

Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela ReCiPe metodom

Ferenc E. Kiš, Goran C. Bošković

Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad, Republika Srbija

Izvod

U radu su prikazani rezultati ocenjivanja uticaja životnog ciklusa biodizela proizvedenog od ulja uljane repice ReCiPe metodom. Funkcionalna jedinica (FJ) je definisana kao 3750 km pređenog puta kamionom na biodizel gorivo. Od ukupno 18 ispitivanih kategorija uticaja svega 4 je odgovorno za 99% ukupnog uticaja životnog ciklusa biodizela. Zauzimanje poljoprivrednih površina (0,67 ha·god./FJ) je odgovorno za oko polovine ukupnog negativnog uticaja životnog ciklusa biodizela. Emisije gasova sa efektom staklene baštne (3000 kg CO₂ ekv./FJ) i emisija materija koje utiču na formiranje suspendovanih čestica (12,4 kg PM_{ekv.}/FJ) prouzrokuju 37% negativnog uticaja životnog ciklusa. Preostali deo negativnog uticaja životnog ciklusa je uglavnom posledica smanjenja rezervi fosilnih goriva (21168 MJ/FJ).

Ključne reči: biodizel, uljana repica, ocenjivanje životnog ciklusa, ReCiPe metod.

Dostupno na Internetu sa adresu časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Transesterifikacijom triglicerida biljnih ulja u prisustvu alkohola i katalizatora dobija se biodizel, obnovljivo pogonsko gorivo sa značajnom zastupljenosti u zemljama Evropske unije [1]. Preovladava mišljenje da je upotreba biodizela na bazi biljnih ulja umesto dizel goriva fosilnog porekla opravdana sa aspekta zaštite životne sredine [2,3]. Brojna istraživanja su pokazala da su sastav i koncentracija štetnih jedinjenja u izduvnim gasovima motora sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS) sa aspekta zaštite životne sredine povoljniji u slučaju korišćenja biodizela umesto fosilnog dizela [4].

Ocena podobnosti biodizela sa aspekta zaštite životne sredine, međutim, ne sme se oslanjati isključivo na uporednu analizu produkata sagorevanja alternativnih goriva. Sagorevanje biodizela u motorima SUS je samo jedna od faza, i to poslednja, u kompleksnom životnom ciklusu (ŽC) biodizela. Proizvodnja biodizela odvija se nizom sukcesivnih aktivnosti koje neminovno prati emisija zagađujućih materija i korišćenje prirodnih resursa, a kao posledica nastaju promene u životnoj sredini sa posledicama po ljudsko zdravlje, ekosistem i raspoloživost prirodnih resursa. Poslednjih godina se sve više pažnje posvećuje proceni uticaja biodizela na životnu sredinu tokom njegovog celokupnog životnog ciklusa [5–8]. Zahtev da se uticaj motornih goriva na životnu sredinu ispituje tokom njihovog celokupnog životnog ciklusa je postavljen i u Direktivi 2009/28/EC Evropskog Parlamenta i Saveta o promociji upotrebe energije iz obnovljivih izvora.

Cilj rada je ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela, proizvedenog u uslovima koji se mogu ekstrapolisati na uslove proizvodnje u Vojvodini/Srbiji, na

NAUČNI RAD

UDK 662.756.3:633.85

Hem. Ind. 67 (4) 601–613 (2013)

doi: 10.2298/HEMIND120801102K

životnu sredinu. Analiza je ograničena na biodizel proizveden od ulja uljane repice, jer od važnijih biljnih ulja proizvedenih u Srbiji jedino ulje uljane repice zadovoljava zahteve srpskog standarda za biodizel (SRPS EN 14214) u pogledu maksimalno dozvoljenog jodnog broja sirovine.

METOD RADA I IZVORI PODATAKA

Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela na životnu sredinu se zasniva na metodi „Ocenjivanje životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Assessment – LCA*)“ definisanog standardom SRPS ISO 14040:2008 [9]. Prema ovom standardu LCA se izvodi u četiri faze: *i)* određivanje cilja, predmeta i područja primene, *ii)* inventarijanje životnog ciklusa, *iii)* ocenjivanje uticaja životnog ciklusa i *iv)* interpretacija rezultata.

Cilj, predmet i područje primene

Cilj je, kako je istaknuto u Uvodu, ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela proizvedenog od ulja uljane repice na životnu sredinu. U okviru predmeta i područja primene potrebno je odrediti bitne metodske prepostavke, pre svega funkciju i funkcionalnu jedinicu ispitivanog sistema, granice sistema i postupak alokacije.

Funkcija ispitivanog sistema proizvoda je definisana kao „obezbeđivanje primenjive energije za pogon motora SUS“. Eventualne druge funkcije kao što su „smanjenje poljoprivrednih površina za proizvodnju prehrambenih useva“ ili „dobijanje kvalitetne stočne hrane“ nisu uzete u obzir i samim tim njihov potencijalni efekat nije meren kroz funkcionalnu jedinicu. Funkcionalna jedinica (FJ) je određena kao 3750 km pređenog puta kamionom ukupne težine 28 t sa ugrađenim EURO 3 motorom pri realnim uslovima kretanja (ETC – European Transient Cycle) i prosečnog iskorишćenja tovarnog kapaciteta od 50%. Kamion kao gorivo koristi čist biodizel, B-100 (tj. bez namešavanja sa dize-

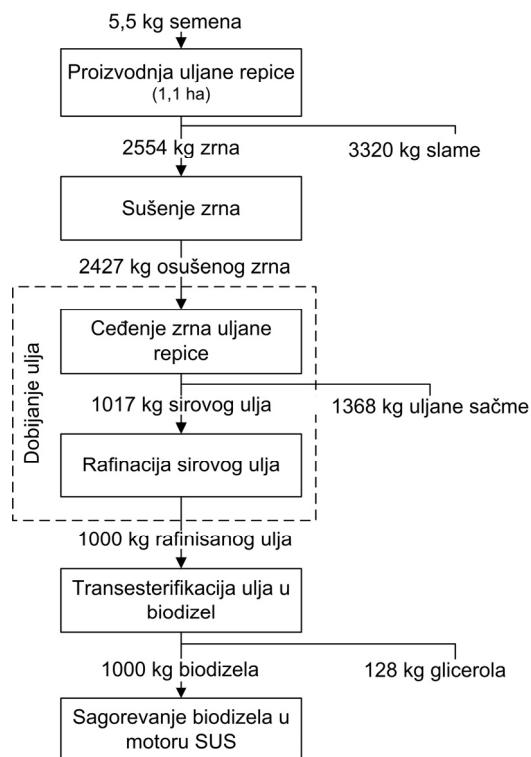
Prepiska: F.E. Kiš, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Bul. Cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija.

E-pošta: ferenc1980@gmail.com

Rad primljen: 1. avgust, 2012

Rad prihvaćen: 19. oktobar, 2012

lom fosilnog porekla), proizведен od ulja uljane repice. Prosečna potrošnja biodizela referentnog kamiona pri datim uslovima iznosi 0,2667 kg/km [10], što definiše referentnu količinu biodizela od 1000 kg po FJ. Granice sistema definišu jedinične procese koji čine životni ciklus proizvoda, a koji su uključeni u LCA [9]. U ovom radu, granice sistema su definisane na način da uključuju najveći deo jediničnih procesa za koje je u prethodnim LCA biodizela dokazano da imaju značajan uticaj na formiranje rezultata analize [7,8,11–14]. Graničama sistema nisu obuhvaćeni procesi u vezi sa izgradnjom, održavanjem i demontažom građevinskih objekata i opreme korišćenih pri proizvodnji i sušenju zrna, proizvodnji ulja i transesterifikaciji. Prema rezultatima ranijih istraživanja ovi procesi imaju samo manji uticaj na formiranje rezultata LCA [11–13]. Faze životnog ciklusa biodizela koje su obuhvaćene analizom kao i osnovni materijalni tokovi iskazani u odnosu na FJ su prikazani na slici 1.



Slika 1. Osnovni materijalni tokovi u životnom ciklusu 1000 kg biodizela [15].

Figure 1. Main material flows in the life cycle of 1000 kg of biodiesel [15].

