

PROCENA UTICAJA PROIZVODNJE ULJANE REPICE NA ŽIVOTNU SREDINU LCA METODOM

Drugi deo: Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa

Ferenc Kiš^{1*}, Nataša Đurišić-Mladenović², Ana Marjanović-Jeromela³

Izvod

U radu su predstavljeni rezultati ocenjivanja uticaja proizvodnog lanca uljane repice u uslovima Vojvodine. Funkcionalna jedinica (FJ) je hektar (ha) oranične površine pod uljanom repicom, sa prinosom od 3.000 kg semena. Za procenu štete koja nastaje u životnoj sredini kao posledica emisija i upotrebe prirodnih resursa povezanih sa proizvodnim lancem uljane repice korišćena je ReCiPe 2016 (H) metoda i OpenLCA računarski program. Ukupna šteta naneta ljudskom zdravlju je procenjena na 0,0048 DALY, šteta zbog gubitka biodiverziteta je 0,0001 broj vrsta × god., dok šteta zbog eksploatacije geoloških rezervi minerala iznosi 167 USD po FJ. Zauzimanje oraničnih površina je odgovorno za 90% gubitka biodiverziteta povezanog sa proizvodnim lancem uljane repice, dok su životni ciklus dizel goriva, proizvodni lanac mineralnih đubriva i emisije azotovih jedinjenja iz poljoprivrednog zemljišta zajedno odgovorni za 74% štete nanete ljudskom zdravlju, odnosno 91% štete zbog utroška mineralnih resursa. Interesantno je primetiti da od blizu 1.000 različitih emisija i prirodnih resursa u proizvodnom lancu uljane repice, svega deset je odgovorno za najveći deo (preko 90%) ukupne štete u pojedinim oblastima zaštite.

Ključne reči: uljana repica, Vojvodina, ocenjivanje uticaja životnog ciklusa, ReCiPe 2016 metoda

Uvod

Ovaj rad predstavlja drugi deo istraživanja uticaja proizvodnog lanca uljane repice na životnu sredinu korišćenjem metode ocenjivanja životnog ciklusa (eng. life cycle assessment, LCA) i obuhvata treću i četvrtu fazu u okviru LCA analize. Analiza se oslanja na rezultate prvog dela rada (Kiš i sar., 2024) u okviru kojeg su prikazani ulazni i izlazni tokovi proizvodnje uljane repice, kao i izvod iz rezultata inventarisanja. Rezultat inventarisanja (eng. life cycle inventory results, LCI results) sadrži podatke o vrstama i količinama zagađujućih supstanci

koje se emituju u životnu sredinu, kao i o potrošnji prirodnih resursa u proizvodnom lancu uljane repice (tzv. ulazni i izlazni elementarni tokovi), ali ne i podatke o njihovom mogućem uticaju na kvalitet životne sredine. Iz tog razloga uvodi se treća faza LCA, tzv. ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (eng. life cycle impact assessment, LCIA), u kojoj se koriste različite metode kako bi se uticaj više stotina elementarnih tokova na životnu sredinu iskazao kroz rezultat manjeg broja indikatora kategorija uticaja i time olakšalo tumačenje i poređenje

Originalni naučni rad (Original Scientific Paper)

¹ Kiš F (0000-0002-8568-6114), Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija

² Đurišić-Mladenović N (0000-0002-5203-6051), Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Bul. cara Lazara 1, 21000 Novi Sad, Srbija

³ Marjanović-Jeromela A (0000-0002-7663-0696), Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksima Gorkog 30, 21000 Novi Sad, Srbija

* e-mail: fkiss@uns.ac.rs

dobijenih rezultata sa drugim LCA analizama. Na primer, u okviru LCIA faze, uticaj pedesetak različitih gasova sa efektom staklene bašte iz rezultata inventarisanja, moguće je iskazati zbirno, u ekvivalentima ugljen-dioksida sa jedinicom mere kg CO₂ ekv.

Postojeće LCIA metode se razlikuju po izboru kategorija uticaja, tj. aspekata zaštite životne sredine koje razmatraju, indikatora kategorija i primenjenih modela karakterizacije (European Commission, 2011). Jedan od načina podele LCIA metoda je u zavisnosti od toga da li je LCIA metoda usmerena na međupozicije ili na krajnje pozicije (ili završne tačke) u mehanizmu životne sredine (MŽS). Na međupozicijama MŽS se meri promena u pritisku na životnu sredinu usled emisija ili potrošnje resursa (porast zasićenosti zemljišta bazama, promena u koncentraciji zagađujućih supstanci u atmosferi, porast intenziteta infracrvenog zračenja, smanjenje geoloških rezervi minerala itd.), dok se na krajnjim pozicijama meri šteta koja će nastati u pojedinim oblasti-

ma zaštite kao posledica nastale promene u životnoj sredini (npr. gubitak biodiverziteta, oštećenje zdravlja, osiromašenje zaliha prirodnih resursa itd.) (Kiš, 2011). Oblasti zaštite (eng. areas of protection) u LCA su po pravilu ljudsko zdravlje, životna sredina ili prirodno okruženje, i prirodni resursi (Dewulf et al., 2015). Prilikom tumačenja rezultata LCA treba imati u vidu da je pouzdanost rezultata najveća na nivou rezultata inventarisanja, niža je na nivou međupozicija MŽS i najniža je na krajnjim pozicijama MŽS (Bare et al., 2000). Ipak, zbog mogućnosti agregiranja, odnosno združivanja rezultata i iskazivanja ukupnog uticaja životnog ciklusa kroz svega nekoliko indikatora štete, metode koje su usmerene na krajnje pozicije MŽS imaju veću upotrebnu vrednost za donošenje odluka (Bare et al., 2000), naročito kada je cilj poređenje uticaja dva ili više proizvoda.

Cilj ovog rada je prikazivanje i diskusija rezultata ocenjivanja uticaja proizvodnog lanca uljane repice proizvedene u uslovima koji se smatraju tipičnim za značajan deo Vojvodine.

Metode

Za ocenjivanje uticaja proizvodnog lanca uljane repice u radu se koristi ReCiPe 2016 metoda (Huijbregts et al., 2016). ReCiPe 2016 je jedna od novijih i široko korišćenih LCIA metoda. Ono što izdvaja ovu metodu od ostalih jeste mogućnost vrednovanja uticaja kako na međupozicijama, tako i na krajnjim pozicijama MŽS. Uticaj životnog ciklusa proizvoda se meri kroz rezultat 18 indikatora na međupozicijama i 22 indikatora na krajnjim pozicijama MŽS. ReCiPe 2016 omogućava da se rezultati 22 indikatora na krajnjim pozicijama grupišu i iskažu kroz tri agregatna indikatora ukupne štete u pojedinim oblastima zaštite (Kiš i Bošković, 2013a):

