

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Milica M. Perić

**PROCENA EKOLOŠKE OPRAVDANOSTI
KORIŠĆENJA BRZORASTUĆE BILJKE
MISCANTHUS GIGANTEUS KAO
OBNOVLJIVOG IZVORA ENERGIJE
UPOTREBOM METODE OCENE
ŽIVOTNOG CIKLUSA**

doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Milica M. Perić

**THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF
BIOENERGY CROP *MISCANTHUS
GIGANTEUS* AS A RENEWABLE ENERGY
RESOURCE BY USING LIFE CYCLE
ASSESSMENT METHODOLOGY**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Mentori:

dr Branko Bugarski

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

dr Mirko Komatina

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije:

dr Marko Rakin

redovni profesor, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Aleksandar Kojović,

vanredni profesor, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Dragi Antonijević

naučni savetnik, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane:

Procena ekološke opravdanosti korišćenja brzorastuće biljke *Miscanthus giganteus* kao obnovljivog izvora energije upotrebom metode Ocene životnog ciklusa

Rezime

Predmet naučnog istraživanja ove doktorske disertacije je ekološka analiza opravdanosti korišćenja brzorastuće biljke miskantusa (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) za dobijanje energije korišćenjem metode Ocene životnog ciklusa.

Osnivanje i kultivacija energetske plantaže miskantusa je uveliko započeto u nekoliko zemalja Evrope. U Srbiji još uvek nije otpočelo plantažno gajenje miskantusa i nije izvršena analiza potencijalnih uticaja na životnu sredinu tokom gajenja i upotrebe biomase miskantusa u energetske svrhe. Samim tim, nije zabeležena ni primena metode Ocene životnog ciklusa (eng. „*Life Cycle Assessment*“ skr. LCA) koja se u naučnim istraživanjima u svetu uveliko koristi za ekološku validaciju obnovljivih izvora energije.

Osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije je formiranje modela analize životnog ciklusa miskantusa koji obuhvata proračun masenih i energetske bilansa, svih ulaza i izlaza jediničnih procesa, (svake pojedinačne operacije u životnom ciklusu miskantusa), i kvantifikovanje količine emitovanih polutanata i njihovog uticaja na životnu sredinu kroz unapred definisane kategorije uticaja. Ispitivana su dva energetska lanca korišćenja Miskantusa: korišćenje briketa od Miskantusa za dobijanje toplotne energije i korišćenje miskantusa za dobijanje pirolitičkog dizela. Svaki energetski lanac je ispitan analizom dva scenarija: prvi scenario oslikava trenutno ili najrealnije stanje a drugi scenario oslikava optimizovano stanje koje podrazumeva veću energetske efikasnost, veću produktivnost i manje štetne uticaje na životnu sredinu.

Osnovna metoda istraživanja u ovoj disertaciji je metoda Ocene životnog ciklusa (LCA). Ekološka analiza energetske lanca miskantusa je sprovedena uz pomoć LCA softvera: analiza energetske lanca briketa miskantusa je sprovedena korišćenjem softvera „SimaPRO“, a energetske lanca proizvodnje pirolitičkog dizela korišćenjem softvera „GREET“. Za proračun promene organskog ugljenika u zemljištu usled gajenja miskantusa, korišćena je metodologija razvijena od strane Internacionalnog Panela za Klimatske Promene

(IPCC). Kvantifikovanje emisija polutanata (ugljen-dioksida, ugljen-monoksida, oksida azota, azot sub-oksida, oksida sumpora, metana, ugljo-vodonika) prilikom upotrebe poljoprivrednih mašina, vršeno je uz pomoć baze podataka Švajcarske državne Kancelarije za Zaštitu Životne Sredine. Za fazu ocenjivanja uticaja na životnu sredinu briketa miskantusa korišćen je midpoint pristup „ReCiPe“ metode i razmatrano je 14 uticajnih kategorija.

Rezultati analize energetskog lanca briketa miskantusa dobijeni u ovoj disertaciji pokazuju da je briketiranje najštetnija operacija u toku životnog ciklusa usled velike količine utrošene električne energije i niske produktivnosti procesa. Negativni uticaji na životnu sredinu u ovom energetskom lancu potiču od upotrebe fosilnih goriva za dobijanje električne energije i njihovog neefikasnog korišćenja u zastarelim poljoprivrednim mašinama. Od prosečnog godišnjeg prinosa miskantusa gajenog na černozeu, dobija se $23,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ briketa čijim se sagorevanjem oslobađa 365,5 GJ energije koja se može upotrebiti za grejanje 383 m^2 porodičnih kuća. Ista ova količina energije se može dobiti sagorevanjem 22 t briketa lignita ili sagorevanjem 23 t ogrevnog drveta. U slučaju kad se za kultivaciju miskantusa ne koristi savremena mehanizacija, gajenje miskantusa na 1 ha zaparloženog poljoprivrednog zemljišta može dovesti do godišnje sekvestracije ugljenika od 0,08 do 0,91 t. U slučaju kad se koristi modernija mehanizacija, sekvestracija ugljenika je moguća samo u slučaju kad su ostvareni maksimalni prinosi miskantusa. I pored ovoga, dokazano je da su briketi miskantusa ekološki opravdanija alternativa za dobijanje toplotne energije u odnosu na ugalj i drvo u trinaest od četrnaest ispitivanih kategorija. U drugom energetskom lancu dokazano je da je sinteza pirolitičkog dizela od miskantusa ekološki pogodnija alternativa samo ukoliko se vodonik za proces stabilizacije sirovog bio-ulja dobija interno, od vodene frakcije pirolitičkog bio-ulja, a ne eksterno, reformacijom prirodnog gasa. Zbog toga se prilikom interne sinteze pirolitičkog dizela, dobijaju oko 38 % niži prinosi pirolitičkog dizela. U toku ove putanje proizvodnje dizela, emituje se 96 % manje CO_2 i 84 % manje CH_4 , ali i oko 60 % više čestica, 30 % više oksida sumpora i 56 % više azot sub-oksida u odnosu na konvencionalnu putanju.

Zaključuje se da se proces dobijanja pirolitičkog bio-dizela od miskantusa još uvek ne može smatrati ekološki podobnijom alternativom u odnosu na konvencionalni postupak

dobijanja ovog goriva. S tim u vezi, osnivanje energetske plantaže miskantusa je opravdano samo u slučaju proizvodnje briketa ali ne i proizvodnje pirolitičkog dizela. Predlažu se dalja istraživanja kao i eksperimentalna potvrda modela.

Ključne reči: biomasa, toplotna energija, obnovljivi izvori energije, ocena životnog ciklusa, zaštita životne sredine, energetska zasada, briketi, Miskantus, piroliza, sagorevanje, pirolitički dizel, energetska efikasnost

Načna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Biohemijско inženjerstvo i biotehnologija

UDK broj:

The environmental assessment of the bioenergy crop *Miscanthus giganteus* as a renewable energy resource by using Life Cycle Assessment methodology

Abstract

The subject matter of the research in this dissertation is the environmental assessment of fast-growing bioenergy plant miscanthus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) for the sustainable energy use by applying the Life Cycle Assessment methodology.

So far, the largescale cultivation of miscanthus plants has been implemented in several EU countries. Unfortunately, in the Republic of Serbia, the largescale cultivation of miscanthus has not started yet and the potential environmental impacts from cultivation and use of miscanthus biomass for energy purposes have not yet been verified. Also, there are no records of the application of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology which is widely used in scientific research around the world for the environmental assessment of renewable energy sources and many other.