Kada kao rezultat nekog proizvodnog procesa nastaje više od jednog proizvoda javlja se problem alokacije, odnosno kako ukupan uticaj proizvodnog procesa raspodeliti na glavni i jedan ili više sporednih proizvoda. Na primer, u pojedinim fazama životnog ciklusa biodizela pored glavnog proizvoda nastaju i sporedni proizvodi kao što su slama, uljana sačma i glicerol (slika 1). S

obzirom na to da je istraživanje usmereno isključivo na ocenjivanje uticaja biodizela potrebno je nekom od metoda alokacije iz rezultata isključiti uticaje vezane za sporedne proizvode [9]. Deo ukupne količine elementarnog toka i u životnom ciklusu biodizela (elementarni tok je emisija koja se ispušta u životnu sredinu ili prirodni resurs koji se uzima iz životne sredine), koji se pripisuje biodizelu ($E_{\text{biodizel.total},i}$), utvrđuje jednačinom (1):

$$E_{\text{biodizel.total},i} = E_{1,i}f_1f_2f_3 + E_{2,i}f_2f_3 + E_{3,i}f_3 + E_{4,i} \quad (1)$$

gde je $E_{x,i}$ količina elementarnog toka i u fazi proizvodnje zrna uljane repice; f_1 je deo (u %) $E_{1,i}$ koji se pripisuje zrnu uljane repice; $E_{2,i}$ je količina elementarnog toka i u fazama sušenja zrna i ekstrakcije i rafinacije ulja; f_2 je deo $E_{2,i}$ koji se pripisuje rafinisanom ulju uljane repice; $E_{3,i}$ je količina elementarnog toka i u fazi transesterifikacije; f_3 je deo $E_{3,i}$ koji se pripisuje biodizelu; $E_{4,i}$ je količina elementarnog toka i u fazi sagorenja biodizela u motoru SUS.

Vrednosti $E_{x,i}$ se dobijaju kao rezultat inventarisanja, dok se faktori alokacije (f_x) utvrđuju metodom alokacije. Faktori alokacije pokazuju koji deo elementarnog toka $E_{x,i}$ se pripisuje glavnom proizvodu u pojedinim fazama životnog ciklusa biodizela. U ovom radu se primenjuje ekonomska alokacija što znači da je vrednost f_x jednaka udelu prihoda od prodaje glavnog proizvoda u ukupnom prihodu faze. Na osnovu mase (slika 1) i tržišnih cena glavnih i sporednih proizvoda [15] (265 EUR/t zrna uljane repice; 28 EUR/t slame uljane repice; 730 EUR/t rafinisanog ulja; 170 EUR/t sačme; 900 EUR/t biodizela; 80 EUR/t glicerola) dobijene su sledeće vrednosti faktora alokacije: $f_1 = 88\%$, $f_2 = 76\%$ i $f_3 = 99\%$. Jednačina (1) se primenjuje na sve elementarne tokove izuzev CO₂ biološkog porekla (objašnjeno u daljem delu teksta).

Inventarisanje životnog ciklusa

Inventarisanje životnog ciklusa biodizela se radi u dva koraka, u skladu sa principima opisne LCA. U prvom se prikupljaju podaci o vrsti i količini materijalnih i energetskih ulaza (u daljem tekstu „ulazi“) u pojedinim fazama životnog ciklusa biodizela (npr. koja vrsta i količina mineralnih đubriva se koristi pri proizvodnji uljane repice). U drugom se prikupljaju podaci o emisijama u životnu sredinu i korišćenju prirodnih resursa u celokupnom životnom ciklusu svakog pojedinačnog ulaza definisanog u prethodnom koraku inventarisanja (npr. koja vrsta i količina zagađujućih materija se emituje u životnu sredinu tokom proizvodnog lanca i upotrebe mineralnih đubriva). Konačan rezultat inventarisanja sadrži podatke o vrstama i količinama materija koje se emituju u životnu sredinu, kao i podatke o vrstama i količinama prirodnih resursa upotребljenih u životnom ciklusu biodizela.

Podaci o emisijama i vrsti i količini prirodnih resursa u životnom ciklusu ulaza koji se koriste u životnom ciklusu biodizela preuzeti su iz Ecoinvent 2.0 baze podataka. Pri inventarisanju životnog ciklusa korišćen je SimaPro 7.3 LCA računarski program u čijem sastavu je i pomenuta baza podataka.

Ukupna količina elementarnog toka i (E_i) u životnom ciklusu biodizela se utvrđuje jednačinom (2):

$$E_i = \sum_{j=1}^n I_j E_{i,j} \quad (2)$$

gde su: I_j – količina ulaza j u životnom ciklusu biodizela (npr. kg heksana/FJ), $E_{i,j}$ – količina elementarnog toka i u životnom ciklusu jedinice ulaza j (npr. kg CH₄/kg heksana) i n – broj (vrsta) različitih ulaza u životnom ciklusu biodizela

Podaci o vrstama i količinama ulaza po pojedinim fazama životnog ciklusa biodizela kao i izvor podataka o elementarnim tokovima u životnom ciklusu pojedinih ulaza dati su u nastavku poglavljia.

Proizvodnja zrna uljane repice. U proračunima se uzima da je prinos uljane repice 2305 kg/ha na osnovu petogodišnjeg (2005–2009) proseka u Vojvodini [16]. Materijalni i energetski tokovi proizvodnje zrna uljane repice u uslovima Vojvodine su preuzeti iz [15]. Norma setve iznosi 5 kg semena po ha. Uljana repica se prihranjuje sa 140 kg N, 40 kg P₂O₅ i 80 kg K₂O po ha. Azot se u zemljište unosi u vidu amonijum-nitratnog đubriva (35% N) dok se potrebna količina fosfora i kalijuma unosi putem trostrukog superfosfata (48% P₂O₅) i kalijum-hlorida (60% K₂O). Deo azota unetog u zemljište se gubi usled volatizacije slobodnog amonijaka i denitrifikacije. Gasoviti gubici iznose 74 g NH₃, 35 g N₂O i 16 g NO po kg unetog azota [15]. Od pesticida koristi se „Fusilade forte“, „BOSS 300 SL“ i „Megatrin 2.5 EC“. Kao gorivo u poljoprivrednoj mehanizaciji se koristi fosilni dizel. Ukupna potrošnja dizel goriva prilikom izvođenja agrotehničkih operacija je 90 l/ha. Potrošnja maziva u motorima poljoprivrednih mašina proporcionalna potrošnji goriva i iznosi 0,62 vol.% goriva [17]. Nakon žetve zrno uljane repice se prevozi do sušare udaljene 37,5 km kamionima na dizel gorivo fosilnog porekla.

Sušenje zrna uljane repice. U procesu sušenja sadržaj vode u zrnu uljane repice se smanjuje sa početnih 13,5 na 9%. Pretpostavlja se da se sušenje odvija u vertikalnoj gravitacionoj sušari Strahl 5000 (Officine Minute, Italija) koja kao gorivo koristi lako ulje za loženje. Ova tehnologija sušenja zrna ratarskih useva je rasprostanjena u Vojvodini [18]. Specifična potrošnja energije po toni osušenog zrna iznosi 260 MJ toplotne energije i 2,8 MJ električne energije [15]. Osušeno zrno se prevozi do uljare udaljene 37,5 km kamionima na dizel gorivo fosilnog porekla.

Ekstrakcija ulja i rafinacija. Usled nedostatka podataka o relevantnim materijalnim i energetskim tokovima uljara u Srbiji analiza se oslanja na podatke danske uljare „AarhusKarlshamn“ iz Aarhusa [19]. Ekstrakcija ulja se zasniva na kombinovanom postupku, koji podrazumeva najpre presovanje zrna uljane repice, a zatim ekstrakciju preostalog ulja iz uljane pogače heksanom. Kombinovani postupak dobijanja ulja je karakterističan za većinu uljara u Srbiji [1]. Potrošnja heksana po toni presovanog i ekstrahovanog ulja u uljari „AarhusKarlshamn“ je 1,19 kg. Potrebe procesa u toplotnoj energiji se zadovoljavaju energijom vodene pare koja se dobija sagorevanjem lakog ulja za loženje (donja toplotna moć goriva je 41,8 MJ/kg). U procesu ekstrakcije ulja po toni sirovog ulja troši se 43 kg lakog lož ulja, kao i 419 MJ električne energije po toni sirovog ulja.

U procesu rafinacije sirovog ulja slobodne masne kiseline se konvertuju u sapune dodatkom natrijum-hidroksida i uklanjaju centrifugiranjem. Ostale nečistoće se uklanjaju filtracijom primenom kiselinom tretirane gline za izbeljivanje. U procesu rafinacije troši se 6,1 kg lakog lož ulja i 104 MJ električne energije po toni sirovog ulja. Rafinisano ulje se prevozi do pogona za transesterifikaciju udaljenog 1 km kamionima na dizel gorivo fosilnog porekla.

