in B_z, i \in S_{z b}$	težina olupina vozila istovarenih u skladište $i$ reciklažne kompanije $b$ tipa $z$ u vremenskom periodu $t$

$$X_{zbi jt}, z \in Z, b \in B_z, i \in N_{zb}, j \in \Gamma_{izb}$$

težina materijala prosleđenog od entiteta  $i$  do entiteta  $j$  u slučaju reciklažne kompanije  $b$  tipa  $z$  u vremenskom periodu  $t$

#### 4.1.2. Formulacija modela

Predloženi model se bavi problemom taktičkog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju. Na osnovu notacije izložene u poglavlju 4.1.1, problem je formulisan kao linearni program.

Kriterijumska funkcija: maksimizirati *Profit* (26)

$$Profit = \text{Ukupan prihod (TR)} - \text{Ukupan trošak (TC)} \quad (26.a)$$

$$TR = \text{Plaćanje JARC-a za sakupljeni ASR (RF)} \\ + \text{Prihod od prodaje sortiranih metala (RM)} \quad (26.b)$$

$$RF = U \sum_{t=1}^T \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in M_{zb}} \sum_{j \in \Gamma_{zbi}} X_{zbi jt} \quad (26.b.1)$$

$$RM = \sum_{t=1}^T \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} R_{zbi jt} X_{zbi jt} \quad (26.b.2)$$

$$TC = \text{Cena primljenih olupina vozila (CP)} \\ + \text{Cena skladištenja (CI)} \\ + \text{Cena sortiranja materijala (CS)} \\ + \text{Cena transporta izolovanih materijala (CT)} \\ + \text{Cena naprednog termalnog tretmana (CA)} \\ + \text{Cena odlaganja na deponiju (CL)} \quad (26.c)$$

$$CP = \sum_{t=1}^T C_t^P \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in S_{zb}} P_{zbit} \quad (26.c.1)$$

$$CI = \sum_{t=1}^T C_t^P \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in S_{zb}} H_{zbt} W_{zbit} \quad (26.c.2)$$

$$CS = \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{j \in R_{zb}} C_{zbj}^S \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} \quad (26.c.3)$$

$$CT = \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{j \in O} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} C_{zbij}^T \sum_{t=1}^T X_{zbit} \quad (26.c.4)$$

$$CA = \sum_{j \in F} C_j^A \sum_{t=1}^T \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} \quad (26.c.5)$$

$$CL = \sum_{j \in L} C_j^L \sum_{t=1}^T \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} \quad (26.c.6)$$

pri ograničenjima:

$$W_{zbit} = P_{zbit} + W_{zbit-1} - \sum_{j \in \Gamma_{zbi}} X_{zbit}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall i \in S_{zb}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (27)$$

$$W_{zbi0} = \Pi_{zbi0}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall i \in S_{zb} \quad (28)$$

$$\sum_{i \in S_{zb}} W_{zbit} \geq W_z^{min}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (29)$$

$$\sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} \leq C_{zbi}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall j \in R_{zb}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (30)$$

$$\sum_{j \in \Psi_{zbi}} X_{zbit} = E_{zbi} \sum_{j \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall i \in R_{zb}; \forall k \in K_{zbi}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (31)$$

$$\sum_{i \in F \cup L} X_{zbit} = \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit}, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall j \in M_{zb}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (32)$$

$$\sum_{j \in F} E_j^R \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} - \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{i \in \Omega_{zbi}} \sum_{k \in J_{zb}^B} \sum_{j \in \Psi_{zbi}} \sum_{k \in J_{zb}^B} X_{zbit}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (33)$$

$$+ \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit} \geq Q^A \sum_{z \in Z} \sum_{b \in B_z} \sum_{k \in J_{zb}^A} \sum_{i \in \Omega_{zbi}} E_{zbi} \sum_{j \in \Gamma_{zbi}^{-1}} X_{zbit}$$

$$P_{zbit} \geq 0, W_{zbit} \geq 0, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall i \in S_{zb}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (34)$$



$$X_{zbiijt} \geq 0, \quad \forall z \in Z; \forall b \in B_z; \forall i \in N_{zb}; \forall j \in \Gamma_{izb}; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (35)$$

Kriterijumska funkcija (26) teži da maksimizira profit japanskog sistema za reciklažu vozila tokom planskog horizonta. Profit je izračunat jednačinom (26.a), tako što je ukupan prihod ( $TR$ ) umanjen za ukupan trošak ( $TC$ ). Komponente  $TR$  su definisane u jednačini (26.b). Ukupan iznos primljenih ASR reciklažnih depozita, naplaćenih od JARC-a (jednačina (26.b.1)), izračunat je na osnovu količine ASR-a koji je sakupljen od reciklažnih kompanija i naknade za reciklažu ASR-a. Jednačina (26.b.2) određuje prihod koji reciklažne kompanije ostvare od prodaje sortiranih metala. Komponente  $TC$  su definisane u jednačini (26.c). Jednačina (26.c.1) izračunava troškove otkupa primljenih pošiljaka olupina vozila, a jednačina (26.c.2) predstavlja troškove skladištenja onih olupina koje nisu raspoređene za reciklažu. Jednačina (26.c.3) određuje troškove drobljenja olupina i daljeg sortiranja oslobođenih materijalnih frakcija. Jednačina (26.c.4) izračunava troškove transporta sortiranih materijala do njihovih finalnih odredišta. Jednačinom (26.c.5) su određeni troškovi naprednog termalnog tretmana u odgovarajućem postrojenju, i jednačina (26.c.6) izračunava troškove odlaganja ASR-a na najbližoj industrijskoj deponiji.

Jednačine bilansa zaliha su definisane ograničenjima (27). Ograničenja (28) definišu vrednosti nivoa početnih zaliha olupina vozila. Ograničenja (29) obezbeđuju poštovanje sigurnosnog nivoa zaliha i na taj način eliminišu mogućnost da u toku radnog vremena dođe do zaustavljanja drobilice. Jednačine (30) predstavljaju kapacitivna ograničenja raspoloživih entiteta sortiranja, a jednačine (31) održavaju njihov materijalni bilans. Definisane miksera u modelu kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju je u funkciji kombinovanja raznovrsnih frakcija u jedinstveni otpadni tok (jednačine (32)). Ograničenja (33) osiguravaju poštovanje specifične kvote u pogledu ekološke efikasnosti procesa reciklaže vozila, koja je definisana japanskim ELV zakonom (tj. procenat reciklaže ASR-a ne može biti manji od propisane vrednosti). Ograničenja (34)-(35) definišu vrednosne domene promenljivih odlučivanja.

## 4.2. Numerička studija

U narednom delu biće prezentovana numerička studija modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju. U okviru ove studije su ispitani sledeći scenariji:

- *Scenario 1 - važeća ASR kvota* (važi od 1. aprila 2010. godine). Proizvođači moraju garantovati da stopa reciklaže ASR neće pasti ispod 50%.
- *Scenario 2 - buduća ASR kvota* (stupa na snagu 1. aprila 2015. godine). Proizvođači moraju garantovati da stopa reciklaže ASR neće pasti ispod 70% (Sakai i ostali, 2007).

Ova numerička studija je urađena sa sledećim ciljevima:

- Ilustrovanje potencijala i primenljivosti predloženog modela.
- Sticanje uvida u performanse japanskog sistema za reciklažu vozila.
- Analiza uticaja japanskog ELV zakona.

U cilju što sveobuhvatnije analize performansi japanskog sistema za reciklažu vozila u ovoj numeričkoj studiji je posmatran specijalan slučaj uticaja promene dizajna vozila na aktivnosti reciklaže ASR-a, odnosno uticaj smanjenja težine vozila supstituisanjem crnih metala aluminijumom. Zbog toga je u okviru navedenih scenarija formirano po 11 test problema, tako što je udeo čelično-intenzivnih olupina vozila u dostupnim pošiljkama variran u intervalu od 0-100% sa korakom od 10%.

Pored toga, kako bi upotrebljivost predloženog modela i prezentovanih numeričkih rezultata bila verifikovana, sprovedene su analize osetljivosti sledećih reciklažnih parametara:

- Cene metala.
- Iznos ASR depozita.
- Troškovi transporta.
- Troškovi sortiranja.
- Cena olupina vozila.
- Cena naprednog termalnog tretmana.

- Cena odlaganja na deponiju.

#### 4.2.1. Sakupljanje podataka

U ovom delu su predstavljeni podaci koji su korišćeni u numeričkoj studiji modela kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju. Kako bi poređenje podataka iz različitih izbora bilo moguće, sve cene su konvertovane u evre na bazi Rojtersovih kvota od 8. avgusta 2011. godine, tj. 1 EUR =1.4186 USD=109.9722 JPY (Reuters, 2011) i (metrična) tona je izabrana sa jedinicu mase.

Materijalni sastavi analiziranih čelično intenzivnih i aluminijumsko intenzivnih tipova olupina vozila su dati u tabeli 20.

**Tabela 20.** Materijalni sastav olupina vozila (%).

Tip olupine	Materijal										
	Gvožđe	Nerdajući čelik	Čelik (ostalo)	Aluminijum	Bakar	Mesing	Magnezijum	Cink	Plastika	Guma	Ostalo
ČI <sup>a</sup>	11.64	1.64	60.09	8.31	1.47	0.26	0.22	0.27	9.77	2.66	3.66
AI <sup>b</sup>	11.00	1.37	50.43	17.22	0.88	0.10	0.09	0.31	12.50	1.16	4.94

<sup>a</sup> Prema podacima iz Cheah i ostali (2007), Jody i ostali (2010) i IDIS (2011)

<sup>b</sup> Prema podacima iz Jody i ostali (2010) i IDIS (2011)

Liste materijala lake frakcije ostataka drobljenja automobila i teške frakcije ostataka drobljenja automobila su formirane za svaki od potencijalno raspoloživih tipova pošiljaka na osnovu njihovog materijalnog sastava (izračunatom prema listi iz tabele 20 i odgovarajućem udelu ČI tipa olupina *s*) i smernica datih u studiji Phelan i ostali (2010). Liste materijala, dobijene na ovaj način, su priložene u tabeli 21.

**Tabela 21.** Materijalni sastav ASR frakcija iz pošiljke sa udelom čelično intenzivnih olupina vozila *s* (%).

<i>s</i>	Tip ASR-a	Materijal									
		Gvožđe i čelik (ostalo)	Nerdajući čelik	Aluminijum	Bakar	Mesing	Magnezijum	Cink	Plastika	Guma	Ostalo
100	Laki	3.11	1.56	26.13	5.19	0.94	0.69	0.98	34.69	9.90	16.81
	Teški	0.0	0.92	42.27	5.42	1.01	1.12	1.05	35.41	9.15	3.65
90	Laki	3.00	1.50	27.55	4.90	0.87	0.64	0.96	34.53	9.23	16.82
	Teški	0.0	0.88	43.97	5.10	0.93	1.04	1.03	34.94	8.51	3.62
80	Laki	2.88	1.44	28.96	4.61	0.80	0.59	0.95	34.36	8.56	16.83
	Teški	0.0	0.84	45.66	4.78	0.86	0.96	1.00	34.46	7.86	3.59
70	Laki	2.77	1.38	30.38	4.33	0.74	0.54	0.93	34.20	7.89	16.84
	Teški	0.0	0.80	47.36	4.45	0.78	0.87	0.98	33.99	7.22	3.55
60	Laki	2.66	1.32	31.80	4.04	0.67	0.49	0.92	34.04	7.22	16.84
	Teški	0.0	0.76	49.05	4.13	0.71	0.79	0.96	33.51	6.57	3.52
50	Laki	2.55	1.27	33.21	3.75	0.60	0.45	0.90	33.87	6.56	16.85
	Teški	0.0	0.72	50.75	3.81	0.63	0.71	0.94	33.04	5.93	3.49
40	Laki	2.43	1.21	34.63	3.46	0.53	0.40	0.88	33.71	5.89	16.86
	Teški	0.0	0.68	52.45	3.49	0.55	0.63	0.91	32.56	5.28	3.46
30	Laki	2.32	1.15	36.05	3.17	0.46	0.35	0.87	33.55	5.22	16.87
	Teški	0.0	0.64	54.14	3.17	0.48	0.55	0.89	32.09	4.64	3.43
20	Laki	2.21	1.09	37.46	2.89	0.40	0.30	0.85	33.38	4.55	16.88
	Teški	0.0	0.60	55.84	2.84	0.40	0.46	0.87	31.61	3.99	3.39
10	Laki	2.09	1.03	38.88	2.60	0.33	0.25	0.84	33.22	3.88	16.89
	Teški	0.0	0.56	57.53	2.52	0.33	0.38	0.84	31.14	3.35	3.36
0	Laki	1.98	0.97	40.30	2.31	0.26	0.20	0.82	33.06	3.21	16.89
	Teški	0.0	0.52	59.23	2.20	0.25	0.30	0.82	30.66	2.70	3.33

Efikasnosti pojedinih entiteta sortiranja, koji se koriste u japanskom sistemu za reciklažu vozila (slika 15), izračunate su primenom simulatora Post-fragmentation separation model (SMART, 2006; Coates i Rahimifard, 2009). Dobijene vrednosti su date u tabeli 22.

**Tabela 22.** Efikasnost sortiranja u slučaju pošiljke sa udelom čelično intenzivnih olupina vozila *s* (%).

Entitet	Materijalna frakcija	<i>s</i>										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Drobilica	Teški materijali	80.35	79.63	78.90	78.17	77.45	76.73	76.02	75.32	74.63	73.94	73.26
	Laki ASR	19.65	20.37	21.10	21.83	22.55	23.27	23.98	24.68	25.37	26.06	26.74
Magnetski sorter	Crni metali (1)	91.29	90.81	90.32	89.80	89.27	88.73	88.17	87.58	86.98	86.36	85.72
	Teški ASR	8.71	9.19	9.68	10.20	10.73	11.27	11.83	12.42	13.02	13.64	14.28
	Crni metali 2	4.67	4.50	4.32	4.15	3.98	3.82	3.64	3.47	3.30	3.12	2.95
	Obojeni miks	95.33	95.50	95.68	95.85	96.02	96.18	96.36	96.53	96.70	96.88	97.05
Sorter vrtložnom strujom	Obojeni metali 1	51.18	52.42	53.64	54.84	56.06	57.28	58.50	59.71	60.95	62.15	63.39
	Nemetali 1	48.82	47.58	46.36	45.16	43.94	42.72	41.50	40.29	39.05	37.85	36.61
	Obojeni metali 2	36.47	37.48	38.49	39.50	40.49	41.49	42.48	43.47	44.44	45.43	46.30
	Nemetali 2	63.53	62.52	61.51	60.50	59.51	58.51	57.52	56.53	55.56	54.57	53.70
	Aluminijum	93.99	94.33	94.65	94.92	95.20	95.47	95.68	95.87	96.10	96.26	96.51
Sorter teškim medijumom	Guma, plastika i ostalo	6.01	5.67	5.35	5.08	4.80	4.53	4.32	4.13	3.90	3.74	3.49
	Al-bogata frakcija	85.04	86.26	87.40	88.47	89.51	90.47	91.42	92.31	93.16	93.98	94.80
Ručno sortiranje	Cu-bogata frakcija	14.96	13.74	12.60	11.53	10.49	9.53	8.58	7.69	6.84	6.02	5.20
	Finalni Fe metali	99.67	99.66	99.65	99.64	99.63	99.62	99.60	99.59	99.58	99.57	99.56
	Bakarne žice	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44

Imajući u vidu da je analizirani dijagram toka reciklaže ASR-a kontinualan (slika 15), prosečne brzine magnetskih sortera, sortera teškim medijumom i ručnog

sortiranja su izračunate na osnovu prethodno usvojenih brzina drobilice i sortera vrtložnom strujom (tabela 23), i efikasnosti sortiranja (tabela 22). Na primer, prosečna brzina magnetskih sortera savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila u slučaju reciklaže pošiljke sastavljene isključivo od čelično intenzivnih olupina vozila ( $s=100\%$ ) određuje se kao:  $\max\{71.20*0.8035=57.21; 71.20*0.1965=14.0\}=57.21$  tona/h. Dobijene vrednosti prosečnih brzina sortiranja i odgovarajući troškovi su prezentovani u tabelama 23 i 24, respektivno.

**Tabela 23.** Prosečne brzine sortiranja u slučaju pošiljke sa udelom čelično intenzivnih olupina vozila  $s$  (tona/h).

$s$	Entitet					
	Droblilica <sup>a</sup>	Magnetski sorter	Sorter vrtložnom strujom <sup>b</sup>	Sorter teškim medijumom	Ručno sortiranje <sup>c</sup>	
100	71.20	57.21	24.60	24.60	52.23	52.88
90		56.70			51.49	52.14
80		56.17			50.73	51.38
70		55.66			49.98	50.63
60		55.14			49.22	49.86
50		54.63			48.47	49.11
40		54.13			47.73	48.35
30		53.63			46.97	47.58
20		53.14			46.22	46.82
10		52.65			45.47	46.05
0		52.16			44.71	45.27

<sup>a</sup> Prema specifikacijama datim u brošuri Harris shredders (2009) za model HS80115 od 2000 ks

<sup>b</sup> Usvojeno iz rada Williams i ostali (2007)

<sup>c</sup> Brzine sortiranja u slučaju tradicionalno (leva kolona) i savremeno opremljene (desna kolona) reciklažne kompanije

Japanski proizvođači automobila, za svaki model posebno, propisuju iznose ASR reciklažnih depozita na osnovu procenjene količine ASR-a koja se može generisati u reciklažnom procesu. U ovoj disertaciji, ASR reciklažni depoziti su određeni u postupku koji sledi.

U prvom koraku, izračunate su prosečne naknade za reciklažu ASR-a svih važnijih japanskih proizvođača automobila (tj. onih čiji je udeo na automobilskom tržištu Japana (bez mini vozila) veći od 1%). Inače, u važnije japanske proizvođače automobila, po opadajućem redosledu tržišnog udela (datog u zagradama) spadaju: Toyota (45.56%), Nissan (18.54%), Honda (14.09%), Mazda (5.33%), Mitsubishi (3.63%), Fuji Heavy (2.99%) i Suzuki (1.75%) (JAMA, 2011). Prosečne naknade za reciklažu ASR-a su izračunate na osnovu podataka o broju ELV-a iz kojih je sakupljen ASR i iznosima novčanih sredstava koje je JARC isplaćivao važnijim japanskim

proizvođačima automobila (Fuji Heavy, 2010; Honda, 2006-2011; Mazda, 2006-2011; Mitsubishi, 2005-2008, 2011; Nissan, 2006-2011; Suzuki, 2005-2010; Toyota, 2005-2010).

U narednom koraku, određen je generalni ASR reciklažni depozit na osnovu prethodno izračunatih prosečnih ASR reciklažnih depozita i odgovarajućih tržišnih udela važnijih japanskih proizvođača automobila.

U trećem koraku, određena je prosečna količina ASR-a po vozilu. To je urađeno na osnovu podataka o ukupnoj težini generisanog ASR-a i broju sakupljenih vozila (Fuji Heavy, 2010; Honda, 2006-2011; Mazda, 2006-2011; Mitsubishi, 2005-2008, 2011; Nissan, 2006-2011; Suzuki, 2005-2010; Toyota, 2005-2010). Zatim su uvedene pretpostavke da se iznosi ASR reciklažnih depozita neće menjati tokom planskog horizonta i da u današnjim pošiljkama udeo čelično intenzivnih olupina iznosi oko 90%.

U poslednjem koraku, izračunate su vrednosti ASR reciklažnih depozita za preostale kategorije pošiljaka u skladu sa njihovim materijalnim sastavom. Dobile vrednosti su prezentovane u tabeli 24.

**Tabela 24.** Vrednosti ASR reciklažnih depozita i prosečnih troškova sortiranja u slučaju pošiljke sa udelom čelično intenzivnih olupina vozila *s*.

<i>s</i>	ASR depozit (EUR/ELV)	Entitet (EUR/toni)					
		Drobilica	Magnetski sorter <sup>b</sup>	Sorter vrtložnom strujom	Sorter teškim medijumom	Ručno sortiranje <sup>d</sup>	
100	59.46	59.85 <sup>a</sup>	3.80	2.51	74.10 <sup>c</sup>	1.89	1.87
90	61.82		3.83			1.92	1.89
80	64.18		3.87			1.95	1.92
70	66.54		3.91			1.98	1.95
60	68.90		3.94			2.01	1.98
50	71.26		3.98			2.04	2.01
40	73.62		4.02			2.07	2.04
30	75.98		4.05			2.10	2.08
20	78.34		4.09			2.14	2.11
10	80.70		4.13			2.17	2.14
0	83.06		4.17			2.21	2.18

<sup>a</sup> Prosečna vrednost troškova prezentovanih u studiji GHK/BioIS (2006)

<sup>b</sup> Prema podacima iz prodajnog kataloga (MAS Magnetics, 2011) i usvojenoj brzini sortiranja

<sup>c</sup> Na osnovu troškova datih u studiji Manouchehri (2007), pretpostavke da vreme povraćaja investicije iznosi 4 godine i usvojenoj brzini sortiranja

<sup>d</sup> Brzine sortiranja u slučaju tradicionalno (leva kolona) i savremeno opremljene (desna kolona) reciklažne kompanije

Prodajne cene sortiranih metala zavise od trenutnog stanja na berzama sekundarnih metala (tabela 25).

**Tabela 25.** Cene sortiranih metala od jula do avgusta 2011. godine (EUR/toni).

Datum	Crni metal <sup>a</sup>	Al-bogata frakcija <sup>b</sup>	Al frakcija <sup>c</sup>	Cu-bogata frakcija <sup>d</sup>	Izolovane bakarne žice <sup>e</sup>
15/07/2011	322.61	1352.01	1487.21	2548.62	1756.06
22/07/2011	322.61	1370.66	1507.73	2564.16	
29/07/2011	322.61	1375.32	1512.86	2564.16	
05/08/2011	322.61	1381.54	1519.69	2564.16	

<sup>a</sup> Maksimalna cena za "crni izdrobljeni auto-otpad" (AMM, 2011)

<sup>b</sup> Cena za "obojenu auto-frakciju (90% aluminijuma) za sekundarne topionice" (AMM, 2011)

<sup>c</sup> Pretpostavljeno da je cena Al frakcije veća za 10% od cene Al-bogate frakcije

<sup>d</sup> Maksimalna cena za "žuti mešani mesing, strugani bakarni otpad" (AMM, 2011)

<sup>e</sup> Na osnovu potražnje za analizirani planski horizont (Recycler's World, 2011)

Cene olupina vozila zavise od njihovog materijalnog sastava (tabela 20) i vrednosti "auto-školjki" na sekundarnoj berzi metala (AMM, 2011). Izračunate vrednosti su priložene u tabeli 26.

**Tabela 26.** Cene olupina vozila u slučaju pošiljke sa udelom čelično intenzivnih olupina vozila s (EUR/toni).

Datum	s										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
15/07/2011	186.71	183.70	180.68	177.66	174.65	171.63	168.62	165.60	162.59	159.57	156.55
22/07/2011	187.19	184.12	181.05	177.98	174.91	171.84	168.78	165.71	162.64	159.57	156.50
29/07/2011	187.32	184.24	181.16	178.07	174.99	171.90	168.82	165.74	162.65	159.57	156.49
05/08/2011	187.50	184.40	181.29	178.19	175.09	171.98	168.88	165.78	162.67	159.57	156.47

Vrednosti ostalih parametara modela su priložene u tabeli 27.

**Tabela 27.** Vrednosti ostalih parametara modela.

Opis	Jedinica
Planski horizont	200 h <sup>a</sup>
Počtetne zalihe	712 tona <sup>b</sup>
Nivo sigurnosnih zaliha	712 tona
Kapitalni trošak zaliha	0.75 %/nedelja
Troškovi transporta Cu-bogate frakcije	36.37 EUR/toni <sup>c</sup>
Troškovi transporta Al-bogate frakcije	36.37 EUR /toni
Troškovi transporta Al frakcije	36.37 EUR /toni
Troškovi transporta crnih metala	36.37 EUR/toni
Troškovi transporta izolovanih bakarnih žica	150.0 EUR/toni
Troškovi transporta ASR-a do postrojenja za napredni termalni tretman	35.2 EUR/toni
Troškovi transporta ASR-a do industrijske deponije	17.6 EUR/toni <sup>d</sup>
Cena odlaganja ASR-a na industrijsku deponiju	161.7 EUR/toni <sup>e</sup>
Cena naprednog termalnog tretmana	213.7 EUR/toni <sup>f</sup>
Efikasnost obnavljanja postrojenja za napredni termalni tretman	85% <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Mesečni proizvodni plan sa 4 nedeljna (5 radnih dana po 10 h) planska perioda

<sup>b</sup> Maksimalni dnevni kapacitet drobilice

<sup>c</sup> Maksimalna težina i zapremina po tovaru su 30 tona i 15 m<sup>3</sup>, respektivno, svi sortirani metali se transportuju na jednaka rastojanja

<sup>d</sup> Najbliža industrijska deponija je duplo bliža od odgovarajućeg postrojenja za napredni termalni tretman

<sup>e</sup> Procenjeni iznos za slučaj odlaganja ASR-a na regulisanim industrijskim deponijama (GHK/BioIS, 2006; Nakamura, 2007)

<sup>f</sup> Prema podacima iz studije Warner i Brown (2008)

<sup>g</sup> Usvojeno iz radova GHK/BioIS (2006) i Vigano i ostali (2010)

#### **4.2.2. Rezultati i diskusija**

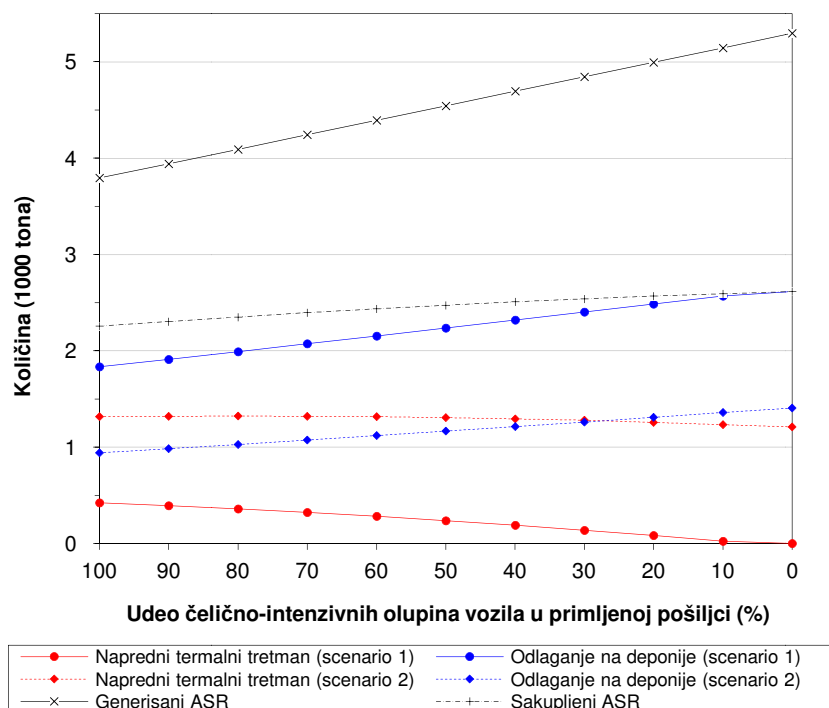
Optimalne odluke modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju za oba analizirana scenarija su prikazane na slici 16. Svi kreirani test problemi su rešeni CPLEX 12.2 solverom na Toshiba Qosmio laptopu sa Intel Core i5-430M procesorom.

Kao što se može videti sa slike 16, japanski ELV zakon ne utiče na količinu ASR-a koja se generiše operacijom drobljenja olupina vozila niti na količinu ASR-a koju sakupe proizvođači. Međutim, sasvim je očigledan uticaj koji materijalni sastav primljenih pošiljaka olupina vozila ima na količinu generisanog ASR-a (slika 16). Detaljnije, količina generisanog ASR-a se nalazi u intervalu od 3794.74 tona (kada su dostupne samo čelično intenzivne olupine vozila) do 5297.50 tona (kada su dostupne samo aluminijumsko intenzivne olupine vozila). Ovo može biti objašnjeno na sledeći način: smanjivanjem udela čelično intenzivnih olupina u dostupnim pošiljkama direktno se povećava udeo ASR-a u primljenim olupinama vozila, a indirektno se povećava količina generisanog ASR-a. Prema tome, promena u dizajnu vozila, koja je u ovoj numeričkoj studiji posmatrana sa aspekta supstituisanja crnih metala aluminijumom, može prouzrokovati povećanje količine generisanog ASR-a do čak 40%. Sa druge strane, količina ASR-a koju sakupe proizvođači zavisi od generisane količine ovog otpadnog toka i načina reciklaže primljenih olupina vozila. Na primer, tradicionalno opremljena fabrika za reciklažu vozila sav generisani ASR uvek šalje odgovarajućem proizvođaču, odnosno generisane i sakupljene količine ASR-a su jednake. Što se tiče savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila, generisani ASR se uvek mehanički reciklira, pri čemu reciklažna efikasnost zavisi od materijalnog sastava dostupnih pošiljaka olupina vozila. Pošto aluminijumsko intenzivne olupine vozila imaju veći sadržaj obojenih metala, koji se smatra jednim od glavnih pokretača procesa planiranja reciklaže ASR-a, veći udeo ovog tipa olupina u primljenoj pošiljci značiće intenzivniju mehaničku reciklažu i manje količine sakupljenog ASR-a.