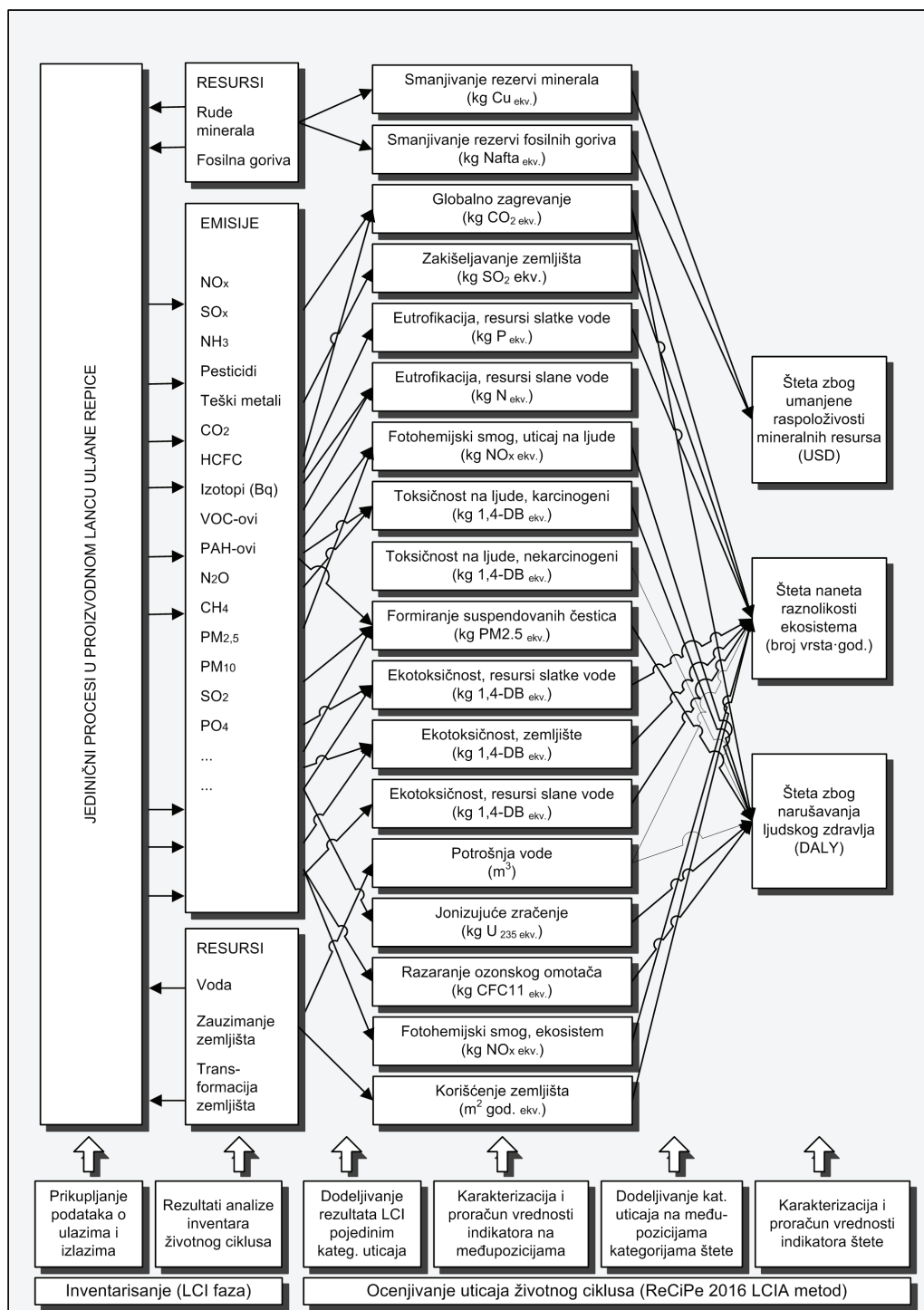
-Šteta naneta ljudskom zdravlju - računa se kao zbir izgubljenih godina života zbog prevremene smrti i izgubljenih godina „zdravog“

života usled oštećenja zdravlja usled izloženosti osobe zagađenju. Jedinica mere 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 prirodnih resursa. Jedinica mere je „broj vrsta × god.“.

-Šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa - procenjuje se na osnovu predviđenog rasta graničnih troškova eksploatacije mineralnih rezervi u budućnosti i efekta ovog rasta na troškove globalne ekonomije. Jedinica mere je USD.

Grafikon 1. daje pregled kategorija uticaja obuhvaćenih ReCiPe 2016 metodom i postupak vrednovanja.



Grafikon 1. Šematski prikaz ReCiPe 2016 LCIA metode

Figure 1. Schematic representation of the ReCiPe 2016 LCIA method

Proračun rezultata indikatora kategorija uticaja rađen je uz pomoć računarskog programa OpenLCA 1.10, korišćenjem verzije ReCiPe 2016 metode koja u ovom računarskom programu nosi oznaku „ReCiPe 2016 Endpoint (H)“.

Rezultati i diskusija

Rezultati ocenjivanja uticaja životnog ciklusa (LCIA) se iskazuju na tri nivoa: 1) na nivou indikatora kategorija uticaja na međupozicijama, 2) na nivou indikatora kategorija uticaja na krajnjim pozicijama MŽS, i 3) na nivou agregatnih indikatora ukupne štete u pojedinim oblastima zaštite. Ukoliko nije drugačije navedeno, svi rezultati se iskazuju u odnosu na funkcionalnu jedinicu, FJ (proizvodnja uljane

repice na površini od 1 ha, sa prosečnim prinosom semena od 3.000 kg ha⁻¹).

Rezultat ocenjivanja uticaja životnog ciklusa

Rezultati ocenjivanja uticaja životnog ciklusa (LCIA) na nivou rezultata indikatora kategorija uticaja na međupozicijama i na krajnjim pozicijama MŽS su prikazani u tabeli 1.

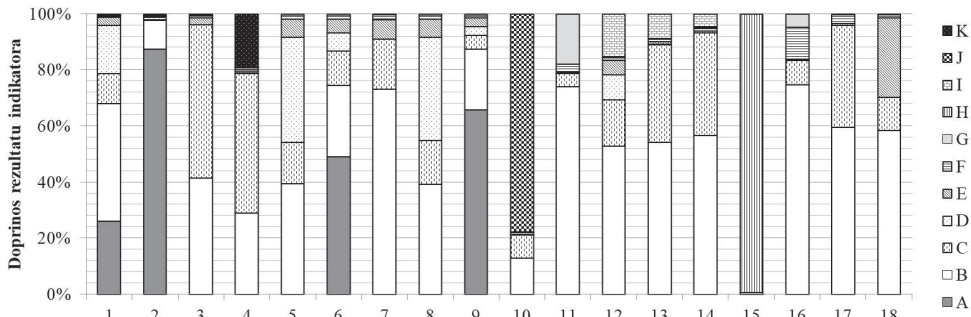
Tabela 1. Rezultati vrednovanja uticaja proizvodnog lanca uljane repice na nivou pojedinih kategorija uticaja
Table 1. Life cycle impact assessment results for specific impact categories

	Kategorije uticaja	MP	KP		
			LJZ	ŽS	MR
1.	Globalno zagrevanje	1,97E+3 kg CO ₂ ekv.	1,83E-3	5,51E-6	
2.	Razaranje ozonskog omotača	2,16E-2 kg CFC-11 ekv.	1,15E-5		
3.	Toksični uticaj na ljude, karcinogeni	1,39E+2 kg 1,4 DB ekv.	4,60E-4		
4.	Toksični uticaj na ljude, nekarcinogeni	1,78E+3 kg 1,4 DB ekv.	4,10E-4		
5.	Fotohemijski smog, uticaj na ljude	3,66E+0 kg NOx ekv.	3,33E-6		
6.	Formiranje susp. čestica	3,25E+0 kg PM2.5 ekv.	2,04E-3		
7.	Jonizujuće zračenje	5,71E+1 kg U235 ekv.	4,85E-7		
8.	Fotohemijski smog, uticaj na ekosistem	3,78E+0 kg NOx ekv.		4,88E-7	
9.	Zakiseljavanje zemljišta	1,54E+1 kg SO ₂ ekv.		3,27E-6	
10.	Eutrofikacija, slatka voda	1,25E+0 kg P ekv.		8,36E-7	
11.	Eutrofikacija, slana voda	1,48E-1 kg N ekv.		2,52E-10	
12.	Ekotoksičnost, zemljište	3,77E+3 kg 1,4 DB ekv.		4,30E-8	
13.	Ekotoksičnost, slana voda	1,10E+2 kg 1,4 DB ekv.		1,16E-8	
14.	Ekotoksičnost, slatka voda	8,18E+1 kg 1,4 DB ekv.		5,66E-8	
15.	Korišćenje zemljišta	1,01E+4 m ² .god. ekv		8,95E-5	
16.	Potrošnja vode	1,60E+1 m ³	3,55E-5	2,16E-7	
17.	Smanjivanje rezervi minerala	1,25E+1 kg Cu ekv.			2,89E+0
18.	Smanjivanje rezervi fosilnih goriva	4,54E+2 kg nafta ekv.			1,64E+2
	Ukupna šteta:		4,79E-3	9,99E-5	1,67E+2

MP - rezultati indikatora na međupozicijama; KP - rezultati indikatora na krajnjim pozicijama (veličina štete); LJZ – veličina štete nanete ljudskom zdravlju (DALY); ŽS – veličina štete nanete raznolikosti ekosistema (broj vrsta × god.); MR - veličina štete zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa (USD).