Transesterifikacija ulja u biodizel. Transesterifikacija se zasniva na nemačkoj tehnologiji (Lurgi AG) pri kojoj se transesterifikacija ulja u biodizel izvodi metanolom u prisustvu alkalnog katalizatora natrijum-metilata. Ova tehnologija se primenjuje i u fabriци biodizela „Victoria-Oil“ u Šidu. Materijalni i energetski tokovi procesa su dostupni iz literature [20]. Nakon transesterifikacije biodizel gorivo se distribuira cisternama na fosilno dizel gorivo do benzinskih pumpi koje su prosečno udaljene 50 km.

Pregled materijalnih i energetskih ulaza proizvodnog lanca biodizela iskazanih u odnosu na FJ, odnosno referentnu količinu od 1000 kg biodizela, zajedno sa podacima o emisijama i upotrebi prirodnih resursa u životnom ciklusu pojedinih ulaza, dat je u tabeli 1. Za one ulaze za koje je procenjeno da je uticaj faze upotrebe na životnu sredinu zanemarljiv (npr. električna energija), ili za koje ne postoje pouzdani i kompletni podaci o eventualnim uticajima faze upotrebe (npr. fosforna i kalijumova đubriva), razmatrani su samo uticaji koji nastaju u njihovom proizvodnom lancu.

Sagorevanje biodizela. Kao reprezentativni inventar emisije gasova motora SUS na biodizel gorivo za kamion i uslove opisanih u FJ, koriste se podaci iz literature [10], koji su delimično korigovani [15]. Pri sagorevanju 1000 kg biodizela u motoru referentnog kamiona emituje se 2849 kg CO₂. Od ukupne količine CO₂ koja nastaje pri sagorevanju biodizela 2700 kg je biološkog porekla, dok je preostali deo fosilni CO₂ poreklom iz metanola [15]. Ugljenik biološkog porekla u biodizelu

Tabela 1. Ulaz materijala i energije u proizvodnom lancu 1000 kg biodizela; ŽC – uzet u obzir ceo životni ciklus; PL – uzet u obzir samo proizvodni lanac

Table 1. Material and energy inputs in the production chain of 1000 kg of biodiesel

Faza životnog ciklusa	Procesi obuhvaćeni analizom	Ulaz materijala i energije (pre alokacije)		Izvor podataka o inventaru ŽC ili PL
		Jedinica	Količina	
Proizvodnja zrna uljane repice	ŽC amonijum-nitrita	kg N	155,1	[6,15]
	PL trostrukog superfosfata	kg P ₂ O ₅	44,3	[21]
	PL kalijum-hlorida	kg K ₂ O	88,6	[21]
	PL pesticida	kg	1,4	[21]
	PL semena	kg	5,5	[21]
	ŽC dizel goriva u polj. maš.	kg	84,8	[10,21]
	ŽC maziva u polj. mašinama	kg	0,52	[10]
Sušenje zrna	Transport zrna do sušare	tkm	191,0	[22]
	ŽC lakov lož ulja	kg	15,1	[23]
	PL električne energije	MJ	23,6	[23]
Presovanje i ekstrakcija ulja	Transport zrna do uljare	tkm	182,0	[22]
	ŽC lakov lož ulja	kg	43,7	[10]
	PL električne energije	MJ	426,1	[23]
Rafinacija ulja	PL heksana	kg	1,2	[24]
	PL električne energije	MJ	104,0	[23]
	ŽC lakov lož ulja	kg	6,2	[10]
	PL fosforne kiseline (85%)	kg	0,8	[25]
	PL natrijum-hidroksida (50%)	kg	2,1	[25]
	PL sumporne kiseline (100%)	kg	1,9	[25]
	PL gline za izbeljivanje	kg	9,0	[26]
Transesterifikacija	Transport rafinisanog ulja	tkm	1,0	[22]
	PL električne energije	MJ	43,2	[23]
	ŽC zemnog gasa u parnom kotlu	m ³	33,4	[27]
	PL natrijum-metilata (100%)	kg	5,0	[28]
	PL natrijum-hidroksida (50%)	kg	1,5	[25]
	PL sone kiseline (36%)	kg	10,0	[24]
	PL metanola	kg	96,0	[25]
	Transport biodizela	tkm	50,0	[22]

vodi poreklo od atmosferskog ugljenika koji je bio apsorbovan u zrnu uljane repice u procesu fotosinteze, te se ova količina CO₂ (2700 kg) oduzima od ukupne emisije CO₂ u fazi proizvodnje zrna uljane repice. Pored CO₂ u procesu sagorevanja 1000 kg biodizela u vazduhu se oslobađa 3,37 kg CO, 28,8 kg NO_x (oksiidi azota), 26,4 g N₂O, 335 g PM_{2,5} (čestice sa prečnikom manjim od 2,5·10⁻⁶ m), 49,2 g PM₁₀ (čestice sa prečnikom većim od 2,5·10⁻⁶ m), 0,61 kg NMVOC (nemetanska lakoisparljiva organska jedinjenja), 14,3 g CH₄, 18,7 g NH₃ i 4,3 g benzena [10,15].

Metod za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa

Rezultat inventarisanja sadrži podatke o vrstama i količinama emisija i prirodnih resursa vezanih za životni ciklus biodizela ali ne i o mogućim uticajima ovih elementarnih tokova na životnu sredinu. U kontekstu LCA mogući uticaj proizvoda na životnu sredinu se utvrđuje

nekom od metoda za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (eng. *Life Cycle Impact Assessment method – LCIA metod*).

Za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela u radu se koristi ReCiPe metod [29]. ReCiPe metod je nastao kombinacijom i usavršavanjem dva popularna LCIA metoda: CML2000 [30] i Eco-indicator 99 [31]. Ono što izdvaja ovaj metod od ostalih jeste mogućnost vrednovanja uticaja kako na međupozicijama, tako i na krajnjim pozicijama mehanizma životne sredine (tj. na nivou štete). Uticaj životnog ciklusa proizvoda se meri kroz rezultat 18 indikatora na međupozicijama i 3 indikatora na krajnjim pozicijama mehanizma životne sredine. U većini kategorija uticaja na međupozicijama, ukupan uticaj svakog elementarnog toka se iskazuje u odnosu na ekvivalentan uticaj referentnog elementarnog toka. Na primer, u okviru kategorije uticaja „globalno zagrevanje“ uticaj svakog gasa sa efektom sta-

klene bašte (CO_2 , CH_4 , N_2O , itd.) se iskazuje zbirno, kroz ekvivalentan uticaj referentne supstance, koja je u slučaju ReCiPe metoda CO_2 (slika 2).