Rezultati testiranja predloženog modela su potvrdili da japanski ELV zakon ima ključan uticaj na donošenje odluke o reciklaži ASR-a. Štaviše, analizom podataka o količinama ASR-a koje se odlažu na deponije i recikliraju u postrojenju za napredni termalni tretman (slika 16), zaključeno je da će povećanje reciklažne kvote na 70% uticati da se količina ASR-a koja se odlaže na deponije smanji za oko 50%. Ovo jasno potvrđuje prvobitnu nameru japanskih zakonodavaca da kreiraju ekološki održiv sistem za reciklažu vozila.

Testiranje predloženog modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju je ukazalo na to da druga ruta predstavlja ne samo bolju, već i pri usvojenim baznim vrednostima parametara modela jedinu ekonomski prihvatljivu rutu za reciklažu ASR-a. Količina primljenih olupina vozila u toku svakog planskog perioda tačno je jednaka maksimalnom kapacitetu drobilice (3560 tona/nedelja). Pored toga, jasno je identifikovano da savremeno opremljena fabrika za reciklažu vozila teži da ostvari što je moguće veći kvantitet i viši kvalitet sortiranih metalnih tokova bez obzira na materijalni sastav dostupnih pošiljaka. Obe frakcije ASR-a se uvek mehanički recikliraju, kako bi vredni obojeni metali mogli biti izolovati. Na primer, Al-bogata frakcija se uvek dodatno prečišćava, jer dodatni prihod uvek nadmašuje troškove njenog sortiranja.



Slika 16. Optimalne odluke modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju.

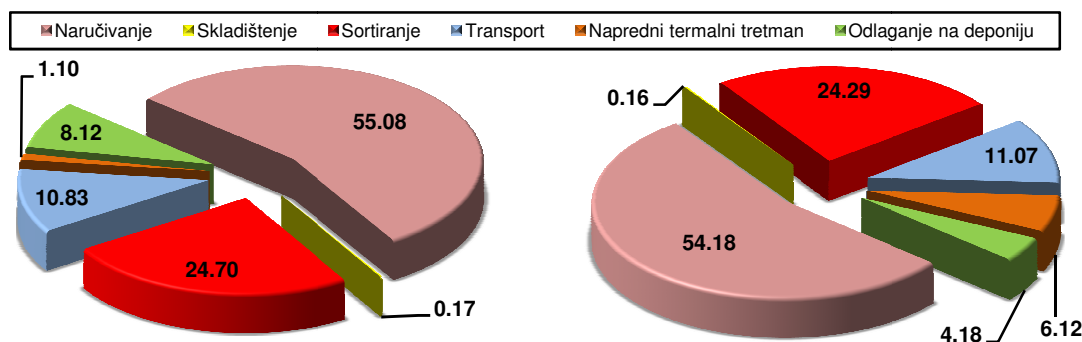
U tabeli 28 su za 22 analizirana bazna test problema prikazane vrednosti ukupnog profita japanskog sistema za reciklažu vozila, vrednosti profita savremene fabrike za reciklažu vozila po toni prerađenih olupina, dobiti proizvođača po toni sakupljenog ASR-a (izračunati kao razlike vrednosti primljenih ASR reciklažnih depozita, i troškova naprednog termalnog tretmana i/ili odlaganja sakupljenog ASR-a), i vrednosti ostvarenih ekoloških efikasnosti procesa reciklaže ASR-a. Analizom prikazanih podataka se može zaključiti da na poslovanje savremeno opremljene japanske fabrike za reciklažu vozila neće uticati uvođenje strožije ASR kvote. To nije neočekivano, ako se zna da su prema japanskom ELV zakonu proizvođači ti koji su isključivo zaduženi za sakupljanje ASR-a i njegovu reciklažu. Sa druge strane, više je nego očigledan uticaj koji materijalni sastav primljenih pošiljaka olupina vozila ima na vrednost ostvarenog profita savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila. Imajući u vidu da aluminijumsko intenzivne olupine vozila karakteriše znatno veći sadržaj obojenih metala (tabela 20), može se zaključiti da veća dostupnost ovog tipa olupina donosi veći profit modernim opremljenim fabrikama za reciklažu vozila. Detaljnije, vrednosti njihovog profita se nalaze u intervalu od 146.94 EUR/toni prerađenih olupina (kada su dostupne pošiljke sastavljene isključivo od čelično intenzivnog tipa olupina vozila) do 192.56 EUR/toni prerađenih olupina (kada su dostupne pošiljke sastavljene isključivo od aluminijumsko intenzivnog tipa olupina vozila). Što se tiče poslovnih rezultata koje beleže proizvođači, povećanje ASR kvote za 20% uticaće da se njihov dobitak smanji za oko 30 EUR/toni sakupljenog ASR-a. Međutim, imajući u vidu da će svaka tona sakupljenog ASR-a i dalje donositi značajan profit proizvođačima (od 92.82 EUR do 101.23 EUR), zaključeno je da iznos ASR reciklažnog depozita može ostati na istom cenovnom nivou i kada u Japanu bude stupila na snagu strožija ASR kvota.

**Tabela 28.** Profiti i ekološke efiksanosti numeričke studije modela reciklaže ASR-a.

Test problem	Scenario	s (%)	Ukupan profit (EUR)	SFRV profit (EUR/toni)	Dobitak proizvođača (EUR/toni)	Efikasnost reciklaže ASR-a (%)
1	1	100	2,364,118.21	146.94	120.35	50.00
2		90	2,421,209.24	150.35	121.54	50.00
3		80	2,482,241.53	154.04	122.76	50.00
4		70	2,547,326.43	158.01	124.03	50.00
5		60	2,615,415.57	162.22	125.34	50.00
6		50	2,688,207.85	166.76	126.73	50.00
7		40	2,763,710.80	171.50	128.14	50.00
8		30	2,842,323.60	176.47	129.61	50.00
9		20	2,925,068.41	181.76	131.16	50.00
10		10	3,010,237.51	187.21	132.75	50.00
11		0	3,091,260.47	192.56	133.40	50.59
12	2	100	2,301,973.69	146.94	92.82	70.00
13		90	2,356,640.57	150.35	93.53	70.00
14		80	2,415,225.37	154.04	94.27	70.00
15		70	2,477,824.76	158.01	95.02	70.00
16		60	2,543,448.86	162.22	95.81	70.00
17		50	2,613,776.01	166.76	96.65	70.00
18		40	2,686,817.07	171.50	97.49	70.00
19		30	2,762,954.25	176.47	98.37	70.00
20		20	2,843,245.60	181.76	99.30	70.00
21		10	2,925,946.06	187.21	100.26	70.00
22		0	3,007,049.00	192.56	101.23	70.00

s, udeo čelično-intenzivnih olupina vozila u primljenoj pošiljci; SFRV, savremena fabrika za reciklažu vozila

Posmatrajući udele pojedinih troškovnih kategorija u strukturi prosečnih troškova japanskih fabrika za reciklažu ELV-a u slučaju važeće ASR kvote (test problemi 1-11), može se primetiti da najznačajnije segmente čine: naručivanje olupina vozila (55.08%), sortiranje (24.70%) i transport do optimalnih odredišta (10.83%) (slika 5). Sa druge strane, uvođenjem strožije kvote reciklaže ASR-a (test problemi 12-22) segment troškova naprednog termalnog tretmana dobiće na značaju (6.12%), dok će udeo troškova odlaganja na deponiju biti dvostruko manji (4.18%) (slika 17).



**Slika 17.** Struktura prosečnih troškova japanskih fabrika za reciklažu ELV-a (%); levo – pri važećoj ASR reciklažnoj kvoti, desno – pri budućoj ASR reciklažnoj kvoti.

Što se tiče ekološke efikasnosti procesa reciklaže ASR-a, treba istaći da je čak i kvota koja stupa na snagu 1. aprila 2015. godine lako dostignuta u kreiranim test problemima (tabela 28). Prema tome, može se zaključiti da je japanski sistem za reciklažu vozila već uveliko spreman za finalnu fazu primene toliko pominjanog ELV zakona.

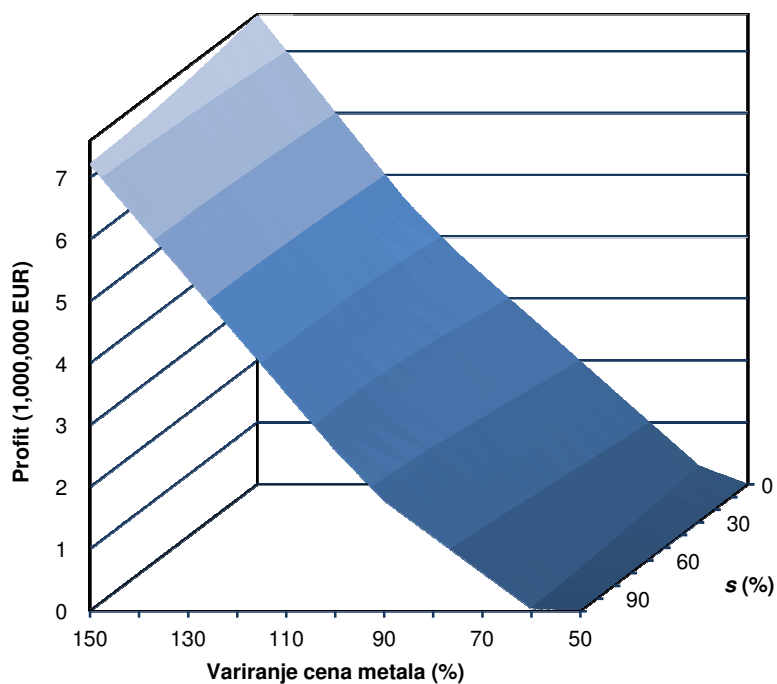
#### *4.2.2.1. Analize osetljivosti*

Kako bi bila verifikovana upotrebljivost modela reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju, prezentovanih numeričkih rezultata, izvedenih zaključaka i iznetih preporuka, neophodno je sprovesti analize osetljivosti svih reciklažnih parametara. Prema tome, stabilnost predloženog modela je ispitana sprovođenjem analiza osetljivosti parametara prihoda (cene metala i iznos ASR depozita) i parametara rashoda (troškovi transporta, troškovi sortiranja, cena olupina vozila, cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na industrijsku deponiju). Štaviše, analizirani su uticaji svih reciklažnih parametara na vrednosti ostvarenog profita japanskog sistema za reciklažu vozila, u slučajevima važeće i buduće ASR reciklažne kvote. Svi analizirani parametri prihoda i rashoda su povećani i smanjeni za 50% sa korakom od 10% u odnosu na 11 baznih test problema (opisanih u poglavlju 4.2). Kao rezultat toga je kreirano i optimalno rešeno novih 1540 test problema, odnosno 770 po analiziranom scenariju.

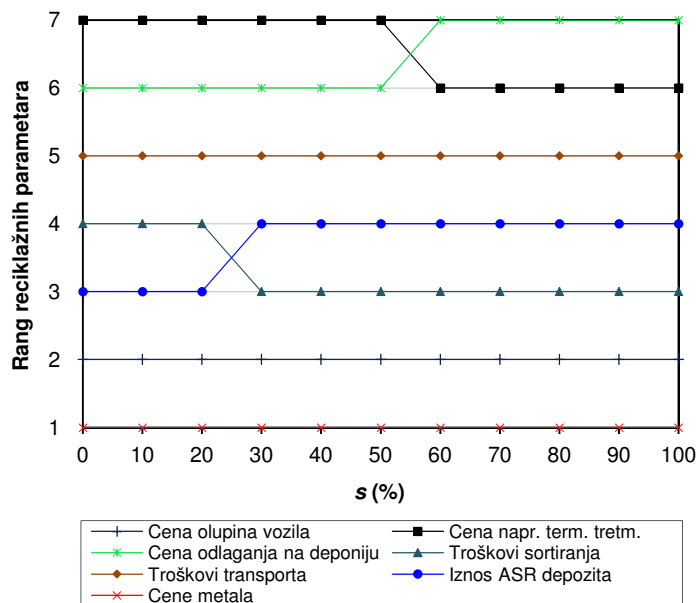
Što se tiče scenarija 1, sprovedene analize osetljivosti su pokazale da na vrednost ostvarenog profita japanskog sistema za reciklažu vozila najviše može uticati promena cena metala. Rast cena na berzama otpadnih metala proizvodi skoro linearno povećanje profitabilnosti japanskog sistema za reciklažu vozila (slika 18). Tako na primer, njihov porast za 50% bi mogao povećati vrednost ostvarenog profita od 2.45 puta ( $s=0\%$ ) do 2.82 puta ( $s=70\%$ ). Sa druge strane, krah berzi (sekundarnih) metala bi mogao naterati japanske reciklažne kompanije da obustave prijem pošiljaka olupina vozila i njihovu dalju reciklažu, kako bi izbegle eventualne finansijske gubitke. Ova situacija je ilustrovana na slici 18 u slučaju smanjenja cena metala za 50%.

Na slici 19 su prikazani rangovi analiziranih parametara u slučaju scenarija 1. Sa ove slike, koja detaljno prikazuje zavisnost rangova reciklažnih parametara od udela

čelično intenzivnih olupina vozila u primljenoj pošiljci  $s$ , može se uočiti sledeće: drugorangirani parameter je cena olupina vozila, na trećem i četvrtom mestu se smenjuju iznos ASR depozita i troškovi sortiranja, petoplasirani su transportni troškovi, dok su poslednje mesto povremeno zauzimali cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na deponiju (slike P1-P6 u prilogu 3).

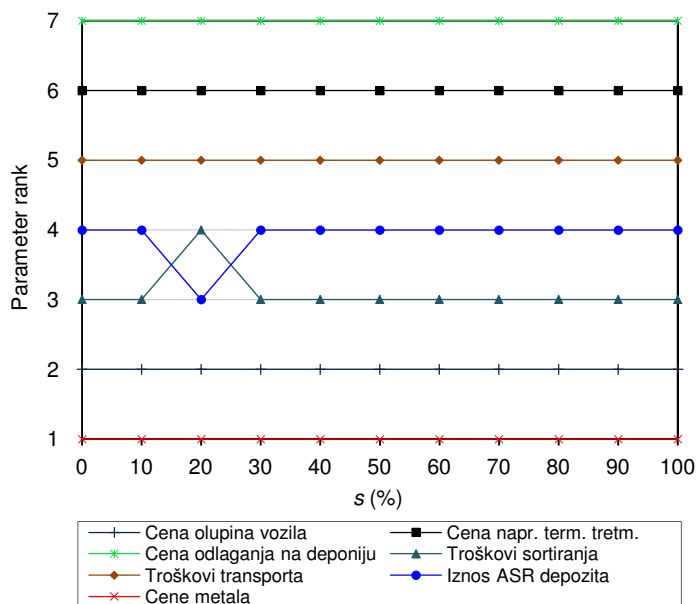


**Slika 18.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cena metala u slučaju važeće ASR kvote.



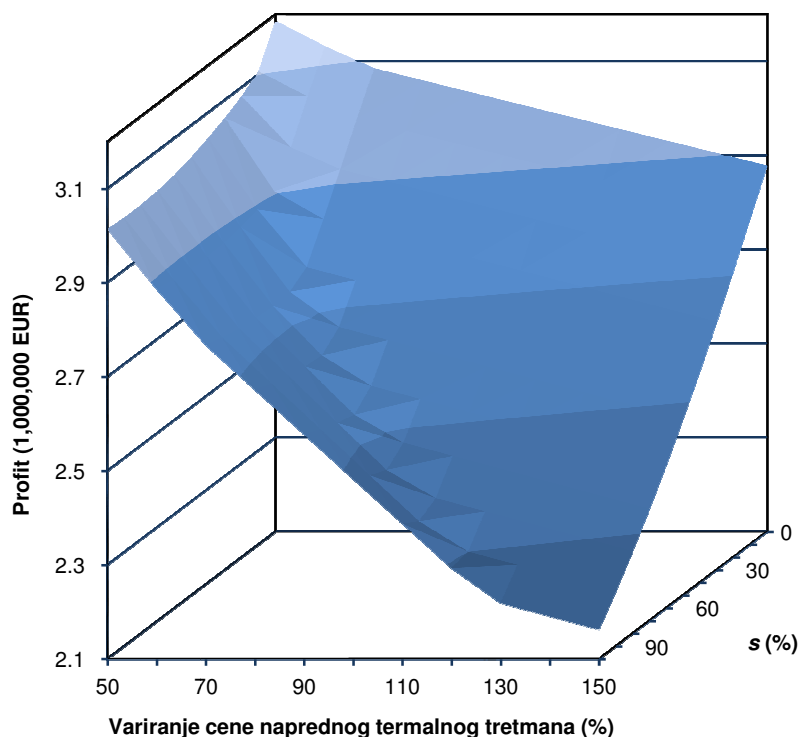
Slika 19. Rangovi reciklažnih parametara u slučaju važeće ASR kvote.

Uvidom u rezultate dobijene analizama osetljivosti za slučaj buduće ASR kvote (slika 20), uočeno je da promena cena metala ostaje parametar koji ima najveći uticaj na vrednost ostvarenog profita japanskog sistema za reciklažu vozila.



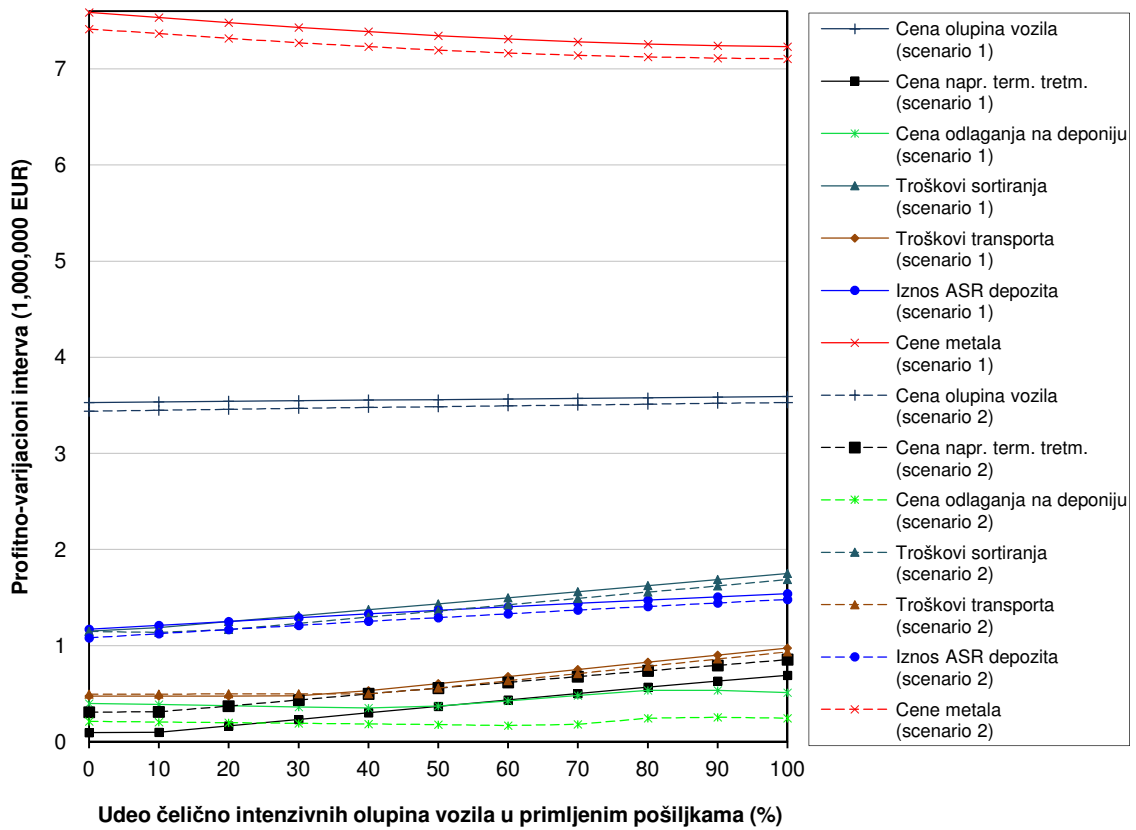
Slika 20. Rangovi reciklažnih parametara u slučaju buduće ASR kvote.

Što se tiče troškovnih parametara modela, cena olupina vozila je prvorangirana, a prate je troškovi sortiranja, troškovi transporta, cena naprednog termalnog tretmana (slika 21) i cena odlaganja na industrijsku deponiju (slike P7-P12 u prilogu 3).



**Slika 21.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene naprednog termalnog tretmana u slučaju buduće ASR kvote.

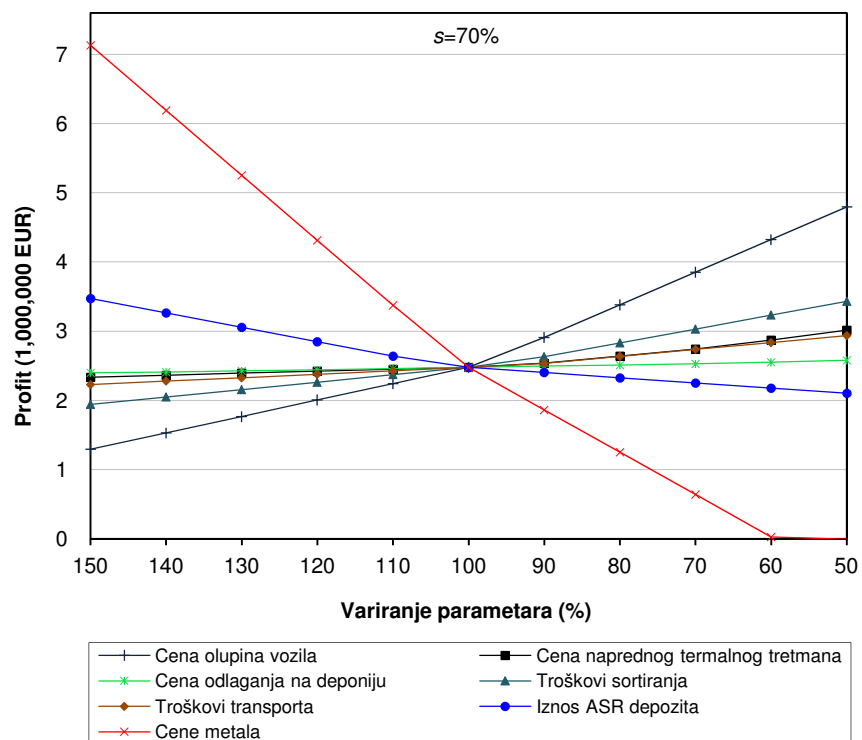
Na slici 22 je prezentovana funkcionalna zavisnost vrednosti profitno-varijacionog intervala reciklažnih parametara od materijalnog sastava primljenih pošiljaka olupina vozila. Sa ove slike se može videti da uvođenje strožije ASR kvote povećava uticaj samo cene naprednog termalnog tretmana. Pored toga, evidentno je da će značaj ovog reciklažnog parametra samo dodatno rasti sa promenom dizajna vozila (tj. sa povećanjem udela ASR-a u primljenim olupinama vozila). Uticaj ASR kvote na ostale parametre je relativno ograničen (smanjivanje značaja do 10%), osim u slučaju cene odlaganja ASR-a na deponiju, koja višestruko gubi na svom značaju.



Slika 22. Vrednosti profitno-varijacionog intervala reciklažnih parametara u posmatranim scenarijima.

Konačno, u oba analizirana scenarija je jasno identifikovan uticaj koji materijalni sastav primljenih pošiljaka olupina vozila ima na rang reciklažnih parametara (slika 22). Na primer, slika 23 jasno prikazuje osetljivost predloženog modela na variranje različitih parametara prihoda i rashoda u slučaju pošiljke sa 70% udelom čelično intenzivnih olupina i buduće ASR kvote.





**Slika 23.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu reciklažnih parametara u slučaju pošiljke sa 70% udelom čelično intenzivnih olupina i buduće ASR kvote.

## 5. MODELIRANJE I UPRAVLJANJE SISTEMOM ZA RECIKLAŽU VOZILA U REPUBLICI SRBIJI

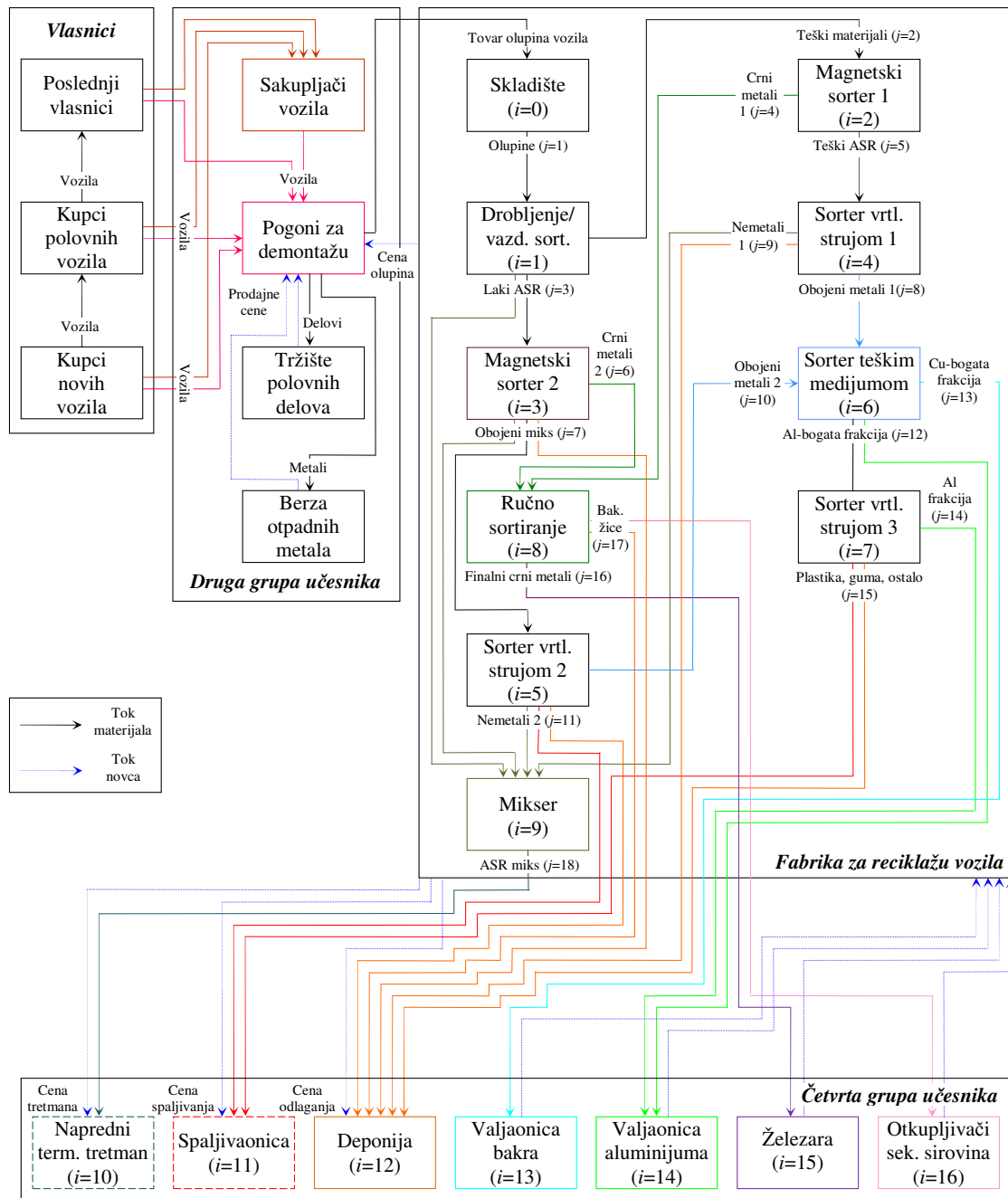
Jasno izražena tendencija da se kreira ekonomski održiv reciklažni sistem i trenutno nezadovoljavajuće stanje u Republici Srbiji po pitanju reciklaže vozila mogu biti posmatrani kao glavni motivi za modeliranje sistema koji bi na duže staze bio *najisplativiji* sa aspekta profita ostvarenog u procesu reciklaže vozila i *najefikasniji* sa aspekta ekološke efikasnosti. S tim u vezi, na slici 24 je priložen dijagram toka materijala i novca projektovanog sistema za reciklažu vozila u Republici Srbiji. On je kreiran na bazi rezultata i zaključaka do kojih se došlo prilikom modeliranja i upravljanja EU i japanskim sistemima za reciklažu vozila, ali i sledećih dokumenata koji su na snazi u Republici Srbiji: 1. Pravilnik o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (u daljem tekstu skraćeno Pravilnik) (MERS, 2010); 2. Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b); 3. Zakon o upravljanju otpadom (Republika Srbija, 2010a); 4. Nacionalna strategija upravljanja otpadom sa programom približavanja Evropskoj Uniji (MERS, 2013).