Kumulativni uticaj gasova sa efektom staklene bašte (eng. greenhouse gases, GHG) nastalih u procesima koji čine proizvodni lanac uljane repice je jednak uticaju 1.970 kg ugljen-dioksida (Tabela 1). Pri proceni uticaja na globalno zagrevanje, ReCiPe 2016 ne razmatra eventualne pozitivne efekte apsorbovanja atmosferskog ugljenika tokom procesa fotosinteze, niti pripisuje negativne efekte emisijama ugljen-dioksida poreklom iz biomase (tj. karakterizacioni faktor za CO₂ iz biomase je 0 kg CO₂_{ekv.} kg⁻¹). U tom smislu, rezultat indikatora kategorije uticaja globalno zagrevanje se može tumačiti kao ugljenični otisak (kao što je definisano u ISO 14067:2018) uljane repice, koji prema proračunima iznosi 0,65 kg CO₂_{ekv.} po

kg semena uljane repice. Rezultati indikatora na međupozicijama takođe pokazuju da se u procesima koji čine proizvodni lanac uljane repice troši oko 454 kg ekvivalenta nafte (nafta_{ekv.}). U ReCiPe 2016 metodi se uzima da je gornja toplotna moć 1 kg nafta_{ekv.} 45,8 MJ što znači da je za dobijanje 3.000 kg uljane repice potrebno 20.793 MJ energije iz fosilnih izvora. Odnosno, za dobijanje 1 kg uljane repice proizvedene u uslovima Vojvodine potrebno je oko 6,93 MJ energije iz fosilnih izvora (računato na osnovu gornje toplotne moći goriva). Doprinos pojedinih procesa rezultatu indikatora kategorija uticaja na međupozicijama su prikazani na Grafikonu 2.



Grafikon 2. Doprinos pojedinih procesa rezultatu indikatora kategorije uticaja na međupozicijama

Napomena: Brojevi na horizontalnoj osi označavaju pojedine kategorije uticaja (vidi tabelu 1). Slovne oznake se odnose na pojedinačne procese (vidi tabelu 2).

Figure 2. Contribution of individual processes to the midpoint impact category indicator result

Note: Numbers on the horizontal axis represent individual impact categories (see Table 1). Letter labels correspond to individual processes (see Table 2).

Šteta koja nastaje po funkcionalnoj jedinici u pojedinim oblastima zaštite je procenjena na 4,79E-3 DALY, 9,99E-5 br. vrstixgod., odnosno 1,67E+2 USD (Tabela 1). Doprinos pojedinih procesa rezultatu indikatora kategorija uticaja na krajnjim pozicijama prikazan je i tabelarno i grafički (Tabela 2; Grafikon 3). U oblasti zaštite ljudskog zdravlja svega nekoliko procesa prouzrokuje preko 95% ukupne štete. Životni ciklus mineralnih đubriva je odgovoran za 65% ukupnog negativnog uticaja. Proizvodni lanac mineralnih đubriva prouzrokuje oko 34%, dok emisije N₂O, NO_x i NH₃ iz zemljišta

koje nastaju volatizacijom i denitrifikacijom azota iz amonijačno-nitratnog đubriva prouzrokuju oko 31% ukupne štete. Emisije koje nastaju u proizvodnom lancu dizel goriva i pri njegovom sagorevanju su odgovorne za oko 13% ukupne štete u oblasti zaštite ljudskog zdravlja. Iznenađujuće je velik značaj procesa u vezi sa proizvodnjom, održavanjem, popravkama i postupcima na kraju životnog veka (eng. end of life, EoL) poljoprivrednih mašina na formiranje rezultata u okviru ove oblasti zaštite. Naime, ovi procesi su odgovorni za blizu 20% ukupne štete zbog oboljenja ili oštećenja zdravlja.

Ranija istraživanja su ukazivala na relativno mali doprinos ovih procesa ukupnom uticaju životnog ciklusa, stoga se često zanemaruju u LCA analizama (Kiš, 2011). U oblasti zaštite životne sredine blizu 90% štete nastaje zbog zauzimanja poljoprivrednih površina za proizvodnju uljane repice. Eksploataciji geoloških rezervi minerala i fosilnih goriva uglavnom

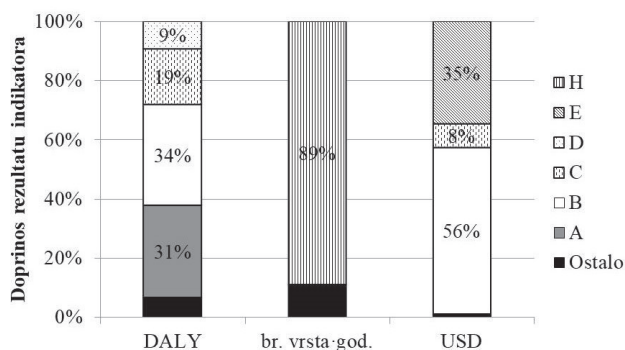
doprinosu dva procesa: proizvodni lanac mineralnih đubriva (sa oko 56%) i proizvodni lanac dizel goriva (sa oko 35%). Pored ova dva procesa, značajan udeo imaju i procesi u vezi sa životnim ciklusom poljoprivrednih mašina i građevinskih objekata koji su odgovorni za oko 8% štete u ovoj oblasti (Tabela 2).

Tabela 2. Procentualni doprinos pojedinih procesa rezultatu indikatora na krajnjim pozicijama
Table 2. Percentage contribution of individual processes to the endpoint impact category indicator result

	Procesi	LjZ	RE	MR
A	Emisija azotovih jedinjenja iz min. đubriva	31,1%	3,6%	0,0%
B	Proizvodni lanac min. đubriva	34,1%	3,8%	56,4%
C	Proizvodnja, održavanje, popravke i EoL poljoprivrednih mašina i građevinskih objekata	18,9%	1,2%	7,9%
D	Sagorevanje dizel goriva	9,2%	1,2%	0,0%
E	Proizvodni lanac dizel goriva	3,5%	0,3%	34,6%
F	Proizvodni lanac pesticida	1,0%	0,1%	0,9%
G	Proizvodni lanac setvenog materijala	0,5%	0,3%	0,3%
H	Korišćenje polj. zemljišta	0,0%	88,9%	0,0%
I	Emisija pesticida u životnu sredinu	0,0%	0,0%	0,0%
J	Emisija fosfora u vodu (erozijom)	0,0%	0,7%	0,0%
K	Unos teških metala sa min. đubrivima u životnu sredinu	1,6%	0,0%	0,0%
	Ukupno	100,0%	100,0%	100,0%

LjZ – šteta zbog narušavanja ljudskog zdravlja; RE – šteta naneta raznolikosti ekosistema; MR – šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa

Napomena: Proizvodni lanac obuhvata deo životnog ciklusa koji počinje sa ekstrakcijom sirovina i završava izlazom gotovog proizvoda iz fabrike (engl. cradle-to-gate), međutim, u ovom radu proizvodni lanac u većini slučajeva obuhvata i transport datog proizvoda do regionalnog/lokalnog skladišta.



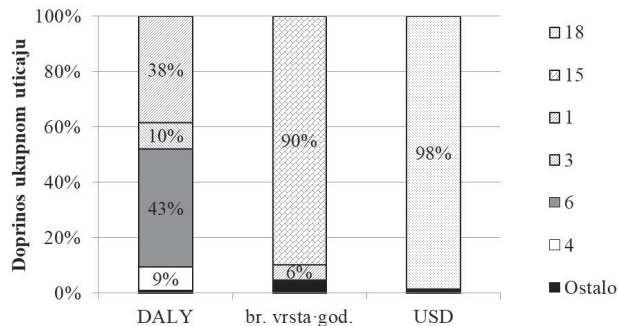
Grafikon 3. Doprinos pojedinih procesa rezultatu agregatnog indikatora štete u pojedinim oblastima zaštite.
Napomena: Slovnne oznake se odnose na pojedinačne procese (vidi Tabelu 2).

Figure 3. Contribution of individual processes to the damage category indicator result
Note: Letter labels correspond to individual processes (see Table 2).