The main goal of the research presented in this doctoral dissertation is to present a model of a miscanthus life cycle, which includes calculation of mass and energy balances, inputs and outputs, for each single unit process (each operation) in a miscanthus life cycle, as well as to quantify emissions of most relevant pollutants and their impact on the environment through the analysis of several complementary impact categories. Two miscanthus bioenergy chains were examined: first bioenergy chain considers the use of miscanthus briquettes for the production of heat energy and the second one considers the production of pyrolytic diesel from miscanthus biomass. Each bioenergy chain is tested through the analysis of two different scenarios: the first scenario reflects the present state or most common situation while the second should reflect an optimized, future state that entails greater energy efficiency, higher productivity and less harmful impacts on the environment.

The basic method used for the research presented in this dissertation is the Life Cycle Assessment method. The environmental assessment of the miscanthus bioenergy chains was carried out by using most suitable LCA software: the analysis of the miscanthus briquettes

bioenergy chain was carried out by using the "SimaPRO" software and the miscanthus pyrolytic diesel production bioenergy chain by using the "GREET" software. For the assessment of soil organic carbon changes due to the cultivation of a miscanthus crops, the methodology developed by the International Climate Change Panel (IPCC) was used. For the quantification of the pollutant emissions (such as: carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxide, nitrogen oxide, sulfur oxide, methane, hydrocarbons) during the use of agricultural machinery, database made by Swiss Federal Office for the Environment was used. For the environmental impact assessment of the miscanthus briquettes bioenergy chain, the "ReCiPe" midpoint method was used considering 14 impact categories.

The results of the LCA for the miscanthus briquettes bioenergy chain identify briquetting as the most environmentally harmful operation in the life cycle due to the large amount of consumed electricity and the low productivity of the process. The negative impacts on the environment come from the consumption of large amounts of fossil fuels for electricity production and also from inefficient combustion of fossil fuels (such as diesel) in obsolete agricultural machinery. From the average annual yield of miscanthus cultivated on chernozem soil, $23.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ briquettes are obtained which when combusted release 365.5 GJ of energy that can be used for heating of 383 m^2 of family houses. The same amount of energy can be obtained by the combustion of 22 t lignite briquettes or 23 t of fire-wood. In a case when the obsolete mechanization is used, cultivation of miscanthus per 1 hectare of harvested agricultural land leads to annual sequestration of carbon from 0.08 to 0.91 t. In a case when more modern machinery is used, carbon sequestration is only possible when maximal yields of miscanthus are obtained. Compared to coal and fuel-wood, miscanthus briquettes are more environmentally friendly alternative for thermal energy production when both obsolete and modern mechanization are considered. In the second bioenergy chain, the synthesis of pyrolytic diesel from the miscanthus can be considered a more environmentally friendly option only when the hydrogen for the stabilization process of raw bio-oil is obtained internally (from a fraction of the pyrolytic bio-oil and not from the natural gas), which in return results in the lower yields of obtained pyrolytic diesel for 38%. In this pyrolytic production pathway, 96% less CO_2 and 84% less CH_4 are being emitted but 60% more

particles, 30% more sulfur oxides and 56% more nitrogen sub-oxide are emitted compared to the conventional diesel production pathway.

It is concluded that synthesis of the pyrolytic diesel from miscanthus still can not be considered as a more environmental friendly alternative to the conventional method for diesel production. In this regard, the establishment of miscanthus bioenergy plantations is justified only for the production of briquettes, not for the production of pyrolytic diesel. Further research is proposed as well as the experimental confirmation of the model.

Key words: biomass, heat, renewable energy sources, life cycle assessment, environmental protection, energy plantations, briquettes, Miscanthus, pyrolysis, combustion, pyrolytic diesel, energy efficiency

Scientific field: Technological engineering

Scientific subfield: Biochemical engineering and biotechnology

UDC number:

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mentorima Branku Bugarskom i Mirku Komatini na ogromnom strpljenju i svesrdnoj pomoći prilikom izrade ove disertacije.

Takođe zahvaljujem se članovima komisije: dr Dragom Antonijeviću, dr Marku Rakinu i dr Aleksandru Kojoviću za korisne savete koji su omogućili da ova disertacija bude još bolja.

Posebno se zahvaljujem dr Željku Dželetoviću na saradnji i na ustupanju podataka u vezi sa uzgojem miskantusa u Srbiji koji su bili od presudne važnosti za izradu ove disertacije.

Zahvaljujem se i Milanu Đorđeviću kao i celoj katedri za Mehanizaciju Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na čelu sa prof dr Nenadom Zrnićem, što su mi omogućili nesmetano korišćenje SimaPro softvera.

Zahvaljujem se i dr Martinu Kaltschmitt-u i dr Inge Stupak Møller na pomoći oko oblikovanja predloga istraživanja za ovu doktorsku disertaciju kao i dr Valentini Castellani na obuci u vezi sa primenom LCA softvera SimaPro. Posebno se zahvaljujem dr Andrei Đuki, dr Milijani Paprici i dr Mirjani Kijevčanin na neizmernoj podršci i korisnim savetima.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici bez čije podrške ova disertacija ne bi ugledala svetlost dana.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Pregled stanja životne sredine i upotrebe obnovljivih izvora energije u svetu.....	1
1.2. Pregled stanja životne sredine i upotrebe obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji.....	5
1.2.1. Potencijal biomase u Republici Srbiji	5
1.3. Predmet i opravdanost istraživanja	7
1.4. Cilj, metod i doprinos	8
1.5. Pregled prethodnih istraživanja.....	12
1.5.1. Istraživanja u vezi primene poljoprivredne mehanizacije: utrošci energije i goriva, produktivnost	12
1.5.2. Istraživanja studija analize životnog ciklusa Miskantusa kao obnovljivog izvora energije.....	14
1.5.3. Miskantus kao sirovina za dobijanje toplotne i/ili električne energije	14
1.5.4. Miskantus kao sirovina za dobijanje pirolitičkog dizela	18
2. Biomasa – definicija, vrste, primena	21
2.1. Uopšteno o biomasi	21
2.2. Tehnologije konverzije biomase	22
2.2.1. Sagorevanje	22
2.2.2. Piroliza.....	25
2.3. Energetski usevi.....	29
2.4. Miskantus kao obnovljiv izvor energije.....	31
2.4.1. Uopštene karakteristike	31
2.4.2. Potencijal za uzgoj miskantusa u agroekoškim uslovima Srbije.....	31
3. Metoda Ocene životnog ciklusa.....	37

3.1.	Faza definisanja svrhe i obima istraživanja	39
3.2.	Faza analize inventara životnog ciklusa	41
3.3.	Faza ocene uticaja životnog ciklusa.....	42
3.3.1.	Potencijal za klimatske promene (CC)	44
3.3.2.	Potencijal za oštećivanje ozonskog omotača (OD)	48
3.3.3.	Potencijal zakišeljavanja zemljišta (TA)	50
3.3.4.	Potencijal za eutrofikaciju (FE, ME).....	50
3.3.5.	Potencijal za toksičnost (HT, TET, FET, MET)	52
3.3.6.	Potencijal za formiranje čestica (PMF)	52
3.3.7.	Potencijal za formiranje fotohemijskih oksidanata (POF)	53
3.3.8.	Potencijal zagađenja jonizujućim zračenjem (IR).....	54
3.3.9.	Potencijal za iscrpljivanje vodnih rezervi (WD)	54
3.3.10.	Potencijal za iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva (FD).....	55
3.4.	Faza interpretacije rezultata LCA studije	55
4.	Životni ciklus miskantusa.....	56
4.1.	Ocena životnog ciklusa energetskog lanca briketa od miskantusa	60
4.1.1.	Cilj i obim studije, granice sistema i funkcionalna jedinica.....	60
4.1.2.	Analiza inventara životnog ciklusa briketa od miskantusa	61
4.1.3.	Analiza inventara životnog ciklusa referentnih fosilnih sistema (briketa od lignita i ogrevnog drveta)	69
4.1.4.	Analiza ocene uticaja na životnu sredinu energetskog lanca briketa miskantusa	70
4.2.	Ocena životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa	72
4.2.1.	Cilj i obim studije, granice sistema i funkcionalna jedinica.....	72