Kao što se sa slike 24 može uočiti, postoje 4 grupe subjekata uključenih u proces reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji. Prvu grupu učesnika sistema za reciklažu vozila čine  *vlasnici vozila*  na kraju životnog ciklusa, koji su istovremeno i mrežni izvori (Vidović i ostali, 2011). U ovu grupu spadaju:  *kupci novih vozila, kupci polovnih vozila i/ili poslednji vlasnici* . Svaki vlasnik vozila na kraju životnog ciklusa je u obavezi da isto preda licu koje vrši sakupljanje i/ili njegov primarni tretman, tj. demontažu (MERS, 2010). Pravilnikom je definisano da vlasnik ne plaća nikakvu naknadu prilikom predaje vozila, ali i naglašeno da vozilo mora biti isporučeno u celini, odnosno sa svim osnovnim sastavnim delovima, uključujući motor i karoseriju, točkove, automobilske gume, baterije, akumulatore i dr. U izuzetnom slučaju, ako vlasnik otpadnog vozila nije poznat, tada prema Pravilniku, sakupljanje i predaju vozila obezbeđuje jedinica lokalne samouprave na čijoj se teritoriji ono nalazi.

Drugu grupu čine  *sakupljači vozila na kraju životnog ciklusa i pogoni za demontažu* . U sakupljače spadaju auto otpadi, prodavci vozila i servisi za njihovu popravku. Pravilnikom je propisano da oni moraju imati odgovarajuću dozvolu za

obavljanje ove delatnosti i skladišni prostor. Pogoni za demontažu od sakupljača preuzimaju vozila na kraju životnog ciklusa bez ikakve nadoknade. Oni iz vozila moraju istakati i odvojeno sakupljati: gorivo, motorno ulje, ulje iz transmissionog sistema, hidraulično ulje (uključujući i ulje iz amortizera), tečnost za hlađenje, tečnost iz sistema za kočenje, i druge tečnosti i opasne materije ukoliko ih vozilo ima (MERS, 2010). Pravilnikom je takođe propisano da demontažni pogoni moraju posedovati zatvoreno skladište za odlaganje rezervnih delova, skladište sa nepropusnom podlogom i zatvorenim kontejnerima za zamašćene delove, opremu za sakupljanje prosutih tečnosti, separatorom ulja i masti, i sl. Pored toga, demontažeri rasklapaju vredne delove (na primer, motor vozila), i prodaju ih na *tržištu polovnih delova* ili *berzi otpadnih metala*. Preostale dekontaminirane olupine, demontažeri prodaju fabrici za reciklažu vozila radi njihove dalje prerade. Inače, poželjno je da pogoni za demontažu budu opremljeni auto presama, kako bi se smanjili troškovi transporta olupina vozila do fabrike za reciklažu.

Fabrika za reciklažu vozila predstavlja dominantnog učesnika projektovanog sistema i njen detaljan opis je dat u poglavlju 3.1. Inače, u Republici Srbiji trenutno ne postoji fabrika za reciklažu vozila, već se integrisani proces demontaže i bazne reciklaže (tj. presovanje olupina, drobljenje olupina i sortiranje isključivo crnih metala) obavlja samo u nekoliko postrojenja za tretman metalnog otpada (Republika Srbija, 2010b). Detaljnije, Vlada Srbije je dozvolila da sledećih 9 firmi vrši tretman vozila na kraju životnog ciklusa, tj. (MERS, 2012): 1. Centar za reciklažu, Beograd; 2. Metalopromet za reciklažu otpada i preradu metala, Kula; 3. Energorom, Bela Crkva; 4. Inos – Sinma, Sevojno; 5. Inos napredak, Šabac; 6. Maksi Co, Aleksinac; 7. Esoteq, Beograd; 8. Zastava Reomat, Kragujevac; i 9. Braća Ilić, Bačka Palanka. Pošto prethodno pobrojana postrojenja za tretman vozila ni u kom slučaju nisu sposobna da uspešno odgovore na izuzetno kompleksan zadatak reciklaže vozila, potrebno je što pre izgraditi fabriku za reciklažu vozila, jer bi ona imala ogroman značaj ne samo za našu zemlju, nego i čitav region.



Slika 24. Dijagram toka materijala i novca projektovanog sistema za reciklažu vozila u Republici Srbiji.

Poslednju, četvrtu grupu učesnika sistema za reciklažu vozila čini 7 finalnih odredišta. U integrisanom reciklažnom sistemu, fabrika za reciklažu vozila može alocirati izolovane otpadne tokove ka nekoliko otpadnih entiteta, tj. ka *deponiji*, *spaljivaonici* ili *postrojenju za napredni termalni tretman*. Treba pomenuti da u regionu ne postoji ni jedno postrojenje za napredni termalni tretman i upravo iz tog razloga je

ovaj entitet na slici 24 označen isprekidanom linijom. Pored toga, spaljivaonica komunalnog otpada kao kontrolisan, tehnološki vođen proces pri kom su minimizirani negativni uticaji na životnu sredinu ne postoji u regionu (Čizmić i ostali, 2012). U Nacionalnoj strategiji upravljanja otpadom sa programom približavanja Evropskoj Uniji je predloženo rešenje za prevazilaženje brojnih problema u oblasti upravljanja otpadnim tokom vozila na kraju životnog ciklusa, koje obuhvata formiranje mreže 5 vrsta infrastrukturnih objekata na području Srbije u funkciji efikasnog upravljanja otpadom, od čega je planirana izgradnja 4 spaljivaonice otpada (MERS, 2013). Istovremeno, treba imati u vidu da Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b) dopušta mogućnost spaljivanja ostataka drobljenja automobila (ali samo u mešavini sa komunalnim otpadom) u spaljivaonicama koje se nalaze u okviru cementara. Zbog toga će posebna pažnja u poglavlju rezultati i diskusija (poglavlje 5.1.2.3.2) biti poklonjena analizi značaja naprednog termalnog tretmana i spaljivanja za proces reciklaže vozila. Sa druge strane, sortirani metalni tokovi se mogu alocirati ka *železari, valjaonici bakra i valjaonici aluminijuma*. Sakupljene bakarke žice se prodaju *otkupljivačima sekundarnih sirovina* u cilju njihove dalje reciklaže.

Pri dugoročnom modeliranju sistema za reciklažu vozila gotovo je nemoguće sve ulazne podatke izraziti u determinističkom obliku. Na primer, troškovi transporta i sortiranja su neizvesni u realnosti, jer mogu varirati u vremenu i prostoru. Pored toga, troškovi odlaganja na deponije, sagorevanja otpada i naprednog termalnog tretmana variraju od države do države i njihove vrednosti su podložne (najčešće) godišnjim promenama. Dalje, brzine prerade raznovrsne opreme koja može biti instalirana u fabrikama za reciklažu vozila, kao i ekološke efikasnosti pogona za napredni termalni tretman i spaljivaonica otpada ne mogu biti posmatrane kao determinističke vrednosti u dugom roku, jer sve one zavise od sadržaja materijalnih tokova. Konačno, pri dugoročnom planiranju reciklaže vozila posmatranje cena otpadnih metala kao determinističkih vrednosti se može smatrati potpuno neprikladnim. Sa druge strane, sagledavanje prethodno pobrojanih parametara sistema za reciklažu vozila kao intervalnih vrednosti je sasvim prirodno, bilo da se planiranje vrši na godišnjem ili višegodišnjem nivou. Pristup za rešavanje takvog problema se naziva intervalno linearno programiranje. Ono predstavlja ekstenziju klasičnog problema linearnog

programiranja u okruženje okarakterisano neizvesnostima (Sengupta i ostali, 2001). Intervalno linearno programiranje može uspešno reflektovati neizvesnosti sistema koji se modelira, potrebe za informacijama su male (za razliku od fazi i stohastičkog programiranja), a algoritmi za rešavanje laki za korišćenje (Simić i Dimitrijević, 2013b). pored toga, važno je pomenuti da ovaj pristup nije ranije bio korišćen za rešavanje problema reciklaže otpada.

Glavni doprinos ovog poglavlja predstavlja razvoj *modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti*. Njegovi osnovni naučni ciljevi su:

- Optimizacija ekonomske i ekološke efikasnosti buduće srpske industrije za reciklažu vozila.
- Istraživanje uticaja koji će Pravilnik o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji imati na buduću reciklažnu industriju.

Sporedne ciljeve predstavljaju analize uticaja dostupnosti postrojenja za napredni termalni tretman i spaljivaonice gradskog otpada.

Konačno, formulisani model projektovanog sistema za reciklažu vozila u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti, može imati izuzetnu praktičnu vrednost, jer može poslužiti kao osnova za razvoj modernog reciklažnog sistema.

## **5.1. Metodologija**

### ***5.1.1. Metoda intervalnog linearnog programiranja***

Uočeno je da determinističke optimizacione tehnike, poput linearnog programiranja nisu pogodne za dugoročno, strateško modeliranje složenih problema saobraćajne ekologije (Pei, 2011). Štaviše, formulacija modela linearnog programiranja u cilju rešavanja problema dugoročnog planiranja reciklaže vozila bi zahtevala eksplicitno određivanje vrednosti brojnih parametara modela čije realne vrednosti su po pravilu nepoznate ili nedostupne (Zou i ostali, 2010a). Prema tome, primena neke od postojećih metoda za rukovanje neizvesnostima je neophodna, kako bi se postojeći

modeli linearnog programiranja proširili i kao takvi bili upotrebljivi za dugoročno planiranje.

Razvijene su brojne metode za tretiranje neizvesnosti. Jedna od popularnijih je metoda *intervalnog linearnog programiranja*. Opšti model intervalnog linearnog programiranja je definisan na sledeći način (Huang i ostali, 1993; Shaocheng, 1994):

$$\text{Min } f^{\pm} = \mathbf{C}^{\pm} \mathbf{X}^{\pm} \quad (36)$$

pri ograničenjima:

$$\mathbf{A}^{\pm} \mathbf{X}^{\pm} \leq \mathbf{B}^{\pm} \quad (37)$$

$$\mathbf{X}^{\pm} \geq 0 \quad (38)$$

gde  $\pm$  predstavlja intervalni broj sa poznatom gornjom granicom “+” i donjom granicom “-”, ali nepoznatim informacijama o raspodeli (Huang i Moore, 1993);  $f^{\pm}$  je kriterijumska funkcija;  $\mathbf{A}^{\pm} = \{\mathbf{R}^{\pm}\}^{m \times n}$  i  $\mathbf{C}^{\pm} \in \{\mathbf{R}^{\pm}\}^{1 \times n}$  su koeficijenti;  $\mathbf{B} \in \{\mathbf{R}^{\pm}\}^{m \times 1}$  predstavlja ograničenja;  $\mathbf{X}^{\pm} \in \{\mathbf{R}^{\pm}\}^{n \times 1}$  predstavlja nepoznate promenljive; i  $\mathbf{R}^{\pm}$  označava skup intervalnih brojeva.

#### 5.1.1.1. Osnove intervalnog linearnog programiranja – definicije i aritmetika

##### 5.1.1.1.1. Definicije

*Definicija 1* – Intervalni broj.

Intervalni broj  $a^{\pm}$  je definisan kao interval sa poznatom donjom i gornjom granicom, ali nepoznatom raspodelom  $a$  (Huang i ostali, 1992).

Zatvoreni realni interval  $[a^-, a^+]$  označem sa  $a^{\pm}$ , je realni intervalni broj koji je potpuno definisan sa:

$$a^{\pm} = [a^-, a^+] = \{a \in R \mid a^- \leq a \leq a^+; a^-, a^+ \in R\} \quad (39)$$

gde  $a^-$  i  $a^+$  predstavljaju donju granicu i gornju granicu, respektivno.

*Definicija 2* – Rangiranje intervalnih brojeva (Pandian i Anuradha, 2011).

- 1) Dva intervalna broja  $a^\pm = [a^-, a^+]$  i  $b^\pm = [b^-, b^+]$  se nazivaju jednakim ako i samo ako je  $a^- = b^-$  i  $a^+ = b^+$ .
- 2)  $a^\pm \leq b^\pm$  ako je  $a^- \leq b^-$  i  $a^+ \leq b^+$ .
- 3)  $a^\pm < b^\pm$  ako je  $a^- < b^-$  i  $a^+ < b^+$ .
- 4)  $a^\pm \geq b^\pm$  ako je  $a^- \geq b^-$  i  $a^+ \geq b^+$ .

*Definicija 3 – Tačka interval.*

Intervalni broj  $a^\pm = [a^-, a^+]$  se zove tačka intervalni broj ako je  $a^- = a^+$ .

*Definicija 4 – Neograničeni interval.*

Interval je neograničen, ako je donja granica ( $a^\pm = [-\infty, a^+]$ ) ili gornja granica beskonačnost ( $a^\pm = [a^-, \infty]$ ).

*Definicija 5 – Intervalni vektor.*

Realni intervalni vektor  $\mathbf{X} \in I(\mathbb{R}^n)$  je skup oblika  $\mathbf{X} = (x_j^\pm)_{n \times 1}$ , gde  $j=1,2,\dots,n$  i  $x_j^\pm = [x_j^-, x_j^+] \in I(\mathbb{R})$ .

*Definicija 6 – Intervalna matrica.*

Realna intervalna matrica  $\mathbf{A} \in I(M(\mathbb{R}^n))$  je skup oblika  $\mathbf{A} = (a_{ij}^\pm)_{n \times n}$ , gde  $i,j=1,2,\dots,n$  i  $a_{ij}^\pm = [a_{ij}^-, a_{ij}^+] \in I(\mathbb{R})$ .

*Definicija 7 – Srednja tačka.*

Srednja tačka intervalnog broja  $a^\pm = [a^-, a^+]$  je definisana kao:

$$m(a^\pm) = \left( \frac{a^- + a^+}{2} \right)$$



*Definicija 8 – Širina (tj. poluširina).*

Širina (tj. poluširina) intervalnog broja  $a^\pm = [a^-, a^+]$  se definiše kao:

$$w(a^\pm) = \left( \frac{a^+ - a^-}{2} \right)$$

*Definicija 9 – Alternativno predstavljanje intervalnog broja.*

Intervalni broj  $a^\pm = [a^-, a^+]$  je alternativno predstavljen kao  $a^\pm = \langle m(a^\pm), w(a^\pm) \rangle$ , gde su  $m(a^\pm)$  i  $w(a^\pm)$  srednja tačka i poluširina intervalnog broja  $a^\pm$ .

*Definicija 10 – Numerička vrednost intervalnog broja.*

Numerička vrednost intervalnog broja  $a^\pm = [a^-, a^+]$  se definiše kao broj čija vrednost leži u intervalu između gornje i donje granice  $a^\pm$  (Huang i Moore, 1993):

$$a^- \leq a^{\pm(w)} \leq a^+$$

gde je  $a^{\pm(w)}$  numerička vrednost  $a^\pm$ .

*Definicija 11 – Najpoželjnija i najnepoželjnija vrednost kriterijumske funkcije (Chinneck i Ramadan, 2000).*

U slučaju minimizacije kriterijumske funkcije i  $x_j \geq 0, \forall j$ ,  $f^- = \sum_{j=1}^n c_j^- x_j$  se zove

najpoželjnija vrednost kriterijumske funkcije, a  $f^+ = \sum_{j=1}^n c_j^+ x_j$  se zove najnepoželjnija

vrednost kriterijumske funkcije.

#### 5.1.1.1.2. Intervalna aritmetika

Neka su  $a^\pm = [a^-, a^+]$  i  $b^\pm = [b^-, b^+]$  realni intervalni brojevi i neka je  $*$  bazni operator. Tada se operacije nad intervalnim brojevima  $a^\pm$  i  $b^\pm$  mogu definisati kao:

$$a^\pm * b^\pm = \{a * b | a \in a^\pm \wedge b \in b^\pm\}.$$

Kod intervalne aritmetike važe sledeća pravila:

- Sabiranje -  $a^\pm + b^\pm = [a^- + b^-, a^+ + b^+]$ .
- Oduzimanje -  $a^\pm - b^\pm = [a^- - b^-, a^+ - b^+]$ .
- Množenje -  $a^\pm \cdot b^\pm = [\min\{a^-b^-, a^-b^+, a^+b^-, a^+b^+\}, \max\{a^-b^-, a^-b^+, a^+b^-, a^+b^+\}]$ .
- Množenje konstantom  $x$  -  $x \cdot a^\pm = \begin{cases} [xa^-, xa^+] & \text{za } x \geq 0 \\ [xa^+, xa^-] & \text{za } x \leq 0 \end{cases}$ .
- Recipročna vrednost -  $1/a^\pm = [1/a^+, 1/a^-]$ .
- Deljenje -  $a^\pm / b^\pm = a^\pm \cdot 1/b^\pm$ .

#### 5.1.1.2. Algoritmi za rešavanje problema intervalnog linearnog programiranja

Model definisan jednačinama (36)-(38) može biti razložen na 2 podmodela koji odgovaraju donjoj  $f^-$  i gornjoj  $f^+$  granici kriterijumske funkcije respektivno, i rešen primenom standardnih algoritama intervalnog linearnog programiranja.

Među brojnim algoritmima za rešavanje problema intervalnog linearnog programiranja posebno treba istaći Sivi LP<sup>31</sup> (Huang i Moore, 1993) i Najbolji najlošiji slučaj<sup>32</sup> (Chinneck i Ramadan, 2000; Shaocheng, 1994). Oni predstavljaju 2 najviše korišćena algoritma, jer ih odlikuje zavidna računarska efikasnost pri izračunavanju optimalnih intervalnih rešenja (Zhou i ostali, 2009). Ukratko, oba algoritma preformulišu originalni model intervalnog linearnog programiranja (predstavljen jednačinama (36)-(38)) korišćenjem ekstremnih vrednosti ograničenja, kako bi predstavili “najkonzervativnije” i “najagresivnije” uslove. Međutim, osnovna razlika između pomenuta dva algoritma leži u tome da GLP algoritam diferencira selekciju ekstremnih parametarskih vrednosti (tj, donje i gornje granice koeficijenata) promenljivih odlučivanja u kriterijumskoj funkciji na bazi njihovih različitih znakova (tj, negativna ili pozitivna vrednost koeficijenta  $c_j$ ), dok BWC tretira sve parametre bez

<sup>31</sup> Sivi LP - *engl.* Gray linear programming algorithm (GLP)

<sup>32</sup> BWC - *engl.* Best worst case algorithm (BWC)

diskriminacije. Oba algoritma obezbeđuju intervalna rešenja, i svaka tačka unutar tog intervala se posmatra kao potencijalno rešenje na bazi kojeg se donosi upravljačka odluka.

#### 5.1.1.2.1. GLP algoritam

GLP ili interaktivni algoritam su razvili Huang i Moore (1993) sa ciljem da reše originalni model intervalnog linearnog programiranja putem detaljne analize međusobnih veza između parametara i promenljivih, i između kriterijumske funkcije i ograničenja (Huang i ostali, 1992). Prema GLP algoritmu, rešenje modela intervalnog linearnog programiranja može biti dobijeno iz 2 koraka, gde se podmodel koji odgovara  $f^-$  (kada je kriterijumska funkcija minimizacionog tipa) prvi formuliše i rešava, pa se zatim relevantni podmodel koji odgovara  $f^+$  formuliše na bazi rešenja prvog podmodela.

Detaljnije, ako pretpostavimo da je  $b_i^\pm > 0$  i  $f_i^\pm > 0$ , prvi podmodel se može formulisati na sledeći način:

$$\text{Min } f^- = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^- x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^- x_j^+ \quad (40)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}|^- \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ \leq b_i^+, \quad \forall i \quad (41)^{33}$$

$$x_j^\pm \geq 0, \quad \forall j \quad (42)$$

gde su  $x_j^\pm$  ( $j=1,2,\dots,k_1$ ) intervalne promenljive sa pozitivnim koeficijentima u kriterijumskoj funkciji, i  $k_1$  je ukupan broj intervalnih promenljivih sa pozitivnim koeficijentima u kriterijumskoj funkciji;  $x_j^\pm$  ( $j=k_1+1,k_1+2,\dots,n$ ) su intervalne promenljive sa negativnim koeficijentima, i  $n$  je ukupan broj intervalnih promenljivih u

<sup>33</sup> Sing funkcija definiše znak koeficijenta ograničenja  $a_{ij}$

kriterijumskoj funkciji. Rešenja  $x_{j_{\text{opt}}}^-$  ( $j=1,2,\dots,k_1$ ),  $x_{j_{\text{opt}}}^+$  ( $j=k_1+1,k_1+2,\dots,n$ ) i  $f_{\text{opt}}^-$  se dobijaju rešavanjem podmodela (40)-(42).

Drugi podmodel, koji odgovara  $f^+$ , može biti formulisan na sledeći način:

$$\text{Min } f^+ = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^+ x_j^- \quad (43)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}^-| \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}^+| \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- \leq b_i^-, \quad \forall i \quad (44)$$

$$x_j^+ \geq x_{j_{\text{opt}}}^-, \quad j=1,2,\dots,k_1 \quad (45)$$

$$0 \leq x_j^- \leq x_{j_{\text{opt}}}^+, \quad j=k_1+1,k_1+2,\dots,n \quad (46)$$

#### 5.1.1.2.2. BWC algoritam

BWC algoritam je predložio Shaocheng (1994), a proširili Chinneck i Ramadan (2000) kako bilo u model mogla biti uključena intervalna ograničenja jednakosti i negativne promenjive odlučivanja. On se sastoji iz 2 koraka kojima se optimalna rešenja dobijaju rešavanjem 2 podmodela koji odgovaraju donjoj i gornjoj granici kriterijumske funkcije.

Najbolje optimalne vrednosti kriterijumske funkcije modela intervalnog linearnog programiranja, predstavljenog jednačinama (36)-(38), mogu se dobiti rešavanjem sledećeg podmodela (Shaocheng, 1994):

$$\text{Min } f^- = \sum_{j=1}^n c_j^- x_j \quad (47)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^+ x_j \geq b_i^-, \quad \forall i \quad (48)$$

$$x_j \geq 0, \quad \forall j \quad (49)$$

Najgore optimalne vrednosti kriterijumske funkcije modela (36)-(38), mogu se dobiti rešavanjem drugog podmodela (Shaocheng, 1994):

$$\text{Min } f^+ = \sum_{j=1}^n c_j^+ x_j \quad (50)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j \geq b_i^+, \quad \forall i \quad (51)$$

$$x_j \geq 0, \quad \forall j \quad (52)$$

Ako se tip kriterijumske funkcije modela intervalnog linearnog programiranja, predstavljenog jednačinama (36)-(38), promeni u “max”, tada se najbolje i najgore optimalne vrednosti dobijaju rešavanjem sledećih problema, respektivno (Allahdadi i Mishmast Nehi, 2011):

$$\text{Max } f^+ = \sum_{j=1}^n c_j^+ x_j \quad (53)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^+ x_j \geq b_i^-, \quad \forall i \quad (54)$$

$$x_j \geq 0, \quad \forall j \quad (55)$$

i

$$\text{Max } f^- = \sum_{j=1}^n c_j^- x_j \quad (56)$$

pri ograničenjima:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j \geq b_i^+, \quad \forall i \quad (57)$$

$$x_j \geq 0, \quad \forall j \quad (58)$$

Kako bi se postigao uži interval rešenja, GLP algoritam prilikom preformulacije ograničenja kod oba podmodela svesno ignoriše neke sistemske neizvesnosti i na taj

način dovodi u pitanje dopustivost i optimalnost generisanih intervalnih rešenja. To svakako nije teorijski i matematički opravdano, pa se u tom smislu BWC algoritam može smatrati boljom metodom za rukovanje neizvesnostima predstavljenim u intervalnom obliku (Pei, 2011). Zbog toga je odlučeno da za rešavanje modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti, koji će biti prezentovan u narednom delu ovog poglavlja, bude korišćen BWC algoritam.

### ***5.1.2. Model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti***

#### *5.1.2.1. Notacija modela*

U modelu dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti je korišćena sledeća notacija.

#### *Indeksi i skupovi*

$t$	indeks vremenskog perioda; $t \in \{1, \dots, T\}$
J	skup materijala
S	skup skladišta
M	skup miksera
R	skup sortera (tj. drobilica, oprema za sortiranje i procesi ručnog sortiranja)
F	skup postrojenja za napredni termalni tretman
D	skup odredišta koja vrše obnavljanje energije (tj. postrojenja za napredni termalni tretman i spaljivaonica)
L	skup deponija
P	skup proizvođača raznovrsnih metala (valjaonice bakra i aluminijuma i železare)
Q	skup otkupljivača sekundarnih sirovina

$O = F \cup D \cup L \cup P \cup Q$	skup odredišta (tj. postrojenje za napredni termalni tretman, spaljivaonica, deponije, proizvođači raznovrsnih metala i otkupljivači sekundarnih sirovina)
$N = S \cup M \cup R \cup O$	skup entiteta (tj. drobilica, oprema za sortiranje, procesi ručnog sortiranja, skladišta, mikseri i odredišta)
$A \subseteq \{(i, j)   i \in N, j \in N\}$	skup materijalnih tokova
$\Gamma_i = \{j   (i, j) \in A\}, i \in N$	skup entiteta koji slede $i$ -ti entitet
$\Gamma_j^{-1} = \{i   (i, j) \in A\}, j \in N$	skup entiteta koji prethode $j$ -tom entitetu
$g_{ij} \in J$	materijal na toku $(i, j)$ (atribut toka)
$K_i, K_i \subset J, i \in R$	skup materijala izolovanih $i$ -tim entitetom sortiranja
$\Psi_{ik} = \{j   j \in \Gamma_i, g_{ij} = k\}, i \in R, k \in K_i$	skup entiteta na koje je materijal $k$ prosleđen sa entiteta $i$
<i>Parametri</i>	
$T$	broj analiziranih vremenskih perioda
$\Pi_{i0}, i \in S$	težina početnih zaliha olupina vozila u skladištu $i$
$W_{min}^{\pm}$	intervalna vrednost nivoa sigurnosnih zaliha
$\Lambda$	trajanje planskog perioda u vremenskim jedinicama
$V_j^{\pm}, j \in R$	intervalna vrednost recipročne brzine sortiranja u slučaju entiteta $j$

$E_{ik}^{\pm}, i \in R, k \in K_i$	intervalna vrednost efikasnosti entiteta sortiranja $i$ u slučaju materijala $k$ u procentima
$ER_j^{\pm}, j \in F \cup Q$	intervalna vrednost reciklažne efikasnosti odredišta $j$ u procentima
$EE_j^{\pm}, j \in D$	intervalna vrednost energetske efikasnosti odredišta $j$ u procentima
$Q_R$	reciklažna kvota
$Q_{R'}$	kvota obnavljanja (tj. reciklaže i obnavljanja energije)
$Q_E$	kvota obnavljanja energije
$R_{ijt}^{\pm}, j \in P \cup Q, i \in \Gamma_j^{-1}$	intervalna vrednost prihoda po jedinici težine od prodaje metala sortiranih entitetom $i$ proizvođaču metala ili otkupljivaču sekundarnih sirovina $j$ u vremenskom periodu $t$
$CP_t^{\pm}$	intervalna vrednost cene naručivanja olupina vozila po jedinici težine u vremenskom periodu $t$
$CS_{jt}^{\pm}, j \in R$	intervalna vrednost cene sortiranja na entitetu $j$ po jedinici težine u vremenskom periodu $t$
$Z_t^{\pm}$	intervalna vrednost kapitalnih troškova držanja zaliha u vremenskom periodu $t$ u procentima
$CA_{jt}^{\pm}, j \in D$	intervalna vrednost cene (naprednog) termalnog tretmana u odredišnom postrojenju $j$ po jedinici težine u vremenskom periodu $t$
$CT_{ijt}^{\pm}, j \in O, i \in \Gamma_j^{-1}$	intervalna vrednost cene transporta od entiteta $i$ do odredišta $j$ po jedinici težine u vremenskom periodu $t$



$CL_{jt}^{\pm}, j \in L$  intervalna vrednost cene odlaganja na deponiju  
 $j$  po jedinici težine u vremenskom periodu  $t$

*Promenljive*

$W_{it}, i \in S, t \in \{0, 1, \dots, T\}$  težina olupina vozila koje se na kraju  
vremenskog perioda  $t$  nalaze u skladištu  $i$

$P_{it}, i \in S$  težina olupina vozila istovarenih u skladište  $i$  u  
vremenskom periodu  $t$

$X_{ijt}, i \in N \setminus O, j \in \Gamma_i$  težina materijala prosleđenog od entiteta  $i$  do  
entiteta  $j$  u vremenskom periodu  $t$

*5.1.2.2. Formulacija modela*

Predloženi model se bavi problemom dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji. Njegov cilj je da maksimizira profit projektovane savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila tokom planskog horizonta.