Iz rezultata koji se tiču doprinosa pojedinih kategorija uticaja agregatnih indikatora štete u pojedinim oblastima zaštite se vidi da je svega nekoliko kategorija uticaja odgovorno za najveći deo ukupnog uticaja u pojedinim oblastima zaštite, a to su: globalno zagrevanje, formiranje suspendovanih čestica, zauzimanje poljoprivrednih površina i smanjenje rezervi fosilnih goriva (Grafikon 4).

Preko 80% negativnog uticaja na ljudsko zdravlje se pripisuje emisijama u vazduh koje doprinose formiranju čestica (43%) i gasovima sa efektom staklene bašte (38%) koji se oslobađaju u proizvodnom lancu uljane repice. Značajan uticaj imaju još i emisije kancerogenih i nekancerogenih supstanci sa toksičnim uticajem na ljude koje zajedno prouzrokuju oko 19% štete u ljudskom zdravlju. Kumulativan doprinos rezultata indikatora ostalih kategorija uticaja (jonizujuće zračenje, formiranje fotohemijskog smoga, razaranje ozonskog omotača i potrošnja vode) ukupnom uticaju na ljudsko zdravlje je svega 1% (Tabela 1). Ukupan uticaj u okviru kategorije uticaja formiranja suspendovanih

čestica je procenjen na 3,25 kg PM_{2.5} ekv. (Tabela 1), i posledica je pre svega emisije amonijaka (38%), oksida azota (30%), oksida sumpora (18%) i suspendovanih čestica (13%). Emisije koje nastaju u životnom ciklusu mineralnog đubriva (proizvodni lanac i emisija azotovih jedinjenja nakon primene) su odgovorne za blizu 75% štete u okviru ove kategorije uticaja, dok ostatak uglavnom prouzrokuju procesi i emisije povezani sa životnim ciklusom poljoprivrednih mašina, građevinskih objekata i dizel goriva (Grafikon 2). Uticaj emisija u proizvodnom lancu uljane repice na globalno zagrevanje je procenjen na 1.970 kg CO₂ ekv. (Tabela 1). Interesantno je primetiti, da iako se u proizvodnom lancu uljane repice emituje svega 1,94 kg N₂O naspram 1.300 kg CO₂ (Kiš i sar., 2024), zbog 293 puta većeg uticaja prethodnog kao gasa sa efektom staklene bašte u odnosu na CO₂, emisija N₂O je odgovorna za 32% uticaja u okviru globalnog zagrevanja. U životnom ciklusu biodizela N₂O uglavnom nastaje u procesu denitrifikacije amonijum-nitratnog đubriva.



Grafikon 4. Doprinos pojedinih kategorija uticaja rezultatu agregatnog indikatora štete

Napomena: Brojevi na horizontalnoj osi označavaju pojedine kategorije uticaja (vidi Tabelu 1).

Figure 4. Contribution of individual impact categories to the damage category indicator result

Note: Numbers on the horizontal axis represent individual impact categories (see Table 1)

Šteta koja nastaje u životnoj sredini se u ReCiPe 2016 metodi vrednuje kroz gubitak biodiverziteta na određenoj teritoriji. Gubitak biodiverziteta u proizvodnom lancu uljane repice je uglavnom posledica zauzimanja površina radi poljoprivredne proizvodnje (90%) i globalnog zagrevanja izazvanog emisijama gasova sa efektom staklene bašte (6%). Kumulativan doprinos rezultata indikatora ostalih

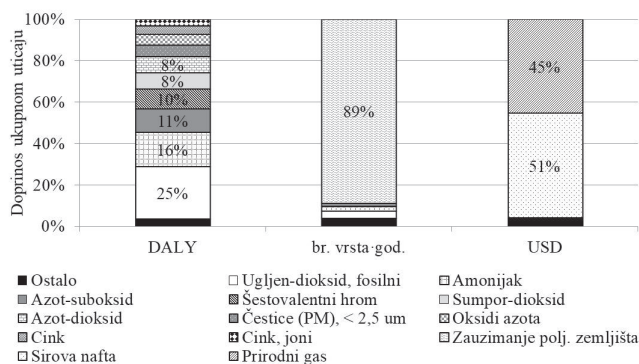
kategorija uticaja (zakišeljavanje zemljišta, fotohemijški smog, eutrofrikacija vodnih resursa, ekotoksičnost, potrošnja vode i transformacija prirodnih staništa) ukupnom uticaju na raznolikost ekosistema je svega 4% (Tabela 1).

Šteta zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa je skoro u potpunosti posledica

smanjenja mineralnih rezervi fosilnih goriva (98%). U proizvodnom lancu 3.000 kg uljane repice koriste se fosilna goriva u količini od 454 kg nafta_{ekv.} (Tabela 1). Preko polovine (oko 58%) ukupne potrošnje fosilnih goriva u proizvodnom lancu uljane repice se vezuje za proizvodni lanac mineralnih đubriva, dok se u proizvodnom lancu dizel goriva, koji se troši u poljoprivrednim mašinama, troši dodatnih 129 kg ekvivalenta nafte, odnosno 28% ukupne potrošnje (Grafikon 2).

ReCiPe 2016 omogućuje vrednovanje uticaja na životnu sredinu skoro 1.000 različitih elementarnih tokova (oko 750 emisija i oko 250 različitih prirodnih resursa) iz rezultata

inventarisanja proizvodnog lanca uljane repice. Međutim, rezultati pokazuju da je svega 10 elementarnih tokova odgovorno za 97% ukupnog uticaja proizvodnog lanca uljane repice na ljudsko zdravlje (Grafikon 5). To su pre svega emisije u vazduh kao što su ugljen-dioksid, amonijak, azot-suboksid, oksidi azota, sumpor-dioksid, suspendovane čestice, ali i emisije šestovalentnog hroma u vodu, kao i emisije cinka u vodu i zemljište. Zauzimanje zemljišta je odgovorno za oko 90% štete nanete biodiverzitetu, dok potrošnja prirodnog gasa i sirove nafte u proizvodnom lancu uljane repice prouzrokuje oko 96% štete zbog umanjene raspoloživosti mineralnih resursa.



Grafikon 5. Doprinos pojedinih elementarnih tokova rezultatu agregatnog indikatora u različitim oblastima zaštite
 Figure 5. Contribution of individual elementary flows to the damage category indicator result

Četvrtina štete nanete ljudskom zdravlju je posledica emisije ugljen-dioksida fosilnog porekla. Preko polovine (oko 55%) CO₂ nastaje u proizvodnom lancu mineralnih đubriva. Procesi u vezi sa proizvodnjom i sagorevanjem dizel goriva koje koristi poljoprivredna mehanizacija pri izvođenju agrotehničkih operacija i transporta materijala i semena uljane repice prouzrokuju oko 29% ukupne emisije CO₂. Relativno značajan udeo procesa u vezi sa proizvodnjom, održavanjem i EoL poljoprivrednih mašina i građevinskih objekata u ukupnoj emisiji CO₂ fosilnog porekla (oko 14%), ukazuje na značajne energetske zahteve ovih procesa.

Emisije amonijaka, azot-dioksida i azot-suboksida prouzrokuju oko 40% ukupne štete u oblasti zaštite ljudskog zdravlja i skoro u celosti su posledica primena azotnih đubriva za ishranu uljane repice. Ovaj podatak ukazuje

na relativno veliki značaj optimizacije primene mineralnih đubriva sa aspekta zaštite kvaliteta životne sredine. Ostale emisije u vazduh sa relativno velikim doprinosom ukupnoj šteti u oblasti zaštite ljudskog zdravlja su: SO₂, NO_x i čestice (PM_{2,5}) i za njihov nastanak su uglavnom odgovorni procesi u vezi sa životnim ciklusom dizel goriva i poljoprivrednih mašina i opreme, kao i proizvodni lanac mineralnih đubriva.