4.2.2.	Analiza inventara životnog ciklusa pirolitičkog dizela	73
4.2.3.	Uporedna analiza sa konvencionalnom proizvodnjom dizela	81
4.2.4.	Analiza ocene uticaja na životnu sredinu proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa.....	83
5.	Rezultati i interpretacija.....	84
5.1.	Ocena uticaja na životnu sredinu životnog ciklusa briketa miscantusa.....	84
5.1.1.	Uporedna analiza sa referentnim fosilnim sistemima – briketima lignita i ogrevnim drvetom	93
5.1.2.	Energetski ulazi i izlazi, EO:EI odnos.....	94
5.1.3.	Analiza osetljivosti – Budući scenario	97
5.1.4.	Procena SOC i emisija gasova sa efektom staklene bašte sa obradive površine na kojoj je gaji miskantus.....	102
5.1.5.	Procena direktnih i indirektnih emisija N ₂ O.....	104
5.1.6.	Procena skladištenja ugljenika u zemljištu.....	108
5.1.7.	LUC usled gajenja miskantusa	110
5.2.	Ocena uticaja na životnu sredinu proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa	111
5.2.1.	Analiza osetljivosti – Integrirana - H ₂ interna putanja	118
5.2.2.	Uporedna analiza proizvodnje dizela pirolitičkom, integrisanom-H ₂ internom putanjom i konvencionalnom putanjom.....	119
5.2.3.	Uporedna analiza proizvodnje dizela pirolitičkom, distribuiranom-H ₂ eksternom putanjom i integrisanom-H ₂ Internom putanjom.....	123
6.	Zaključak	126
6.1.	Ocena životnog ciklusa energetskog lanca briketa od miskantusa	126
6.2.	Ocena životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa	128

6.3.	Metoda Ocene životnog ciklusa – ključna razmatranja	129
6.4.	Ostvareni naučni doprinosi i budući pravci istraživanja.....	131
7.	Literatura:	134
8.	PRILOZI	152

Spisak slika:

Slika 1.1. Emisije CO ₂ za 2017. godinu u celom svetu, prema analizi „Global Carbon“ projekta [3]. Veći krug označava veću količinu emisija (1. Kina, 2. SAD, 3. Indija, 4. Rusija, 5. Japan, 6. Nemačka, 7. Iran, 8. Saudijska Arabija, 9. Južna Koreja, 10. Kanada).	2
Slika 2.1. Načini konverzije biomase [81]	22
Slika 2.2. Briketi od slame: 1) miskantusa, 2) ječma i 3) livadskog sena [82].	24
Slika 2.3. Dijagram toka celokupnog procesa brze pirolize i procesa unapređivanja pirolitičkog ulja sa opcionalnom proizvodnjom vodonika [70].	28
Slika 2.4. Višegodišnji energetske usevi: a) miskantus (<i>Miscanthus x giganteus</i>); b) prerijsko proso (<i>Panicum virgatum</i>); c) trstika (<i>Phalaris arundinacea</i>); d) mediteranska trska (<i>Arundo donax</i>) [95]–[98].	30
Slika 2.5. Ogljedno polje miskantusa u Zemunu (Institut za primenu nuklearne energije - INEP) na zemljištu tipa černoziem, decembar 2015. godine: a) i b) režim sadnje 2 rizoma po m ² (levo) i režim sadnje 3 rizoma po m ² , uz primenu 333 kg NPK đubriva (sredina) i 667 kg NPK đubriva (desno); c) režim sadnje bez primene đubriva, 2 rizoma po m ² (levo) i 1 rizom po m ² (desno). Metlice se formiraju pri nepovoljnijim uslovima uzgoja (slike iz privatne arhive doktorantkinje).	34
Slika 3.1. Šema životnog ciklusa proizvoda [10].	38
Slika 3.2. Faze i interaktivna priroda LCA metode [10].	39
Slika 4.1. Šema životnog ciklusa miskantusa	57
Slika 4.2. Zastupljenost tipova stambenih objekata u Republici Srbiji [150].	59
Slika 4.3. Agregat za sitnjenje i briketiranje bala, “BIOMASSER® 2DUO-SET” [157] ...	65
Slika 4.4. Prikaz menija za odabir vrste mašina, emitovanih polutanata i godine proizvodnje	68
Slika 4.5. Emisije polutanata prilikom korišćenja traktora snage 18-37 kW, proizvedenog 1995. godine (slika preuzeta iz FOEN baze) [154].	68
Slika 4.6. Transport Miskantus bala do postrojenja za pirolizu (preuzeto iz GREET).	75
Slika 4.7. Proces sušenja biomase miskantusa (GREET)	76

Slika 4.8. Proces pirolize i stabilizacije Miskantusa: sa leve strane su dati ulazi u proces a sa desne izlazi iz procesa (GREET).....	78
Slika 4.9. Proces krakovanja pirolitičkog bio-ulja vodonikom: sa leve strane su dati ulazi u proces a sa desne izlazi iz procesa (GREET).	78
Slika 4.10. Transport pirolitičkog dizela od rafinerije do pumpe (GREET).....	79
Slika 4.11. Šematski prikaz „ <i>wheel to pump</i> “ proizvodnje pirolitičkog dizela od Miskantusa iz GREET softvera. U GREET softveru se plavom bojom označavaju <i>stacionarni procesi</i> , roze bojom <i>procesu transporta</i> , a žutom bojom <i>putanje procesa</i> (engl. “pathway”). Crvenim strelicama označeni su svi procesi koji se nalaze u okviru putanje procesa “MISKANTUS PIROLIZA”.	80
Slika 4.12. Proces transporta dizela iz GREETa dopunjen za prekookeanski i železnički transport (Ocean Tanker, Bulk Terminal, Rail).....	81
Slika 4.13. Šematski prikaz „ <i>wheel-to-pump</i> “ konvencionalne putanje proizvodnje dizela iz GREET softvera.	82

Spisak tabela:

Tabela 1.1. Tehnički iskoristivi potencijal biomase u Republici Srbiji [12].....	5
Tabela 2.1. Vrste pirolize i tipovi reaktora [86]:	26
Tabela 2.2. Prinos nadzemne biomase Miskantusa u odnosu na sva tri različita režima gustine sadnje i primene mineralnih đubriva na karbonatnom černozeu (Zemun) u toku prve tri godine od zasnivanja ogleda (februarska žetva, tona suve materije po ha ± SD)[47].....	34
Tabela 2.3. Prosečni prinosi biomase Miskantusa u toku zimske žetve, na dva kvalitetna tipa zemljišta u toku prvih pet godina i na marginalnom zemljištu u toku prve četiri godine od zasnivanja, uz primenu 667 kg NPK 15:15:15 ha ⁻¹ mineralnog đubriva i gustinu sadnje od 2 rizoma po m ² [t s.m. ha ⁻¹] [47]	35
Tabela 3.1. Lista gasova sa efektom staklene baste i njihov 100 godišnji GWP potencijal izražen putem CO ₂ ekvivalenata (prema IPCC metodologiji).....	44
Tabela 3.2. Jedinjenja koja oštećuju ozon i njihovi karakterizacioni faktori	49
Tabela 3.3. Potencijal zakišeljavanja zemljišta (u kg SO ₂ -ekvivalenata kg ⁻¹)	50
Tabela 3.4. Izvori emisija fosfora i njihov potencijal za eutrofikaciju slatkovodnih ekosistema:	51
Tabela 3.5. Izvori emisije azota i njihov potencijal za eutrofikaciju marinskih ekosistema:	51
Tabela 3.6. “Midpoint“ karakterizacioni faktori za formiranje čestica i formiranje troposferskog ozona neke supstance x.....	53
Tabela 4.1. Operacije u toku životnog ciklusa miskantusa, korišćena mašinerija, produktivnost, potrošnja goriva i emisije polutanata proračunate na osnovu funkcionalne jedinice (1 ha) i referentnog protoka (23,5 t, 85% s.m.) i korišćena literatura [20]:	61
Tabela 4.2. Modifikovani procesi Ecoinvent i Agri-footprint baza inventara koji su korišćeni u LCA za miskantus, ogrevno drvo, brikete od lignita i prilikom analize osetljivosti (budući scenario)[20]:.....	66
Tabela 4.3. Analizirane kategorije uticaja, odgovarajući indikatori i mediji prijema	71
Tabela 4.4. Input-output matrica za energetski lanac pirolitičkog dizela od miskantusa gajenog na 1 ha zemljišta tipa černozeu:	73