Na osnovu notacije izložene u poglavlju 5.1.2.1, problem može biti formulisan kao model intervalnog linearnog programiranja. Formulirani model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti donosi optimalne intervalne odluke o naručivanju, skladištenju, sortiranju, reciklaži, naprednom termalnom tretmanu (ako je postrojenje dostupno), sagorevanju u spaljivaonici gradskog otpada (ako je spaljivaonica gradskog otpada dostupna ili je spaljivanje ugovoreno sa lokalnom cementarom) i odlaganju na deponiju.

$$\begin{aligned}
\text{Max } f^\pm = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j \in P \cup Q} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} R_{ijt}^\pm X_{ijt} - CP_t^\pm \sum_{i \in S} P_{it} - \sum_{j \in R} CS_{jt}^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \right. \\
\left. - Z_t^\pm CP_t^\pm \sum_{i \in S} W_{it} - \sum_{j \in D} CA_{jt}^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} - \sum_{j \in O} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} CT_{ijt}^\pm X_{ijt} \right. \\
\left. - \sum_{j \in L} CL_{jt}^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \right] \quad (59)
\end{aligned}$$

pri ograničenjima:

$$W_{it} = P_{it} + W_{it-1} - \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (60)$$

$$W_{i0} = \Pi_{i0}, \quad \forall i \in S \quad (61)$$

$$\sum_{i \in S} W_{it} \geq W_{min}^\pm, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (62)$$

$$\sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} V_j^\pm X_{ijt} \leq \Lambda, \quad j \in R; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (63)$$

$$\sum_{j \in \Psi_{ik}} X_{ijt} = E_{ik}^\pm \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} X_{j it}, \quad \forall i \in R; \forall k \in K_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (64)$$

$$\sum_{k \in K_i} \sum_{j \in \Psi_{ik}} X_{ijt} = \sum_{j \in \Gamma_i^{-1}} X_{j it}, \quad \forall i \in R; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (65)$$

$$\sum_{i \in F} X_{j it} = \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt}, \quad \forall j \in M; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (66)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in F} ER_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in Q} ER_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \\
\geq Q_R \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (67)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{j \in P} \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in F} ER_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} + \sum_{j \in Q} ER_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \\
+ \sum_{j \in D} EE_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \geq Q_{R'} \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (68)
\end{aligned}$$

$$\sum_{j \in D} EE_j^\pm \sum_{i \in \Gamma_j^{-1}} X_{ijt} \leq Q_E \sum_{i \in S} \sum_{j \in \Gamma_i} X_{ijt}, \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (69)$$

$$P_{it} \geq 0, W_{it} \geq 0, \quad \forall i \in S; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (70)$$

$$X_{ijt} \geq 0, \quad \forall i \in N \setminus O; \forall j \in \Gamma_i; \forall t \in \{1, \dots, T\} \quad (71)$$

Kriterijumska funkcija (59) teži da maksimizira profit projektovane moderno opremljene fabrike za reciklažu vozila tokom planskog horizonta.

U kriterijumskoj funkciji, prvi deo predstavlja prihod ostvaren od prodaje sortiranih metala i to: frakcije finalnih crnih metala železari, Cu-bogate frakcije valjaonici bakra, Al-bogate frakcije i Al frakcije valjaonici aluminijuma, izolovanih bakarnih žica otkupljivačima sekundarnih sirovina.

Drugi deo kriterijumske funkcije predstavlja troškove naručivanja (presovanih) olupina vozila od pogona za demontažu, treći deo izračunava troškove drobljenja olupina vozila i sortiranja svih materijalnih tokova, a četvrti deo se odnosi na troškove skladištenja olupina vozila koje nisu raspoređene za reciklažu.

Peti deo kriterijumske funkcije izračunava troškove (naprednog) termalnog tretmana izolovanog ASR-a. Kao što je i napomenuto u uvodnom delu ovog poglavlja, u regionu ne postoji ni jedno postrojenje za nepredni termalni tretman. Međutim, imajući u vidu da je usvajanjem i stupanjem na snagu Pravilnika o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (MERS, 2010) praktično ratifikovana EU ELV direktiva, a samim tim i prihvaćene rigorozne ekološke kvote u pogledu obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije u procesu prerade vozila na kraju životnog ciklusa, sprovođenje analize uticaja dostupnosti postrojenja za napredni termalni tretman je od izuzetne važnosti. Štaviše, ova analiza može poslužiti i kao svojevrsna provera Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b), pošto ovaj dokument nije predvideo izgradnju postrojenja za napredni termalni tretman u Republici Srbiji zaključno sa 2020. godinom. Sa druge strane, imajući u vidu da u regionu trenutno ne postoji ni jedna spaljivaonica gradskog otpada, podatak da je Nacionalnom strategijom upravljanja otpadom sa programom približavanja Evropskoj Uniji planirana izgradnja 4 spaljivaonice otpada (MERS, 2013), i činjenicu da je Strategijom upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b) dopuštena mogućnost spaljivanja ostataka drobljenja automobila u spaljivaonicama koje se nalaze u okviru cementara, jasno je da ovaj aspekt

dodatnog tretmana otpadnih materijala izolovanih u procesu reciklaže vozila nije smeo biti izostavljen pri formulaciji modela.

Šesti deo kriterijumske funkcije se odnosi na troškove transporta sortiranih metala do finalnih odredišta (železara, valjaonica bakra, valjaonica aluminijuma i otkupljivači sekundarnih sirovina) i izolovanih otpadnih materijala ka otpadnim entitetima (deponija, spaljivaonica i/ili postrojenje za napredni termalni tretman). Detaljnije, obojeni miks i prva frakcija nemetala se transportuju isključivo na deponiju; druga frakcija nemetala i frakcija sačinjena od plastike, gume i ostalih materijala mogu biti transportovane na deponiju ili do spaljivaonice; ASR miks (koji inače nastaje mešanjem frakcije lakog ASR-a, frakcije obojenog miksa, i prve i druge frakcije nemetala) se transportuje do postrojenja za napredni termalni tretman; frakcija izolovanih bakarnih žica ukoliko iz nekog razloga nije mogla biti prodana otkupljivačima sekundarnih sirovina (na primer, ne postoji dovoljna tražnja na berzi otpadnih metala) se transportuje do deponije.

Poslednji, sedmi deo kriterijumske funkcije izračunava troškove odlaganja izolovanih materijalnih frakcija (tj. obojenog miksa, prve i druge frakcije nemetala, frakcije sačinjene od plastike, gume i ostalih materijala, ASR miksa i izolovanih bakarnih žica) na deponije na kojim je dozvoljeno odlaganje nusprodukata procesa reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa.

Jednačine bilansa zaliha su definisane ograničenjima (60). Jednačine (61) definišu vrednosti nivoa početnih zaliha. Ograničenja (62) obezbeđuju poštovanje sigurnosnog nivoa zaliha i na taj način eliminišu mogućnost neplaniranog zaustavljanja rada drobilice. Jednačine (63) predstavljaju kapacitivna ograničenja drobilice i entiteta sortiranja, a ograničenja (64)-(65) održavaju njihov materijalni bilans. Ograničenja (66) opisuju operacije mešanja frakcije lakog ASR-a, frakcije obojenog miksa, prve i druge frakcije nemetala u frakciju ASR miksa. Prisustvo ovog ograničenja u modelu dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti ima smisla samo kada je postrojenje za napredni termalni tretman dostupno.

Ograničenja (67)-(69) reprezentuju specifične ekološke kvote procesa reciklaže vozila, koje su propisane u Pravilniku o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (MERS, 2010). Detaljnije, u prilogu 3 pomenutog

Pravilnika su propisani sledeći zahtevi u vezi sa ponovnom upotrebom, tretmanom i reciklažom vozila na kraju životnog ciklusa: Počev od 1. januara 2015. godine minimalna stopa reciklaže i stopa obnavljanja iznose 80% i 85%, respektivno, a maksimalna stopa obnavljanja energije iznosi 5%; Počev od 1. januara 2019. godine minimalna stopa reciklaže i stopa obnavljanja iznose 85% i 95%, respektivno, a maksimalna stopa obnavljanja energije iznosi 10%. U skladu sa prethodno iznetim, ova ograničenja obezbeđuju da procenat reciklaže vozila ne može biti manji od propisane reciklažne kvote (ograničenja (67)), procenat obnavljanja vozila ne može biti manji od propisane kvote obnavljanja (ograničenja (68)), i procenat obnavljanja energije ne može biti veći od propisane kvote obnavljanja energije (ograničenja (69)).

Konačno, ograničenja (70)-(71) definišu vrednosne domene promenljivih odlučivanja korišćenih u modelu.

#### 5.1.2.3. Numerička studija

U narednom delu biće prezentovana numerička studija modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti. Detaljnije, formulisani model je primenjen na studiju slučaja u kojoj je analiziran vremenski period 2013-2016. godina, ispitana 3 zakonodavna slučaja i 3 trenda cena otpadnih metala, ali i istovremeno analizirana dostupnost odredišta otpadnih tokova. U skladu sa tim, kreiran je 21 test problem (tabela 29).

Doprinos ove studije slučaja se ogleda u sledećem:

- *Ilustrovanje potencijala i primenjivosti razvijenog modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti.*
- *Prezentovanje podataka o profitabilnosti i efikasnosti projektovane savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa.*
- *Analiza uticaja Pravilnika o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (MERS, 2010) na procese naručivanja, sortiranja, alokacije sortiranih metala i izolovanog otpada.*
- *Analiza Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b).*

Pravilnik o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji (MERS, 2010), koji je stupio na snagu 24.12.2010. godine, je u prilogu 3 (po ugledu na EU ELV direktivu) propisao detaljne zahteve u vezi sa ponovnom upotrebom, tretmanom i reciklažom vozila na kraju životnog ciklusa. U skladu sa zahtevima iz Pravilnika, u okviru ove studije su ispitani sledeći regulatorni slučajevi (tabela 29):

- *Slučaj 1 – nema pravne regulative* (do 31. decembra 2014. godine).
- *Slučaj 2 – I faza primene Pravilnika* (počinje 1. januara 2015. godine). Minimalna stopa reciklaže i stopa obnavljanja iznose 80% i 85%, respektivno, a maksimalna stopa obnavljanja energije iznosi 5%.
- *Slučaj 3 – II faza primene Pravilnika* (počinje 1. januara 2019. godine). Minimalna stopa reciklaže i stopa obnavljanja iznose 85% i 95%, respektivno, a maksimalna stopa obnavljanja energije iznosi 10%.

U ovoj studiji slučaja biće razmatran četvorogodišnji planski horizont: dvogodišnji podhorizont (2013-2014. godina) za prvi regulatorni slučaj i dvogodišnji podhorizont (2015-2016. godina) za drugi i treći regulatorni slučaj (tabela 29). Sprovedenje analize druge faze primene ekoloških zahteva Pravilnika i pre njenog zvaničnog početka, tj. analiza trećeg regulatornog slučaja u okviru drugog planskog podhorizonta, može se opravdati namerom da se proverí ispravnost Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b). Detaljnije, pomenuta Strategija nije predvidela izgradnju postrojenja za napredni termalni tretman u Republici Srbiji zaključno sa 2020. godinom, pa je od ključne važnosti utvrditi da li je bez ovog važnog otpadnog entiteta uopšte moguće dosegnuti rigorozne ekološke zahteve koji bi trebalo da stupe na snagu samo godinu dana po isteku drugog planskog podhorizonta. Pored toga, kako dinamički karakter brojnih parametara modela ne bi bio zanemaren, oba dugoročna planska podhorizonta su dalje podeljena na 2 perioda u trajanju od po godinu dana.

Pri dugoročnom planiranju reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa posmatranje cena otpadnih metala kao determinističkih vrednosti se može smatrati potpuno neprikladnim. Sa druge strane, njihovo sagledavanje kao intervalnih vrednosti

je sasvim prirodno, bilo na nivou dana, nedelje, meseca ili godine. Pored toga, velika neizvesnost koja konstantno vlada na berzama otpadnih metala, ogroman broj raznovrsnih uticajnih faktora, nepostojanje adekvatnih studija koje se bave dugoročnim procenama kretanja cena otpadnih metala i neadekvatnost formiranja cena otpadnih metala na osnovu cena primarnih metala (Aruga i Managi, 2011; Xiarchos i Fletcher, 2009), kao neophodnost nameću analizu više mogućih scenarija u okviru sva 3 posmatrana regulatorna slučaja. Imajući u vidu da svetska ekonomija čini velike napore da prevaziđe krizu u kojoj se našla (a koja je započeta još 2008. godine) i primetni oporavak berzi metala, u ovoj numeričkoj studiji su analizirana 3 sledeća trenda cena otpadnih metala (tabela 29):

- *Scenario 1 – Nepostojani trend.* Cene sortiranih otpadnih metala i olupina vozila variraju u vrednosnom intervalu [-2.50, 2.50] %/godina.
- *Scenario 2 – Srednji trend rasta.* Cene sortiranih otpadnih metala rastu u vrednosnom intervalu [2.51, 5.0] %/godina.
- *Scenario 3 – Visoki trend rasta.* Cene sortiranih otpadnih metala rastu u vrednosnom intervalu [5.01, 15.0] %/godina.

Iako je Nacionalna strategija upravljanja otpadom sa programom približavanja Evropskoj Uniji predvidela izgradnju 4 spaljivaonice otpada (MERS, 2013), a Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b) dozvolila spaljivanje ostataka drobljenja automobila u spaljivaonicama koje se nalaze u okviru cementara, ovaj vid dodatnog tretmana otpadnih materijala izolovanih u procesu reciklaže vozila se ne koristi u Republici Srbiji. U skladu sa tim, važan segment ove studije slučaja predstavljaće analize uticaja dostupnosti spaljivaonice gradskog otpada i postrojenja za napredni termalni tretman na profitabilnost i ekološku efikasnost projektovane savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa (tabela 29).

**Tabela 29.** Prikaz kreiranih test problema za studiju slučaja Republike Srbije.

Test problem	Planski period	Regulatorni slučaj	Scenario	Dostupnost odredišta otpadnih tokova	
				Postrojenje za napredni termalni tretman	Spaljivaonica
1	2013-2014.	Nema pravne regulative	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna
2				Nedostupno	Dostupna
3			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna
4				Nedostupno	Dostupna
5			Visoki trend rasta	Nedostupno	Nedostupna
6				Nedostupno	Dostupna
7	2015-2016.	I faza	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna
8				Nedostupno	Dostupna
9			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna
10				Nedostupno	Dostupna
11			Visoki trend rasta	Nedostupno	Nedostupna
12				Nedostupno	Dostupna
13		II faza	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna
14				Nedostupno	Dostupna
15				Dostupno	Dostupna
16			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna
17				Nedostupno	Dostupna
18				Dostupno	Dostupna
19	Visoki trend rasta		Nedostupno	Nedostupna	
20			Nedostupno	Dostupna	
21			Dostupno	Dostupna	

#### 5.1.2.3.1. Sakupljanje podataka

U ovom delu su predstavljeni podaci koji su korišćeni u numeričkoj studiji modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti. Kako bi poređenje podataka iz različitih izvora bilo moguće, sve cene su konvertovane u evre na bazi kursne liste Narodne banke Srbije od 14. maja 2013. godine, tj. 1 EUR=1.301 USD=110.9505 RSD (NBS, 2013).

U ovoj numeričkoj studiji, liste materijala  $M_1$  i  $N_1$  klasa vozila su bazirane na podacima iz studija Cheah i ostali (2007), Davis i ostali (2010), Jody i ostali (2010). Pored toga, podaci o tome šta od sklopova i delova demontažeri rasklapaju i u kojoj meri, kao i njihov materijalni sastav, takođe su uzeti u obzir (Eurostat, 2012; IDIS, 2011). Materijalni sastav lake i teške frakcije ostataka drobljenja automobila je usklađen sa studijom Gaillot i McCormack (2010). Konačno, efikasnosti pojedinih entiteta sortiranja su dobijene primenom simulatora Post-fragmentation separation model (SMART, 2006) i prikazane u tabeli 30.

Imajući u vidu da je analizirani dijagram toka reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa kontinualan (slika 23), brzine magnetskih sortera, sortera teškim medijumom i



ručnog sortiranja su izračunate na osnovu prethodno usvojenih brzina drobilice i sortera vrtložnom strujom, i odgovarajućih efikasnosti sortiranja (tabela 30). Dobljene intervalne vrednosti brzina prerade su date u tabeli 30, a pripadajuće cene prerade u tabeli 31.

**Tabela 30.** Efikasnost i brzina opreme za sortiranje.

Entitet	Materijalna frakcija	Efikasnost (%)	Brzina (tona/h)
Drobnica	Teški materijali	[77.64, 78.72]	[61.1, 81.3] <sup>a</sup>
	Laki ASR	[21.28, 22.36]	
Magnetski sorter	Crni metali 1	[89.38, 90.16]	[47.44, 64.0]
	Teški ASR	[9.84, 10.62]	
	Crni metali 2	[4.02, 4.28]	
	Obojeni miks	[95.72, 95.98]	
Sorter vrtložnom strujom	Obojeni metali 1	[53.93, 55.76]	[18.3, 30.5] <sup>b</sup>
	Nemetali 1	[44.24, 46.07]	
	Obojeni metali 2	[38.73, 40.24]	
	Nemetali 2	[59.76, 61.27]	
	Aluminijum	[94.68, 95.11]	
	Guma, plastika i ostalo	[4.89, 5.32]	
Sorter teškim medijumom	Al-bogata frakcija	[87.58, 89.17]	[18.3, 30.5]
	Cu-bogata frakcija	[10.83, 12.42]	
Ručno sortiranje	Finalni Fe metali	[99.63, 99.65]	[42.93, 58.49]
	Bakarne žice	[0.35, 0.37]	

<sup>a</sup> Na bazi podataka iz Harris shredders (2012) i Simić i Dimitrijević (2013b).

<sup>b</sup> U skladu sa Kumar i Sutherland (2008) i Simić i Dimitrijević (2013b).

**Tabela 31.** Troškovi prerade (EUR/tonni).

Entitet	Godina			
	2013.	2014.	2015.	2016.
Drobnica <sup>a</sup>	[41.19, 54.81]	[42.01, 55.89]	[42.76, 56.89]	[43.45, 57.82]
Magnetski sorter <sup>a</sup>	[2.59, 3.56]	[2.65, 3.64]	[2.71, 3.72]	[2.77, 3.80]
Sorter vrtložnom strujom <sup>a</sup>	[1.58, 2.64]	[1.61, 2.69]	[1.64, 2.74]	[1.67, 2.78]
Sorter teškim medijumom <sup>a</sup>	[58.78, 65.84]	[59.94, 67.14]	[61.01, 68.34]	[62.0, 69.45]
Ručno sortiranje <sup>b</sup>	[1.07, 1.57]	[1.10, 1.65]	[1.14, 1.74]	[1.17, 1.82]

<sup>a</sup> Imajući u vidu da prema Ugovoru o energetske zajednici Republika Srbija mora usaglašavati statistiku cena sa pravilima i metodologijama koja važe u Evropskoj Uniji, troškovi prerade otpadnih materijalnih tokova su procenjeni uzimajući u obzir: važeću cenu električne energije za industrijske potrošače u Republici Srbiji (AERS, 2013), prognozirani trend rasta cene električne energije za industrijske potrošače srednje veličine (godišnja potrošnja između 500 i 2000 MWh) u Evropskoj Uniji (Eurostat, 2013), podatke iz rada Simić i Dimitrijević (2013b) i odgovarajuće brzine sortiranja prikazane u tabeli 30

<sup>b</sup> Procenjeno uzimajući u obzir: podatke Republičkog zavoda za statistiku o platama u oblasti sakupljanja, tretmana i odlaganja otpada u Srbiji (RZSS, 2013), pretpostavku da će godišnji rast plata u ovoj oblasti biti u intervalu od 3-5% i intervalnu vrednost brzine ručnog sortiranja otpadnog toka crnih metala datu u tabeli 30

Cene transporta su procenjene uzimajući u obzir generalne specifične gustine tovara, i maksimalnu težinu i zapreminu po tovaru (tabela 32). Pored toga, cena iznajmljivanja kamiona (šlepera) zavisi od autoprevoznika, potrebne radne snage, rastojanja do kojeg se tovar prevozi, dužine ugovora, nosivosti i tipa kamiona, i sl.

Da bi se sve cene transporta mogle izračinati bilo je neophodno uvesti sledeće pretpostavke:

- *Moderno opremljena fabrika za reciklažu vozila na kraju životnog ciklusa će biti locirana u okolini Beograda, najvećeg izvorišta ELV-a.*
- *Maksimalna težina i zapremina po tovaru su 30 tona i 15 m<sup>3</sup>, respektivno.*
- *Sortirana Cu-bogata frakcija se transportuje do valjaonice bakra Sevojno A.D, Sevojno. Ona je locirana u Sevojnu, i osim korišćenja primarne i sekundarne sopstvene sirovine, vrši otkup eksterne sekundarne sirovine koju nakon pripreme koristi u svom proizvodnom ciklusu. Sadašnja cena kamionskog transporta se nalazi u intervalu od 5.80 EUR/toni do 11.34 EUR/toni (Nole prevoz, 2013; Put Zaječar a.d, 2013; TimoCom, 2013).*
- *Sortirana Al-bogata frakcija i frakcija aluminijuma se transportuju do IMPOL SEVAL a.d. valjaonice aluminijuma u Sevojnu. Sadašnja cena transporta se nalazi u intervalu [5.80, 11.34] EUR/toni (Nole prevoz, 2013; Put Zaječar a.d, 2013; TimoCom, 2013).*
- *Spaljivaonica komunalnog otpada kao kontrolisan, tehnološki vođen proces u okviru koga su minimizirani negativni uticaji na životnu sredinu ne postoji u regionu (Čizmić i ostali, 2012). Međutim, treba imati u vidu da Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Republika Srbija, 2010b) dopušta mogućnost spaljivanja ostataka drobljenja automobila (ali samo u mešavini sa komunalnim otpadom) u spaljivaonicama koje se nalaze u okviru cementara. S tim u vezi, u Republici Srbiji postoje 3 cementare: Lafarge, Beočin; Holcim Srbija, Popovac i Titan cementara, Kosjerić. Pod pretpostavkom da postoji spremnost vlasnika i raspoloživ kapacitet, kao najbliža se bira cementara Lafarge. Troškovi transporta druge frakcije nemetala i frakcije sastavljene od plastike, gume i ostalih materijala su dati u tabeli 32.*
- *Odlaganje svih otpadnih tokova proizvedenih u procesu reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa se vrši na deponiju u Vinči. Naime, Sekretarijat za zaštitu životne*

sredine, koji funkcioniše u okviru Gradske uprave grada Beograda, planirao je da se industrijski otpad može odlagati na deponiju u Vinči sve do njene konačne sanacije. Po završetku procesa sanacije, planiranog za kraj 2014. godine, trebalo bi da počne sa radom nova, proširena i moderno opremljena deponija, tzv. Centar za upravljanje otpadom Vinča (Filipović i ostali, 2011).

- *Finalni tok crnih metala se transportuje u Železaru Smederevo d.o.o.* Sadašnja cena transporta šleperom do Smedereva se nalazi u intervalu [1.62, 5.40] EUR/toni (Put Zaječar a.d, 2013; Nole prevoz, 2013).
- *Postrojenje za napredni termalni tretman bi trebalo locirati na udaljenosti od 5 km do 50 km od fabrike za reciklažu vozila*, kako bi se ekološki uticaj transporta minimizirao (Ciacci i ostali, 2010). U tom slučaju, transport ASR-a bi po sadašnjim cenama iznosio od 1.04 EUR/toni do 4.99 EUR/toni (Nole prevoz, 2013; Put Zaječar a.d, 2013; TimoCom, 2013).
- *Izolovane bakarne žice se mogu ručno reciklirati u Republici Srbiji.* Ako se ima u vidu da u široj okolini grad Beograda već postoje potencijalna odredišta (tj. otkupljivači ove vrste sekundarnih sirovina) za ovaj otpadni tok, niske cene transporta su osigurane (tj. [1.23, 4.78] EUR/toni (Nole prevoz, 2013; Put Zaječar a.d, 2013; TimoCom, 2013)).

**Tabela 32.** Troškovi transporta (EUR/toni).

Otpadni materijalni tok	Odredište	Godina			
		2013.	2014.	2015.	2016.
Obojeni miks	Deponija	[1.60, 6.21]	[1.76, 6.21]	[1.93, 7.51]	[2.12, 8.23]
Nemetali 1	Deponija	[2.34, 9.11]	[2.58, 10.03]	[2.83, 11.01]	[3.10, 12.07]
Nemetali 2	Deponija	[2.82, 10.98]	[3.10, 12.09]	[3.41, 13.27]	[3.74, 14.54]
	Spaljivaonica Lafarge	[2.17, 8.45]	[2.39, 9.30]	[2.62, 10.22]	[2.87, 11.19]
Plastika, guma, ostalo	Deponija	[3.21, 12.49]	[3.53, 13.75]	[3.88, 15.10]	[4.25, 16.54]
	Spaljivaonica Lafarge	[2.47, 9.61]	[2.72, 10.58]	[2.99, 11.62]	[3.27, 12.73]
Izolovane bakarne žice	Deponija	[1.60, 7.65]	[1.76, 8.42]	[1.93, 9.25]	[2.12, 10.13]
	Otkupljivači sekundarnih sirovina	[1.23, 4.78]	[1.35, 5.26]	[1.49, 5.78]	[1.63, 6.33]
Cu-bogata frakcija	Valjaonica bakra Sevojno A.D.	[5.80, 11.34]	[6.38, 12.48]	[7.01, 13.71]	[7.68, 15.02]
Al-bogata frakcija	Valjaonica aluminijuma	[5.80, 11.34]	[6.38, 12.48]	[7.01, 13.71]	[7.68, 15.02]
Al frakcija	IMPOL SEVAL a.d.	[5.80, 11.34]	[6.38, 12.48]	[7.01, 13.71]	[7.68, 15.02]
Finalni crni metali	Železara Smederevo d.o.o.	[1.62, 5.40]	[1.78, 5.94]	[1.96, 6.56]	[2.15, 7.15]
ASR miks	Postrojenje za napredni termalni tretman	[1.04, 4.99]	[1.14, 5.49]	[1.26, 6.03]	[1.38, 6.61]

Intervali troškova transporta sortiranih metalnih i otpadnih frakcija su prognozirani kubnim trendom na osnovu podataka o kretanjima cena sirove nafte od 1986. godine (ECBE, 2013). Inače, za selekciju trenda prognoze je korišćen statistički

softver SPSS, koji je favorizovao kubni trend zbog najveće vrednosti koeficijenta determinacije (tj. vrednosti 0.934). Dobijene cene transporta pojedinih materijala do njihovih odredišta su date u tabeli 32.

Cene odlaganja na deponiju, spaljivanja i naprednog termalnog tretmana su priložene u tabeli 33. Cene odlaganja frakcije obojenog miksa, prve i druge frakcije nemetala, frakcije sastavljene od plastike, gume i ostalih materijala, i frakcije izolovanih bakarnih žica na deponiju u Vinči su identifikovane uvidom u Lokalni plan upravljanja otpadom grada Beograda 2011-2020. godine (Filipović i ostali, 2011). Nacionalnom strategijom upravljanja otpadom planirana je izgradnja 4 spaljivaonice otpada u Republici Srbiji (MERS, 2013). Bilo da se spaljivanje vrši u Lafarge spaljivaonici ili nekoj od specijalizovanih spaljivaonica čija izgradnja je u planu, cene bi trebalo treba formirati na osnovu izveštaja Konfederacije evropskih spaljivaonica (CEWEP, 2011, 2012).

**Tabela 33.** Cene odlaganja na deponiju, spaljivanja i naprednog termalnog tretmana (EUR/toni).

Cena	Godina			
	2013.	2014.	2015.	2016.
Odlaganje na deponiju	[74.50, 82.34]	[75.72, 83.69]	[76.95, 85.05]	[78.20, 86.44]
Spaljivanje	[33.94, 152.77]	[34.11, 158.73]	[34.28, 164.92]	[34.45, 171.35]
Napredni termalni tretman <sup>a</sup>	[122.41, 215.07]	[123.64, 223.03]	[124.87, 231.28]	[126.12, 239.84]

<sup>a</sup> U skladu sa podacima iz Warner i Brown (2008), i Simić i Dimitrijević (2013b), kao i preporuke iz Vigano i ostali (2010)

U ovoj studiji slučaja je analizirano nekoliko trendova cena olupina vozila i otpadnih metala u dugom roku (tabela 34). Detaljnije, donje i gornje granice vrednosti cena olupina vozila i otpadnih metala u 2012. godini su korišćene kao bazne za kreiranje 3 moguća trenda (tj. nepostojanog trenda, trenda srednjeg rasta i trenda visokog rasta) za četvorogodišnji planski horizont.