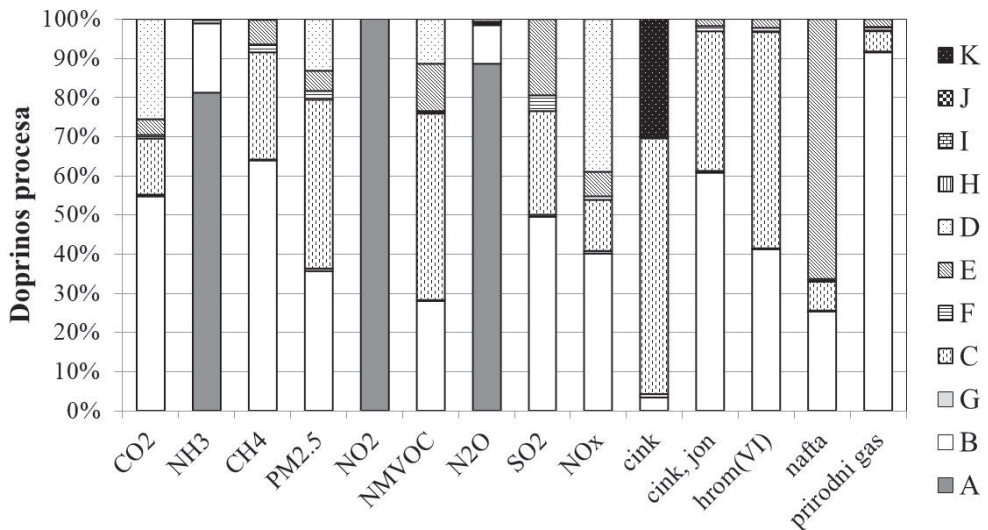
Od emisija u vodu i zemljište najveći doprinos ukupnoj šteti u oblasti ljudskog zdravlja imaju šestovalentni hrom (hrom(VI)) i cink koji zajednički prouzrokuju oko 17% ukupne štete. Dublja analiza ecoinvent procesa je pokazala da oko 60% ukupne emisije ovog oblika hroma u vodu nastaje u proizvodnom lancu poljoprivrednih mašina, uglavnom u procesu proizvodnje nerđajućeg čelika, pri varenju i

topljenju hromnog metala, dok se ostatak emituje pri proizvodnji sirovina za proizvodnju amonijačno nitratnog đubriva. Interesantno je primetiti da mineralna đubriva nisu najveći izvor emisije cinka u zemljište, već su to poljoprivredne mašine, odnosno habanje guma čime se unosi oko 75% ukupne količine cinka u zemljište.

Procesi u vezi sa proizvodnjom amonijum-nitratnog đubriva su odgovorni za preko 90% ukupne eksploatacije rezervi prirodnog gasa u proizvodnom lancu uljane repice. Velika potrošnja prirodnog gasa pri proizvodnji amonijum-nitratnog đubriva je pre svega posledica tehnologije proizvodnje, u kojoj se potrebna

količina vodonika dobija katalitičkim procesom razgradnje (cepanja) molekula metana prisutnog u prirodnom gasu pomoću vodene pare na visokim temperaturama (tzv. „parni reforming metana“).

Potrošnja dizel goriva za realizaciju agrotehničkih i transportnih aktivnosti doprinosi sa 66% ukupnoj eksploataciji geoloških rezervi sirove nafte u proizvodnom lancu uljane repice. Procesi u vezi sa proizvodnjom mineralnih đubriva doprinose sa oko 25%, a procesi u vezi sa proizvodnjom, održavanjem i EoL poljoprivrednih mašina i građevinskih objekata doprinose sa oko 7%.



Grafikon 6. Doprinos pojedinih procesa emisiji/utrošku elementarnog toka

Napomena: oznake se odnose na pojedinačne procese (vidi Tabelu 2).

Figure 6. Contribution of individual processes to emissions and resource consumption

Note: Labels correspond to individual processes (see Table 2).

Senzitivna analiza

U okviru senzitivne analize testira se moguću uticaj promene vrednosti pojedinih promenljivih na ukupan uticaj proizvodnog lanca uljane repice na životnu sredinu. U osnovnoj varijanti pretpostavlja se da ne dolazi do ispiranja azota odnosno da je $FRAC_{leach} = 0$ (vidi jednačinu 2 u radu Kiš i sar., 2024). U okviru senzitivne analize ispituje se moguća promena u rezultatima LCIA ukoliko se pretpostavi da se 24% azota iz mineralnih đubriva ispira

u obliku nitrata ($FRAC_{leach} = 0,24$), što je vrednost koju Međuvladin panel o klimatskim promenama (eng. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) predlaže za regione sa vlažnijom klimom (Hergoualc'h et al., 2019). Ispiranje azota utiče na rezultate dvojako: direktno, kroz zagađivanje podzemnih voda, i indirektno, kroz doprinos emisiji N_2O (vidi jednačinu 2 u radu Kiš i sar., 2024). U okviru senzitivne analize ispitaće se i uticaj izabrane metode za procenu direktnih emisija N_2O iz

mineralnih đubriva na rezultate LCA, odnosno ukoliko se umesto IPCC Tier 1 metode (jednačina 1 u radu Kiš i sar., 2024) koristi GNOC kalkulator (eng. Global Nitrous Oxide Calculator, GNOC) za utvrđivanje ovih emisija. Prema klasifikaciji IPCC, GNOC spada u grupu Tier 2 metoda, jer omogućava vrednovanje N_2O emisija uvažavajući neke lokalno specifične uslove. GNOC pristup (Köble, 2014) se zasniva na istraživanju Stehfest and Bouwman (2006) koji su analizom rezultata velikog broja primarnih istraživanja razradili jednačine za procenu direktnih emisija N_2O u zavisnosti od karakteristika zemljišta, pH vrednosti zemljišta, sadržaja organskog ugljenika u zemljištu i nekih klimatskih uslova. U okviru senzitivne

analize ispituje se i uticaj potrošnje goriva na rezultate LCA, pretpostavljajući da je ona 78 l ha^{-1} (u skladu sa Nikolić i sar., 2005) umesto u osnovnoj varijanti pretpostavljene potrošnje od 125 l ha^{-1} (Kiš i sar., 2024). U okviru senzitivne analize razmatra se u kojoj meri bi se rezultati LCA promenili ukoliko bi se u inventar proizvodnog lanca uljane repice uključila i količina atmosferskog CO_2 koju uljana repica apsorbuje u procesu fotosinteze, kao i mogući uticaj teških metala na LCA kada se uzme u obzir i količina teških metala koja se iznosi prinosom (vidi dodatna objašnjenja u Kiš i sar., 2024, poglavlje „Emisije“). Pregled vrednosti promenljivih i njihov uticaj na LCIA rezultate na krajnjim tačkama MŽS je dat u Tabeli 3.

Tabela 3. Osetljivost rezultata LCIA na promenu u vrednostima nekih promenljivih
 Table 3. The sensitivity of LCIA results to changes in the values of certain variables

	Promenljiva	Jedinica mere	Ulazna vrednost		Promena u vrednosti		
			stara	nova	LJZ	ŽS	R
I	Ispiranje azota iz đubriva	FRACleach	0 ^(a)	0,24	+3%	0%	0%
II	Direktne emisije N_2O iz min. đubriva	$\text{kg } N_2O\text{-N kg}^{-1} \text{ N}$ u đubrivu	0,0050 ^(a)	0,0043	-1%	0%	0%
III	Potrošnja goriva	l ha^{-1}	125,2 ^(a)	78,2	-5%	-1%	-13%
IV	Iznošenje teških metala prinosom	kg ha^{-1}	A+B u tabeli 5 ^(a)	D u tabeli 5 ^(a)	-16%	0%	0%
V	Vezivanje atmosferskog ugljenika u semenu	$\text{kg } CO_2 \text{ ha}^{-1}$	0	6424 ^(a)	-124%	-18%	0%

(a) Podatak je iz prvog dela istraživanja (Kiš i sar., 2024); LJZ – ljudsko zdravlje (Daly); ŽS – životna sredina (br. vrsta po godini); R – resursi (USD)

Rezultati senzitivne analize pokazuju da promena u pretpostavljenom stepenu ispiranja nitrata ima mali uticaj na LCA rezultate. U slučaju pretpostavke da se 24% azota u mineralnim đubrivima ispira, i time doprinosi zagađenju podzemnih voda, rezultat indikatora štete u ljudskom zdravlju bi se povećao za svega 3%, dok je uticaj na gubitak biodiverziteta zanemarljiv (Tabela 3). Korišćenje Tier 2 metode za procenu direktnih emisija N_2O iz mineralnih đubriva takođe malo utiče na rezultate. Zapravo, uprošćeni emisioni faktor koji predlaže IPCC ($0,005 \text{ kg } N_2O\text{-N direktno/kg N}$ prema Hergoualch et al., 2019) je veoma blizu vrednosti do koje se došlo korišćenjem