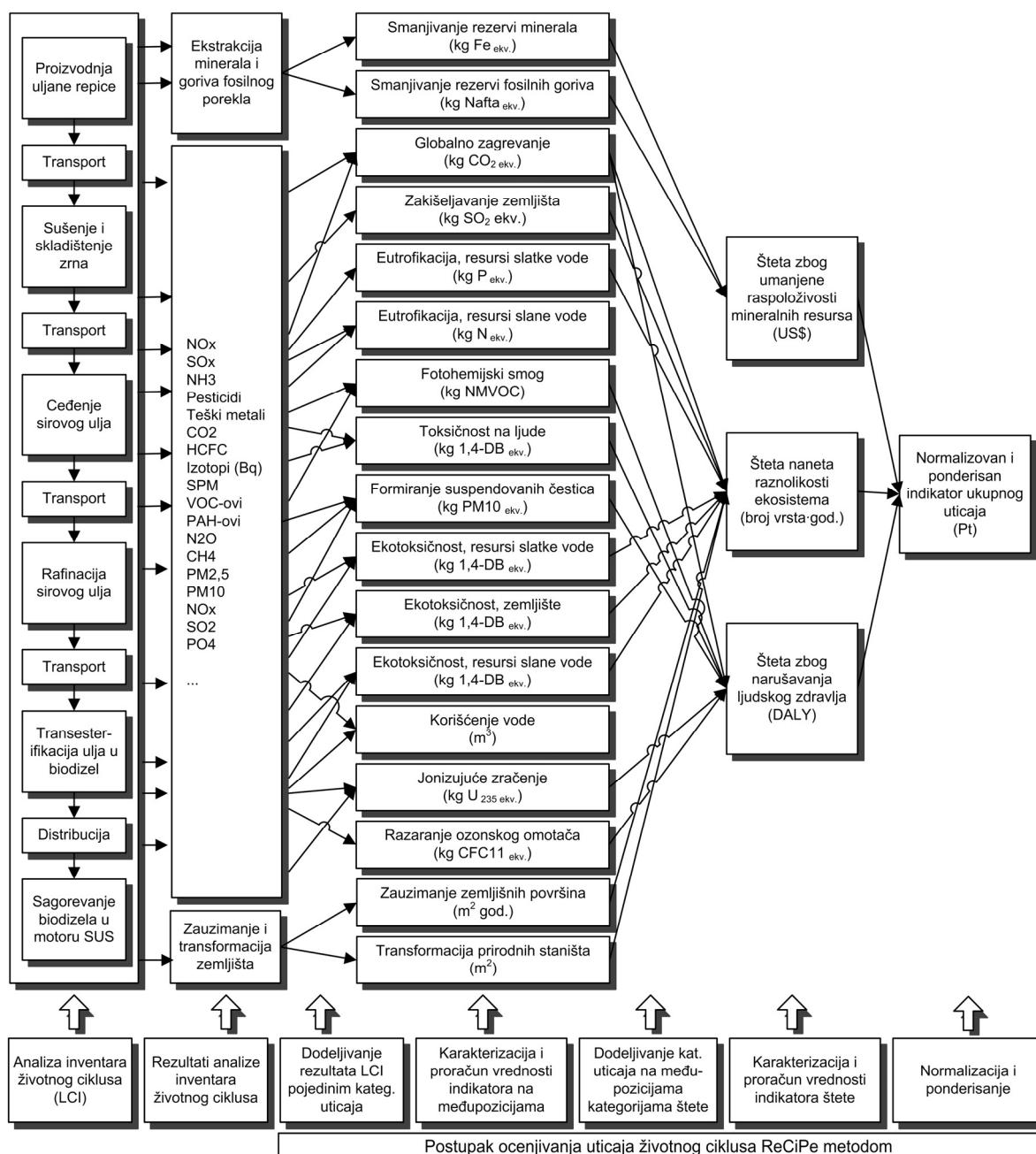
Indikatori na krajnjim pozicijama se nazivaju i indikatori štete jer se kroz njih meri šteta koja nastaje kao posledica emisija i korišćenja prirodnih resursa u životnom ciklusu ispitivanog proizvoda. ReCiPe metod razmatra uticaje u okviru sledeće tri kategorije uticaja na krajnjim pozicijama mehanizma životne sredine:

- **Šteta naneta ljudskom zdravlju** – računa se kao zbir izgubljenih godina života zbog prevremene smrti i izgu-

bljenih godina „zdravog“ života usled oštećenja zdravlja zbog izloženosti osobe zagađenju. Jedinica mera je DALY (eng. *Disability Adjusted Life Year*).

- **Šteta naneta raznolikosti ekosistema** – meri se kroz gubitak biodiverziteta, a obim štete se iskazuje kroz broj vrsta koji će nestati tokom određenog vremenskog perioda usled zagađenja životne sredine ili korišćenja zemljišta. Jedinica mera je „br. vrst \times god.“.

- **Šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa** – procenjuje se na osnovu predviđenog rasta graničnih troškova eksploracije mineralnih rezervi u



Slika 2. Šematski prikaz ReCiPe metode.
Figure 2. Scheme of the ReCiPe method.

budućnosti i efekta ovog rasta na troškove globalne ekonomije. Jedinica mera je US\$.

ReCiPe metod omogućuje iskazivanje ukupnog uticaja u vidu jednog sintetičkog indikatora sa jedinicom mera Pt. Ovaj indikator je rezultat normalizacije i ponderisanja (u literaturi se češće koristi i izraz „odmeravanja“) između indikatora tri pomenute kategorije štete i omogućuje njihovo neposredno poređenje i utvrđivanje njihovih udela u ukupnom uticaju životnog ciklusa. Prema SRPS ISO 14040:2008 normalizacija i ponderisanje su opcionalni elementi LCIA i korišćenje ovako izvedenih indikatora nije dozvoljena u uporednim analizama.

Pregled kategorija uticaja obuhvaćenih ReCiPe metodom i postupak vrednovanja dati su na slici 2. Interesantno je napomenuti da od 18 indikatora na međupozicijama, dva, *eutrofifikacija – slana voda i korišćenje vode*, nije moguće meriti na nivou indikatora na krajnjim pozicijama mehanizma životne sredine [29]. To pokazuje da, iako je metod nastao usavršavanjem dva prethodna metoda, još uvek ne omogućava vrednovanje svih uticaja životnog ciklusa na krajnjim pozicijama.

Vrednovanje rezultata indikatora kategorija uticaja rađeno je uz pomoć računarskog programa SimaPro

7.3, korišćenjem verzije ReCiPe metoda koja u ovom računarskom programu nosi oznaku „ReCiPe Endpoint (H), Europe ReCiPe H/A“.

REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati istraživanja se iskazuju na dva nivoa: *i*) na nivou rezultata inventarisanja, koji sadrži podatke o vrsti i količini elementarnih tokova u životnom ciklusu biodizela i *ii*) na nivou rezultata ocenjivanja uticaja životnog ciklusa. Ukoliko nije drugačije navedeno svi rezultati se iskazuju u odnosu na FJ (1000 kg biodizela).

Rezultat inventarisanja životnog ciklusa

U životnom ciklusu biodizela se u životnu sredinu emituje više stotina različitih supstanci i upotrebljava nekoliko stotina različitih oblika ruda minerala, neobnovljivih izvora energije, zemljишta i drugih prirodnih resursa. Zbog nemogućnosti prikazivanja svih elementarnih tokova vezanih za životni ciklus biodizela, prikaz podataka je ograničen na manji broj elementarnih tokova (tabele 2–4). Pregledom su obuhvaćene emisije u životnu sredinu koje su određene Pravilnikom o građičnim vrednostima emisije, načinu i rokovima merenja i evidentiranja podataka (Sl. glasnik RS, br. 30/97) i

Tabela 2. Odabrani rezultati inventarisanja ŽC 1000 kg biodizela – emisije u vazduh

Table 2. Partial life cycle inventory results of 1000 kg of biodiesel – emissions to air

Emisije u vazduh	Jed.	Proizvodnja zrna	Sušenje zrna	Dobijanje ulja	Transesterifikacija	Sagorevanje biodizela	Ukupno ŽC
CO ₂ ^a	kg	-2,08E+03	6,47E+01	2,66E+02	1,87E+02	2,85E+03	1,28E+03
N ₂ O	kg	5,56E+00	7,03E-04	2,98E-03	1,70E-03	2,64E-02	5,60E+00
CH ₄	kg	9,98E-01	6,63E-02	1,82E-01	6,72E-01	1,43E-02	1,93E+00
NO _x	kg	6,27E+00	2,08E-01	3,66E-01	2,74E-01	2,88E+01	3,59E+01
SO ₂	kg	1,82E+00	1,44E-01	1,75E+00	3,64E-01	0,00E+00	4,08E+00
CO	kg	1,12E+00	6,21E-02	8,43E-02	1,18E-01	3,37E+00	4,75E+00
PM, ukupno ^b	kg	9,62E-01	3,31E-02	3,48E-01	9,07E-02	3,85E-01	1,82E+00
PM, <2,5 µm	kg	4,72E-01	1,69E-02	2,26E-01	3,74E-02	3,36E-01	1,09E+00
PM, između 2,5 i 10 µm	kg	1,82E-01	5,40E-03	3,19E-02	1,42E-02	3,25E-02	2,66E-01
PM, >10 µm	kg	3,08E-01	1,07E-02	9,00E-02	3,91E-02	0,00E+00	4,47E-01
NH ₃	kg	8,27E+00	4,41E-04	7,72E-04	1,05E-03	1,88E-02	8,29E+00
HF	kg	6,58E-03	1,98E-04	3,62E-03	7,98E-04	0,00E+00	1,12E-02
HCl	kg	1,11E-02	7,64E-04	1,19E-02	3,22E-03	0,00E+00	2,71E-02
NMVOC ^c	kg	5,70E-01	5,42E-02	1,01E-01	1,66E-01	6,14E-01	1,51E+00
Benzen	kg	3,03E-03	1,68E-04	5,91E-04	9,98E-04	4,37E-03	9,15E-03
Benzo(a)piren	kg	4,43E-06	1,09E-07	1,78E-07	5,97E-07	0,00E+00	5,32E-06
PAH	kg	2,75E-04	3,09E-06	5,27E-06	2,48E-05	0,00E+00	3,08E-04
Arom. Hc	kg	1,43E-03	4,98E-05	6,70E-05	5,18E-04	0,00E+00	2,06E-03
Metalli ^d	kg	4,06E-03	7,62E-04	5,68E-04	2,44E-04	0,00E+00	5,63E-03