**Tabela 34.** Cene olupina vozila i sortiranih otpadnih metala (EUR/toni).

Trend	Vrsta otpadnog metala	Bazna 2012. godina	Godina			
			2013.	2014.	2015.	2016.
Nepostojani <sup>a</sup>	Olupina vozila	[140.05, 181.94] <sup>d</sup>	[136.55, 186.49]	[133.14, 191.15]	[129.81, 195.93]	[126.56, 200.83]
	Crni metal	[286.21, 352.09] <sup>d</sup>	[279.05, 360.89]	[272.07, 369.91]	[265.27, 379.16]	[258.64, 388.64]
	Al-bogata frakcija	[1356.79, 1473.48] <sup>e</sup>	[1322.87, 1510.32]	[1289.80, 1548.08]	[1257.56, 1586.78]	[1226.12, 1626.45]
	Al frakcija <sup>f</sup>		[1455.16, 1812.38]	[1418.78, 1857.70]	[1383.32, 1904.14]	[1348.73, 1951.74]
	Cu-bogata frakcija	[2151.01, 2762.78] <sup>g</sup>	[2097.23, 2831.85]	[2044.80, 2902.65]	[1993.68, 2975.22]	[1943.84, 3049.60]
	Izolovane bakarne žice	[1289.30, 2026.04] <sup>h</sup>	[1257.07, 2076.69]	[1225.64, 2128.61]	[1195.0, 2181.83]	[1165.12, 2236.38]
Srednji rast <sup>b</sup>	Olupina vozila		[143.57, 191.04]	[147.17, 200.59]	[150.86, 210.62]	[154.65, 221.15]
	Crni metal		[293.39, 369.69]	[300.75, 388.17]	[308.30, 407.58]	[316.04, 427.96]
	Al-bogata frakcija		[1390.85, 1547.15]	[1425.76, 1624.51]	[1461.55, 1705.74]	[1498.23, 1791.03]
	Al frakcija		[1529.94, 1856.58]	[1568.34, 1949.41]	[1607.70, 2046.89]	[1648.05, 2149.24]
	Cu-bogata frakcija		[2205.0, 2900.92]	[2260.35, 3045.97]	[2317.08, 3198.27]	[2375.24, 3358.18]
	Izolovane bakarne žice		[1321.66, 2127.34]	[1354.83, 2233.71]	[1388.84, 2345.40]	[1423.70, 2462.67]
Visoki rast <sup>c</sup>	Olupina vozila		[147.07, 209.23]	[154.44, 240.61]	[162.18, 276.70]	[170.31, 318.20]
	Crni metal		[300.55, 404.90]	[315.61, 465.64]	[331.42, 535.49]	[348.02, 615.81]
	Al-bogata frakcija		[1424.77, 1694.50]	[1496.15, 1948.68]	[1571.11, 2240.98]	[1649.82, 2577.13]
	Al frakcija		[1567.25, 2033.40]	[1645.76, 2338.42]	[1728.22, 2689.18]	[1814.80, 3092.56]
	Cu-bogata frakcija		[2258.78, 3177.20]	[2371.94, 3653.78]	[2490.77, 4201.85]	[2615.56, 4832.13]
	Izolovane bakarne žice		[1353.89, 2329.95]	[1421.72, 2679.44]	[1492.95, 3081.36]	[1567.75, 3543.56]

<sup>a</sup> Cene sortiranih otpadnih metala i olupina vozila variraju u vrednosnom intervalu [-2.50, 2.50] %/godina

<sup>b</sup> Cene sortiranih otpadnih metala rastu u vrednosnom intervalu [2.51, 5.0] %/godina

<sup>c</sup> Cene sortiranih otpadnih metala rastu u vrednosnom intervalu [5.01, 15.0] %/godina

<sup>d</sup> Cene dekontaminiranih i presovanih olupina vozila isključivo zavise od stanja na berzama otpadnih metala i njihovog materijalnog sastava (AMM, 2013)

<sup>e</sup> Prodajna cena sa berze otpanih metala u Birminghamu (AMM, 2013; SPB, 2013)

<sup>f</sup> Određena kao cena za “obojenu auto-frakciju (90% aluminijuma) za sekundarne topionice” (AMM, 2013)

<sup>g</sup> 110-120% od Al-bogate frakcije

<sup>h</sup> Cena za “žuti mešani mesing, strugani bakarni otpad” na osnovu ponuda 14 američkih i 2 kanadska dilera metalima (AMM, 2013)

<sup>i</sup> Bazirano na individualnim kupoprodajnim sporazumima iz Recycler’s World (2013) za otpadni tok označen kao “Druid” (ISRI, 2013)

Ostali parametri modela su dati u tabeli 35.

**Tabela 35.** Ostali parametri modela.

Opis	Jedinica
Planski podhorizont	5200 h <sup>a</sup>
Nivo sigurnosnih zaliha	[3055, 4065] tona <sup>b</sup>
Nivo početnih zaliha	3560 tona <sup>c</sup>
Kapitalni trošak držanja zaliha	[0.48, 0.75] %/nedelja <sup>d</sup>
Efikasnost obnavljanja energije spaljivonice otpada	[74.5, 77.0] % <sup>e</sup>
Reciklažna efikasnost postrojenja za napredni termalni tretman	[32.5, 33.5] % <sup>f</sup>
Efikasnost obnavljanja energije postrojenja za napredni termalni tretman	[51.0, 53.0] % <sup>f</sup>
Efikasnost manuelne reciklaže otkupljiivača sekundarnih sirovina	[95.0, 100.0] %

<sup>a</sup> Dvogodišnji plan reciklaže vozila koji obuhvata 2 jednogodišnja planska perioda (tj. 520 radnih dana po 10 sati rada dnevno)

<sup>b</sup> Maksimalni nedeljni kapacitet drobilice

<sup>c</sup> Središnja tačka intervala vrednosti nivoa sigurnosnih zaliha

<sup>d</sup> Bazirano na podacima iz Williams i ostali (2007), i Simić i Dimitrijević (2012a,b)

<sup>e</sup> Efikasnost za slučaj spaljivanja mešavine komunalnog otpada i ostataka drobljenja automobila (Ciacci i ostali, 2010; Simić i Dimitrijević, 2012a)

<sup>f</sup> Prema Vigano i ostali (2010), i Simić i Dimitrijević (2013b)

#### 5.1.2.3.2. Rezultati i diskusija

Svi kreirani test problemi su optimalno rešeni primenom LINGO 13.0 solvera na Toshiba Qosmio laptopu sa Intel Core i5-430M procesorom. Vremena rada procesora su bila u intervalu od manje od jedne sekunde pa do nekoliko sekundi.

Optimalne vrednosti profita po toni prerađenih olupina i ostvarenih stopa obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije su priložene u tabeli 36.

Analizirajući finasijske rezultate projektovane fabrike za reciklažu vozila za period od 2013. do 2014. godine (koji karakteriše nepostojanje pravne regulative sistema za reciklažu vozila u Republici Srbiji) može se uočiti da je najniži profit od [106.13, 306.86] EUR/toni prerađenih olupina vozila ostvaren u 1. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše nepostojani trend i ne postoji mogućnost spaljivanja otpada), a najviši profit od [115.49, 394.30] EUR/toni prerađenih olupina vozila ostvaren u 6. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše visoki trend rasta i postoji mogućnost spaljivanja otpada). Ovakav ishod je direktna posledica toga što je u 6. test problemu pretpostavljen daleko povoljniji trend promene berzanskih cena

otpadnih metala. Pored toga, treba pomenuti da je veća vrednost gornje granice profita ostvarena u onim test problemima u kojima je bilo dozvoljeno spaljivanje izolovanog otpada (tj. najbolje rešenje kod 2, 4. i 6. test problema), jer tada spaljivanje zbog niže donje cenovne granice (tabela 33) predstavlja finansijski primamljivije odredište za izolovane otpadne materijale. Dostupnost spaljivaonice nije imala uticaja kod izračunavanja najlošijeg rešenja 2, 4. i 6. test problema, jer je tada odlaganje otpada na deponiju isplativije od njegovog spaljivanja, pre svega zbog niže gornje cenovne granice (tabela 33).

Kada je analiziran scenario bez pravne regulative sistema za reciklažu vozila u Republici Srbiji (test problemi od 1 do 6), stope obnavljanja i reciklaže su iznosile po 82.96%, osim u onim situacijama kada je bilo moguće alocirati izolovani otpad ka spaljivaonici i odlučivanje bilo optimistički orijentisano. Detaljnije, kada su tražena najbolja rešenja 2, 4. i 6. test problema uočeno je da su stopa obnavljanja i stopa obnavljanja energije povećane na 92.94% i 9.98%, respektivno, kao posledica niže donje cenovne granice spaljivanja od donje granice cene odlaganja na deponiju (tabela 36).

Što se tiče analize dobijenih finansijskih rezultata u okviru I faze primene Pravilnika (test problemi 7-12), najvažnije je istaći da ukoliko posle 1. januara 2015. godine ne bude postojala mogućnost spaljivanja izolovanih otpadnih materijala, tada će fabrika za reciklažu vozila sasvim sigurno morati da obustavi svoj rad (tabela 36). Razlog ovakvog postupka ne leži u njenoj nemogućnosti da profitabilno posluje, već je rezultat nemoći da se dostigne propisana kvota obnavljanja od 85%. Dakle, izgradnja i puštanje u rad spaljivaonice(a) do kraja 2014. godine i/ili sklapanje ugovora o dozvoli sagorevanja otpada u cementarama predstavlja ključni izazov za republičke vlasti i/ili fabriku za reciklažu vozila, respektivno. Sa druge strane, u test problemima 8, 10 i 12, kada je pretpostavljena mogućnost spaljivanja otpada, najniži profit od [70.46, 339.44] EUR/toni prerađenih olupina vozila je zabeležen u 8. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše nepostojani trend), a najviši profit od [79.95, 569.31] EUR/toni prerađenih olupina vozila identifikovan u 12. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše visoki trend rasta). Istovremeno, u pomenutim test problemima, stope obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije su se nalazile u intervalima [85.0, 87.96]%, [82.96, 82.96]% i [2.11, 5.0]%, respektivno, pri čemu donje granice intervala

odgovaraju najlošijim rešenjima, a gornje granice intervala najboljim rešenjima (tabela 36).

**Tabela 36.** Profiti po toni prerađenih olupina vozila i ekološke efikasnosti numeričke studije modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti.

Test pr.	Planski period	Regulatorni slučaj	Scenario	Dostupnost određišta otpadnih tokova		Rešenje BWC algoritma	Profit po toni (EUR/toni)	Stopa obn. (%)	Stopa reciklaže (%)	Stopa obn. energije (%)
				Postrojenje za napredni termalni tretman	Spaljivaonica					
1	2013-2014.	Nema pravne regulative	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	306.86	82.96	82.96	0.0
2						Najlošije	106.13	82.96	82.96	0.0
3			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	312.45	92.94	82.96	9.98
4						Najlošije	106.13	82.96	82.96	0.0
5			Visoki trend rasta	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	315.22	82.96	82.96	0.0
6						Najlošije	129.39	82.96	82.96	0.0
7	2015-2016.	I faza	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	—	0.0	0.0	0.0
8						Najlošije	—	0.0	0.0	0.0
9			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	339.44	87.96	82.96	5.0
10						Najlošije	70.46	85.0	82.89	2.11
11			Visoki trend rasta	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	—	0.0	0.0	0.0
12						Najlošije	—	0.0	0.0	0.0
13		II faza	Nepostojani trend	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	362.16	87.96	82.96	5.0
14						Najlošije	123.58	85.0	82.89	2.11
15						Najbolje	—	0.0	0.0	0.0
16			Srednji trend rasta	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	569.31	87.96	82.96	5.0
17						Najlošije	79.95	85.0	82.89	2.11
18						Najbolje	—	0.0	0.0	0.0
19	Visoki trend rasta		Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	—	0.0	0.0	0.0	
20					Najlošije	—	0.0	0.0	0.0	
21					Najbolje	337.77	95.0	85.0	10.0	
					Najlošije	55.86	95.0	85.0	10.0	
					Najbolje	—	0.0	0.0	0.0	
					Najlošije	—	0.0	0.0	0.0	
					Najbolje	—	0.0	0.0	0.0	
					Najlošije	—	0.0	0.0	0.0	
					Najbolje	360.48	95.0	85.0	10.0	
					Najlošije	108.98	95.0	85.0	10.0	
					Najbolje	—	0.0	0.0	0.0	
					Najlošije	—	0.0	0.0	0.0	
					Najbolje	—	0.0	0.0	0.0	
					Najlošije	—	0.0	0.0	0.0	
					Najbolje	567.64	95.0	85.0	10.0	
					Najlošije	65.35	95.0	85.0	10.0	



Analizirajući dobijene rezultate za period od 2015. do 2016. godine i regulatorni slučaj prevremenog uvođenja rigoroznijih ekoloških kvota (tj, stopa obnavljanja minimum 95%, stopa reciklaže minimum 85% i stopa obnavljanja energije maksimum 10%), uočeno je da fabrika za reciklažu vozila neće doneti odluku o obustavi rada samo u situaciji kada je dostupno postrojenje za napredni termalni tretman (test problemi 15, 18 i 21). Iz prethodnog se nameće jasan zaključak da spaljivanje otpada nije ni u kom slučaju dovoljno da se dostignu stope obnavljanja i reciklaže od 95% i 85%, respektivno. Prema tome, neophodna je revizija Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (koja nije predvidela izgradnju postrojenja za napredni termalni tretman otpada do kraja 2019. godine), ukoliko se želi izbegnuti kolaps sistema za reciklažu vozila u trenutku kada II faza primene Pravilnika bude stupila na snagu. Sa druge strane, u situacijama kada je pretpostavljeno da fabrika za reciklažu vozila može izolovane otpadne materijale alocirati i ka spaljivaonici i ka postrojenju za napredni termalni tretman (test problemi 15, 18 i 21), identifikovana je izuzetna profitabilnost, ali samo u slučajevima optimistički orijentisanog poslovanja. Detaljnije, najniži profit od [55.86, 337.77] EUR/toni prerađenih olupina vozila je zabeležen u 15. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše nepostojani trend), a najviši profit od [65.33, 567.64] EUR/toni prerađenih olupina vozila identifikovan u 21. test problemu (kada cene otpadnih metala karakteriše visoki trend rasta). Istovremeno, u pomenutim test problemima, stope obnavljanja, reciklaže i obnavljanja energije su iznosile 95%, 85% i 10%, respektivno, nezavisno da li se radi o najboljem ili najlošijem rešenju BWC algoritma (tabela 36).

Konačno, prethodna analiza je potvrdila da trend promena berzanskih cena otpadnih metala ima presudan uticaj na iznos ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila. Ovaj zaključak je potpuno očekivan, jer upravo cene otpadnih metala predstavljaju najvažniji reciklažni parametar.

Ilustrativno govoreći, pesimistički orijentisano donošenje odluka (najlošija rešenja BWC algoritma iz tabele 36) osigurava veliku verovatnoću da će kreirani planovi biti u potpunosti sprovedeni u delo. Ono se bazira na sledećim pretpostavkama: drobilica i oprema za sortiranje rade smanjenim kapacitetom, skuplje sortiranje generisanih frakcija materijala, držanje višeg nivoa sigurnosnih zaliha olupina vozila, visoke troškove držanja zaliha, manju reciklažnu i/ili energetske efikasnost optimalnih

odredišta, visoke troškove naručivanja olupina vozila od pogona za demontažu, manji prihod od prodaje sortiranih metala, skuplji transport do optimalnih odredišta, skuplje odlaganje na deponiju, skuplje spaljivanje i skuplji napredni termalni tretman. Osnovne nedostatke može predstavljati pojava neiskorišćenih kapaciteta drobilice i opreme za sortiranje, kao i ostvarivanje nižeg profita od onog koji bi bio moguć. Sa druge strane, optimistički orijentisano donošenje odluka (najbolja rešenja BWC algoritma iz tabele 36) karakteriše mala verovatnoća da će kreirani planovi biti zaista ostvareni. Ono se bazira na pretpostavkama koje su suprotne od prethodno iznetih, a osnovni nedostatak predstavlja mogućnost gomilanja zaliha, jer sve ono što je naručeno ne može uvek biti procesuirano.

Sprovedeno testiranje je pokazalo da brzina drobljenja olupina vozila, čije se granice nalaze u intervalu [61.1, 81.3] tona/h (tabela 30) čine osnovu za kreiranje plana naručivanja. Detaljnije, količina naručenih olupina se tokom planskog horizonta kretala u intervalu [158860, 211380] tona/planskom periodu, gde vrednosti donje i gornje granice intervala predstavljaju optimalne količine pri pesimistički orijentisanom odlučivanju (najlošija rešenja BWC algoritma) i optimistički orijentisanom odlučivanju (najbolja rešenja BWC algoritma), respektivno. Usled postojanja početnih zaliha u formulisanom modelu, u početnim planskim periodima kod pesimistički orijentisanog odlučivanja (pretpostavljeno da je nivo početnih zaliha niži od nivoa sigurnosnih zaliha) se vrši dopuna početnih zaliha do nivoa sigurnosnih zaliha (naručuje 505 tona više, tj. 159365 tona), a kod optimistički orijentisanog odlučivanja (pretpostavljeno da je nivo početnih zaliha viši od nivoa sigurnosnih zaliha) na preradu se raspoređuje višak početnih zaliha (naručuje 505 tona manje, tj. 210875 tona) (tabela 35).

Prema tome, utvrđeno je da se tokom svakog planskog perioda naručuje tačno ona količina olupina vozila koja je jednaka maksimalnom kapacitetu drobilice. Izuzetak od prethodno iznetog se može javiti kada postoje velike oscilacije u nabavnim cenama olupina. Tada se, ukoliko postoji očekivanje da će one značajno poskupeti i da će troškovi skladištenja olupina vozila koje nisu bile raspoređene za reciklažu biti manji od dodatnih izdataka za njihovo naručivanje, u narednom planskom periodu (ili periodima), može pristupiti naručivanju količine koja je veća od one koja se može preraditi.

Što se tiče upravljanja zalihama, njihov nivo je tokom čitavog testiranja bio jednak nivou sigurnosnih zaliha. Ova vrsta zaliha se može koristiti samo ukoliko dođe do neplaniranog prekida u snabdevanju olupinama vozila. One se planiraju tako da mogu da podmire makar nedeljne potrebe drobilice (tabela 35). Konačno, identifikovano favorizovanje pristupa kojim se naručuje tačno onoliko olupina koliko se može preraditi jasno ukazuje na nameru fabrike za reciklažu vozila da izbegne nepotrebne troškove skladištenja viškova olupina.

Analiza alokacije izolovanih otpadnih materijala (tabela 37) je pokazala da će stupanje na snagu ekoloških kvota 1. januara 2015. godine u najboljim slučajevima (najbolja rešenja BWC algoritma) praktično utrostručiti količinu otpada koja se odlaže na deponije. Detaljnije, odlaganje će sa 15421.2 tone (test problemi 2, 4 i 6) porasti na čak 43663.8 tona (test problemi 8, 10 i 12). Ovaj rezultat je ne samo neočekivan, već i potpuno neprihvatljiv, jer se direktno kosi sa namerom donošenja pravnih akata ove vrste da se količine koje se odlažu na deponiju minimiziraju. Utvrđeno je da se ovakav rezultat javio kao direktna posledica ograničavanja stope obnavljanja energije na 5%. Sa druge strane, u najgorim slučajevima (najlošija rešenja BWC algoritma) je ipak uočena određena delotvornost Pravilnika, pošto je količina koja se odlaže na deponiju u test problemima 8, 10 i 12 manja za oko 20% u odnosu na količinu zabeleženu u test problemima 2, 4 i 6.

Testirano prevremeno stupanje na snagu II faze pravilnika (test problemi 15, 18, 21), uticaće na to da se deo izolovanih otpadnih tokova koji se više ne bude mogao rutirati ka deponijama mora preusmeriti na spaljivaonicu i/ili postrojenje za napredni termalni tretman (tabela 37). Upravo će cene spaljivanja i naprednog termalnog tretmana (tabela 33) imati odlučujući uticaj na preraspodelu "viška" otpada između ova dva mrežna entiteta. Pored toga, treba posebno naglasiti da njihovo potpuno preusmeravanje na spaljivaonicu neće biti moguće, jer i II faza primene Pravilnika predviđa postojanje ograničenja u pogledu obnavljanja energije, doduše na relaksiranom nivou od 10%. Delotvornost uvođenja rigoroznijih ekoloških kvota potvrđuju minimalne količine izolovanog otpada koji se odlaže na deponije u test problemima 15, 18 i 21. U odnosu na situaciju kada nema pravne regulative (test problemi 2, 4 i 6), deponovane količine su dvostruko i desetostuko manje u slučaju najboljeg i najgoreg

rešenja BWC algoritma, respektivno. Sa druge strane, u odnosu na I fazu primene pravilnika (test problemi 8, 10 i 12), deponovane količine su oko 6 i oko 8 puta manje u slučaju najboljeg i najgoreg rešenja BWC algoritma, respektivno. U skladu sa prthodno iznetim može se zaključiti da usvojeni Pravilnik i dostupnost otpadnih entiteta imaju odlučujući uticaj na donošenje odluka o alokaciji izolovanih otpadnih materijala.

**Tabela 37.** Optimalna alokacija izolovanih otpadnih materijala numeričke studije modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti.

Test problem	Planski period	Regulatorni slučaj	Dostupnost odredišta otpadnih tokova		Rešenje BWC algoritma	Odlaganje na deponiju (tona)	Spaljivanje (tona)	Napredni termalni tretman (tona)
			Postrojenje za napredni termalni tretman	Spaljivaonica				
1,3,5	2013-2014.	Nema pravne regulative	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	72036.9	0.0	0.0
2,4,6					Najlošije	54114.1	0.0	0.0
7,9,11	2015-2016.	I faza	Nedostupno	Nedostupna	Najbolje	15421.2	56615.7	0.0
8,10,12					Najlošije	54114.1	0.0	0.0
13,16,19		II faza	Nedostupno	Dostupna	Najbolje	0.0	0.0	0.0
14,17,20					Najlošije	0.0	0.0	0.0
15,18,21			Dostupno	Dostupna	Najbolje	43663.8	28373.2	0.0
					Najlošije	45419.4	8694.7	0.0
					Najbolje	0.0	0.0	0.0
					Najlošije	0.0	0.0	0.0
					Najbolje	0.0	0.0	0.0
					Najlošije	0.0	0.0	0.0
					Najbolje	7171.3	39125.6	25740.0
					Najlošije	5606.8	25203.6	23303.7

Pregledom tabele 37, može se uočiti da optimističnije odlučivanje (najbolja rešenja) utiče na povećanje ukupne količine izolovanih otpadnih materijala. Odmah se može postaviti praktično pitanje: Zašto treba više “rizikovati” ako to sa sobom povlači pojavu većih količina otpada u sva 3 posmatrana regulatorna slučaja? Odgovor leži u mogućnosti da se poveća nivo ostvarenog profita procesuiranjem većeg broja olupina vozila, pošto prihod od prodaje dodatnih količina sortiranih metala nadmašuje troškove slanja pratećeg otpada ka izabranim optimalnim odredištima.

Kreiranje plana alokacije sortiranih metala je značajno jednostavnije od kreiranja plana alokacije otpada, jer regulatorni zahtevi nemaju na njega nikakvog uticaja. Štaviše, svaki od sortiranih metala ima svoje prirodno odredište (slika 24). Na primer, Cu-bogata frakcija i frakcija crnih metala se uvek prodaju valjaonici bakra Sevojno A.D. i železari Smederevo d.o.o., respektivno. Sa druge strane, uočeno je da

prodaja izolovanih bakarnih žica otkupljivačima sekundarnih sirovina ima primat nad njihovim deponovanjem. Ovakva odluka je potpuno očekivana i dvostruko korisna: rastu stopa reciklaže i nivo ostvarenog profita. Međutim, treba pomenuti da na izvodljivost ove odluke primarno utiče tražnja na tržištu sekundarnih metala.

Što se tiče plana sortiranja, jasno je identifikovana intencija fabrike za reciklažu vozila da ostvari što je moguće veći kvantitet i viši kvalitet sortiranih metalnih tokova, nezavisno od vrednosti kvota ekološke efikasnosti. Obe ASR frakcije se uvek mehanički recikliraju, primarno kako bi se izolovali vredni obojeni metali. Al-bogata frakcija se uvek dodatno prečišćava, jer dodatni prihod uvek prevazilazi troškove njenog sortiranja. Zbog toga, tokom testiranja modela nije zabeležena prodaja Al-bogate frakcije valjaonici aluminijuma IMPOL SEVAL a.d, već isključivo frakcije aluminijuma.

## 6. ZAKLJUČAK

U disertaciji je prvo formulisan *model kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju*. Predloženi model obezbeđuje optimalne odluke u pogledu naručivanja, skladištenja, sortiranja, transporta, naprednog termalnog tretmana, sagorevanja i odlaganja na deponiju. U okviru prateće studije slučaja razmatrane su profitabilnost i ekološka efikasnost EU sistema za reciklažu vozila, i priložena diskusija o uticaju tehnološkog razvoja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila. Pored toga, izvršene su sledeće analize: analiza uticaja EU ELV direktive na proces donošenja reciklažnih odluka, analiza uticaja raspoloživih finansijskih instrumenata na profitabilnost i ekološku efikasnost fabrike za reciklažu vozila, analiza dva pristupa za upravljanje ekološkom efikasnošću reciklažnog sistema, i analiza uticaja EU ELV direktive i uslova poslovanja na strukturu troškova fabrike za reciklažu vozila.

Kroz testiranje predloženog modela je zaključeno da kontrolu efikasnosti reciklažnog sistema treba sprovoditi na nivou čitavog sistema, jer to ni u kom slučaju neće ugroziti ciljeve koje je EU ELV direktiva propisala. U slučaju važećih kvota, najbolji ekološki rezultati biće ostvarivani pri visokoj ceni odlaganja ASR-a na deponiju i niskoj ceni prerade u postrojenju za napredni termalni tretman. Sa druge strane, posle 1. januara 2015. godine zemlje članice EU treba da povećaju cene odlaganja na deponije i učine sve da snize troškove naprednog termalnog tretmana i spaljivanja ukoliko žele da minimiziraju dalju degradaciju životne sredine. Najvažniji zaključak do kojeg se došlo pri ispitivanju individualnog uticaja cena odlaganja na deponiju, prerade u postrojenju za napredni termalni tretman i spaljivanja je da povećanje cene odlaganja na deponiju neće uvek smanjiti količinu deponovanih ostataka drobljenja automobila. Štaviše, do 1. januara 2015. godine pomenuto poskupljenje neće imati efekta pri visokim cenama spaljivanja i naprednog termalnog tretmana, a posle ovog datuma ono će biti opravdano samo ukoliko cena naprednog termalnog tretmana bude niska. Analizom strukture troškova fabrike za reciklažu vozila zaključeno je da na nju u značajnoj meri utiču zakonska regulativa i finansijski uslovi poslovanja. Naime, utvrđeno je da su u toku prve faze primene ELV direktive najznačajniji troškovni segmenti naručivanje olupina vozila (70.97%), drobljenje i sortiranje (16.59%), i transport do optimalnih odredišta

(7.27%). Pored toga, identifikovano je da će povećanje svih kvota uspostaviti novi poredak glavnih troškovnih segmenata, tj. naručivanje olupina vozila (68.34%), drobljenje i sortiranje (15.97%), napredni termalni tretman (8.21%) i transport do optimalnih odredišta (6.44%).

Pristupom linearnog programiranja formulisan je i testiran *model izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila*. On je primenjen na studiju slučaja u kojoj su ispitana 2 regulatorna scenarija, i analiziran uticaj klase ( $M_1$  i  $N_1$ ) i materijalnog sastava vozila. Utvrđeno je da savremeno opremljena fabrika za reciklažu vozila može poslovati profitabilno, čak i u striktno kontrolisanim i regulatorno rigoroznim proizvodnim uslovima. Testiranje predloženog modela je pokazalo da će ona stalno naručivati onu količinu olupina vozila koju maksimalno može da preradi u toku planskog perioda, kao i da će bez obzira na klasu porudžbine i kategoriju olupine vozila težiti da dostigne što veći kvalitet i kvantitet sortiranih metala. Propisane kvote obnavljanja i reciklaže su dostižne, ali samo ako fabrika za reciklažu vozila poseduje savremenu opremu za sortiranje i ima mogućnost da pojedine otpadne frakcije prosledi spaljivaonici i/ili postrojenju za napredni termalni tretman. Štaviše, dostupnost ovih otpadnih entiteta će dodatno dobiti na značaju 1. januara 2015. godine, o čemu svedoči podatak da kada budu stupile na snagu još strožije kvote ekološke efikasnosti prosečna stopa obnavljanja energije bi mogla porasti na 9.87%. Promena u dizajnu vozila, čiji je specijalan slučaj analiziran u pratećoj studiji (tj. smanjenje težine vozila supstituisanjem crnih metala aluminijumom), neće ugroziti poslovanje savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila. Štaviše, u oba ispitana regulatorna scenarija, analiza optimalnih planova naručivanja je identifikovala udeo obojenih metala kao jednog od glavnih pokretača procesa reciklaže. Prema tome, nameće se jasan zaključak da investiranje fabrika za reciklažu vozila u nabavku savremene opreme za sortiranje predstavlja potpuno ispravnu odluku.

Kako bi bila verifikovana upotrebljivost predloženog modela i prezentovanih rezultata, sprovedene su odgovarajuće analize osetljivosti. Stabilnost dobijenih rezultata je ispitana analizom njihove osetljivosti na promene cena aluminijuma i bakra. Oba analizirana parametra u značajnoj meri utiču na profitabilnost fabrike za reciklažu vozila, pri čemu promena cene aluminijuma može imati do 10 puta veći uticaj nego

promena cene bakra. Uvođenje strožijih ekoloških kvota gotovo da neće imati nikakvog efekta na veličinu uticaja koji pomenute cene obojenih metala imaju na rezultate modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila. Analiza osetljivosti količine naručenih olupina (čiju dostupnost može ograničiti izvoz polovnih vozila, napuštanje vozila i prisustvo nelegalnih operatora) na visinu ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila je ukazala na značajnu, skoro linearnu međuzavisnost.

*Model kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju* je takođe prezentovan u ovoj disertaciji. Priložena studija slučaja je ilustrovala potencijale i primenljivost predloženog matematičkog modela, poslužila za analizu uticaja Japanskog ELV zakona, i dala uvid u finansijske i ekološke performanse japanskog sistema za reciklažu vozila. Sprovedene analize osetljivosti svih reciklažnih parametara (tj. cene metala, iznosa ASR depozita, troškova transporta, troškova sortiranja, cene olupina vozila, cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na deponiju) su demonstrirale i verifikovale korišćeni metodološki pristup, i pokazale da cene sortiranih otpadnih metala predstavljaju najznačajniji parametar. Što se tiče troškovnih parametara, cena olupina vozila je prvorangirana, prate je troškovi sortiranja, troškovi transporta, cena naprednog termalnog tretmana i cena odlaganja na deponiju. Zaključeno je da će uvođenje strožije ASR reciklažne kvote, planirano za početak fiskalne 2015. godine, povećati uticaj samo cene naprednog termalnog tretmana, dok će uticaj ostalih reciklažnih parametara biti smanjen.