GNOC softvera ($0,0043 \text{ kg } N_2O\text{-N direktno/kg N}$, Tabela 3) koji zahteva brojne inpute od strane korisnika (npr. pH vrednost zemljišta, klimatski uslovi), te greška zbog korišćenja Tier 1 metode u prosečnim uslovima za Vojvodinu nije velika. Kao što se i očekivalo potrošnja goriva ima veliki uticaj na oblast zaštite: prirodni resursi, kako zbog značajnog doprinosa proizvodnog lanca goriva eksploataciji geoloških rezervi sirove nafte (Grafikon 2) tako i zbog relativno velike razlike u potrošnji goriva u idealnim i prosečnim uslovima (78 l ha^{-1} naspram 125 l ha^{-1}). Pod pretpostavkom idealnih uslova proizvodnje, kao što je to definisano u Nikolić i sar. (2005), uticaj proizvodnog lanca

uljane repice na ljudsko zdravlje bi se smanjio za 5%, a potrošnja mineralnih resursa za 13% (Tabela 3). Ukoliko se prilikom inventarisanja teških metala uzmu u obzir i količine koje se uklanjaju iz zemljišta putem prinosa, ukupan uticaj u oblasti ljudskog zdravlja bi bio niži za oko 16%, dok u ostalim oblastima zaštite ne bi došlo do promene. Iako se ovaj način prikazivanja primenjuje u nekim bazama podataka, on je problematičan, jer može navesti na pogrešan zaključak da se prinosom trajno uklanjaju teški metali iz životne sredine, što naravno nije slučaj (detaljno pojašnjeno u prvom delu istraživanja, Kiš i sar., 2024). Ukoliko bi se apsorbovani ugljen-dioksid uključio u inventar kao negativna emisija CO₂, rezultat indikatora kategorije uticaja globalno zagrevanje bi se smanjio sa 1.970 kg CO₂ ekv./FJ (Tabela 1) na -4.454 kg CO₂ ekv./FJ sa značajnim implikacijama po vrednosti rezultata u oblastima zaštite: ljudsko zdravlje i kvalitet ekosistema (Tabela 3). Međutim, kako je naglašeno u prvom delu istraživanja (Kiš i sar., 2024), prave efekte vezivanja atmosferskog ugljenika je moguće utvrditi samo analizama koje obuhvataju celokupni životni ciklus proizvoda, vodeći računa o momentu i obliku reemisije ugljenika u životnu sredinu. Iz tog razloga, ovakvo iskazivanje treba izbegavati u parcijalnim LCA analizama koje su usmerene samo na pojedine faze životnog ciklusa proizvoda.

Potencijalno bitni aspekti koji nisu razmatrani u radu

Iznošenje žetvenih ostataka sa parcele

U uslovima Vojvodine slama uljane repice se uglavnom zaorava što je i pretpostavka u ovom radu. Međutim, u specifičnim slučajevima kada se žetveni ostaci delom ili u celosti iznose sa parcele potrebno je prilagoditi LCA metodu kako bi ovi aspekti bili uključeni. U slučajevima kada se slama delom ili u celosti valorizuje na tržištu, ona postaje sporedni proizvod sistema i u skladu sa ISO 14040:2006 potrebno je primeniti neku od tehnika za rešavanje problema multifunkcionalnosti, što je samo po sebi izazov (više o problemu multifunkcionalnosti vidi u Kiš i Bošković, 2013b). Ipak, sa aspekta

inventarisanja najveći izazov predstavlja procena posledice uklanjanja ostataka na životnu sredinu. Iznošenje žetvenih ostataka utiče na sadržaj organske materije u zemljištu, emisije iz zemljišta, plodnost zemljišta i očekivane prinose, te u LCA treba uključiti i ove aspekte (Kiš, in press). Trenutno ne postoji standardizovan postupak za procenu uticaja iznošenja žetvenih ostataka, ali u malobrojnim studijama u kojima su ovi aspekti razmatrani uglavnom se kvantifikuju samo efekti dodatne količine mineralnih đubriva primenjenih kako bi se nadomestile količine hraniva iznete sa žetvenim ostacima. U svom preglednom radu Kiš (in press) je identifikovao svega nekoliko LCA studija u kojima se razmatraju i neki drugi efekti, poput smanjenja emisija azotovih jedinjenja iz zemljišta zbog izbegnute degradacije ostataka u zemljištu ili uticaja iznošenja žetvenih ostataka na sadržaj organskog ugljenika u zemljištu.

Emisije gasova sa efektom staklene bašte zbog promena u nameni ili načinu korišćenja zemljišta

Zemljište je značajan rezervoar ugljenika i procentualno mali gubitak organskog ugljenika u zemljištu, zbog promene u nameni ili načinu korišćenja zemljišta, može dovesti do značajnih emisija ugljen-dioksida (Cherubini and Jungmeier, 2010). Pored zemljišta, organski ugljenik se nalazi i u nadzemnoj i podzemnoj (korenov sistem) biomasi, stoga svaka promena u njenoj masi po jedinici površine dovodi do emisije ugljenika, što se po pravilima LCA pripisuje proizvodu čija proizvodnja je dovela do te promene. Stoga pretpostavka o prethodnom načinu upotrebe zemljišta može imati veliki uticaj na rezultate LCA. Na primer, proizvodnja uljane repice na površini koja je ranije bila korišćena kao pašnjak (travnata površina), može dovesti do značajnih emisija GHG (Kiss, 2017). S druge strane, ukoliko se uljana repica gaji na površini koja se odavno koristi kao oranica (npr. duže od 20 godina), što je tipično za uslove u Vojvodini, po pravilu se ne računa sa ovim efektima, jer se pretpostavlja da je razlika u količini ugljenika u zemljištu i biomasi između dve oranice koje se koriste na isti ili veoma sli-

čan način zanemarljiva (Kiš, in press). Poseban slučaj predstavlja kada se uljana repica gaji u energetske svrhe, npr. za preradu u biogoriva. U tom slučaju preovlađuje mišljenje da je potrebno računati sa emisijama ugljen-dioksida iz zemljišta i biomase do kojeg dolazi indirektno, zbog prevođenja prirodnih staništa u oranice na nekoj drugoj lokaciji, kako bi se nadomestio ispad u proizvodnji hrane zbog korišćenja površina u energetske svrhe. Ovaj fenomen u LCA se naziva posredna promena upotrebe zemljišta (eng. indirect land use change, iLUC) što je po pravilu praćeno značajnim emisijama GHG (Cherubini and Jungmeier, 2010). Na primer, iLUC efekti proizvodnje uljane repice u svrhu dobijanja biodizela mogu se kretati između 46 g CO₂_{ekv}/MJ (Al-Riffai et al., 2010) i 1.434 g CO₂_{ekv}/MJ biodizela (Lapola et al., 2010), što u mnogim slučajevima prevazilazi uticaj GHG koji nastaju neposredno u proizvodnom lancu same uljane repice (32 g CO₂_{ekv}/MJ biodizela prema direktivi (EU) 2018/2001). Treba naglasiti da sa iLUC efektima ne treba računati kada se uljana repica koristi kao sirovina za proizvodnju hrane i hraniva, stoga se odluka o uključivanju ovih efekata ne može doneti pre utvrđivanja namene uljane repice.

Potrošnja vode od strane uljane repice

Trenutno ne postoji široko prihvaćena i standardizovana metoda za procenu potrošnje vode poreklom iz atmosferskih padavina od strane biljaka koje se analiziraju LCA metodom (u tom pogledu se najviše odmaklo u radu Pfister et al., 2009). Iz tog razloga, ovaj aspekt se po pravilu zanemaruje u LCA studijama i najvažnijim LCI bazama podataka kao što su ecoinvent (Wernet et al., 2016) ili AGRIBALYSE (Koch and Salou, 2020). Podatak o potrošnji vode (iskazan kroz rezultat indikatora kategorije uticaja potrošnja vode u Tabeli 1) zbog toga obuhvata samo količinu vode koja se koristi za navodnjavanje (ukoliko se usev navodnja), za piće, za potrebe čišćenja i u tehnološke svrhe (npr. u industrijskim pogonima za proizvodnju mineralnih đubriva).