^a Ukupna emisija CO₂ u životnom ciklusu biodizela je umanjena za količinu atmosferskog CO₂ koja je apsorbovana u zrnu uljane repice u procesu fotosinteze i koja je nakon prerade zrna dospela u biodizel; ^b ukupne suspendovane čestice (PM, ukupno) obuhvataju suspendovane čestice sa prečnikom manjim od 2,5 µm, čestice sa prečnikom između 2,5 i 10 µm i čestice sa prečnikom većim od 10 µm; ^c grupa NMVOC u vazduhu obuhvata oko 90 jedinjenja ili skupa jedinjenja uključujući i benzen, benzo(a)piren, PAH i aromatične ugljovodonike. Zbog značaja sa aspekta kvaliteta vazduha, benzen, benzo(a)piren, PAH i aromatični ugljovodonici se iskazuju i posebno;

^d teški metali obuhvataju cink, nikl, bakar, barijum, olovo, arsen, mangan, kobalt, kadmijum i živu

Tabela 3. Odabrani rezultati inventarisanja ŽC 1000 kg biodizela – emisije u vodu i zemljište
Table 3. Partial life cycle inventory results of 1000 kg of biodiesel – emissions to water and soil

Komponenta	Jed.	Proizvodnja zrna	Sušenje zrna	Dobijanje ulja	Transesterifikacija	Sagorevanje biodizela	Ukupno ŽC
Emisije u vodu							
NH ₃	kg	7,71E-02	9,99E-05	2,93E-04	3,15E-04	0,00E+00	7,78E-02
NO ₃ ⁻	kg	2,68E-01	2,85E-04	9,29E-04	1,91E-03	0,00E+00	2,72E-01
PO ₄ ³⁻	kg	1,23E+00	7,36E-04	1,64E-02	2,10E-03	0,00E+00	1,25E+00
P	kg	1,34E-03	6,55E-06	4,67E-05	9,84E-04	0,00E+00	2,37E-03
HPK	kg	1,95E+00	1,80E-01	4,47E-01	2,83E-01	0,00E+00	2,86E+00
BPK	kg	1,75E+00	1,74E-01	4,49E-01	2,41E-01	0,00E+00	2,62E+00
HC ^a	kg	1,04E-02	1,21E-03	4,17E-03	2,64E-02	0,00E+00	4,22E-02
Metalli ^b	kg	3,33E-02	2,79E-03	1,68E-02	4,40E-03	0,00E+00	5,73E-02
Emisije u zemljište							
Metalli ⁽²⁾	kg	3,20E-03	3,14E-04	6,79E-04	5,32E-04	0,00E+00	4,73E-03

^aGrupa ugljovodonika (HC) emitovanih u vodu obuhvata oko 40 jedinjenja ili skupa jedinjenja iz inventara životnog ciklusa biodizela; ^bteški metali obuhvataju cink, nikl, bakar, barijum, olovo, arsen, mangan, kobalt, kadmijum i živu

Tabela 4. Odabrani rezultati inventarisanja ŽC 1000 kg biodizela – prirodni resursi
Table 4. Partial life cycle inventory results of 1000 kg of biodiesel – natural resources

Resurs	Jed.	Proizvodnja zrna	Sušenje zrna	Dobijanje ulja	Transesterifikacija	Sagorevanje biodizela	Ukupno ŽC
Korišćenje neobnovljivih izvora energije							
Sirova nafta, u zemlji ^a	kg	1,26E+02	1,80E+01	4,18E+01	3,89E+00	0,00E+00	1,89E+02
Zemni gas, u zemlji ^b	m ³	1,13E+02	1,57E+00	4,32E+00	1,33E+02	0,00E+00	2,52E+02
Mrki ugalj, u zemlji ^c	kg	2,57E+01	7,06E+00	1,48E+02	2,67E+01	0,00E+00	2,07E+02
Kameni ugalj, u zemlji ^d	kg	2,95E+01	1,07E+00	2,16E+00	7,06E+00	0,00E+00	3,98E+01
Uranijum ^e	kg	1,08E-03	5,44E-05	1,40E-04	4,40E-04	0,00E+00	1,71E-03
Zauzimanje površina							
Poljoprivredno zemljište	m ² ·god.	6,71E+03	1,13E-01	4,20E-01	7,13E-01	0,00E+00	6,71E+03
Građevinsko zemljište	m ² ·god.	6,18E+00	2,62E-01	7,56E-01	4,62E-01	0,00E+00	7,66E+00
Korišćenje vode							
Voda	m ³	5,45E+00	1,67E-01	1,08E+00	6,26E-01	0,00E+00	7,33E+00

^aSirova nafta čiji je gornja toplotna moć 45,80 MJ/kg; ^bzemni gas čiji je gornja toplotna moć 38,3 MJ/m³; ^cmrki ugalj čiji je gornja toplotna moć 9,9 MJ/kg; ^dkameni ugalj čiji je gornja toplotna moć 19,1 MJ/kg; ^euranijum iz koga se dobija 560000 MJ električne energije po 1 kg

Uredbom o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha (Sl. glasnik RS, br. 11/10), kao i neki drugi elementarni tokovi koji bi mogli pomoći prilikom tumačenja rezultata LCIA.

Rezultat ocenjivanja uticaja životnog ciklusa

Rezultati ocenjivanja uticaja životnog ciklusa biodizela se iskazuju najpre na nivou rezultata indikatora pojedinih kategorija uticaja, a zatim i na nivou normalizovanog i ponderisanog indikatora ukupnog uticaja.

Pregled rezultata indikatora kategorija uticaja na međupozicijama i krajnjim pozicijama mehanizma životne sredine dat je u tabeli 5.

Iz rezultata se vidi da je svega nekoliko kategorija uticaja odgovorno za najveći deo ukupnog uticaja u okviru pojedinih kategorija uticaja na krajnjim pozicijama, a to su: globalno zagrevanje, formiranje suspen-

dovanih čestica, zauzimanje poljoprivrednih površina i smanjenje rezervi fosilnih goriva.

Šteta zbog narušavanja ljudskog zdravlja se skoro u celosti pripisuje emisiji gasova sa efektom staklene bašte (56%) i emisijama u vazduhu koje doprinose formiranju čestica (43%). Kumulativan doprinos rezultata indikatora ostalih kategorija uticaja (jonizujuće zračenje, formiranje fotohemiskog smoga, razaranje ozonskog omotača i toksičnost po ljudi) ukupnom uticaju na ljudsko zdravlje je svega 1% (tabela 5). Uticaj emisija u životnom ciklusu biodizela na globalno zagrevanje je procenjen na 3000 kg CO_{2,ekv.} (tabela 5), što je manje nego što se emituje u životnom ciklusu iste mase fosilnog dizela (3700 kg CO_{2,ekv.} prema [10]). Interesantno je napomenuti da u životnom ciklusu biodizela CO₂ nije gas koji je najviše odgovoran za globalno zagrevanje već je to N₂O. Naime, iako se u životnom ciklusu biodizela emituje svega 5,6 kg N₂O naspram 1280 kg CO₂ (tabela

Tabela 5. Rezultati vrednovanja uticaja životnog ciklusa 1000 kg biodizela na nivou pojedinih kategorija uticaja
Table 5. Life cycle impact assessment results of 1000 kg of biodiesel

R.b.	Kategorije uticaja	Rezultati indikatora na međupozicijama		Rezultati indikatora na krajnjim pozicijama (veličina štete)		
		Jed. mere	Vrednost	Ljudsko zdravlje (DALY)	Ekosistem (br. vrsta·god.)	Resursi, US\$
1.	Globalno zagrevanje	kg CO ₂ ekv.	3,00E+03	4,19E-03	2,37E-05	
2.	Razaranje ozonskog omotača	kg CFC-11ekv.	1,51E-04	4,00E-07		
3.	Toksičnost na ljude	kg 1,4 DB _{ekv.}	9,87E+01	6,91E-05		
4.	Fotohemski smog	kg NMVOC _{ekv.}	3,62E+01	1,41E-06		
5.	Formiranje susp. čestica	kg PM _{2,5} ekv.	1,24E+01	3,21E-03		
6.	Jonizujuće zračenje	kg U235 _{ekv.}	9,58E+01	1,57E-06		
7.	Zakišeljavanje zemljišta	kg SO ₂ ekv.	4,36E+01		2,53E-07	
8.	Eutrofikacija, slatka voda	kg P _{ekv.}	4,15E-01		1,82E-08	
9.	Eutrofikacija, slana voda	kg N _{ekv.}	1,43E+01			
10.	Ekotoksičnost, zemljište	kg 1,4 DB _{ekv.}	8,36E-01		1,07E-07	
11.	Ekotoksičnost, slatka voda	kg 1,4 DB _{ekv.}	2,14E+00		5,56E-10	
12.	Ekotoksičnost, slana voda	kg 1,4 DB _{ekv.}	3,24E+00		2,60E-12	
13.	Zauzimanje polj. zemljišta	m ² ·god.	6,71E+03		1,23E-04	
14.	Zauzimanje građ. zemljišta	m ² ·god.	7,66E+00		1,48E-07	
15.	Transfor. prirodnih staništa	m ²	4,28E-01		8,57E-07	
16.	Korišćenje vode	m ³	7,33E+00			
17.	Smanjivanje rezervi minerala	kg Fe _{ekv.}	8,25E+01		5,89E+00	
18.	Smanjivanje rezervi fosilnih goriva	kg Nafta _{ekv.}	5,04E+02		8,10E+03	
Ukupna šteta prouzrokovana životnim ciklusom biodizela				7,48E-03	1,48E-04	8,11E+03