Promena dizajna vozila, koja je u ovom modelu posmatrana sa aspekta supstituisanja crnih metala aluminijumom, neće ugroziti tamošnji sistem za reciklažu vozila. U oba analizirana regulatorna scenarija, analiza optimalnih odluka je identifikovala udeo obojenih metala kao jednog od glavnih pokretača procesa reciklaže ELV-a. Međutim, samo su savremeno opremljene fabrike za reciklažu vozila u mogućnosti da iskoriste veliku vrednost obojenih metala, jer su one, za razliku od tradicionalno opremljenih fabrika za reciklažu vozila, sposobne da ih uspešno izoluju. Testiranje formulisanog modela je pokazalo da savremeno opremljena fabrika za reciklažu vozila predstavljaju ekonomski i ekološki bolje rešenje za reciklažu ASR-a.

Japanski ELV zakon ne utiče ni na količinu ASR-a koja se generiše operacijom drobljenja olupina, ni na količinu ASR-a koju sakupljaju proizvođači automobila.



Međutim, on ima ključan uticaj na donošenje odluke o reciklaži ASR-a, jer će povećanje reciklažne kvote za 20% uticati da se količina ASR-a koja se odlaže na deponije smanji za oko 50%. Uvođenje strožije ASR reciklažne kvote neće značajnije uticati na promenu nivoa profitabilnosti savremeno opremljenih fabrika za reciklažu vozila, ali će smanjiti višak profita proizvođača automobila za oko 30 EUR/toni sakupljenog ASR-a. Što se tiče efikasnosti procesa reciklaže, čak je i strožija ASR reciklažna kvota lako dostižna. Prema tome, generalni zaključak je da japanski sistem za reciklažu vozila spremno dočekuje finalnu fazu primene tamošnjeg ELV zakona.

Dalji razvoj predloženog modela kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a se može kretati u dva pravca. Prvi pravac daljeg istraživanja se odnosi da širu analizu uticaja promene dizajna vozila na reciklažni sistem. Ovo praktično znači uključivanje dodatnih tipova vozila u analizu, poput plastično intenzivnih, električnih, hibridnih i sl. Drugi pravac daljeg istraživanja treba usmeriti na modeliranje sistema za reciklažu vozila i u nekim drugim državama koje poseduju savremenu zakonsku regulativu, kao što su na primer Kina, Južna Koreja i Tajvan.

*Model dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji u uslovima neizvesnosti* je formulisan i testiran u ovoj disertaciji. On je primenjen na studiju slučaja u kojoj je analiziran vremenski period 2013-2016. godina, ispitana 3 regulatorna slučaja i 3 trenda cena otpadnih metala, ali i istovremeno analizirana dostupnost finalnih odredišta izolovanih otpadnih tokova. Doprinos urađene studije slučaja je višestruk. Prvo, ilustrovan je potencijal i primenjivost razvijenog modela. Drugo, ispitani su uticaji Pravilnika o načinu i postupku upravljanja vozilima na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji na donošenje odluka o naručivanju, sortiranju, alokaciji izolovanih otpadnih materijala i sortiranih metala. Treće, prezentovani su podaci o profitabilnosti i ekološkoj efikasnosti projektovane fabrike za reciklažu vozila. Konačno, analizirana je Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine.

Predloženi model može da kreira optimalne planove naručivanja olupina vozila, sortiranja generisanih frakcija materijala, alokacije izolovanih otpadnih tokova i alokacije sortiranih metala. Testiranje predloženog modela je pokazalo da fabrika za reciklažu vozila teži da ostvari što je moguće veći kvantitet i viši kvalitet sortiranih

metalnih tokova, nezavisno od vrednosti kvota ekološke efikasnosti koje je propisao pomenuti Pravilnik. Uticaj "rizika" na plan naručivanja olupina je identifikovan u kreiranim test problemima, jer polaznu tačku za njegovo kreiranje predstavlja brzina rada drobilice. Ekološki zahtevi Pravilnika ne utiču na kreiranje plana alokacije sortiranih metala, jer svaki od sortiranih metala ima svoje prirodno odredište.

Testiranjem predloženog modela se došlo do zaključka da trend promene berzanskih cena otpadnih metala ima presudan uticaj na iznos ostvarenog profita fabrike za reciklažu vozila. Ovakav zaključak je potpuno očekivan, jer upravo cene otpadnih metala predstavljaju najvažniji reciklažni parametar. U periodu od 2013. do 2014. godine vrednost ostvarenog profita se kretala u intervalu od 106.13 EUR/toni pa sve do 394.30 EUR/toni prerađenih olupina vozila u zavisnosti od posmatranog trenda kretanja cena otpadnih metala, dostupnosti spaljivaonice i (graničnih) vrednosti parametara modela. Analiza I faze primene Pravilnika je pokazala da ako posle 1. januara 2015. godine ne bude postojala mogućnost spaljivanja izolovanih otpadnih materijala, tada će fabrika za reciklažu vozila sasvim sigurno morati da obustavi svoj rad. Razlog ovakvog postupka ne leži u njenoj nemogućnosti da profitabilno posluje (jer se u onim test problemima u kojima je pretpostavljeno postojanje spaljivaonice profit kretao u intervalu od 70.46 EUR/toni pa sve do 569.31 EUR/toni prerađenih olupina vozila), već je rezultat nemoći da se dostigne propisana kvota obnavljanja od 85%. Zaključak je da izgradnja i puštanje u rad spaljivaonice(a) do kraja 2014. godine i/ili sklapanje ugovora o dozvoli sagorevanja otpada u cementarama predstavlja ključni izazov za republičke vlasti i/ili fabriku za reciklažu vozila, respektivno. Sa druge strane, istraživanjem prevremenog uvođenja rigoroznijih ekoloških kvota Pravilnika zaključeno je da izgradnja i puštanje u rad postrojenja za napredni termalni tretman pre 1. januara 2019. predstavlja potreban uslov za dostizanje stopa obnavljanja i reciklaže od 95% i 85%, respektivno. Prema tome, ukoliko se želi izbegnuti kolaps sistema za reciklažu vozila u trenutku kada II faza primene Pravilnika bude stupila na snagu, preporučuje se mogućnost revizije Strategije upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine.

Analiza alokacije izolovanih otpadnih materijala je ukazala na veoma ograničen, čak i nepovoljan uticaj prve faze primene Pravilnika na projektovani sistem za reciklažu vozila u Republici Srbiji. S tim u vezi, identifikovano je da uvođenje kvota ekološke efikasnosti može čak i utrostručiti količinu otpadnih materijala koja se odlaže na

deponije, doduše samo ako se govori o najboljim rešenjima BWC algoritma. Ovakav rezultat se javio kao direktna posledica uvođenja ograničenja u pogledu obnavljanja energije od 5%, što navodi na zaključak da sa njegovom implementacijom treba sačekati. Druga faza primene Pravilnika će definitivno rasteretiti deponije od otpadnih materijala generisanih u procesu reciklaže vozila. Detaljnije, identifikovano je smanjenje od 2 do 10 puta u odnosu na slučaj kada nema pravne regulative, i smanjenje od 6 do 8 puta u odnosu na I fazu primene Pravilnika. Prema tome, generalni zaključak je da usvojeni Pravilnik i dostupnost otpadnih entiteta imaju odlučujući uticaj na donošenje odluka o alokaciji izolovanih otpadnih materijala.

Problem reciklaže vozila karakteriše prisustvo velike neizvesnosti, pa iz određenih razloga neće biti uvek opravdano posmatrati baš sve parametre predloženog modela dugoročnog planiranja reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa u Republici Srbiji kao intervalne vrednosti. Na primer, brzina prerade opreme za sortiranje može neplanirano fluktuirati u toku posmatranog planskog horizonta usled varijacija u sadržaju prerađivanog toka materija i promene (tj. pogoršanja) stanja u kojem se oprema nalazi. Potencijalni pristup za prevazilaženje ovog problema bi se mogao tražiti u implementaciji koncepta dualnih intervala (tj. intervala sa intervalnim granicama) u predloženu formulaciju modela. Ovaj relativno nov koncept (Joslyn, 2003; Joslyn i Booker, 2003) je potrebno primeniti kada velika informaciona neizvesnost postoji u granicama pojedinih intervalnih parametara. On do sada nije bio korišćen za rešavanje problema reciklaže vozila (Li i ostali, 2010; Liu i Huang, 2009; Liu i ostali, 2009), pa može biti posmatran kao važan pravac daljeg istraživanja. Rešavanje problema reciklaže vozila na kraju životnog ciklusa uz poštovanje osnovnih načela koncepta održivog ravoja može biti posmatrano kao još jedan pravac daljeg istraživanja. Ako se ima u vidu da ekonomski, ekološki i društveni kriterijumi predstavljaju tri dimenzije pomenutog koncepta, primena nekog metoda višekriterijumske analize je u tom slučaju neizostavna. Konačno, ne postoje studije iz oblasti reciklaže vozila koje su se bavile analiziranjem veze između rizika odlučivanja i performansi sistema (Simić i Dimitrijević, 2013b). REILP metod<sup>34</sup> (Zou i ostali, 2010b) može pružiti numerička rešenja za svaki željeni nivo tolerancije rizika. Ovaj metod se bazira na nivou aspiracije sistema, koji generalno govoreći predstavlja spremnost donosioca odluke da rizikuje prilikom rešavanja

---

<sup>34</sup> REILP - *engl.* Risk explicit interval linear programming

određenog problema. Prema tome, REILP metodološki okvir može poslužiti kao polazna tačka za formulaciju modela reciklaže vozila kojim bi se obuhvatio aspekt rizika odlučivanja i time doprinelo daljem razvoju ove naučne oblasti.

## 7. LITERATURA

- Agbo, C.O.A. (2011). Recycle materials potential of imported used vehicles in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 118-129.
- Agencija za energetiku Republike Srbije (AERS). (2013). Regulativa cena – Srbija: cene električne energije i prirodnog gasa po Eurostat metodologiji. <http://www.aers.rs/Index.asp?l=1&a=111> [14.05.2013]
- Allahdadi, M., Mishmast Nehi, H. (2011). Fuzzy linear programming with interval linear programming approach. *AMO - Advanced Modeling and Optimization*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-12.
- Altay, M.C., Sivri, N., Onat, B., Şahin, Ü., Zorağa, M., Altay, H.F. (2011). Recycle of metals for end-of-life vehicles (ELVs) and relation to Kyoto protocol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, pp. 2447-2451.
- Amaral, J., Ferrao, P., Rosas, C. (2006). Is recycling technology innovation a major driver for technology shift in the automobile industry under an EU context? *International Journal of Technology, Policy and Management*, Vol. 6, No. 4, pp. 385-398.
- American Metal Market (AMM). (2011). <http://www.amm.com/Pricing.html> [10.08.11]
- American Metal Market (AMM). (2013). Scrap prices. <http://www.amm.com/Pricing.html> [22.03.13]
- Amza, G., Apostolescu, Z., Iliescu, M., Garac, Z., Paise, S., Groza, M. (2011). Applied ecotechnological issues for recycling cars. *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on mathematical methods, computational techniques and intelligent systems*, Iasi, Romania, July 1-3, pp. 33-38.
- Ando, G., Steiner, C., Selinger, A., Shin, K. (2002). ASR treatment in Japan - Experience of 95000 t ASR recycling and recovery available for Europe through TwinRec. *Proceedings of International Automobile Recycling Congress*, March 13-15, Geneva, Switzerland, 2002.
- Aruga, K., Managi, S. (2011). Price linkages in the copper futures, primary, and scrap markets. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 56, No. 1, pp. 43-47.

- Bandivadekar, A.P., Kumar, V., Gunter, K.L., Sutherland, J.W. (2004). A model for material flows and economic exchanges within the U.S. automotive life cycle chain. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 23, No. 1, pp. 22-29.
- Barakat, S., Urbanic, J. (2011). A systematic investigation for reducing shredder residue for complex automotive seat subassemblies. In: *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing* (Eds: Hesselbach, J., Herrmann, C.), Springer, Berlin, Germany, pp. 476-481.
- Bari, M.A., Kindzierski, W.B., Lashaki, M.J., Hashisho, Z. (2011). Automotive wastes. *Water Environment Research*, Vol. 83, No. 10, pp. 1467-1487.
- Beck, M. (2009). ELV recycling goal within reach of ARN. *Car Recycling*, October, pp. 2-4.
- Bellmann, K., Khare, A. (1999). European response to issues in recycling car plastics. *Technovation*, Vol. 19, pp. 721-734.
- Bellmann, K., Khare, A. (2000). Economic issues in recycling end-of-life vehicles. *Technovation*, Vol. 20, pp. 677-690, 2000.
- Berzi, L., Delogu, M., Giorgetti, A., Pierini, M. (2013). On-field investigation and process modelling of end-of-life vehicles treatment in the context of Italian craft-type authorized treatment facilities. *Waste Management*, Vol. 33, No. 4, pp. 892-906.
- Blume, T., Walther, M. (2013). The end-of-life vehicle ordinance in the German automotive industry – corporate sense making illustrated. *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.020.
- Boon, J.E., Isaacs, J.A., Gupta, S.M. (2001). Economic impact of aluminum-intensive vehicles on the U.S. automotive recycling infrastructure. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 4, No. 2, pp. 117-134.
- Boon, J.E., Isaacs, J.A., Gupta, S.M. (2003). End-of-life infrastructure economics for “clean vehicles” in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 7, No. 1, pp. 25-45.
- Bostel, N., Dejax, P., Lu, Z. (2005). The design, planning, and optimization of reverse logistics networks. In: *Logistics systems: design and optimization* (Eds. Langevin, A., Riopel, D.), Springer, New York, USA. pp. 171-212.

- Boughton, B. (2007). Evaluation of shredder residue as cement manufacturing feedstock. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 51, pp. 621-642.
- Boughton, B., Horvath, A. (2006). Environmental assessment of shredder residue management. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 47, No. 1, pp. 3-25.
- Brahmst, E. (2006). Copper in end-of-life vehicle recycling. Manufacturing, Engineering & Technology Group, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI, USA. <http://www.cargroup.org/?module=Publications&event=View&pubID=35> [18.04.2013]
- Carcangiu, C.E., Orrù, P.F., Pilloni, M.T. (2010). Analysis of end-of-life vehicle processes: A case study in Sardinia (Italy). In: *Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches* (Eds: Vallespir, B., Alix, T.), Springer, Boston, USA, pp. 409-416.
- Castro, M.B., Remmerswaal, J.A.M., Brezet, J.C., Van Schaik, A., Reuter, M.A. (2005). A simulation model of the comminution–liberation of recycling streams: Relationships between product design and the liberation of materials during recycling. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 75, No. 3-4, pp. 255-281.
- Castro, M.B.G, Remmerswaal, J.A.M., Reuter M.A. (2003). Life Cycle Impact Assessment of the average passenger vehicle in the Netherlands. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8, No. 5, pp. 297-304.
- Scrao Price Bulletin (SPB). (2013). Market Reports > Birmingham. <http://www.scrappricebulletin.com/MarketReportsRegion.aspx?marketcode=BI> [15.05.2013]
- Centre for Sustainable Manufacturing and Reuse/recycling Technologies (SMART). (2006). Post-fragmentation modeller, Loughborough University, Loughborough, UK. <http://www.centreforsmart.co.uk/download%20pages.html> [22.04.2013]
- CEWEP. (2011). CEWEP country report 2010. [http://www.cewep.eu/information/data/subdir/442.\\_Country\\_Report\\_on\\_Waste\\_Management.html](http://www.cewep.eu/information/data/subdir/442._Country_Report_on_Waste_Management.html) [accessed 18.05.12].
- CEWEP. (2012). Landfill taxes & bans. [http://www.cewep.eu/media/www.cewep.eu/org/med\\_557/852\\_2011-12-12\\_cewep\\_-\\_landfill\\_taxes\\_\\_bans\\_\\_webiste.pdf](http://www.cewep.eu/media/www.cewep.eu/org/med_557/852_2011-12-12_cewep_-_landfill_taxes__bans__webiste.pdf) [accessed 18.05.12].

- Che, J., Yu, J.-s., Kevin, R.S. (2011). End-of-life vehicle recycling and international cooperation between Japan, China and Korea: Present and future scenario analysis, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 23, pp. S162-S166.
- Cheah, L.W. (2010). Cars on a diet: The material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the U.S. *PhD thesis*. The Engineering Systems Division of Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. [http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/LCheah\\_PhD\\_thesis\\_2010.pdf](http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/LCheah_PhD_thesis_2010.pdf) [12.07.11]
- Cheah, L.W., Evans, C., Bandivadekar, A., Heywood, J. (2007). Factor of two: Halving the fuel consumption of new U.S. automobiles by 2035. Publication No. LFEE 2007-04 RP. Laboratory for Energy and Environment, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/42918> [05.01.2013]
- Chen, K.-c., Huang S.-h., and Lian, I.-w. (2010). The development and prospects of the end-of-life vehicle recycling system in Taiwan. *Waste Management*, Vol. 30, Nos. 8-9, pp. 1661-1669.
- Chen, M. (2005). End-of-life vehicle recycling in China: Now and the future. *JOM*, Vol. 57, No. 10, pp. 20-26.
- Chen, M. (2006). Sustainable recycling of automotive products in China: Technology and regulation. *JOM*, Vol. 58, No. 8, pp. 23-26.
- Chen, M., Zhang, F. (2009). End-of-life vehicle recovery in China: Consideration and innovation following the EU ELV directive. *JOM*, Vol. 61, No. 3, pp. 45-52.
- Chinneck, J.W., Ramadan, K. (2000). Linear programming with interval coefficients, *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 2, pp. 209-220.
- Choi, J.-K., Stuart, J.A., Ramani, K. (2005). Modeling of automotive recycling planning in the United States. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 413-419.
- Ciacci, L., Morselli, L., Passarini, F., Santini, A., Vassura, I. (2010). A comparison among different automotive shredder residue treatment processes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 15, pp. 896-906.
- Coates, G., Rahimifard, S. (2006). Cost models for increased value recovery from end-of-life vehicles. In: Duflou, J. Willems, B. Dewulf, W. (eds.). *Proceedings of*



- 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, May 31-June 2, Leuven, Belgium, pp. 347-352. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Coates, G., Rahimifard, S. (2007). Assessing the economics of pre-fragmentation material recovery within the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, No. 2, pp. 286-302.
- Coates, G., Rahimifard, S. (2009). Modelling of post-fragmentation waste stream processing within UK shredder facilities. *Waste Management*, Vol. 29, No. 1, pp. 44-53.
- Commission of the European Communities (CEC). (2007). Document accompanying the report from the Commission to the Council and the European Parliament on the targets contained in article 7(2)(b) of Directive 2000/53/ec on end-of-life vehicle - impact assessment. European Commission, Brussels. <http://eur-lex.europa.eu/SECMonth.do?year=2007&month=01> [12.07.11]
- Čizmić, M., Rankov, S., Vujić, G., Radivojević, T., Dolga, M., Tubin, T., i ostali. (2012). Regionalni plan upravljanja otpadom za opštine Subotica, Senta, Kanjiža, Čoka, Bačka Topola i Mali Idoš. [http://www.deponija.rs/downloads/Regionalni\\_plan\\_upravljanja\\_otpadom.pdf](http://www.deponija.rs/downloads/Regionalni_plan_upravljanja_otpadom.pdf) [15.05.2013]
- Dalmijn, W.L., De Jong, T.P.R. (2007). The development of vehicle recycling in Europe: Sorting, shredding, and separation. *JOM*, Vol. 59, No. 11, pp. 52-56.
- Dantec, D. (2005). Analysis of the cost of recycling compliance for the automobile industry. *MSc thesis*, The Engineering Systems Division of Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. [http://msl.mit.edu/students/msl\\_theses/Dantec\\_D-thesis.pdf](http://msl.mit.edu/students/msl_theses/Dantec_D-thesis.pdf) [08.10.2011].
- Davis, S.C., Diegel, S.W., Boundy, R.G. (2010). Transportation energy data book: Edition 29. Oak Ridge National Laboratory, Center for Transportation Analysis, Energy and Transportation Science Division, Oak Ridge, Tennessee, US. <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub24318.pdf> [12.07.11]
- Davis, S.C., Diegel, S.W., Boundy, R.G. (2012). Transportation energy data book: Edition 31. Oak Ridge National Laboratory, Center for Transportation Analysis, Energy and Transportation Science Division, Oak Ridge, Tennessee, US.

- <http://www.oesa.org/Doc-Vault/Industry-Information-Analysis/US-DOE.pdf>  
[19.03.12]
- Edwards, C., Bhamra T., Rahimifard, S. (2006a). A design framework for end-of-life vehicle recovery. In: Duflou, J. Willems, B. Dewulf, W. (eds.). *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, May 31-June 2, Leuven, Belgium, pp. 365-37. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Edwards, C., Coates, G., Leaney, P.G., Rahimifard, S. (2006b). Implications of the end-of-life vehicles directive on the vehicle recovery sector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 7, pp. 1211-1216.
- Environmental Data Centre on Waste (EDCW). (2008). End of life vehicles data, 2006. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20year%202006%20ref%202010%2006%2022%20publication\\_01092010.xls](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20year%202006%20ref%202010%2006%2022%20publication_01092010.xls)  
[03.05.11]
- Environmental Data Centre on Waste (EDCW). (2009). End of life vehicles data, 2007. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20year%202007%20ref%202010%2007%2022%20publication\\_01092010.xls](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20year%202007%20ref%202010%2007%2022%20publication_01092010.xls)  
[03.05.11]
- Environmental Data Centre on Waste (EDCW). (2010). End of life vehicles data, 2008. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV\\_year\\_2008\\_ref\\_2010\\_09\\_30\\_published\\_04\\_10\\_2010.xls](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV_year_2008_ref_2010_09_30_published_04_10_2010.xls) [03.05.11]
- Environmental Data Centre on Waste (EDCW). (2011). End of life vehicles data, 2006-2009. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs> [12.07.11]
- Environmental Data Centre on Waste (EDCW). (2013). End-of-life vehicles: Reuse, recycling and recovery, totals (Last update: 21-02-2013). [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key\\_waste\\_streams/end\\_of\\_life\\_vehicles\\_elvs](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key_waste_streams/end_of_life_vehicles_elvs) [25.04.13]
- Environmental Protection Agency (EPA). (2010). Depollution and shredder trial report on end of life vehicles - final report. Ireland. <http://www.epa.ie/downloads/>

pubs/waste/stats/EPA\_ELIV\_Depollution\_&\_shredder\_trial\_final\_report.pdf  
[12.07.11]

Espartero, S., Lozano, D.J., Lauroba, N., Beitia, A., Muñoz, C., Nadal, R.V. (2010). Is Spain the best vehicle recycler country in Europe?. *Selected Proceedings from the 13th International Congress on Project Engineering 2009*, Badajoz, Spain, pp. 434-442.

European Central Bank Eurosystem (ECBE). (2013). Statistical data warehouse – historical oil prices from year 1985. to year 2013. <http://sdw.ecb.europa.eu/browse.do?node=2120782> [15.05.2013]

European Commission Environment (ECE). (2005). The story behind the strategy – EU waste policy. [http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/story\\_book.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/story_book.pdf). [22.12.2011]

European Union (EU). (1975). Council Directive of 15 July 1975 on waste (75/442/EEC). *Official Journal of the European Union*, L 194, pp. 39.

European Union (EU). (2000). Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 269, pp. 34-42.

European Union (EU). (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, L 312, pp. 3-30.

Eurostat. (2012). Eurobase: complete data on end-of-life vehicles. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs> [18.05.12].

Eurostat. (2013). Electricity prices for medium size industrial consumers in Euro area (changing composition) (2004–2012), updated on 22.05.2013. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/database> [23.05.13].

Ferrao, P., Amaral, J. (2006). Assessing the economics of auto recycling activities in relation to European Union Directive on end of life vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 73, No. 3, pp. 277-289.

Ferrao, P., Nazareth, P., Amaral, J. (2006). Strategies for meeting EU ELV reuse/recovery targets. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 10, No. 4, pp. 77-93.

- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M. (2010). Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, Vol. 2, No. 10, pp. 3309-3322.
- Fiore, S., Ruffino, B., Zanetti, M.C. (2012). Automobile shredder residues in Italy: Characterization and valorization opportunities. *Waste Management*, Vol. 32, No. 8, pp. 1548-1559.
- Filipović, D., Ilić, M., Joksimović, B., Stevanović Čarapina, H., Jovović, A., Tošović, S., i ostali. (2011). Lokalni plan upravljanja otpadom grada Beograda 2011-2020. Ugovor br. 4011-129. <http://www.beograd.rs/download.php/documents/Lokalni%20plan%20upravljanja%20otpadom%202011-2020%20-%20II%20deo.pdf> [15.05.2013]
- Forslind, K.H. (2005). Implementing extended producer responsibility: The case of Sweden's car scrapping scheme. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, No. 6, pp. 619-629.
- Forton, O.T., Harder, M.K., Moles, N.R. (2006). Value from shredder waste: Ongoing limitations in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 46, No. 1, pp. 104-113.
- Fuji Heavy. (2010). Corporate social responsibility report 2010, Tokyo, Japan. [http://www.fhi.co.jp/english/envi/report/pdf/2010/e\\_all.pdf](http://www.fhi.co.jp/english/envi/report/pdf/2010/e_all.pdf) [12.07.11]
- Fumikazu, Y. (2007). The cyclical economy of Japan, the 2nd edition. Hokkaido University, Sapporo, Japan. <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/34758/1/TheCyclicalEconomyofJapan.pdf> [01.09.11]
- Fuse, M., Kashima, S. (2008). Evaluation method of automobile recycling systems for Asia considering international material cycles: Application to Japan and Thailand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 10, No. 2, pp. 153-164.
- Gaillot, O., McCormack, I. (2010). Depollution and shredder trial report on end of life vehicles in Ireland. Ireland environmental protection agency. <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=14261> [02.05.2013]
- Gerrard, J., Kandlikar, M. (2007). Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of ELV Directive on "green" innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, No. 1, pp. 17-27.

- Gesing, A. (2004). Assuring the continued recycling of light metals in end-of-life vehicles: A global perspective. *JOM*, Vol. 56, No. 8, pp. 18-27.
- GHK/BioIS. (2006). A study to examine the costs and benefits of the ELV directive - final report. Birmingham, UK. [http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/study/final\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/study/final_report.pdf) [12.07.11]
- Giannouli, M., de Haan, P., Keller, M., Samaras, Z. (2007). Waste from road transport: Development of a model to predict waste from end-of-life and operation phases of road vehicles in Europe. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 1169-1182.
- Go, T.F., Wahab, D.A., Rahman, M.N.Ab., Ramli, R., Azhari, C.H. (2011). Disassemblability of end-of-life vehicle: A critical review of evaluation methods. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 13, pp. 1536-1546.
- Gomes, V. (2006). Material transformation and recycling of automotive shredder residues. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, Vol. 14, No. 1-2, pp. 183-192.
- Gupta, S.M., Isaacs, J.A. (1997). Value analysis of disposal strategies for automobiles. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 33, No. 1-2, pp. 325-328.
- Harris shredders. (2009). Ferrous brochures. [http://www.harrisequip.com/wp-content/assets/brochures/Shredder\\_Brochure\\_2009web.pdf](http://www.harrisequip.com/wp-content/assets/brochures/Shredder_Brochure_2009web.pdf) [01.11.11]
- Harris shredders. (2012). Ferrous brochures. <http://www.harrisequip.com/products/> [18.05.12]
- Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y., Adachi, Y. (2012). Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next-generation vehicles and scrap sorting technology. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 66, pp. 8-14.
- Hedayati, M., Subic, A. (2011). A framework for extended end-of-life vehicle (ELV) recovery rate based on a sustainable treatment option. *International Journal of Sustainable Design*, Vol. 1, No. 4, pp. 381-401.
- Hjelmar, O., Wahlstrom, M., Andersson, M.T., Laine-Ylijoki, J., Wadstein, E., Thomas, R. (2009). Treatment methods for waste to be landfilled. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Sweden. [http://www.naturvardsverket.se/upload/06\\_produkter\\_och\\_avfall/avfall/hantering%20av%20avfall/deponering/las\\_mer\\_om\\_deponering/Treatment\\_methods\\_for\\_waste\\_to\\_be\\_landfilled.pdf](http://www.naturvardsverket.se/upload/06_produkter_och_avfall/avfall/hantering%20av%20avfall/deponering/las_mer_om_deponering/Treatment_methods_for_waste_to_be_landfilled.pdf) [12.07.11]

- Hoberg, H., Wolf, S., Meier-Kortwig, J. (1999). Modelling the material flow of recycling processes for aluminium alloys by means of technical recycling quotas. Institute for Mineral Processing, Coking and Briquetting, Aachen, Germany. [http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v07\\_sfb525.pdf](http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v07_sfb525.pdf) [12.07.11]
- Honda. (2006). Environmental annual report 2005, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/pdf/2005\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/pdf/2005_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Honda. (2007). Environmental annual report 2006, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/pdf/2006\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/pdf/2006_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Honda. (2008). Environmental annual report 2007, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/pdf/2007\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/pdf/2007_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Honda. (2009). Environmental annual report 2008, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/pdf/2008\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/pdf/2008_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Honda. (2010). Environmental annual report 2009, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/pdf/2009\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/pdf/2009_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Honda. (2011). Environmental annual report 2010, Tokyo, Japan. [http://world.honda.com/environment/report/download/2010/2010\\_report\\_E\\_full.pdf](http://world.honda.com/environment/report/download/2010/2010_report_E_full.pdf) [09.08.11]
- Huang, C.-Hs., Huang, C.-Ha., Lin, S.-L. (2008). The study of environmental impacts for end-of-life vehicles in Taiwan. In: Zandi, I. et al. (eds.). *Proceedings of the 23th International Conference on Solid Waste Technology and Management*, March 30-April 2, Philadelphia, PA, USA. Widener University, Philadelphia.
- Huang, G.H., Baetz, B.W., Patry, G.G. (1992). A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty. *Civil Engineering Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 319-335.