Tabela 5.1. Emisije polutanata (kg) u toku svih 13 operacija životnog ciklusa briketa od miskantusa preračunate u ekvivalentne faktore svih 14 ispitivanih kategorija uticaja.....	89
Tabela 5.2. Emisije polutanata u procentima (%) u toku svih 13 operacija životnog ciklusa briketa od miskantusa preračunate u ekvivalentne faktore svih 14 ispitivanih kategorija uticaja. Zbir uticaja svih 13 operacija u jednoj uticajnoj kategoriji je označen sa 100 %....	90
Tabela 5.3. Kategorije uticaja, jedinice i mediji prijema emitovanih polutanata i utrošak resursa tokom životnog ciklusa briketa lignita, ogrevnog drveta i briketa miskantusa (u sadašnjem i budućem scenariju proizvodnje) i povećanje/smanjenje emisija prilikom zamene briketa lignita i ogrevnog drveta briketima miskantusa i prilikom poređenja budućeg i sadašnjeg scenarija proizvodnje briketa miskantusa, izraženo u [kg] i u [%]:.....	95
Tabela 5.4. Emisioni faktori (kg h^{-1}) za traktore klase snage motora 75-130 kW koji su proizvedni 2020.godine sa EU5 standardom motora (preuzeto iz FOEN baze).	98
Tabela 5.5. Procena nadzemne i podzemne biomase miskantusa, sadržaja azota (N), direktnih i indirektnih emisija N_2O , $\text{CO}_2 \text{ eq}^Y$, bruto i neto potencijala za skladištenje ugljenika (C) u zemljištu usled gajenja miskantusa na 1 ha zemljišta tipa černozem u slučaju kad su dobijeni minimalni, prosečni i maksimalni godišnji prinosi:	103
Tabela 5.6. Neto potencijal za skladištenje C u slučaju sadašnjeg i budućeg scenarija dobijanja briketa miskantusa i količina ugljenika koja ostaje ili se gubi usled zamene zapuštenog poljoprivrednog zemljišta usevima miskantusa po ha godišnje:	103
Tabela 5.7. Emisije polutanata i utrošak resursa tokom svake operacije u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela miskantusa (prosečnog prinosa, 23,5 t s.m. gajenog na 1 ha zemljišta černozem) [151]:	111
Tabela 5.8. Emisije polutanata i utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H_2 putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu (f.u.) [151]:.....	115
Tabela 5.9. Emisije polutanata i utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u integrisanoj- H_2 internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu (f.u.) od 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m^{-3} , 6 t pirolitičkog dizela) [151]:.....	120

Spisak grafikona:

Grafikon 1.1. Udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije zemalja EU za 2016. godinu (obojeno plavom bojom) i zacrtani ciljevi nacionalnih akcionih planova za 2020. godinu (obojeno sivom bojom) i EU prosek. Ostvareni udeo OIE u Republici Srbiji je označen naranžastom bojom a ostvareni EU prosek crvenom bojom.	4
Grafikon 5.1. Ocena životnog ciklusa briketa miskantusa (SimaPro) [20].....	91
Grafikon 5.2. Ocena životnog ciklusa briketa miskantusa - operacije u polju [20].	92
Grafikon 5.3. Rezultati komparativne analize energetskih lanaca briketa od lignita (LB), ogrevnog drveta (OD) i briketa od miskantusa (MB) [20].	96
Grafikon 5.4. Poređenje sadašnjeg i budućeg scenarija ocene životnog ciklusa briketa miskantusa (SimaPro) [20].	100
Grafikon 5.5. Poređenje sadašnjeg i budućeg scenarija energetskog lanca briketa miskantusa u kategoriji Klimatske promene [20].	101
Grafikon 5.6. Emisije polutanata tokom svih faza proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa (kg): P1 – faza kultivacije miskantusa; P2 – transport bala sa polja do rafinerije; P3 – sitnjenje biomase; P4 – sušenje biomase; P5 – piroliza + hidrotretiranje (stabilizacija) sirovog pirolitičkog ulja; P6 – hidrokrakovanje (uanpređivanje) sirovog pirolitičkog ulja; P7 – transport pirolitičkog dizela iz rafinerije do pumpe [151].	112
Grafikon 5.7. Utrošci resursa tokom svih faza proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa (MJ): P1 – faza kultivacije miskantusa; P2 – transport bala sa polja do rafinerije; P3 – sitnjenje biomase; P4 – sušenje biomase; P5 – piroliza + hidrotretiranje (stabilizacija) sirovog pirolitičkog ulja; P6 – hidrokrakovanje (uanpređivanje) sirovog pirolitičkog ulja; P7 – transport pirolitičkog dizela iz rafinerije do pumpe [151].	113
Grafikon 5.8. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H ₂ putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, u odnosu na funkcionalna jedinicu, 406,75 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ 9,85 t pirolitičkog dizela) [151].	116
Grafikon 5.9. Utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H ₂ putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel,	

proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu, 406,75 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ 9,85 t pirolitičkog dizela) [151].	117
Grafikon 5.10. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u integrisanoj-H ₂ internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, u odnosu na funkcionalna jedinicu, 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ , 6 t pirolitičkog dizela) [151].	121
Grafikon 5.11. Utrošci resursa [GJ] u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u integrisanoj-H ₂ internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu, 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ , 6 t pirolitičkog dizela) [151].	122
Grafikon 5.12. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-H ₂ eksternoj putanji i u integrisanoj-H ₂ internoj putanji, u odnosu na funkcionalna jedinicu: 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ , 6 t pirolitičkog dizela) [151].	124
Grafikon 5.13. Utrošci resursa [GJ] u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-H ₂ eksternoj putanji i u integrisanoj-H ₂ internoj putanji, proračunate u odnosu na funkcionalu jedinicu: 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m ⁻³ , 6 t pirolitičkog dizela) [151].	125

Spisak skraćenica:

eq – ekivalenti

EU – Evropska Unija

FE – potencijal za eutrofikaciju slatkovodnih ekosistema (engl. „*Freshwater eutrophication potential*”)

FET – potencijal ekotoksičnosti slatkovodnih ekosistema (engl. „*Freshwater ecotoxicity potential*”)

FOEN – Švajcarska državna Kancelarija za Zaštitu Životne Sredine (engl. “*Federal Office for the Environment*”)

f.u. - funkcionalna jedinica u LCA studiji

GHG – gasovi staklene baste (engl. “*green house gasses*”)

GREET® Model – softverska alatka za procenu uticaja na životnu sredinu različitih vrsta goriva (engl. „*The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model*”)