2), zbog 293 puta većeg uticaja prethodnog kao gasa sa efektom staklene bašte u odnosu na CO₂, emisija N₂O je odgovorna za 55% uticaja u okviru globalnog zagrevanja. U životnom ciklusu biodizela N₂O uglavnom nastaje u procesu denitrifikacije amonijum-nitratnog đubriva. Doprinos pojedinih faza životnog ciklusa ukupnoj emisiji značajnijih gasova sa efektom staklene bašte dat je u tabeli 2. Prema ReCiPe metodu emisije koje doprinose formiranju čestica su amonijak, oksidi azota, oksidi sumpora i suspendovane čestice (PM). Ukupan uticaj u okviru kategorije uticaja „formiranje suspendovanih čestica“ je procenjen na 12,4 kg PM_{2,5,ekv.} (tabela 5), i posledica je emisije oksida azota (61%), amonijaka (21%), suspendovanih čestica (12%) i oksida sumpora (6%). Emisija ovih jedinjenja se u najvećoj meri pripisuje fazama proizvodnje zrna uljane repice i sagorevanju biodizela u motorima SUS (tabela 2).

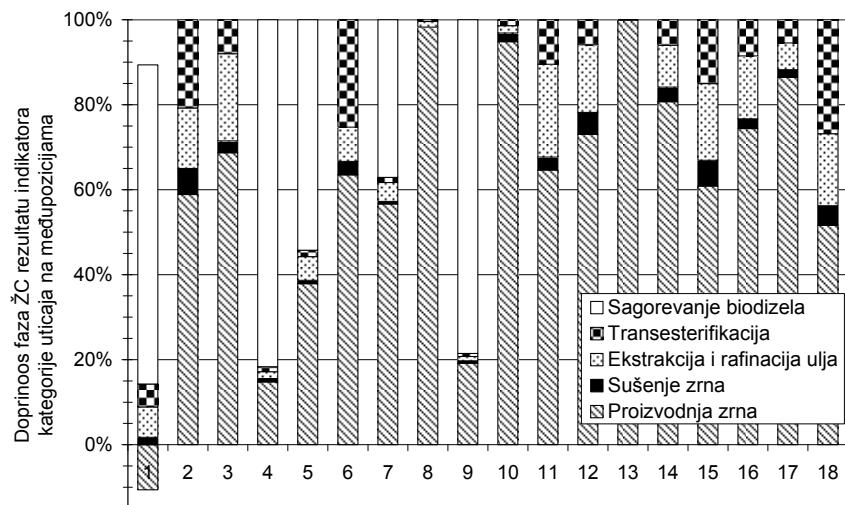
Šteta naneta raznolikosti ekosistema se u ReCiPe metodi vrednuje kroz gubitak biodiverziteta na određenoj teritoriji. Gubitak biodiverziteta u životnom ciklusu biodizela je uglavnom posledica zauzimanja poljoprivrednih površina (83%) i globalnog zagrevanja izazvanog emisijama gasova sa efektom staklene bašte u životnom ciklusu biodizela (16%). Kumulativan doprinos rezultata indikatora ostalih kategorija uticaja (zakišeljavanje zemljišta, eutrofikacija vodnih resursa, ekotoksičnost i transformacija prirodnih staništa) ukupnom uticaju na raznolikost ekosistema je svega 1% (tabela

5). Procesi u vezi sa životnim ciklусом 1000 kg biodizela zauzimaju 0,67 ha poljoprivrednog zemljišta (tabela 5).

Šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa je skoro u potpunosti posledica smanjenja mineralnih rezervi fosilnih goriva (99%). U proizvodnom lancu 1000 kg biodizela koriste se fosilna goriva u količini od 504 kg Nafta_{ekv.} (tabela 5). U ReCiPe metodi se uzima da je energetski sadržaj 1 kg Nafta_{ekv.} 42 MJ što znači da je za dobijanje 1000 kg biodizela potrebno iskoristiti 21168 MJ energije iz fosilnih izvora. Odnosno, za dobijanje 1 MJ energije u biodizelu potrebno je iskoristiti 0,56 MJ energije iz fosilnih izvora (računato na osnovu donje topotne moći biodizela od 37,8 MJ/kg), što je znatno manje energije nego što se iskoristi za dobijanje iste količine energije u fosilnom dizelu (1,29 MJ prema [10]).

Slika 3 pokazuje doprinos pojedinih faza životnog ciklusa biodizela rezultatu indikatora na međupozicijama mehanizma životne sredine. Rezultati indikatora svih kategorija uticaja su uglavnom određeni fazama proizvodnje zrna i sagorevanja biodizela.

Šteta koja nastaje po funkcionalnoj jedinici u kategoriji uticaja „šteta zbog narušavanja ljudskog zdravlja“ je procenjena na 7,48E-03 DALY ekvivalenta, u kategoriji uticaja „šteta naneta raznolikosti ekosistema“ na 1,48E-04 br. vrst·god., a u kategoriji uticaja „šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa“ na 8,11E+03 US\$ (tabela 5). Doprinos pojedinih faza život-



Slika 3. Doprinos pojedinih faza životnog ciklusa rezultatu indikatora na međupozicijama; brojčane oznake na horizontalnoj osi označavaju kategorije uticaja sa istim rednim brojem kao u tabeli 5.

Figure 3. Contribution of life cycle phases to midpoint indicator results.

nog ciklusa i jediničnih procesa rezultatu indikatora kategorija uticaja na krajnjim pozicijama prikazan je u tabeli 6.

Ukupan uticaj životnog ciklusa biodizela (ukupan negativan uticaj životnog ciklusa umanjen za ukupan pozitivan uticaj zbog apsorpcije CO₂ u procesu foto-

Tabela 6. Doprinos pojedinih faza i procesa rezultatu indikatora na krajnjim pozicijama (%)
Table 6. Contribution of life cycle phases and processes to the endpoint indicator results (%)

Faze i procesi	Šteta zbog narušavanja ljudskog zdravlja	Šteta naneta raznolikosti ekosistema	Šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa
Proizvodnja zrna	9,4	81,6	51,6
Zauzimanje zemljišta	0,0	54,8	0,0
Emisije iz zemljišta	28,5	33,7	0,0
Proizvodnja đubriva	23,5	5,7	34,1
Dizel gorivo	7,2	1,3	15,9
Apsorpcija CO ₂	-50,5	-14,4	0,0
Ostalo	0,2	0,3	0,3
Transport	0,5	0,1	1,3
Sušenje zrna	1,6	0,4	4,6
Proizvodnja električne energije	0,2	0,0	0,3
Dobijanja toplotne energije	0,9	0,2	2,8
Transport	0,5	0,1	1,4
Ekstrakcija i rafinacija ulja	7,7	1,6	16,9
Proizvodnja električne energije	4,7	0,7	7,2
Dobijanja toplotne energije	2,9	0,8	9,3
Proizvodnja hemikalija	0,1	0,1	0,4
Transport	0,0	0,0	0,0
Transesterifikacija	4,5	1,2	26,9
Proizvodnja električne energije	0,5	0,1	0,8
Dobijanja toplotne energije	1,7	0,5	7,0
Proizvodnja hemikalija (bez metanola)	0,7	0,2	2,0
Proizvodnja metanola	1,5	0,4	16,6
Transport	0,2	0,0	0,5
Sagorevanje biodizela	76,8	15,3	0,0
Ukupno ŽC	100,0	100,0	100,0

sinteze) je procenjen na 540 Pt (tabela 7). U ukupnom uticaju, šteta zbog narušavanja ljudskog zdravlja, šteta naneta raznolikosti ekosistema i šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa učestvuju sa 27%, 63% i 10%, redom (tabela 7). Proizvodni lanac biodizela je odgovoran za oko 70% ukupnog uticaja životnog ciklusa, dok preostali deo prouzrokuje fazu sagorevanja biodizela. U proizvodnom lancu biodizela faza proizvodnje zrna uljane repice prouzrokuje oko 85% ukupnog uticaja (tabela 7).