Ograničenja analize i predlozi za buduća istraživanja

Različite emisije NO_x, PM, CO i ugljovodnika u zavisnosti od opterećenja motora Posmatrajući na nivou kategorija štete, emisije koje nastaju pri sagorevanju dizel goriva u poljoprivrednim mašinama u najvećoj meri doprinose rezultatu indikatora štete u oblasti ljudskog zdravlja sa udelom od oko 10%. Međutim, u pojedinim kategorijama na međupozicijama, produkti sagorevanja dizel goriva mogu biti odgovorni za preko 40% uticaja (Grafikon 2), što ukazuje na potencijalni značaj ovog aspekta. U nedostatku preciznijih podataka, u radu su korišćeni prosečni emisijski faktori u odnosu na potrošnju goriva iz EMEP/EEA 2019 studije (Winter and Dore, 2019). Dok su neke emisije zaista u dobroj korelaciji sa potrošnjom goriva (CO₂, SO₂, teški metali), druge (npr. PM, NO_x, CO, ugljovodnici) u velikoj meri zavise od načina korišćenja mašina, pre svega snage i opterećenja (Winter and Dore, 2019). Na primer, Nemecek and Kägi (2007) su ukazali da emisija CO može da se kreće u rasponu 3-6 g po litri dizel goriva, u zavisnosti od opterećenja motora pri izvođenju agrotehničke operacije. S obzirom na potencijalni značaj ovih emisija na rezultate indikatora pojedinih kategorija uticaja, njihovom utvrđivanju je potrebno posvetiti više pažnje.

Uticaji u vezi sa proizvodnjom, održavanjem i EoL poljoprivrednih mašina

Procena uticaja u vezi sa proizvodnjom, održavanjem i EoL mašina i građevinskih objekata se često izostavlja iz LCA analiza zbog pretpostavke da ovi procesi malo doprinose ukupnim rezultatima (Kiš, 2011). Međutim, ova analiza je pokazala da tokovi u vezi sa ovim procesima nisu zanemarljivi i čine oko 20% ukupnog uticaja u oblasti zaštite ljudskog zdravlja, odnosno odgovorni su za oko 10% uticaja u okviru kategorije štete koja se odnosi na eksploataciju geoloških rezervi minerala i fosilnih goriva (Grafikon 4). Njihov uticaj je najizraženiji u kategorijama koje vrednuju uticaj karcinogenih i nekarcinogenih emisija sa toksičnim uticajem na ljude u kojima su

odgovorne za blizu 60% ukupnog uticaja. Ovi procesi obuhvataju širok spektar aktivnosti, uključujući i proizvodnju, održavanje (zamena ulja i filtera), popravke i uticaje u vezi sa EoL mašinama i građevinskim objektima (vidi opis ovih procesa u Nemecek and Kägi, 2007). Međutim, dublja analiza LCIA rezultata je pokazala da čak 30% ukupnog uticaja u vezi sa ovim procesima uzrokuje proizvodni lanac traktora i pluga koji se koriste za obradu zemljišta. Ovako veliki udeo se može delom objasniti i neobično niskom produktivnošću pojedinih mašina u njihovom životnom veku koja se pretpostavlja u ecoinvent bazi podataka. Naime, u ecoinventu se pretpostavlja da se traktori tokom njihovog radnog veka angažuju svega 6.000-7.200 sati (500-600 sati godišnje), dok plugovi u svom životnom veku obrade svega 240 ha (20 ha godišnje) (Nemecek and Kägi, 2007). Ovako niska angažovanost poljoprivredne mehanizacije tokom njihovog životnog veka je utvrđena u prosečnim uslovima u Švajcarskoj (u ecoinvent-

tu se pozivaju na švajcarske podatke pri proceni prosečnog angažovanja mašina) i svakako nije reprezentativna za velika poljoprivredna gazdinstva koja, radi povraćaja investicije, teže što boljem iskorišćavanju raspoloživih sredstava. Interesantno je primetiti da su autori ovog rada preračunali uticaje korišćenjem podataka (očekivani životni vek, tipična masa, godišnja produktivnost poljoprivredne mehanizacije) jednog velikog poljoprivrednog preduzeća u Vojvodini i uticaji su bili za oko 50% niži u odnosu na ecoinvent vrednosti. Trenutno, autori ecoinvent baze podataka ne preporučuju izmenu podrazumevanih vrednosti životnog veka ili produktivnosti poljoprivrednih mašina, jer čak i manje odstupanje od ovih vrednosti (npr. 10%) značajno utiče na pozadinske procese i uvodi greške (Nemecek and Kägi, 2007). Stvaranje fleksibilnijeg okvira, koji bi omogućio izmenu originalnih vrednosti korišćenjem ažurnijih ili lokalno specifičnih vrednosti, svakako je problem na kojem treba raditi.

Zaključak

ReCiPe 2016 LCIA metoda omogućuje vrednovanje u okviru 18 kategorija uticaja na međupozicijama. Međutim, rezultati analize su pokazali da svega nekoliko kategorija prevalentno utiče na ukupnu štetu, a to su globalno zagrevanje, formiranje suspendovanih čestica, zauzimanje poljoprivrednih površina i smanjenje rezervi fosilnih goriva. Ukupan uticaj GHG emitovanih u proizvodnom lancu 3.000 kg uljane repice je ekvivalentan uticaju 1.968 kg CO₂, uticaj zagađujućih supstanci koje doprinose formiranju čestica (amonijak, suspendovane čestice, oksidi azota i sumpora) je procenjen na 3,25 kg PM_{2,5ekv.}, dok je potrošnja fosilnih goriva procenjena na 454 kg nafta_{ekv.}, odnosno 6,93 MJ/kg semena uljane repice (računato na osnovu gornje toplotne moći goriva).

Emisije azotovih jedinjenja iz zemljišta, proizvodni lanac mineralnih đubriva i životni ciklus dizel goriva (proizvodni lanac i sagorevanje) su odgovorni za 74% štete nanete ljudskom zdravlju, odnosno 91% štete zbog utroška mineralnih resursa. Gubitak biodi-

veziteta se skoro u celosti pripisuje efektima zauzimanja poljoprivrednih površina za gajenje uljane repice. Rezultati analize ukazuju na relativno veliki udeo procesa i tokova u vezi sa proizvodnjom, održavanjem i postupcima na kraju životnog veka poljoprivrednih mašina i građevinskih objekata u rezultatima indikatora štete u oblastima zaštite ljudskog zdravlja (19%) i mineralnih resursa (8%), pa se ne preporučuje isključivanje mogućih efekata ovih procesa i tokova iz analize.

ReCiPe 2016 metoda je vrednovala uticaj oko 750 različitih emisija sa štetnim uticajem na životnu sredinu, kao i uticaj oko 250 različitih oblika prirodnih resursa koji se troše ili koriste u proizvodnom lancu uljane repice. Međutim, rezultat LCIA analize pokazuje da je svega desetak elementarnih tokova odgovorno za preko 90% ukupne štete u pojedinim oblastima zaštite. To su, pre svega, emisije u vazduh (ugljen-dioksid, amonijak, azot-suboksid, oksidi azota, sumpor-dioksid i suspendovane čestice), emisije određenih teških metala u vodu i zemljište (šestovalentni

hrom i cink), ali i eksploatacija nekih prirodnih resursa, pre svega obradivih površina, prirodnog gasa i sirove nafte.

Rezultati LCIA analize mogu se koristiti za određivanje onih procesa i emisija, čijom se racionalizacijom ili boljom kontrolom mogu postići pozitivni efekti sa aspekta zaštite životne

sredine, a to su smanjenje utroška mineralnih đubriva po jedinici prinosa ili smanjenje potrošnje dizel goriva za realizaciju njihovih i transportnih aktivnosti, ali i bolja kontrola desetak emisija koje najviše doprinose štetnom uticaju proizvodnog lanca uljane repice.