- Huang, G.H., Baetz, B.W., Patry, G.G. (1993). A grey fuzzy linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty. *Civil Engineering Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 123-146.
- Huang, G.H., Moore, R.D. (1993). Grey linear programming, its solving approach, and its application. *International Journal of Systems Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 159-172.
- IDIS. (2011). <http://www.idis2.com/> [10.08.11]
- Ignatenko, O., Van Schaik, A., Reuter, M.A. (2008). Recycling system flexibility: The fundamental solution to achieve high energy and material recovery quotas. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16, No. 4, pp. 432-449.
- Institute of Scrap Recycling Industries, Inc. (ISRI). (2009). Scrap specifications circular - guidelines for nonferrous scrap, ferrous scrap, glass cullet, paper stock, plastic scrap, electronics scrap, tire scrap. Effective 10/22/09, Washington, DC, USA. [http://www.sadoff.com/sft65/scrap\\_specifications\\_circular.pdf](http://www.sadoff.com/sft65/scrap_specifications_circular.pdf) [12.07.11]
- Institute of Scrap Recycling industries, Inc. (ISRI). (2013). Scrap specifications circular – guidelines for nonferrous scrap, ferrous scrap, glass cullet, paper stock, plastic scrap, electronics scrap, tire scrap. Effective 10/25/12, Washington, DC, USA. [www.isri.org](http://www.isri.org) [30.03.13]
- International Organisation of Standardisation, ISO 22628:2002. Road vehicles – recyclability and recoverability, calculation method.
- Iranpour, R., Zhao, J., Wang, A., Yang, F., Li, X. (2012). Research of value analysis oriented end of life vehicle dismantling and recycling process. *Advanced Materials Research*, No. 518-523, pp. 3450-3454.
- Isaacs, J.A., Gupta, S.M. (1997). Economic consequences of increasing polymer content for the U.S. automobile recycling infrastructure. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 1, No. 1, pp. 19-33.
- Jaafar, H.S., Nasir, N., Mohd-Ali, R., Aluwi, H.A., Rahmat, A.K. (2009). An analysis of the institutional framework of the commercial vehicle rebuilt industry in Malaysia. *Proceedings of the Conference on Scientific and Social Research*, Melaka, Malaysia.

- Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA). (2011). Motor vehicle statistics of Japan - 2011. Tokyo, Japan. <http://www.jama-english.jp/publications/MVS2011.pdf> [12.07.11]
- Jekel, L.J., Tam, E.K.L. (2007). Plastics waste processing: Comminution size distribution and prediction. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 133, No. 2, pp. 245-254.
- Jeong, K.M., Hong, S.J., Lee, J.Y., Hur, T. (2007). Life Cycle Assessment on end-of-life vehicle treatment system in Korea. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 13, No. 4, pp. 624-630.
- Jody, B., Daniels, E.J. (2006). End-of-life vehicle recycling: the state of the art of resource recovery from shredder residue. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, report no. ANL/ESD/07-8, Chicago, USA. <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2011/02/69114.pdf>. [12.07.11]
- Jody, B., Daniels, E.J., Duranceau, C.M., Pomykala, Jr., J.A., Spangenberg, J.S. (2010). End-of-life vehicle recycling: The state of the art of resource recovery from shredder residue. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Chicago, Illinois, USA. [http://www.es.anl.gov/Energy\\_systems/CRADA\\_Team/publications/End%20of%20life%20vehicle%20recycling%20Technology%20review.pdf](http://www.es.anl.gov/Energy_systems/CRADA_Team/publications/End%20of%20life%20vehicle%20recycling%20Technology%20review.pdf) [12.07.11]
- Johnson, M.R., Wang, M.H. (2002). Evaluation policies and automotive recovery options according to the European Union directive on end-of-life vehicles (ELV). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 216, No. 9, pp. 723-739.
- Joslyn, C. (2003). Multi-interval elicitation of random intervals for engineering reliability analysis. *Proceedings of 2003 International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*. University of Maryland, MD, USA.
- Joslyn, C., Booker, J. (2003). Generalized information theory for engineering modeling and simulation. In: *Engineering design reliability handbook* (Eds: Nikolaidis, E., Ghiocel, D.M., Singhal, S.), CRC Press, Boca Raton, USA, Chapter 9, pp. 1-40.
- Joung, H.T., Cho, S.J., Seo, Y.C., Kim, W.H. (2007). Status of recycling end-of-life vehicles and efforts to reduce automobile shredder residues in Korea. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 159-166.



- Kanari, N., Pineau, J.-L., Shallari, S. (2003). End-of-life vehicle recycling in the European Union. *JOM*, Vol. 55, No. 8, pp. 15-19.
- Kasai, J. (2000). Experiences and thoughts about Life Cycle Assessment in the automotive industry in Japan. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 5, No. 5, pp. 313-316.
- Kibira, D., Jain, S. (2011). Impact of hybrid and electric vehicles on automobile recycling infrastructure. *Proceedings of 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ, USA, pp. 1072-1083.
- Kim, H.C., Keoleian, G., Grande, D., Bean, J. (2003). Life cycle optimization of automobile replacement: Model and application. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37, No. 23, pp. 5407-5413, 2003.
- Kim, H.-J., McMillan, C., Keoleian, G.A., Skerlos, S.J. (2008a). Model of cost and mass for compact sized lightweight automobiles using aluminum & high strength steel. *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, San Francisco, CA, USA, pp. 1-6.
- Kim, H.-J., McMillan, C., Winebrake, J.J., Keoleian, G.A., Skerlos, S.J. (2008b). Evaluating life cycle cost, emissions and materials use for an aluminum intensive vehicle: Preliminary analysis. *Proceedings of 2008 NSF Engineering Research and Innovation Conference*, Knoxville, TN, USA.
- Kim, K.-H., Joung, H.-T., Nam, H., Seo, Y.-C., Hong, J.H., Yoo, T.-W., et al. (2004). Management status of end-of-life vehicles and characteristics of automobile shredder residues in Korea. *Waste Management*, Vol. 24, No. 6, pp. 533-540.
- Kindzierski, W.B., Small, C., Fang, Y., Bari, M.A., Hashisho, Z. (2012). Automotive wastes. *Water Environment Research*, Vol. 84, pp. 1407-1431.
- Knight, W.A., Sodhi, M. (2000). Design for bulk recycling: Analysis of materials separation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 49, pp. 83-86.
- Kollamthodi, S., Hird, A.B., Elghali, L., Johnstone, K., Wayman, M., McColl, V. (2003). Data required to monitor compliance with the end of life vehicles directive. Project report SE/483/02, DEFRA, UK. <http://archive.defra.gov.uk/environment/waste/producer/vehicles/documents/trlstudy-one.pdf> [12.07.11]

- Koshiha, K. (2006). The recycling of end-of-life vehicles in Japan. *Japan for Sustainability Newsletter*, Vol. 50. [http://www.japanfs.org/en\\_/newsletter/200610-1.html](http://www.japanfs.org/en_/newsletter/200610-1.html) [12.07.11]
- Krinke, S., Boßdorf-Zimmer, B., Goldmann, D., (2006). The Volkswagen-SiCon process: Eco-efficient solution for future end-of-life vehicle treatment. In: Dufloy, J. Willems, B. Dewulf, W. (eds.). *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, May 31-June 2, Leuven, Belgium, pp. 359-363. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Kumar, S., Yamaoka, T. (2007). System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 18, No. 2, pp. 115-138.
- Kumar, V., Sutherland, J.W. (2008). Sustainability of the automotive recycling infrastructure: review of current research and identification of future challenges. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, Vol. 1, pp. 145-167.
- Kumar, V., Sutherland, J.W. (2009). Development and assessment of strategies to ensure economic sustainability of the U.S. automotive recovery infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 8, pp. 470-477.
- Ladjouze, Y., Rahimifard, S. (2004). Parametric cost model to support end-of-life management of vehicles. *Proceedings of the IFAC conference on manufacturing, modelling, management and control*, October 21-22, paper #36, Athens, Greece.
- Lewicki, R. (2009). End-of-life vehicles in the light of environmental benefits identified in the products' life cycle. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*, Vol. 1, No. 157, pp. 87-99.
- Li, J., Yu, K. (2011). A study on legislative and policy tools for promoting the circular economic model for waste management in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 103-112.
- Li, P., Dahmus, J., Guldberg, S., Riddervold, H.O., Kirchain, R. (2011). How much sorting is enough: Identifying economic and scrap-reuse benefits of sorting technologies. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 15, No. 5, pp. 743-759.
- Li, Y.P., Huang, G.H., Guo, P., Yang, Z.F., Nie, S.L. (2010). A dual-interval vertex analysis method and its application to environmental decision making under

- uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol. 200, No. 2, pp. 536-550.
- Liljenroth, U. (2004). Shredder technology - developments and trends in Europe. WSP Environmental, Goteborg, Sweden. <http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/> [12.07.11]
- Liu, Z.F., Huang, G.H. (2009). Dual-interval two-stage optimization for flood management and risk analyses. *Water Resources Management*, 23, No. 11, pp. 2141-2162.
- Liu, Z., Huang, G.H., Nie, X., He, L. (2009). Dual-interval linear programming model and its application to solid waste management planning. *Environmental Engineering Science*, Vol. 26, No. 6, pp. 1033-1044.
- Lundqvist, U., Andersson, B., Axsater, M., Forsberg, P., Heikkila, K., Jonson, U., et al. (2004). Design for recycling in the transport sector - future scenarios and challenges. Chalmers University of Technology and Goteborg University, Goteborg, Sweden, 2004. [http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/04/CPM\\_Report\\_2004\\_7\\_DFRrapport.pdf](http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/04/CPM_Report_2004_7_DFRrapport.pdf) [12.07.11]
- Mancini, G., Tamma, R., Viotti, P. (2010). Thermal process of fluff: Preliminary tests on a full-scale treatment plant. *Waste Management*, Vol. 30, Nos. 8-9, pp. 1670-1682.
- Manomaivibool, P. (2008). Network management and environmental effectiveness: The management of end-of-life vehicles in the United Kingdom and in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16, No. 18, pp. 2006-2017.
- Manouchehri, H.R. (2006). Mapping and development of shredding product stream(s): four shredding plants in Sweden (What should be done for better performance of the plants?). Northland Oretch Consulting Co., Sweden. [http://www.jernkontoret.se/ladda\\_hem\\_och\\_bestall/publikationer/stalforskning/rapporter/d817.pdf](http://www.jernkontoret.se/ladda_hem_och_bestall/publikationer/stalforskning/rapporter/d817.pdf) [12.07.11]
- Manouchehri, H.R. (2007). Looking at shredding plant configuration and its performance for developing shredding product stream (an overview). Northland Oretch Consulting Co., Sweden. [http://www.jernkontoret.se/ladda\\_hem\\_och\\_bestall/publikationer/stalforskning/rapporter/d\\_823.pdf](http://www.jernkontoret.se/ladda_hem_och_bestall/publikationer/stalforskning/rapporter/d_823.pdf) [12.07.11]

- Mas Magnetics. (2011). Product catalogue, Baiyun, China. <http://www.masmagnet.com/Magnetic%20Separatornew080528.htm> [12.07.11]
- Mathieux, A., Brissaud, D. (2010). End-of-life product-specific material flow analysis. Application to aluminum coming from end-of-life commercial vehicles in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, pp. 92-105.
- Mayyas, A., Qattawi, A., Omar, M., Shan, D. (2012). Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, pp. 1845-1862.
- Mazda. (2006). Mazda social & environmental report 2005, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2005/e2005\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2005/e2005_all.pdf) [09.08.11]
- Mazda. (2007). Mazda social & environmental report 2006, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2006/e2006\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2006/e2006_all.pdf) [09.08.11]
- Mazda. (2008). Mazda social & environmental report 2007, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2007/e2007\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2007/e2007_all.pdf) [09.08.11]
- Mazda. (2009). Mazda social & environmental report 2008, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2008/e2008\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2008/e2008_all.pdf) [09.08.11]
- Mazda. (2010). Mazda sustainability report 2009, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2009/2009\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2009/2009_all.pdf) [09.08.11]
- Mazda. (2011). Mazda sustainability report 2010, Hiroshima, Japan. [http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2010/2010\\_d\\_all.pdf](http://www.mazda.com/csr/download/pdf/2010/2010_d_all.pdf) [09.08.11]
- Mazzanti, M., Zoboli, R. (2006). Economic instruments and induced innovation: The European policies on end-of-life vehicles. *Ecological Economics*, Vol. 58, No. 2, pp. 318-337.
- Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Republika Srbija (MERS). (2010). Pravilnik o načinu i postupku upravljanja otpadnim vozilima. Službeni glasnik RS, br. 98/2010. <http://www.merz.gov.rs/cir/dokumenti/pravilnik-onačinu-i-postupku-upravljanja-otpadnim-vozilima> [14.05.2013]
- Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Republika Srbija (MERS). (2012). Ovlašćeni centri za reciklažu automobila u Srbiji. <http://staklenozvono.rs/?p=301> [14.05.2013]
- Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Republika Srbija (MERS). (2013). Dugoročna agenda Agencije za zaštitu životne sredine – otpad i

- upravljanje otpadom. <http://www.sepa.gov.rs/index.php?menu=207&id=202&akcija=showXlinked> [14.05.2013]
- Miemyzyk, J. (2008). An exploration of institutional constraints on developing end-of-life product recovery capabilities. *International Journal of Production Economics*, Vol. 115, No. 2, pp. 272-282.
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan, (2010). Towards a 3R-oriented, sustainable society: Legislation and trends 2010. Tokyo, Japan. <http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/pamphlet/pdf/handbook2010-eng.pdf> [12.07.11]
- Ministry of the Environment (MoE), Government of Japan. (2002). Law on recycling of end-of-life vehicles. <http://www.meti.go.jp/policy/automobile/recycle/Rejoubuneigo.pdf> [12.07.11]
- Ministry of the Environment (MoE), Government of Japan. (2010). Establishing a sound material-cycle society - milestone toward a sound material-cycle society through changes in business and life styles. Tokyo, Japan. [http://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/a-rep/2010gs\\_full.pdf](http://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/a-rep/2010gs_full.pdf) [12.07.11]
- Ministry of the Environment (MoE), Japan. (2011). FY 2008 status of industrial waste treatment facilities and licensed business operators. [http://www.env.go.jp/en/headline/file\\_view.php?serial=415&hou\\_id=1591](http://www.env.go.jp/en/headline/file_view.php?serial=415&hou_id=1591) [12.07.11]
- Mitsubishi, (2005). Social and environmental report 2005, Tokyo, Japan. [http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2005e\\_all.pdf](http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2005e_all.pdf) [09.08.11]
- Mitsubishi, (2006). Social and environmental report 2006, Tokyo, Japan. [http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2006e\\_all.pdf](http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2006e_all.pdf) [09.08.11]
- Mitsubishi, (2007). Social and environmental report 2007, Tokyo, Japan. [http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2007e\\_all.pdf](http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2007e_all.pdf) [09.08.11]
- Mitsubishi, (2008). Social and environmental report 2008, Tokyo, Japan. [http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2008e\\_all.pdf](http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2008e_all.pdf) [09.08.11]

- Mitsubishi. (2011). Social and environmental report 2011, Tokyo, Japan.  
[http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2011e\\_all.pdf](http://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/social/pdf/2011e_all.pdf)  
 [09.08.11]
- Moakley, J., Weller, M., Zelic, M., Ault, H.K., Rosendal, R.M. (2010). An evaluation of shredder waste treatments in Denmark - alternative methods to landfilling auto shredding residue in compliance with the strict environmental quota by the European Union. Worcester Polytechnic Institute, USA. [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-051110-050238/unrestricted/Final\\_Report.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-051110-050238/unrestricted/Final_Report.pdf) [12.07.11]
- Modaresi, R., Müller, D.B. (2012). The role of automobiles for the future of aluminium recycling. *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, No. 16, pp. 8587-8594.
- Morselli, L., Santini, A., Passarini, F., Vassura, I., Ciacci, L. (2011). LCM applied to auto shredder residue (ASR). In: *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing* (Eds: Hesselbach, J., Herrmann, C.), Springer, Berlin, Germany, pp. 96-99.
- Muhamad Zameri, M.S., Blount, G.N. (2006). End of life vehicles recovery: process description, its impact and direction of research. *Jurnal mekanikal*, Vol. 21, pp. 40-52.
- Muhamad Zameri, M.S., Zakuan, N. (2006). End-of-life vehicle directive: A key element to the vehicle design process. *Proceedings of the 1st Regional Conference on Vehicle Engineering & Technology*, July 3-5, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Nakajima, N., Vanderburg, W.H. (2005). A failing grade for the German end-of-life vehicles take-back system. *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 25, No. 2, pp. 170-186.
- Nakamura, Y. (2007). Waste management and recycling business in the United States and Japan. Harvard University, Cambridge, MA, USA. <http://www.wcfia.harvard.edu/us-japan/research/pdf/07-09.Nakamura.pdf> [09.08.2011].
- Narodna banka Srbija (NBS). (2013). Kursna lista na dan – srednji kurs dinara. <http://www.nbs.rs/internet/cirilica/scripts/ondate.html> [14.05.2013]

- Nicolli, F., Johnstone, N., Söderholm, P. (2012). Resolving failures in recycling markets: The role of technological innovation. *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol. 14, No. 3, pp. 261-288.
- Nijhof, G.H., Rem, P.C. (1999). Upgrading nonferrous metal scrap for recycling purposes. *JOM*, Vol. 51, No. 8, pp. 20-23.
- Nissan. (2006). Nissan sustainability report 2006, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2005/SR05E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2005/SR05E_All.pdf) [09.08.11]
- Nissan. (2007). Nissan sustainability report 2007, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2006/SR06E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2006/SR06E_All.pdf) [09.08.11]
- Nissan. (2008). Nissan sustainability report 2008, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2007/SR07E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2007/SR07E_All.pdf) [09.08.11]
- Nissan. (2009). Nissan sustainability report 2009, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2009/SR09E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2009/SR09E_All.pdf) [09.08.11]
- Nissan. (2010). Nissan sustainability report 2010, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2010/SR10E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2010/SR10E_All.pdf) [09.08.11]
- Nissan. (2011). Nissan sustainability report 2011, Kanagawa, Japan. [http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2010/SR10E\\_All.pdf](http://www.nissan-global.com/EN/DOCUMENT/PDF/SR/2010/SR10E_All.pdf) [09.08.11]
- Nole prevoz. (2013). Cene: kamionski prevoz. <http://www.autoprevoznik.rs> [14.05.2013]
- Nourreddine, M. (2007). Recycling of auto shredder residue. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. A139, pp. 481-490.
- Olugu, E.U., Wong, K.Y. (2012). An expert fuzzy rule-based system for closed-loop supply chain performance assessment in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 1, pp. 375-384.
- Ogushi, Y., Kandlikar, M. (2005). The impact of end-of-life vehicle recycling law on automobile recovery in Japan. *Proceedings of the 4th international environmentally conscious design and inverse manufacturing symposium*, Vol. 1, December 12-14, Tokyo, Japan, pp. 626-633.
- Pandian, P., Anuradha, D. (2011). Solving interval transportation problems with additional impurity constraints. *Journal of Physical Sciences*, Vol. 15, pp. 103-112.

- Passarini, F., Ciacci, L., Santini, A., Vassura, I., Morselli, L. (2012). Auto shredder residue LCA: Implications of ASR composition evolution. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 23, pp. 28-36.
- Paul, R. (2009). End-of-life management of waste automotive materials and efforts to improve sustainability in North America. In: *Sustainable Development and Planning IV*, Vol. 2 (Eds: Brebbia, C.A., et al.), WIT Transactions on Ecology and the Environment, Southampton, England, pp. 853-861.
- Pei, W. (2011). A FREILP Approach for Long-Term Planning of MSW Management System in HRM, Canada. *MSc Thesis*, Department of Civil and Resource Engineering, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada. <http://dalspace.library.dal.ca/bitstream/handle/10222/14173/Pei%2cWenwen%2cMASc%2cCIVL%2cAUG%202011.pdf?sequence=1> [15.02.2013]
- Phelan, D., McCormack, I., Timmers, H. (2010). Depollution and shredder trial report on end of life vehicles. Ireland environmental protection agency. [http://www.epa.ie/downloads/pubs/waste/stats/EPA\\_ELVDepollution\\_&\\_shredder\\_trial\\_final\\_report.pdf](http://www.epa.ie/downloads/pubs/waste/stats/EPA_ELVDepollution_&_shredder_trial_final_report.pdf) [01.11.11]
- Pokharel, S., Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 4, pp. 175-182.
- Put Zaječar a.d. (2013). Iznajmljivanje kamiona. <http://adput.info/adput/listing-iznajmljivanje-kamiona-28.html> [14.05.2013]
- Qu, X., Williams, J.A.S. (2008). An analytical model for reverse automotive production planning and pricing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, No. 3, pp. 756-767.
- Reck, B.K., Graedel, T.E. (2012). Challenges in metal recycling. *Science*, Vol. 337, No. 6095, pp. 690-695.
- Recycler's World. (2011). Non-ferrous scrap metal recycling section. <http://www.recycle.net/> [10.08.11]
- Recycler's World. (2013). Scrap copper recycling category. <http://www.recycle.net/Metal-N/Copper/index.html?affilid=100029> [22.03.12]
- Republički zavod za statistiku, Republika Srbija (RZSS). (2013). Prosečne zarade po oblastima KD2010 – Sakupljanje, tretman i odlaganje otpada; ponovno iskorišćavanje otpadnih materija. <http://webrzs.stat.gov.rs> [14.05.2013]



- Republika Srbija. (2010a). Zakon o upravljanju otpadom. Službeni glasnik RS, br. 36/09, 88/10. <http://www.ekoplan.gov.rs/src/upload-centar/dokumenti/zakoni-i-nacrti-zakona/zakoni/zu.pdf> [15.03.12]
- Republika Srbija. (2010b). Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine. [http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2010%20Maj/strategija\\_upravljanja\\_otpadom\\_konacno.pdf](http://www.kombeg.org.rs/Slike/CeTranIRazvojTehnologija/2010%20Maj/strategija_upravljanja_otpadom_konacno.pdf) [15.03.12]
- Reuter, M.A., Van Schaik, A., Ignatenko, O., de Haan, G.J. (2006). Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles, *Minerals Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 433-449.
- Reuters. (2011). <http://uk.reuters.com/business/currencies/> [03.03.11]
- Rossetti, V.A., Di Palma, L., Medici, F. (2006). Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B137, No. 2, pp. 1089-1095.
- Sakai, S.I., Noma, Y., Kida, A. (2007). End-of-life vehicle recycling and automobile shredder residue management in Japan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 151-158.
- Sakai, S-i., Yoshida, H., Hirai, Y., Asari, M., Takigami, H., Takahashi, S., et al. (2011). International comparative study of 3R and waste management policy developments. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 86-102.
- Sakkas, N., Manios, T. (2003). End of life vehicle management in areas of low technology sophistication. A case study in Greece. *Business Strategy and the Environment*, Vol. 12, No. 5, pp. 313-325.
- Santini, A., Herrmann, C., Passarini, F., Vassura, I., Luger, T., Morselli, L. (2010). Assessment of Ecodesign potential in reaching new recycling targets for ELVs. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54, No. 12, pp. 1128-1134.
- Santini, A., Morselli, L., Passarini, F., Vassura, I., Di Carlo, S., Bonino F. (2011). End-of-life vehicles management: Italian material and energy recovery efficiency. *Waste Management*, Vol. 31, No. 3, pp. 489-494.
- Schmidt, W.-P., Dahlqvist, E., Finkbeiner, M., Krinke, S., Lazzari, S., Oschmann, D., et al. (2004). Life cycle assessment of lightweight and end-of-life scenarios for

- generic compact class passenger vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 9, No. 6, pp. 405-416.
- Seitz, M.A. (2007). A critical assessment of motives for product recovery: The case of engine remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, No. 11-12, pp. 1147-1157.
- Selinger, A., Steiner, C. (2004). Waste gasification in practice: TwinRec fluidized bed gasification and ash melting – Review of four years of commercial plant operation. *Proceedings of the 24th International Conference on Thermal Treatment Technologies & Hazardous Waste Combustors*, May 10-14, Phoenix, Arizona, IT3-075.
- Selinger, A., Steiner, C. Shin, K. (2003a). TwinRec – Bridging the gap of car recycling in Europe. *Proceedings of International Automobile Recycling Congress*, March 12-14, Geneva, Switzerland.
- Selinger, A., Steiner, C. Shin, K. (2003b). TwinRec gasification and ash melting technology - now also established for municipal waste. *Proceedings of 4th International Symposium on Waste Treatment Technologies*, 29 June - 2 July, Sheffield, UK.
- Sengupta, A., Kumar Pal, T., Chakraborty, D. (2001). Interpretation of inequality constraints involving interval coefficients and a solution to interval linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 119, No. 1, pp. 129-138.
- Serrona, K.R., Yu, J.-s., Che, J. (2010). Managing wastes in Asia: Looking at the perspectives of China, Mongolia and the Philippines. In: *Waste Management* (Ed: Kumar, E.S.), InTech, Rijeka, Croatia, pp. 155-172.
- Shaocheng, T. (1994). Interval number and fuzzy number linear programming, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 66, No. 3, pp. 301-306.
- Simić, V. (2013). A short-term model for end-of-life vehicle recycling planning. *Modern Traffic and Transportation Engineering Research*, Vol. 2, pp. 1-6.
- Simić, V., Dimitrijević, B. (2011a). Modelling of production systems for end-of-life vehicles processing. *Proceedings of the 34th International Conference on Production Engineering*, Niš, Serbia, September 28-30, pp. 239-242.