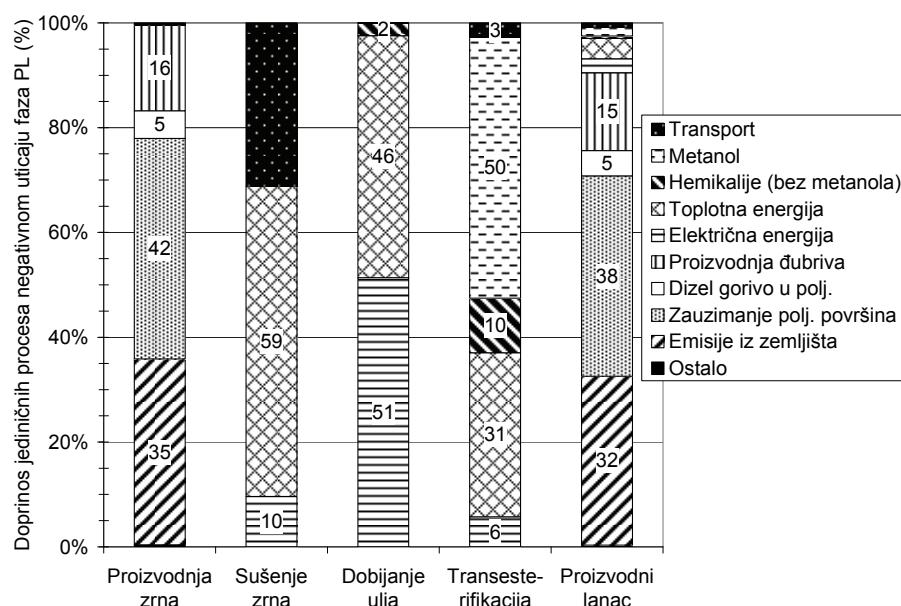
Doprinos pojedinih procesa ukupnom negativnom uticaju pojedinih faza proizvodnog lanca biodizela dat je na slici 4. Svega nekoliko procesa prouzrokuje 90% ukupnog negativnog uticaja koji nastaje u proizvodnom lancu biodizela. Uticaji vezani za proizvodni lanac i pri-

menu mineralnih đubriva koji se koriste pri proizvodnji uljane repice su odgovorni za 47% ukupnog negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela. Proizvodni lanac mineralnih đubriva prouzrokuje 15%, dok emisije N_2O i NH_3 iz zemljišta koje nastaju volatizacijom i denitrifikacijom azota iz amonijačno-nitratnog đubriva prouzrokuju 32% negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela. Zauzimanje zemljišta u poljoprivrednoj fazi je odgovorno za 38% negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela (slika 4).

ReCiPe metod omogućuje vrednovanje uticaja na životnu sredinu preko 320 elementarnih tokova iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa biodizela. Međutim, rezultati pokazuju da je svega 10 elementarnih tokova odgovorno za 98% ukupnog negativnog uticaja životnog

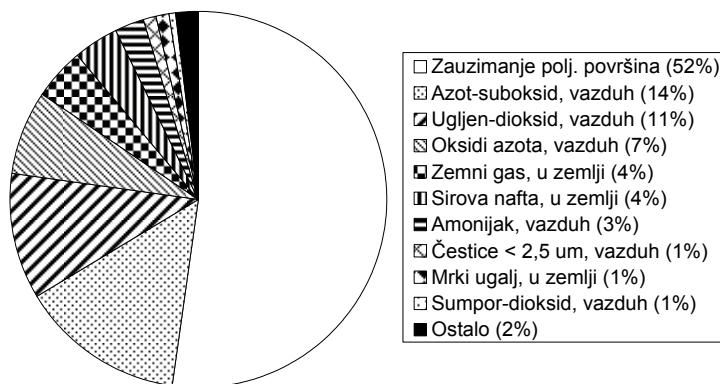
Tabela 7. Doprinos pojedinih kategorija uticaja i faza životnog ciklusa ukupnom uticaju životnog ciklusa 1000 kg biodizela (u Pt)
Table 7. Contribution of life cycle phases and impact categories to the overall impact of 1000 kg of biodiesel (in Pt)

Kategorije uticaja	Uticaj pojedinih faza ŽC biodizela (Pt)						Ukupno (Pt)
	Proizvodnja zrna	Sušenje zrna	Dobijanje ulja	Transesterifikacija	Sagorevanje biodizela		
Ljudsko zdravlje	13,9	2,4	11,4	6,7	113,7	148,1	
Globalno zagrevanje	-11,2	1,8	7,5	5,7	79,2	83,0	
Formiranje suspendovanih čestica	24,1	0,5	3,5	1,0	34,5	63,6	
Ostalo	1,0	0,0	0,3	0,1	0,0	1,4	
Ekosistem	277,1	1,3	5,3	3,9	52,0	339,6	
Globalno zagrevanje	-7,3	1,2	4,9	3,7	51,8	54,3	
Zauzimanje poljoprivrednog zemljišta	282,1	0,0	0,0	0,0	0,0	282,2	
Ostalo	2,2	0,1	0,4	0,2	0,2	3,1	
Resursi	27,4	2,4	9,0	14,2	0,0	53,0	
Ukupno (Pt)	318,3	6,1	25,6	24,9	165,7	540,7	



Slika 4. Doprinos jediničnih procesa ukupnom negativnom uticaju pojedinih faza proizvodnog lanca.
Figure 4. Contribution of unit processes to the overall negative impacts caused by the production chain.

ciklusa biodizela (slika 5). Posmatrano na nivou pojedinačnih elementarnih tokova „zauzimanje poljoprivredne površine“ prouzrokuje oko polovine uticaja u životnom ciklusu biodizela. Emisije u vazduh su odgovorne za oko 37%, a eksploracija rezervi fosilnih goriva za oko 9% uticaja životnog ciklusa biodizela. Emisije u vodu i zemljište imaju mali uticaj na formiranje ukupnog uticaja životnog ciklusa biodizela (<2%) (slika 5).



Slika 5. Doprinos pojedinačnih elementarnih tokova ukupnom uticaju životnog ciklusa.
Figure 5. Contribution of specific elementary flows to the overall impact of the life cycle.

ZAKLJUČCI

Prema rezultatima analize najveći izazov održivoj proizvodnji biodizela predstavljaju značajne poljoprivredne površine koju zauzimaju procesi u proizvodnom lancu biodizela. Zauzimanje poljoprivrednih površina je odgovorno za oko 80% štete koju procesi u vezi sa proizvodnim lancem biodizela nanose raznolikosti ekosistema i za 38% ukupnog negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela. Drugi faktor koji ima važan uticaj na formiranje rezultata LCA biodizela je količina i vrsta primenjenih mineralnih đubriva pri gajenju uljane repice. Rezultati analize su pokazali da su tokovi vezani za proizvodni lanac i primenu mineralnih đubriva odgovorni za skoro polovinu ukupnog negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela iz uljane repice. Samo emisije N_2O i NH_3 koje nastaju u procesima denitrifikacije i volatizacije azota iz amonijačno-nitratnog đubriva prouzrokuju skoro trećinu ukupnog negativnog uticaja proizvodnog lanca biodizela.

S obzirom na to da su prinosi uljane repice u Vojvodini znatno ispod prosečnih prinosa u Evropskoj uniji, potrebno je ispitati mogućnost povećanja prinosa uljane repice po jedinici površine uz zadržavanje inputa na postojećem nivou, pre svega racionalnijom upotreboom mineralnih đubriva i blagovremenim izvođenjem agrotehničkih operacija.

Zahvalnica

Autori su zahvalni Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansijskoj podršci ovog istraživanja — Projekat OI 172059.