Zahvalnica

Autori su zahvalni Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije na finansijskoj podršci ovog istraživanja, broj

ugovora 451-03-47/2023-01/200134 i 451-03-47/2023-01/200032.

Doprinos autora

Konceptualizacija, F.K. i N. Đ-M.; Metodologija, F.K.; Softver, F.K.; Priređivanje podataka, F.K., N. Đ-M. i A. M-J.; Istraživanje, F.K., N. Đ-M. i A. M-J.; Upravljanje projektom,

F.K.; Nadzor, N. Đ-M. i A. M-J.; Vizualizacija, F.K.; Validacija, N. Đ-M. i A. M-J.; Pisanje — originalna priprema nacrtu rada, F.K.; Pisanje — pregled i uređivanje, N. Đ-M. i A. M-J.

Literatura

Al-Riffai P, Dimaranan B, Laborde D (2010): Global trade and environmental impact study of the EU biofuels mandate. International Food Policy Research Institute (IFPRI).
 Bare JC, Hofstetter P, Pennington DW, Udo de Haes A (2000). Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. *Int. J. Life Cycle Assess.* Vol 5 (6): 319-326. <https://doi.org/10.1007/BF02978665>
 Cherubini F, Jungmeier G (2010): LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15: 53-66. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0124-2>
 Dewulf J, Benini L, Mancini L, Sala S, Blengini GA, Ardente F, ... Pennington D (2015): Rethinking the area of protection “natural resources” in life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.* Vol 49 (9): 5310-5317. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00734>
 European Commission (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition. Publications Office of the European Union, Luxemburg.
 Hergoualc’h K, Akiyama H, Bernoux M, Chirinda N, Prado AD, Kasimir Å, Weerden T (2019): Chapter 11: N2O emissions from

managed soils, and CO2 emissions from lime and urea application. In: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
 Huijbregts MA, Steinmann ZJ, Elshout PM, Stam G, Verones F, Vieira MDM, van Zelm R (2016): ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization.
 Kiss F (2017): Overview of methodological challenges associated with LCI modelling of biofuels: A practitioner’s perspective. In: Book of Abstracts: SETAC Europe 23rd LCA Case Study Symposium. 27-28 November, Barcelona, Spain, [CD-ROM]. Brussels, Belgium: SETAC Europe.
 Kiš F (2011): Ekonomsko vrednovanje ekoloških efekata primene biodizela, Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
 Kiš F (in press): Procena uticaja životnog ciklusa biogoriva na globalno zagrevanje: metodološki izazov i izvor nesigurnosti [Quantifying the Life Cycle Global Warming Impact of Biofuels: A Methodological Challenge and a Source of Uncertainty]. U:

- Zbornik radova Naučni skup – Potencijal i efekti korišćenja biomase u Republici Srbiji. 2-3 novembar 2022, Beograd, Srbija.
- Kiš F, Vasin J, Milovac Ž, Zeremski T, Milić S, Savić J (2024): Procena uticaja proizvodnje uljane repice na životnu sredinu LCA metodom. Prvi deo: Inventarisanje životnog ciklusa. Selekcija i semenarstvo, Vol 30 (1): 13-34. <https://doi.org/10.5937/SelSem2401013K>
- Kiš F, Bošković G (2013a): Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa biodizela ReCiPe metodom [Life cycle impact assessment of biodiesel using the ReCiPe method]. Hemijska industrija, 67 (4): 601-613. <https://doi.org/10.2298/HEMIND120801102K>
- Kiš F, Bošković G (2013b): Influence of the Chosen Allocation Method on the Life Cycle Assessment Results of Biodiesel. In: Proc. 3rd International Congress “Engineering, Environment and Materials in Processing Industry. 4-6 March, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 298-309.
- Köble R (2014): The Global Nitrous Oxide Calculator – GNOC - Online Tool Manual. JRC Technical Report, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Ispra, Italy.
- Koch P, Salou T (2020): AGRIBALYSE®: methodology, agricultural stage–version 3.0. June 2020. ADEME. Angers. France.
- Lapola DM, Schaldach R, Alcamo J, et al. (2010): Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. P. Natl. Acad. Sci. USA. 107: 3388-3393.
- Nemecek T, Kägi T (2007): Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent V2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dubendorf, CH.
- Nikolić R, Brkić M, Klinar I, Furman T (2005): Potrebe za tečnim gorivima. U Furman i sar. (ured.), Biodizel alternativno i ekološko tečno gorivo. Departman za poljoprivrednu tehniku, Novi Sad, 11-40.
- Pfister S, Koehler A, Hellweg S (2009): Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. Environ. Sci. Technol. Vol 43 (11): 4098-4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>.
- Stehfest E, Bouwman L (2006): N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global annual emissions. Nutr. Cycling Agroecosyst. Vol 74 (3): 207-228. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9000-7>
- Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. Int. J. Life Cycle Assess. 21: 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Winter M, Dore C (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Non-road mobile sources and machinery. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF RAPESEED PRODUCTION USING THE LCA METHOD

Part Two: Life Cycle Impact Assessment

Ferenc Kiš, Nataša Đurišić-Mladenović, Ana Marjanović-Jeromela

Summary

This constitutes the second segment of an environmental life cycle assessment (LCA) study on oilseed rape cultivation in the prevalent conditions of Vojvodina, Serbia. The paper presents the results of the life cycle impact assessment (LCIA) phase of the LCA. The functional unit (FU) is one hectare of agricultural land used for winter rapeseed cultivation, with a reference flow of 3,000 kg of seeds, representing the average yield per hectare. The assessment is focused on the rapeseed production chain, concluding with the transportation of oilseeds to regional silos. The environmental impact assessment employed the ReCiPe 2016 (H) LCIA method, using the OpenLCA software. The study found that the total damage to human health was estimated at 0.0048 DALY, while damage due to biodiversity loss was calculated as 0.0001 species per year. Additionally, the damage resulting from the exploitation of geological mineral reserves was determined to be 167 USD per FU. Notably, land occupation was identified as the primary contributor to biodiversity loss, accounting for 90% of the associated damage within the rapeseed production chain. Meanwhile, the life cycle of diesel fuel, the mineral fertilizer production chain, and nitrogen compound emissions from agricultural land collectively accounted for 74% of the damage to human health and 91% of the damage attributed to mineral resource consumption. On the midpoint level, the ReCiPe 2016 (H) LCIA method calculates results within 18 impact categories, including the impact on global warming and fossil fuel depletion. The cumulative impact of greenhouse gases (GHG) emitted in the rapeseed production chain is equivalent to the impact of 1,970 kg of carbon dioxide. The carbon footprint of rapeseed was estimated at 0.65 kg CO_{2,eq.} per kg of rapeseed. In the production chain of 3,000 kg of rapeseed, 454 kg of oil equivalent is consumed, which means that approximately 6.93 MJ of energy from fossil sources is required to produce 1 kg of rapeseed under the prevalent conditions in Vojvodina. The ReCiPe 2016 method identified and assessed the impact of approximately 750 different emissions with adverse effects on the environment, as well as the impact of around 250 different forms of natural resources consumed or used in the rapeseed production chain. However, the results of the LCIA analysis show that only about ten elementary flows are responsible for over 90% of the total damage in specific protection areas. These primarily include air emissions (carbon dioxide, ammonia, nitrogen oxides, nitrous oxide, sulphur dioxide, and suspended particles), emissions of certain heavy metals into water and soil (hexavalent chromium and zinc), as well as the exploitation of some natural resources, notably arable land, natural gas, and crude oil. The results of the LCIA analysis can be utilized to identify processes and emissions where rationalization or improved control can yield the greatest environmental benefits. The most substantial environmental improvements are expected through the reduction of mineral fertilizer consumption per unit yield and the decrease in diesel fuel usage for field and transportation activities. Furthermore, enhanced control over emissions that contribute significantly to the adverse impacts of the rapeseed production chain can also lead to substantial environmental enhancements.

Key words: rapeseed, Vojvodina, life cycle impact assessment, ReCiPe 2016 method

Primljen: 10.01.2024.
Prihvaćen: 26.02.2024.