GWP – potencijal za globalno zagrevanje (engl. “*global warming potential*”)

HHV – gornja toplotna moć goriva (engl. “*higher heating value*”)

HT – potencijal toksičnosti za ljude (engl. „*Human toxicity potential*”)

IGD – istočna geografska dužina, longituda, uglovno rastojanje neke tačke na zemljinoj površini od početnog meridijana (Grinič) prema istoku

IPCC – Internacionalni Panel za Klimatske Promene

IR – potencijal zagađenja jonizujućim zračenjem (engl. “*Ionising Radiation potential*”)

ISO – Međunarodna organizacija za standardizaciju

LB – energetska lanac briketa lignita

LCA – metoda Ocene životnog ciklusa (engl. „*Life Cycle Assessment*”)

LCI – faza analize inventara životnog ciklusa (engl. „*Life Cycle Inventory*”)

LCIA – faza ocene uticaja životnog ciklusa na životnu sredinu (engl. „*Life cycle impact assessment*”)

LHV – donja toplotna moć goriva (engl. “*lower heating value*”)

LUC – promena namene korišćenja zemljišta (engl. “*land use change*”)

MB – energetski lanac briketa miskantusa

ME – Potencijal za eutrofikaciju marinskih ekosistema (engl. „*Marine eutrophication potential*“)

MET – potencijal ekotoksičnosti marinskih ekosistema (engl. „*Marine ecotoxicity potential*“)

NMHC – isto kao NMVOC

NMVOC – lako isparljiva organska jedinjenja koja ne sadrže metan (engl. „*Non Methane Volatile Organic Compounds*“),

NPK – Neorgansko, složeno, čvrsto, mešano đubrivo

NPK 15:15:15 - sastav:

- Azot (N): 15% /-1,1% Krečni amonijum nitrat (KAN);
- Fosfor (P₂O₅) 15% /-1,1% Monoamonijum fosfat (MAP);
- Kalijum (K₂O) 15% /-1,1% Kalijum hlorid (KCL).

OD – energetski lanac ogrevnog drveta

OD – potencijal za oštećivanje ozonskog omotača (engl. „*Ozone Depletion potential*“)

ODS – mera kapaciteta za uništenje ozonskog omotača supstanci (engl. „*Ozone depletion substance*“)

OIE – obnovljivi izvori energije

PM – fine čestice (engl. „*Particulate matter*“)

PMF – potencijal za formiranje čestica (engl. „*Particulate matter formation potential*“)

POF – Potencijal za formiranje fotohemijskih oksidanata (engl. „*Photochemical Oxidant Formation potential*“)

ReCiPE – metod za ocenu uticaja životnog ciklusa na životnu sredinu

s.m. – suva materija

SD – standardna devijacija, mera o odstupanju od aritmetičke sredine ispitivanog skupa

SGŠ – Severna geografska širina, latituda, uglovno rastojanje neke tačke na zemljinoj površini od ekvatora do severnog pola

SimaPro - softverska alatka za procenu uticaja na životnu sredinu razvijena od strane “PRé Sustainability” grupe (Amersfort, Holandija)

SOC – količina organskog ugljenika u zemljištu (engl. “*soil organic carbon*“)

TA – potencijal zakišeljavanja zemljišta (engl. “*Terrestrial Acidification potential*”)

TABULA – projekat programa „Inteligenta energija u Evropi (IEE)“ koji se bavi nacionalnom tipologijom stambenih objekata u Srbiji (engl. “*Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*”)

TET – potencijal ekotoksičnosti kopnenih ekosistema (engl. „*Terrestrial ecotoxicity potential*”)

UEC – ukupni emitovani ugljenik

UZC – ukupni zemljišni ugljenik

VOC – lako isparljiva organska jedinjenja (engl. “*volatile organic compounds*”)

WD – Potencijal za iscrpljivanje vodnih rezervi (engl. “*Water Depletion potential*”)

Spisak oznaka:

1,4-DCB – 1,4-dihlorobenzen

CO – ugljen-monoksid

CO₂ – ugljen-dioksid

CH₄ – metan

CFC-11 – trihloroflorometan (freon-11)

Cl – hlor

K – kalijum

U-235 – Izotop uranijuma

H – vodonik

HCl – hlorovodonična kiselina

N – azot

N₂O – azot-suboksid

NO₃ – nitrat

NH₃ – amonijak

NH₄⁺ – amonijum jon

NO_x – oksidi azota

O – kiseonik

P – fosfor

PO₄ – fosfat

S – sumpor

SF₆ – sumpor heksafluorid

SO_x – oksidi sumpora

SO₂ – sumpor-dioksid

°C – stepen Celsijus

J – džul, jedinica za količinu toplotne energije

kJ – kilo džul (10³ džula)

MJ – megadžul (10⁶ džula)

GJ – gigadžul (10⁹ džula)

TJ – teradžul (10^{12} džula)

PJ – petadžul (10^{15} džula)

kBq – kilobekerel; Bekerel (Bq) U235 označava raspadanje jezgra uranijumovog izotopa 235 u jednoj sekundi (s^{-1}).

g – jedinica za masu

μ g – mikrogram (10^{-6} g)

kg – kilogram (10^3 g)

t – tona, jedinica za masu (10^6 g), ređe se označava kao Mg (megagram)

Mt – megatona, jedinica za masu (10^6 tona)

kW – kilovat, jedinica za snagu

kWh – kilovat čas, jedinica za utrošenu energiju

Mtoe – milion tona ekvivalentne nafte kg

MPa – megapaskal, jedinica za pritisak (10^6 paskala)

psi – funta po kvadratnom inču, jedinica za pritisak (engl. “*pound per square inch*”)

m – metar, jedinica za dužinu

cm – centimetar, (m^{-2})

mm – milimetar (m^{-3})

km – kilometar, jedinica za razdaljinu (10^3 metara)

m^2 – metar kvadratni, jedinica za površinu

ha – hektar, jedinica za površinu ($10^4 m^2$)

m^3 – metar kubni, jedinica za zapreminu

l – litar, jedinica za zapreminu ($10^{-3} m^3$)

nmi – nautička milja (ili morska milja), jedinica za dužinu, koristi se za mornaričke i avijacijske potrebe.

ppm – bezdimenziona jedinica, označava milioniti deo jedne celine, koristi se za vrlo velika razblaženja (engl. “*parts per million*”)

pH – mera aktivnosti vodonikovih jona (H^+) u rastvoru, mera kiselosti ili baznosti nekog rastvora.

h – čas, jedinica vremena

s – sekunda, jedinica vremena, (1/3600 časova)