LITERATURA

- [1] T. Tešić, F. Kiš, V. Janković, Mogućnost proizvodnje i korišćenja biodizela u AP Vojvodini, Monografija, Vojvođanska akademija nauka i umetnosti, Novi Sad, 2008.
- [2] D. Skala, S. Glišić, BIODIZEL – I. Istorijat, proizvodnja i standardi, Hem. ind. **58**(2) (2004) 73–78.
- [3] I.S. Stamenković, I.B. Banković-Ilić, O.S. Stamenković, V.B. Veljković, D.U. Skala, Kontinualni postupci dobijanja biodizela, Hem. ind. **63**(1) (2009) 1–10.
- [4] M. Lapuerta, O. Armas, J. Rodriguez-Fernandez, Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions, Prog. Energy Combust. Sci. **34** (2008) 198–223.
- [5] C.M. Gasol, J. Salvia, J. Serra, A. Anton, E. Sevigne, J. Rieradevall, X. Gabarrell, A life cycle assessment of biodiesel production from winter rape grown in Southern Europe, Biomass. Bioenerg. **40** (2012) 71–81.
- [6] J. Malca, F. Freire, Life-cycle studies of biodiesel in Europe: A review addressing the variability of results and modeling issues, Renew. Sust. Energ. Rev. **15** (2011) 338–351.
- [7] A. Iriarte, J. Rieradevall, X. Gabarrell, Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions, J. Clean. Prod. **18** (2010) 336–345.
- [8] A. Iriarte, J. Rieradevall, X. Gabarrell, Transition towards a more environmentally sustainable biodiesel in South America: The case of Chile, Appl. Energ. **91** (2012) 263–273.
- [9] SRPS ISO 14040: (2008): Upravljanje zaštitom životne sredine – Ocenvivanje životnog ciklusa – Principi i okvir. Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.

- [10] N. Jungbluth, Erdöl. Sachbilanzen von Energiesystemen, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 6, Swiss Centre for LCI, Dübendorf and Zurich, 2007.
- [11] A.L. Stephenson, J.S. Dennis, S.A. Scott, Improving the sustainability of the production of biodiesel from oilseed rape in the UK. *Process. Saf. Environ.* **86** (2008) 427–440.
- [12] N.D. Mortimer, P. Cormack, M.A. Elsayed, R.E. Horne, Evaluation of the comparative energy, global warming and socio-economic costs and benefits of biodiesel, Final Report, Resources research unit school of environment and development, Sheffield Hallam University, 2003.
- [13] S. Bernesson, D. Nilsson, P.A. Hansson, A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions. *Biomass. Bioenerg.* **26** (2004) 545–559.
- [14] T. Tsoutsos, V. Kouloumpis, T. Zafiris, S. Foteinis, Life Cycle Assessment for biodiesel production under Greek climate conditions, *J. Clean. Prod.* **18** (2010) 328–335.
- [15] F. Kiš, Ekonomsko vrednovanje ekoloških efekata prime-ne biodizela. Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2011.
- [16] Republički zavod za statistiku, Površine pod uljanom repicom u Republici Srbiji u periodu 2005-2009, http://webrzs.stat.gov.rs/axd/poljoprivreda/index.php?i_nd=1 (jun, 2012).
- [17] K. Refsgaard, N. Halberg, E.S. Kristensen, Energy utilization in crop and dairy production in organic and conventional livestock production systems. *Agric. Syst.* **57** (1998) 599–630.
- [18] Lj. Babić, M. Babić, M. Brkić, Sušenje i skladištenje uljanih kultura, u: T. Furman (Ed.), Biodizel – proizvodnja i korišćenja, Monografija, Institut za poljoprivrednu tehniku, Novi Sad, 1995, str. 73–99.
- [19] J. Schmidt, Life assessment of rapeseed oil and palm oil, Part 3: Life cycle inventory of rapeseed oil and palm oil, PhD thesis, Department of Development and Planning, Aalborg University, 2007.
- [20] F. Kiss, M. Jovanović, G. Bošković, Economic and ecological aspects of biodiesel production over homogeneous and heterogeneous catalysts, *Fuel Process. Technol.* **91** (2010) 1316–1320.
- [21] T. Nemecek, T. Kägi, S. Blaser, Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Ecoinvent report ver-sion 2.0, Vol. 15., Swiss Centre for LCI, Dübendorf and Zurich, 2007.
- [22] M. Spielmann, R. Dones, C. Bauer, Life Cycle Inventories of Transport Services, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 14., Swiss Centre for LCI, PSI, Dübendorf and Villigen, 2007.
- [23] R. Frischknecht, M. Faist Emmenegger, Strommix und Stromnetz. Sachbilanzen von Energiesystemen, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 6., Swiss Centre for LCI, PSI, Dübendorf and Villigen, 2007.
- [24] N. Jungbluth, M. Chudacoff, A. Dauriat, F. Dinkel, G. Doka, M. Faist Emmenegger, E. Gnansounou, N. Kljun, M. Spielmann, C. Stettler, J. Sutter, Life Cycle Inventories of Bioenergy, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 17., Swiss Centre for LCI, ESU. Dübendorf and Uster, 2007.
- [25] H. J. Althaus, M. Chudacoff, R. Hischier, N. Jungbluth, M. Osses, A. Primas, Life Cycle Inventories of Chemicals, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 8., Swiss Centre for LCI, Empa – TSL, Dübendorf, 2007.
- [26] D. Kellenberger, H. J. Althaus, N. Jungbluth, T. Künniger, Life Cycle Inventories of Building Products, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 7., Swiss Centre for LCI, Empa – TSL, Dübendorf, 2007.
- [27] M. Faist Emmenegger, T. Heck, N. Jungbluth, “Erdgas. Sachbilanzen von Energiesystemen”, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 6., Swiss Centre for LCI, PSI, Dübendorf and Villigen, 2007.
- [28] J. Sutter, Life Cycle Inventories of Highly Pure Chemicals, Ecoinvent report version 2.0, Vol. 19, Swiss Centre for LCI, ETHZ, Dübendorf and St. Gallen, 2007.
- [29] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, R. van Zelm, ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1st ed., Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Netherlands, 2009.
- [30] J.B. Guinée (Ed.), Life Cycle Assessment - An operational guide to the ISO standards, Part 2a, Ministry of Housing, Spatioal Planning and the Environment and Centre of Environmental Science, Leiden University, 2001.
- [31] M. Goedkoop, R. Spriensma, The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, 3rd ed., Amersfoort: PRÉ consultants, 2001.

SUMMARY

LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT OF BIODIESEL USING THE ReCiPe METHOD

Ferenc E. Kiss, Goran C. Bošković

University of Novi Sad, Faculty of Technology, Novi Sad, Republic of Serbia

(Scientific paper)

This paper presents the life cycle impact assessment (LCIA) results of biodiesel produced from rapeseed oil. The functional unit (FU) is defined as 3750 km of distance traveled by a truck fuelled with biodiesel. The reference flow is 1000 kg of biodiesel. The LCIA method used in the study is the ReCiPe method. At midpoint level the ReCiPe method addresses environmental issues within 18 impact categories. Most of these midpoint impact categories are further converted and aggregated into 3 endpoint categories (damage to human health, damage to ecosystem diversity, damage to mineral resource availability). The total impact of biodiesel's life cycle was estimated at 540 Pt/FU. The damage to ecosystem diversity (1.48×10^{-4} species·year/FU), the damage to human health (7.48×10^{-3} DALY/FU) and the damage to mineral resource availability (8.11×10^3 US\$/FU) are responsible for 63, 27 and 10% of the total negative impact in the life cycle of biodiesel, respectively. The results have revealed that only 4 impact categories are responsible for most of the impacts within the specific endpoint categories. These are impacts associated with global warming (3000 kg CO_{2,ekv.}/FU), particulate matter formation (12.4 kg PM_{ekv.}/FU), agricultural land occupation (6710 m²a./FU) and fossil fuel depletion (21168 MJ/FU). Greenhouse gases emitted in the life cycle of biodiesel (mainly N₂O and CO₂) are responsible for 56% of the damage caused to human health and for 16% of the damage caused to ecosystem diversity. Airborne emissions which contribute to particulate matter formation (NO_x, NH₃, PM and SO₂) are responsible for 43% of the damage caused to human health. Agricultural land occupation is responsible for 82% of the damage caused to the ecosystem diversity. Damage to mineral resource availability is almost entirely related to the depletion of fossil energy sources. The production chain of biodiesel and the combustion of biodiesel are responsible for 69% and 31% of the total impact of biodiesel's life cycle, respectively. The negative impact of the production chain is mainly related to biodiversity loss due to agricultural land occupation (38%) and the life cycle impacts of mineral fertilizers used in the production of rapeseed (47%). The environmental impact of biodiesel can be reduced by increasing the yield of rapeseed with more efficient use of fertilizers and optimization of agro-technical processes.

Keywords: Biodiesel • Rapeseed • Life cycle assessment • ReCiPe Method