- Simić, V., Dimitrijević, B. (2011b). Sustainable production research - optimization model for processing end-of-life vehicles. *Proceedings of the 5th International Quality Conference*, Kragujevac, Serbia, May 20, pp. 477-484.
- Simić, V., Dimitrijević, B. (2012a). Modelling production processes in a vehicle recycling plant. *Waste Management & Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 940-948.
- Simić, V., Dimitrijević, B. (2012b). Production planning for vehicle recycling factories in the EU legislative and global business environments. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 78-88.
- Simić, V., Dimitrijević, B. (2013a). Modelling of automobile shredder residue recycling in the Japanese legislative context. *Expert Systems with Applications*. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.06.075.
- Simić, V., Dimitrijević, B. (2013b). Risk explicit interval linear programming model for long-term planning of vehicle recycling in the EU legislative context under uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 73, pp. 197-210.
- Smith, M., Crotty, J. (2008). Environmental regulation and innovation driving ecological design in the UK automotive industry. *Business strategy and the environment*, Vol. 17, No. 6, pp. 341-349.
- Smith, M., Jacobson, J., Webb, B. (2004). Abandoned vehicles in England: Impact of the end of life directive and new initiatives, on likely future trends. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 41, No. 3, pp. 177-189.
- Sodhi, M.S., Young, J., Knihgt, W.A. (1999). Modelling material separation processes in bulk recycling. *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 10, pp. 2239-2252.
- Srogi, K. (2008). An overview of current processes for the thermochemical treatment of automobile shredder residue. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 10, pp. 235-244.
- State Environmental Protection Administration of China (SEPAC). (2006). The technical policy for the recovery and utilization of automobile products of the National Development and Reform Commission and of the Ministry of Science and Technology of 6 February 2006. <http://www.asianlii.org/cn/legis/cen/laws/ttpftrauoap730/> [22.02.12]

- Sustainable Electrical and Electronic System for the Automotive Sector (SEES). (2006). D6: car shredding manuals. Berlin, Germany. [http://www.sees-project.net/contents/File/D6\\_Report.pdf](http://www.sees-project.net/contents/File/D6_Report.pdf) [12.07.11]
- Suzuki. (2005). Suzuki environmental and social report 2005, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2005\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2005_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Suzuki. (2006). Suzuki environmental and social report 2006, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2006\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2006_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Suzuki. (2007). Suzuki environmental and social report 2007, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2007\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2007_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Suzuki. (2008). Suzuki environmental and social report 2008, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2008\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2008_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Suzuki. (2009). Suzuki environmental and social report, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2009\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2009_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Suzuki. (2010). Suzuki environmental and social report 2010, Hamamatsu City, Japan. [http://www.globalsuzuki.com/corp\\_info/environmental/pdf/2010\\_enve\\_all.pdf](http://www.globalsuzuki.com/corp_info/environmental/pdf/2010_enve_all.pdf) [09.08.11]
- Tavoularis, G., Lolos, Th., Loizidou, M., Konstantinopoulos, G., Iordan, C., Mihai, C. (2009). Management of the end-of-life vehicles stream in Romania. In: Cossu, R., Diaz, L., & Stegmann, R. (eds.). *Proceedings of the Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, October 5-9. CISA, IT.
- TimoCom. (2013). Berza transporta – izbor teretnog prostora. <http://www.timocom.rs/TimoCom/Ponude-tovarnog-prostora?vehicle=SrbijalSrbijal2> [14.05.2013]
- Togawa, K. (2008). Japan's automotive recycling system: evaluation three years after implementation. In: Promoting 3Rs in developing countries. Lessons from the

- Japanese experience (Ed: Kojima, M.), Chiba, Japan: Institute of Developing Economies, JETRO, pp. 107-124.
- Toyota. (2005). Environmental & social report 2005, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/05/pdf/report2005.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/05/pdf/report2005.pdf). [09.08.11]
- Toyota. (2006). Sustainability report 2006, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/06/pdf/e\\_report06.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/06/pdf/e_report06.pdf) [09.08.11]
- Toyota. (2007). Sustainability report 2007, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/07/pdf/sustainability\\_report07.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/07/pdf/sustainability_report07.pdf) [09.08.11]
- Toyota. (2008). Sustainability report 2008, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/08/pdf/sustainability\\_report08.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/08/pdf/sustainability_report08.pdf) [09.08.11]
- Toyota. (2009). Sustainability report 2009, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/09/pdf/sustainability\\_report09.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/09/pdf/sustainability_report09.pdf) [09.08.11]
- Toyota. (2010). Sustainability report 2010, Tokyo, Japan. [http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability\\_report/pdf\\_file\\_download/10/pdf/sustainability\\_report10.pdf](http://www.toyota-global.com/sustainability/sustainability_report/pdf_file_download/10/pdf/sustainability_report10.pdf) [09.08.11]
- Van Schaik, A., Reuter, M.A. (2004). The time-varying factors influencing the recycling rate of products. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 40, No. 4, pp. 301-328.
- Van Schaik, A., Reuter, M.A. (2005). The effect of design on recycling rates for cars part 1 - theory. *Proceedings of the REWAS'04 - Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, September 26-29, Madrid, Spain, pp. 35-44. <http://www.osd.org.tr/23.pdf> [19.11.2010].
- Van Schaik, A., Reuter, M.A., Boin, U.M.J., Dalmijn, W.L. (2002). Dynamic modelling and optimisation of the resource cycle of passenger vehicles. *Minerals Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 1001-1016.
- Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J., Vandecasteele, C. (2011). Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life

- vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 190, pp. 8-27.
- Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Dewulf, W., Vandecasteele, C. (2012). Environmental impact of incineration of calorific industrial waste: Rotary kiln vs. cement kiln. *Waste Management*, Vol. 32, No. 10, pp. 1853-1863.
- Vidović, M., Dimitrijević, B., Ratković, B., Simić, V. (2011). A novel covering approach to positioning ELV collection points. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 57, pp. 1-9.
- Vigano, F., Consonni, S., Grosso, M., Rigamonti, L. (2010). Material and energy recovery from Automotive Shredded Residues (ASR) via sequential gasification and combustion. *Waste Management*, Vol. 30, No. 1, pp. 145-153.
- Wang, L., Chen, M. (2013). Policies and perspective on end-of-life vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 44, pp. 168-176.
- Warner, S., Brown, M. (2008). Review of proposals - Johnson Canyon Resource Management Park. Salinas valley, Los Angeles, USA. <http://www.svswwa.org/pdf/agendas/ctc/2008/2008-10-29/10-29-08%20CTC%20Agenda%20Packets.pdf> [12.07.11]
- Williams, J.A.S. (2006). A review of electronics demanufacturing processes. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 47, pp. 195-208.
- Williams, J.A.S., Wongweragiat, S., Qu, X., McGlinch, J.B., Bonawi-tan, W., Choi, J.K., et al. (2007). An automotive bulk recycling planning model. *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 2, pp. 969-981.
- Wilts, H., Bringezu, S., Bleischwitz, R., Lucas, R., Wittmer, D. (2011). Challenges of metal recycling and an international covenant as possible instrument of a globally extended producer responsibility. *Waste Management & Research*, Vol. 29, No. 9, pp. 902-910.
- Wu, C.Z., Huang, G.H., Yan, X.P., Cai, Y.P., Li, Y.P. (2010). An interval-parameter mixed integer multi-objective programming for environment-oriented evacuation management. *International Journal of Systems Science*, Vol. 41, pp. 547-560.
- Xiang, W., Ming, C. (2011). Implementing extended producer responsibility: Vehicle remanufacturing in China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, pp. 680-686.

- Xiarchos, I.M., Fletcher, J.J. (2009). Price and volatility transmission between primary and scrap metal markets. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 12, pp. 664-673.
- Zhao, Q., Chen, M. (2011). A comparison of ELV recycling system in China and Japan and China's strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 57, pp. 15-21.
- Zhou, F., Huang, G.H., Chen, G.X., Guo, H.C. (2009). Enhanced interval linear programming. *European Journal of Operational Research*, Vol. 199, No. 2, pp. 323-333.
- Zorpas, A.A., Inglezakis, V.J. (2012). Automotive industry challenges in meeting EU 2015 environmental standard. *Technology in Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 55-83.
- Zou, R., Liu, Y., Riverson, J., Parker, A., Carter, S. (2010a). A nonlinearity interval mapping scheme for efficient waste load allocation simulation-optimization analysis. *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 8, W08530.
- Zou, R., Liu, Y., Liu, L., Guo H.C. (2010b). REILP approach for uncertainty-based decision making in civil engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 357-364.

## PRILOG 1

Ovaj prilog sadrži detaljne podatke o sortiranim materijalnim tokovima koji se transportuju do finalnih odredišta iz studije slučaja modela kratkoročnog planiranja prerade fabrika za reciklažu vozila u EU zakonodavnom i globalnom poslovnom okruženju, prezentovane u poglavlju 3.1. ove disertacije.

**Tabela P1.1.** Frakcija crnih metala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Gvožđe	99.88	7870.0
Bakar	0.12	8960.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>7.871 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.2.** Frakcija lakih obojenih metala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Aluminijum	88.99	2698.9
Polipropilen	2.82	937.0
Guma	1.17	1870.0
Poliuretanski sunder	0.85	453.5
Drvo	0.17	948.5
Staklo	0.08	2600.0
Ostalo	5.92	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>2.505 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.3.** Frakcija teških obojenih metala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Bakar	99.73	8960.0
Nerđajući čelik	0.27	7610.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>8.956 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.4.** Frakcija aluminijuma.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Aluminijum	99.56	2698.9
Polipropilen	0.11	937.0
Guma	0.05	1870.0
Poliuretanski sunder	0.03	453.5
Drvo	0.01	948.5
Staklo	0.00	2600.0
Ostalo	0.24	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>2,691 t/m<sup>3</sup></i>



**Tabela P1.5.** Prva frakcija nemetala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Polipropilen	47.92	937.0
Guma	18.16	1870.0
Poliuretanski sunder	4.17	453.5
Staklo	3.87	2600.0
Nerđajući čelik	2.36	7610.0
Ostalo	23.52	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>1.276 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.6.** Druga frakcija nemetala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Polipropilen	21.71	937.0
Guma	9.34	1870.0
Poliuretanski sunder	8.32	453.5
Drvo	1.80	948.5
Staklo	0.22	2600.0
Ostalo	58.61	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>0.908 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.7.** Frakcija obojenog miksa.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Polipropilen	20.34	937.0
Guma	8.75	1870.0
Poliuretanski sunder	7.80	453.5
Bakar	4.32	8960.0
Aluminijum	2.00	2698.9
Drvo	1.69	948.5
Staklo	0.21	2600.0
Ostalo	54.90	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>1.291 t/m<sup>3</sup></i>

**Tabela P1.8.** Frakcija organskih jedinjenja, gume, plastike i ostalih materijala.

Materijal	Udeo (%)	Specifična gustina (kg/m <sup>3</sup> )
Polipropilen	25.56	937.0
Guma	10.64	1870.0
Poliuretanski sunder	7.75	453.5
Drvo	1.55	948.5
Staklo	0.75	2600.0
Ostalo	53.75	800.0
<i>Generalna specifična gustina</i>		<i>0.938 t/m<sup>3</sup></i>

## PRILOG 2

Ovaj prilog sadrži detaljne rezultate testiranja modela izbora materijala u EU sistemu za reciklažu vozila, koji je prezentovan u poglavlju 3.2. ove disertacije.

**Tabela P2.1.** Vrednost profita u slučaju scenarija 1 (EUR).

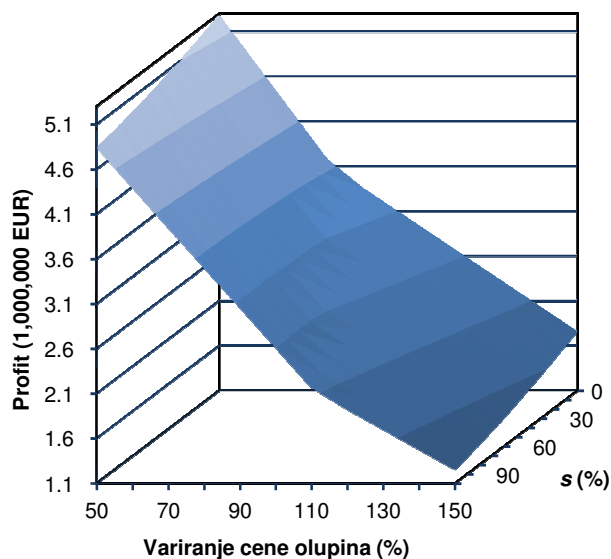
		$H_{11r} (%)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_{21r} (%)$	0	2,936,568.79	2,937,182.00	2,937,793.43	2,938,573.64	2,941,857.57	2,944,105.61	2,944,601.57	2,945,464.40	2,946,111.52	2,946,610.88	2,947,013.93
	10	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72	2,900,816.72
	20	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25	2,843,294.25
	30	2,810,262.34	2,786,574.88	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98	2,785,735.98
	40	2,807,110.47	2,761,459.81	2,733,846.82	2,728,047.97	2,727,875.93	2,727,875.93	2,727,875.93	2,727,875.93	2,727,875.93	2,727,875.93	2,727,875.93
	50	2,805,219.34	2,761,459.81	2,696,589.81	2,677,566.78	2,673,131.57	2,670,886.96	2,669,898.62	2,669,898.62	2,669,898.62	2,669,898.62	2,669,898.62
	60	2,803,958.59	2,761,459.81	2,696,589.81	2,631,837.24	2,620,872.33	2,617,505.47	2,613,756.79	2,612,028.12	2,612,028.12	2,612,028.12	2,612,028.12
	70	2,803,058.06	2,761,459.81	2,696,589.81	2,631,786.67	2,569,575.48	2,563,916.50	2,559,451.79	2,556,994.84	2,555,156.40	2,553,974.88	2,553,974.88
	80	2,802,382.66	2,761,459.81	2,696,589.81	2,631,786.67	2,567,137.68	2,510,754.91	2,503,048.07	2,499,833.70	2,497,460.48	2,495,570.05	2,494,048.78
	90	2,801,861.30	2,761,459.81	2,696,589.81	2,631,786.67	2,567,137.68	2,503,618.55	2,447,253.00	2,440,928.03	2,438,995.60	2,436,739.06	2,434,939.17
	100	2,801,437.01	2,761,459.81	2,696,589.81	2,631,786.67	2,567,137.68	2,503,618.55	2,434,041.87	2,384,654.99	2,380,542.91	2,377,955.54	2,375,890.98

**Tabela P2.2.** Vrednost profita u slučaju scenarija 2 (EUR).

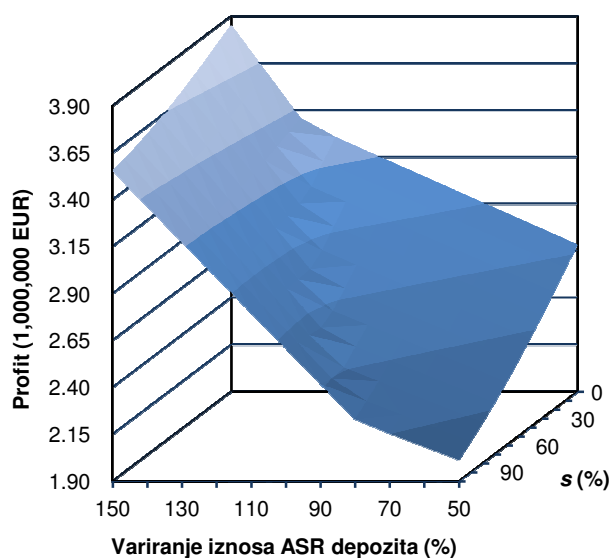
		$H_{11r} (%)$										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$H_{21r} (%)$	0	2,777,204.02	2,777,817.23	2,778,428.66	2,779,041.87	2,781,183.09	2,783,787.71	2,784,547.10	2,785,563.24	2,785,563.24	2,785,563.24	2,785,563.24
	10	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52	2,749,419.52
	20	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60	2,702,905.60
	30	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67	2,656,569.67
	40	2,622,154.64	2,611,042.55	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95	2,610,126.95
	50	2,619,976.77	2,583,036.45	2,569,846.92	2,565,635.80	2,563,608.35	2,563,026.07	2,562,957.30	2,562,957.30	2,562,957.30	2,562,957.30	2,562,957.30
	60	2,618,524.85	2,581,336.93	2,531,370.49	2,523,978.60	2,520,146.71	2,518,297.00	2,515,761.47	2,514,594.22	2,514,594.22	2,514,594.22	2,514,594.22
	70	2,617,487.77	2,581,336.93	2,522,939.29	2,481,167.60	2,472,640.12	2,468,764.27	2,465,074.55	2,462,890.72	2,462,890.72	2,462,890.72	2,462,890.72
	80	2,616,709.95	2,581,336.93	2,522,939.29	2,464,608.39	2,429,051.03	2,417,638.44	2,412,828.33	2,410,058.81	2,410,058.81	2,410,058.81	2,410,058.81
	90	2,616,108.94	2,581,336.93	2,522,939.29	2,464,608.39	2,407,238.59	2,375,301.80	2,360,385.39	2,356,138.37	2,356,138.37	2,356,138.37	2,356,138.37
	100	2,615,620.94	2,581,336.93	2,522,939.29	2,464,608.39	2,407,238.59	2,352,515.36	2,317,180.22	2,304,191.17	2,304,191.17	2,304,191.17	2,304,191.17

### PRILOG 3

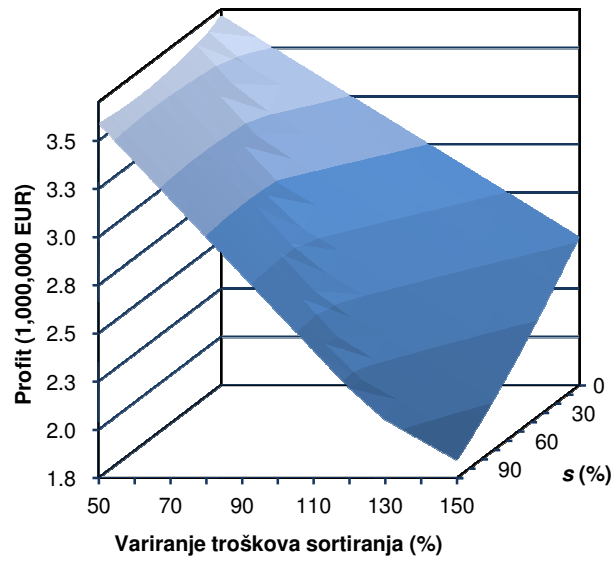
Ovaj prilog sadrži detaljne rezultate testiranja modela kratkoročnog planiranja reciklaže ASR-a u japanskom zakonodavnom okruženju, koji je prezentovan u četvrtom poglavlju ove disertacije.



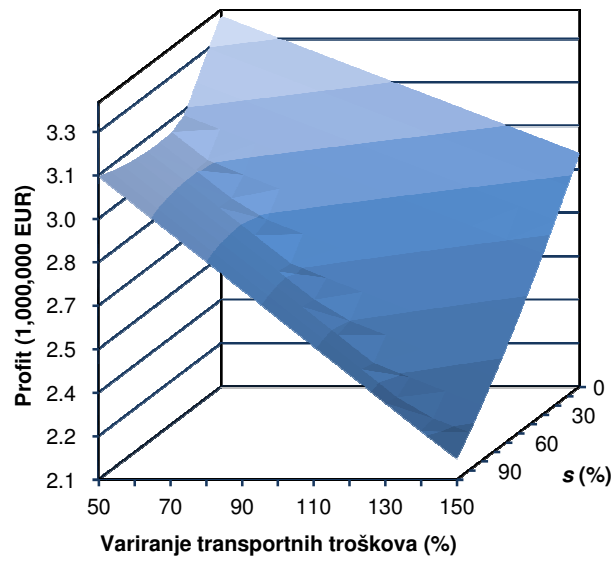
**Slika P1.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene olupina vozila u slučaju važeće ASR kvote.



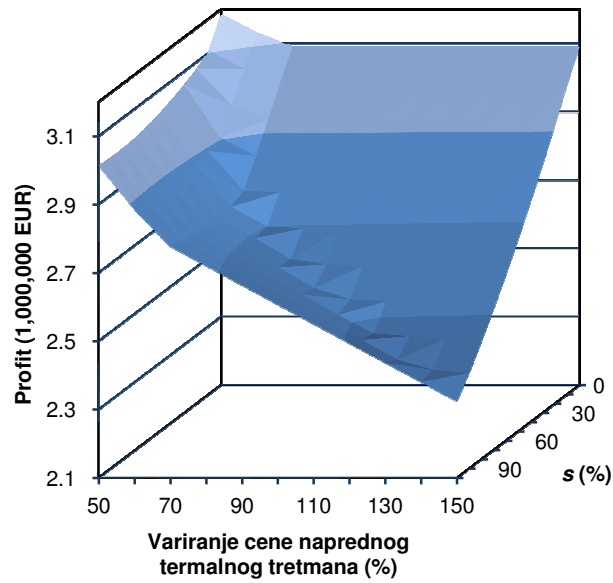
**Slika P2.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu iznosa ASR depozita u slučaju važeće ASR kvote.



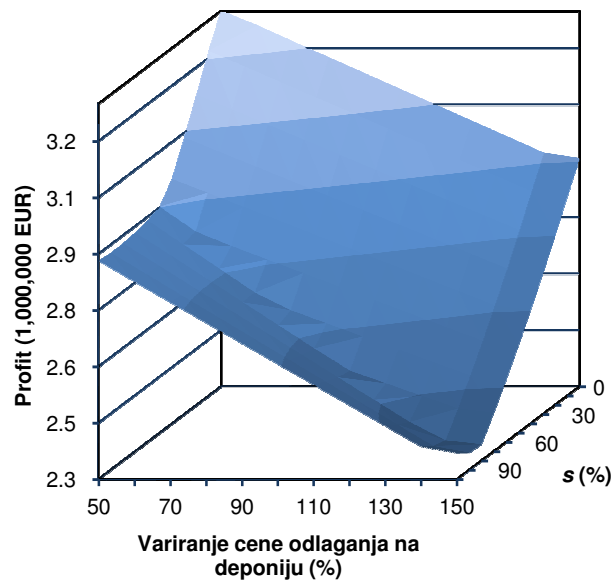
**Slika P3.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu troškova sortiranja u slučaju važeće ASR kvote.



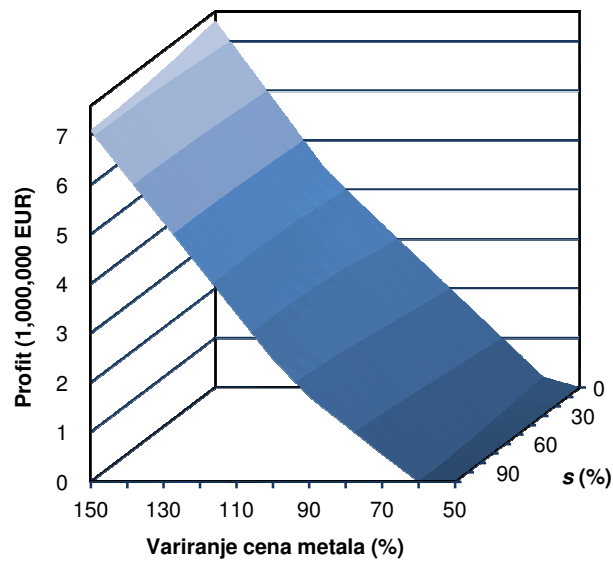
**Slika P4.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu transportnih troškova u slučaju važeće ASR kvote.



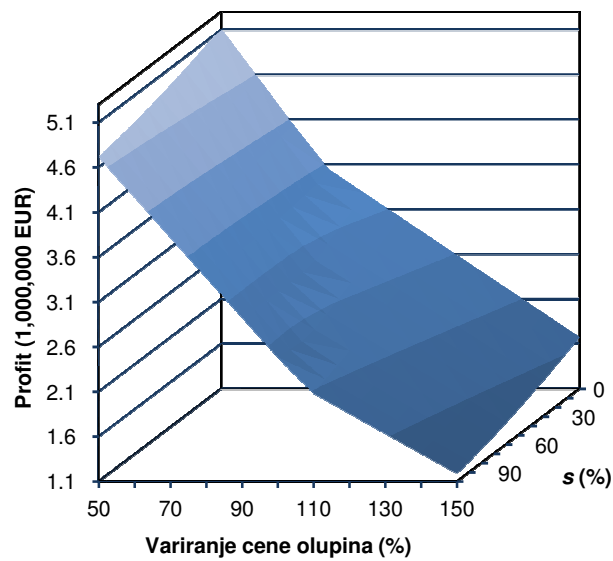
**Slika P5.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene naprednog termalnog tretmana u slučaju važeće ASR kvote.



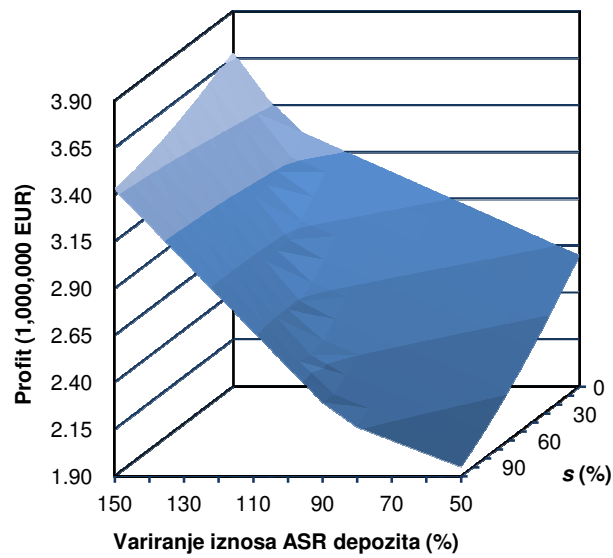
**Slika P6.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene odlaganja na deponiju u slučaju važeće ASR kvote.



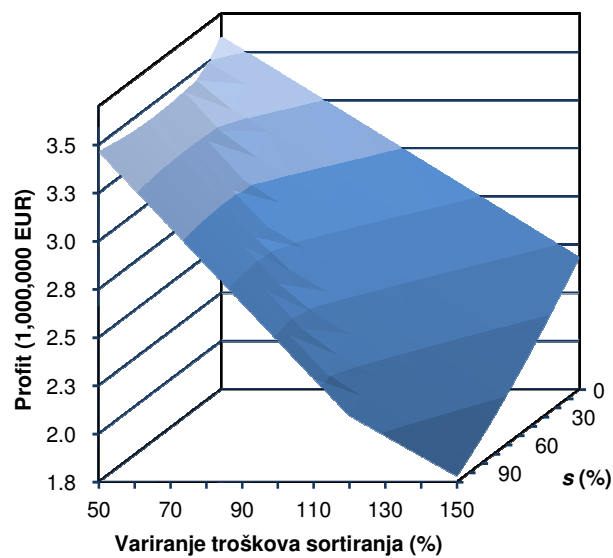
**Slika P7.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cena metala u slučaju buduće ASR kvote.



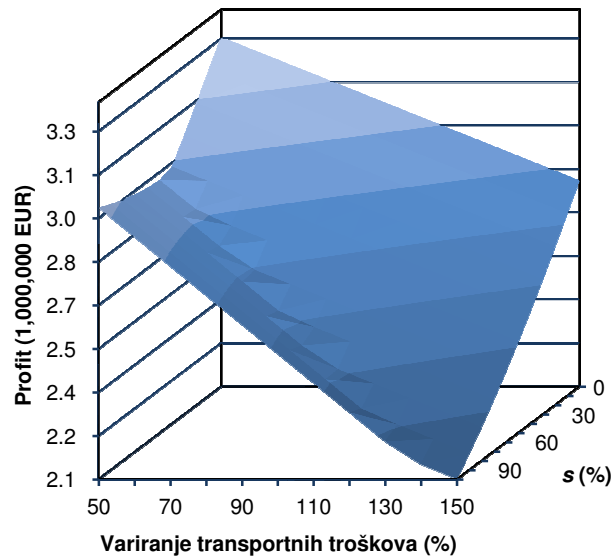
**Slika P8.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene olupina vozila u slučaju buduće ASR kvote.



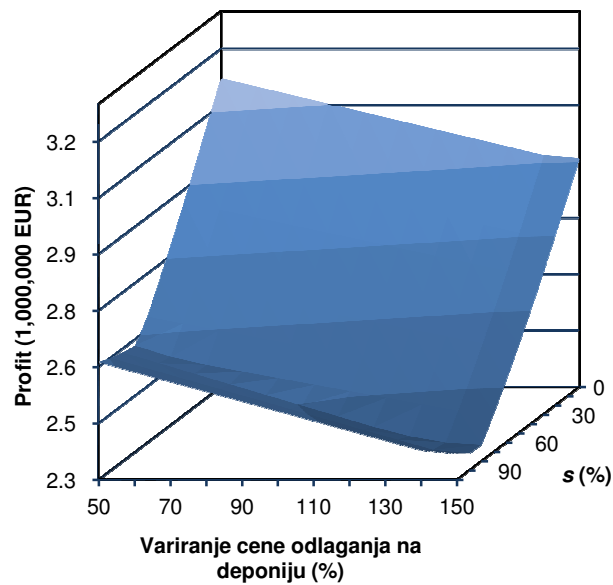
**Slika P9.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu iznosa ASR depozita u slučaju buduće ASR kvote.



**Slika P10.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu troškova sortiranja u slučaju buduće ASR kvote.



**Slika P11.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene naprednog termalnog tretmana u slučaju buduće ASR kvote.



**Slika P12.** Analiza osetljivosti profita japanskog sistema za reciklažu vozila na promenu cene odlaganja na deponiju u slučaju buduće ASR kvote.



## BIOGRAFIJA AUTORA

Vladimir Simić, dipl. inž. saobraćaja, rođen je 16.09.1983. godine u Beogradu, opština Mladenovac, gde je završio osnovnu školu Sveti Sava kao nosilac Vukove diplome. Gimnaziju Slobodan Penezić, prirodni smer, završio je 2002. godine kao nosilac Vukove diplome. Diplomirao je 2007. godine na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj, smer poštanski saobraćaj, sa prosečnom ocenom 9,20. Diplomski rad pod nazivom "Upravljanje zalihama poštanskih vrednosnica" ocenjen je ocenom 10. Nosilac je diplome Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu za najboljeg studenta pete godine studija (školska 2006/2007). Proglašen je za najboljeg diplomiranog studenta Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu u školskoj 2006/2007. godini.

Na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, upisao je doktorske studije 2007. godine. Na doktorskim studijama je položio sve ispite predviđene Statutom fakulteta, sa prosečnom ocenom 10. Predlog istraživanja u okviru doktorske disertacije odbranio 06.03.2013. godine.

U zvanje saradnika u nastavi na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, za užu naučnu oblast "Operaciona istraživanja u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju", izabran je 10. marta 2008. godine. U zvanje asistenta na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, za užu naučnu oblast "Operaciona istraživanja u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju", izabran je 12. maja 2010. godine i tu dužnost i danas obavlja. Na osnovnim akademskim studijama učestvuje u izvođenju nastave na predmetima: "Odabrana poglavlja operacionih istraživanja", "Posebne metode operacionih istraživanja u logistici", "Kvantitativne metode optimizacije". Na master akademskim studijama učestvuje u izvođenju nastave na predmetu "Logistika opasnih materija".

Oblasti interesovanja Vladimira Simića su operaciona istraživanja, ekološko inženjerstvo i logistika. Vladimir Simić, dipl. inž. saobraćaja je autor ili koautor 49 naučno-istraživačka rada objavljena u međunarodnim i nacionalnim časopisima, ili saopštena na međunarodnim i nacionalnim konferencijama.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани Владимир Д. Симић

број индекса Д-І-03/07

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Моделирање и управљање системима за рециклажу возила

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, 22.09.2014. године



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Владимир Д. Симић

Број индекса Д-1-03/07

Студијски програм Саобраћај

Наслов рада Моделирање и управљање системима за рециклажу возила

Ментор ванредни професор, проф. др Бранка Димитријевић, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Коментор редовни професор, проф. др Милорад Видовић, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Потписани Владимир Д. Симић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 22.09.2014. године



### Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

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

Моделирање и управљање системима за рециклажу возила

која је моје ауторско дело.


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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

**Потпис докторанда**

У Београду, 22.09.2014. године



---