god – godina, jedinica vremena

1. Uvod

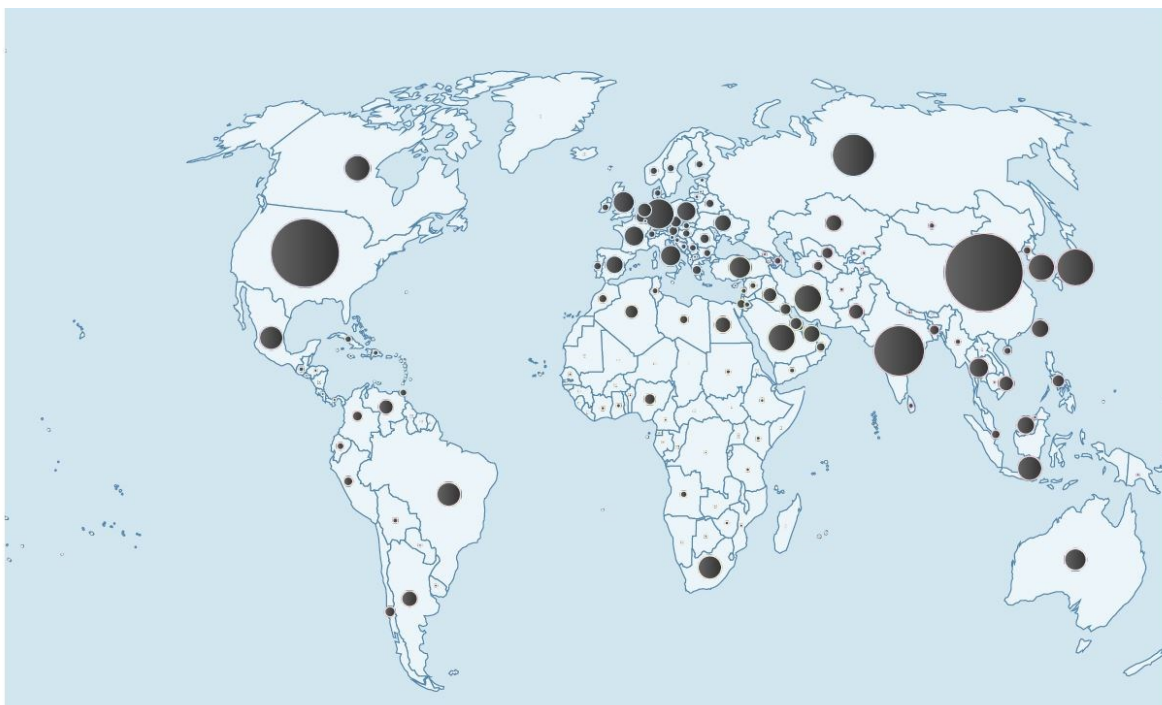
1.1. Pregled stanja životne sredine i upotrebe obnovljivih izvora energije u svetu

Porast brojnosti ljudskog stanovništva i sve ubrzaniji napredak ljudske civilizacije doveli su do ubrzanog iscrpljivanja resursa, drastičnih klimatskih promena i sve većeg zagađenja i degradacije životne sredine. S druge strane, iscrpljivanje resursa i povećano zagađenje predstavljaju potencijalno glavne uzročnike kolapsa industrijske proizvodnje i pada brojnosti ljudske populacije koja se može očekivati u toku narednih 100 godina [1]. Povećano korišćenje resursa, posebno fosilnih goriva kao što su nafta, uglj i prirodni gas je u neraskidivoj vezi sa sve većom potrošnjom energije od koje zavise sva savremena, potrošačka društva. U svetu se dnevno troši 85,2 miliona barela nafte a do 2020. godine očekuje se povećanje ove količine za 60%. Od 1950. godine potrošnja uglja je više nego udvostručena. U zemljama kao što je Kina, nagli rast ekonomije je pratila masovna izgradnja novih termoelektrana na uglj.

Procenjeno je da se sagorevanjem fosilnih goriva proizvodi oko 21,3 milijardi tona ugljen-dioksida godišnje. S obzirom da prirodni procesi mogu da apsorbuju samo oko polovine te količine, godišnje dolazi do neto povećanja od 10,65 milijardi tona ugljen-dioksida u atmosferi. U poslednja dva veka koncentracija ugljen-dioksida (CO_2) u atmosferi je porasla sa 270 ppm na 400 ppm, odnosno povećala se za 50% [1], [2]. Prema podacima projekta „Globalni Ugljenik“ (engl. „*Global Carbon Project*“), u toku 2017. godine u svetu je emitovano ukupno 36153 Mt CO_2 od čega najviše u Kini 27,2 % (9839 Mt CO_2), pa u SAD 14,6% (5270 Mt CO_2) i Indiji 6,9% (2467 Mt CO_2) (slika 1.1) [3].

Hemijske reakcije u atmosferi i povećana apsorpcija metana (CH_4) u zemljištu usled porasta ljudskih aktivnosti kao što su sagorevanje fosilnih goriva, intenzivna poljoprivreda i stočarstvo, negativno su uticale i na prirodne putanje eliminacije ovog gasa u atmosferi, na taj način što godišnje u njoj ostane 10 miliona tona ovog gasa [3]. Sve ove pojave neminovno dovode do ozbiljnih klimatskih promena u celom svetu čije se posledice teško u potpunosti mogu sagledati. Prema nekim od mnogobrojnih modela razvijenih od strane organizacije

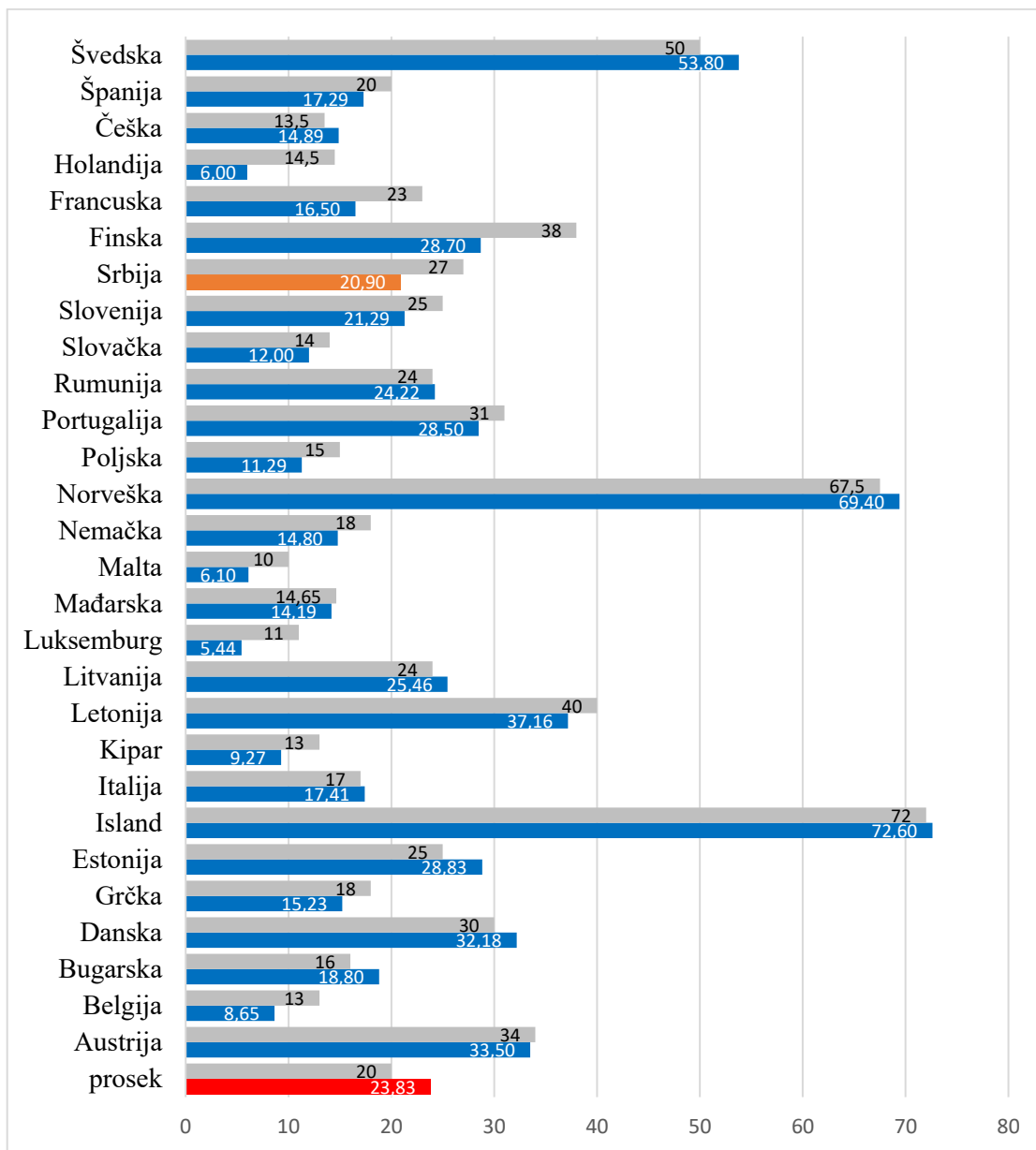
Internacionalni Panel za Klimatske Promene (IPCC) koji imaju za cilj da daju najrealnije prognoze o budućim trendovima klimatskih promena, predviđa se da će, u najboljem slučaju, do kraja 21. veka porast prosečnih temperature vazduha iznositi $0,6^{\circ}\text{C}$, a u najgorem slučaju čak 4°C . Povećanje nivoa mora, koje je takođe posledica globalnog otopljanja bi u najboljem slučaju iznosilo od 0,18 m do 0,38 m a u najgorem slučaju, od 0,26 m do 0,59 m [4].



Slika 1.1. Emisije CO₂ za 2017. godinu u celom svetu, prema analizi „Global Carbon“ projekta [3]. Veći krug označava veću količinu emisija (1. Kina, 2. SAD, 3. Indija, 4. Rusija, 5. Japan, 6. Nemačka, 7. Iran, 8. Saudijska Arabija, 9. Južna Koreja, 10. Kanada).

Kako bi se smanjile katastrofalne posledice klimatskih promena u Evropi i širom sveta, uloženo je puno truda da se fokus sa primene tradicionalnih energetske resursa preusmeri na promociju korišćenja obnovljivih izvora energije. Usvajanjem "Direktive EU 2009/28/EZ" ("Direktiva o obnovljivim izvorima energije"), države članice EU su se obavezale da će do 2020. godine, povećati udeo obnovljivih izvora energije (OIE) koji bi u odnosu na ukupnu finalnu potrošnju energije, trebalo da iznosi minimum 20 % a u potrošnji energije za

transport barem 10 %. Ciljevi za svaku zemlju članicu su određeni pojedinačnim Nacionalnim akcionim planovima, koji je svaka članica definisala u skladu sa sopstvenim mogućnostima. Tako je na primer, cilj za Republiku Maltu da do 2020. godine učešće OIE u finalnoj potrošnji energije bude 10%, za Kraljevinu Švedsku 50%, a zemlje evropske ekonomske zajednice, kao što su Norveška i Island, su odredile ciljeve od 67,5% i 72% [5]. Prema poslednjem izveštaju o napretku primene ove direktive, u 2016. godini deset zemalja je već ispunilo cilj [6], i ostvaren je cilj od minimum 20% OIE za čitavu Evropu (grafikon 1.1).



Grafikon 1.1. Udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije zemalja EU za 2016. godinu (obojeno plavom bojom) i zacrtani ciljevi nacionalnih akcionih planova za 2020. godinu (obojeno sivom bojom) i EU prosek. Ostvareni udeo OIE u Republici Srbiji je označen naranžastom bojom a ostvareni EU prosek crvenom bojom.

1.2. Pregled stanja životne sredine i upotrebe obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji

Prema analizi *Global carbon* projekta, u Republici Srbiji je 2017. godine emitovano ukupno 45 Mt CO₂ što rangira Srbiju na 62. mesto na svetu po količini emitovanog ugljen-dioksida. Ukoliko se razmatraju prosečne emisije CO₂ po glavi stanovnika u 2017. godini, Srbija zauzima 74. mesto (5,1 t CO₂ u odnosu na svetski prosek od 4,8 t CO₂ po glavi stanovnika) [3]. U zadnjih par godina, na teritoriji Republike Srbije zabeležen je porast srednjih godišnjih temperatura do 0,04°C godišnje [7] koji bi prema predviđanjima za period od 2011-2040. godine mogao da iznosi od 0,5 do 0,9°C a za period od 2041-2070.godine i od 1,8 do 2,2°C. Do kraja veka predviđeno je i smanjenje padavina do 20% [8].

Odlukom Ministarskog saveta Energetske zajednice 2012. godine Republika Srbija je preuzela obavezu da do 2020. godine učešće obnovljivih izvora energije u bruto finalnoj potrošnji energije poveća na 27 % i da iz obnovljivih izvora obezbedi najmanje 10 % potrošnje goriva u transportu [9]–[11]. Procenjeno je da ukupni tehnički potencijal OIE za Srbiju 5,6 Mten godišnje [10], [12]–[14]. Od ovog potencijala, najveći udeo potiče od biomase (60 %), zatim od hidro-energije (30 %), solarne energije (4 %), geotermalne energije (3 %), energije vetra (2 %) i biorazgradivog otpada (1 %) [10], [12]–[14].

1.2.1. Potencijal biomase u Republici Srbiji

Ukupni raspoloživi tehnički potencijal biomase u Srbiji iznosi 144 PJ od čega se koristi samo oko 20% i to uglavnom drvena biomasa (tabela 1.1) [11], [14]. Najveći neiskorišćeni potencijal biomase se nalazi u ostacima poljoprivrednih kultura, oko 69 PJ (tabela 1.1). Za sada podaci o raspoloživosti biomase sa energetske plantaza nisu dostupni.

Tabela 1.1. Tehnički iskoristivi potencijal biomase u Republici Srbiji [12]

Vrsta biomase	Raspoloživi tehnički potencijal koji se koristi, TJ god ⁻¹	Neiskorišćen raspoloživi tehnički potencijal, TJ god ⁻¹	Ukupni raspoloživi tehnički potencijal, TJ god ⁻¹
Poljoprivredna biomasa	1382,7	68590,3	69973

- Ostaci poljoprivrednih kultura	1382,7	41481	42863,7
- Ostaci u voćarstvu, vinogradarstvu i preradi voća		25349,5	25349,5
- Tečni stajnjak		1759,8	1759,8
Drvena (šumska) biomasa	42779,9	21327,1	64107
Energetski zasadi	-	-	nije dostupno
Biorazgradivi otpad	0	10391,2	10391,2
- Biorazgradivi komunalni otpad	0	8589,5	8589,5
- Biorazgradivi otpad (osim komunalnog)	0	1801,7	1801,7
UKUPNO	44162,6	100308,6	144471,2

Najveći potrošač biomase je sektor domaćinstva u kome se koristi 80% ukupno utrošene biomase i to uglavnom za potrebe grejanja [9], [15], [16]. U ovom sektoru je zabeležena najveća potrošnja finalne energije (35 % ukupno utrošene finalne energije) [14], [17] a predviđa se da će u budućnosti ovaj rast biti još veći. Od ukupne utrošene finalne energije u ovom sektoru, najveći deo odlazi na potrebe grejanja (53 %) [18]. Na daljinski sistem grejanja priključeno je 22 % domaćinstava dok se preostalih 78 % domaćinstava greje uz pomoć individualnih sistema grejanja. Od ukupnog broja ovih domaćinstava, 21 % koristi centralizovane sisteme (kotlove), 57 % koristi obične peći, furune i šporete u kojima se sa niskom efikasnošću sagorevaju drvo (75 %) ili ugalj (16 %) a 18 % koristi električnu energiju [19], [20].

Najveći potrošači ogrevnog drveta su stanovnici ruralnih i prigradskih naselja gde je ovaj resurs najzastupljeniji a ujedno i najjeftiniji [9]. Ugalj koji se koristi u ovim sistemima je uglavnom poreklom iz Srbije (94 %) [15] i pripada lignitima, s obzirom da 98 % od ukupne količine uglja koji se iskopava u Srbiji čini upravo ova vrsta uglja (visoko kvalitetni ugljevi su prisutni sa samo 2 %) [13]. Ovi energenti se uglavnom sagorevaju u sistemima grejanja niske efikasnosti gde su emisije polutanata disproporcionalno visoke u odnosu na benefite od dobijene energije [13].

Učešće obnovljivih izvora energije u bruto finalnoj potrošnji energije je u Srbiji 2016. godine iznosilo 20,9 % (slika 1.2) od čega u sektoru potrošnje električne energije 29,23 %, u sektoru grejanja i hlađenja 24,24 % a u sektoru transporta 1,22 %, za razliku od 2015. godine kad u sektoru transporta uopšte nije bilo zabeleženo korišćenje OIE [14], [17]. Energetska uvozna zavisnost Srbije u 2010. godini iznosila je oko 33,6 % [21].

Kako bi ostvarila ambiciozan cilj postavljen usvajanjem „Direktive o obnovljivim izvorima energije“, Srbija će morati povećati korišćenje obnovljivih izvora energije. Takođe, kako se navodi u Nacionalni Akcioni Plan za Korišćenje Obnovljivih Izvora Energije, u budućnosti će za Srbiju biti od velike važnosti da „obezbedi sigurno, kvalitetno i pouzdano snabdevanje energijom i energentima i smanji energetska zavisnost zemlje“ [22].

Osim povećanog korišćenja biomase od poljoprivrednih ostataka, prerade drveta i tečnog đubriva, povećanje udela OIE u finalnoj potrošnji energije u Srbiji bi moglo da se ostvari i upotrebom biomase energetskih useva. Na osnovu dosadašnjih istraživanja sprovedenih u Sjedinjenim Američkim Država (SAD) i u Evropi, procenjeno je da su miskantus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) i prijijsko proso najpovoljniji izbor za uzgoj energetskih plantaža u smislu niskih inputa energije [23]–[25]. U Srbiji za sada još uvek nisu osnovane energetske plantaže za komercijalnu upotrebu ovih biljaka mada je osnovano nekoliko eksperimentalnih zasada i dokazano je da je od svih useva miskantus najpovoljniji [26].

1.3. Predmet i opravdanost istraživanja

Predmet naučnog istraživanja ove doktorske disertacije je ekološka analiza opravdanosti korišćenja brzorastuće biljke miskantus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) za dobijanje energije korišćenjem metode Ocene životnog ciklusa (LCA). LCA metoda je u svetu široko prihvaćena kao jedna od najboljih metoda za procenu ekološke opravdanosti bioenergetskih sistema. Pa ipak, većina objavljenih LCA studija je uglavnom fokusirana na kvantifikovanje uticaja na klimatske promene usled emisija CO₂ ekvivalenata u toku celog životnog ciklusa miskantusa [27]–[32] ili u toku nekih faza životnog ciklusa (od kolenke do groba, odnosno od sađenja rizoma miskantusa do kapija bioenergetskog postrojenja, distributera, itd.) [33]–

[35]. Ostali uticaji na životnu sredinu koje se u ovim istraživanjima analiziraju su potencijal za skladištenje ugljenika i promena upotrebe zemljišta usled gajenja useva miskantusa na poljoprivrednom zemljištu [29], [36] ili na pašnjacima [37], [38] kao i emisije polutanata (ugljen-monoksid, oksidi azota, ugljo-vodonici i čestice) tokom sagorevanja biomase miskantusa [39], [40].

U ovoj doktorskoj disertaciji urađena je kompleksnija LCA analiza tipa „od koevke do groba“ koja osim emisija CO₂ ekvivalenata i uticaja na klimatske promene analizira i druge potencijalne uticaje na životnu sredinu, kao što su: oštećivanje ozonskog omotača, zakišeljavanje tla, eutrofikacija vodenih ekosistema, toksičnost, formiranje čestica i fotohemijskih oksidanata, jonizujuće zračenje, iscrpljivanje rezervi vode i fosilnih goriva. Takođe, za razliku od prethodnih istraživanja, u ovoj disertaciji je definisan finalni potrošač toplotne energije – slobodnostojeća porodična kuća koja predstavlja najzastupljeniji tip domaćinstva u Republici Srbiji. Ovaj tip stambenog objekta ima prosečnu specifičnu godišnju potrebu za grejanjem po m² čija je vrednost proračunata u odnosu na karakteristike objekta i tipa primenjenog sistema grejanja. Ovaj podatak se može koristiti za procenu broja finalnih potrošača toplotne energije koja se dobija sagorevanjem biomase miskantusa gajenog na određenoj površini i može biti ključan prilikom planiranja zamene fosilnih goriva briketima miskantusa ali i drugim potencijalno obnovljivim izvorima.

Opravdanost istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji se odnosi i na favorizovanje sprovođenja analize životnog ciklusa proizvoda primenom LCA metode koja je nedovoljno primenjena i nedovoljno istražena u naučnim istraživanjima u Srbiji i u celom regionu Balkana. Razlog ovome leži u nepostojanju dovoljno pouzdanih podataka i u nedovoljnom broju stručnjaka iz ove oblasti. Rezultati ove studije imaju za cilj da podstaknu osnivanje energetske plantaze miskantusa ne samo u Srbiji već i u čitavom Balkanu.

1.4. Cilj, metod i doprinos

Osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije je kvantifikovanje uticaja na životnu sredinu tokom celog životnog ciklusa miskantusa, ispitivanje proizvodnje i upotrebe biomase od miskantusa gajenog prema pravilima srpske poljoprivredne prakse u cilju dokazivanja ekološke opravdanosti zamene tradicionalno korišćenih fosilnih goriva ovim resursom.

Ispitivana su dva energetska lanca korišćenja miskantusa: korišćenje briketa od miskantusa za dobijanje toplotne energije i korišćenje miskantusa za sintezu pirolitičkog dizela. Svaki energetski lanac je ispitan analizom dva scenarija: prvi scenario oslikava trenutno ili najčešće stanje dok drugi oslikava optimizovano stanje koje uzima u obzir veću energetska efikasnost i produktivnost i manje štetne uticaje na životnu sredinu. Pored osnovnog cilja definisani su i pojedinačni ciljevi istraživanja doktorske disertacije:

1) utvrđivanje svih relevantnih ulaza i izlaza za sve faze u životnom ciklusu miskantusa odnosno u energetske tokovima biomase miskantusa, počevši od pripreme zemljišta za sadnju, preko sadnje, uzgoja useva, košenja, baliranja i briketiranja i sagorevanja briketa u kotlovima za grejanje domaćinstava u jednom ispitivanom energetske toku i pripreme za pirolizu i pirolize, i stabilizacije goriva u drugom ispitivanom energetske toku.

2) utvrđivanje parametara koji imaju najštetniji uticaj na životnu sredinu u toku životnog ciklusa miskantusa i predlog mera za njeno umanje, odnosno optimizacija proučavanih energetske lanaca od biomase miskantusa sa aspekta povećanja energetske efikasnosti, kao i sa aspekta smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu.

3) konstrukcija energetske lanaca za tradicionalno korišćene, referentne izvore energije kao što su ugalj i drvo u prvom energetske toku i dizel u drugom energetske lancu i utvrđivanje parametara koji imaju najštetniji uticaj na životnu sredinu.

4) favorizovanje korišćenja alatke Ocene životnog ciklusa u ekološkoj proceni energetske lanaca.

5) procena promene količine ugljenika u zemljištu usled gajenja energetske useva.

6) podsticanje plantažnog gajenja miskantusa u Srbiji

7) konstruisanje modela energetske lanaca koji može biti primenjen i na druge energetske useve.

Kao osnovna metoda u ovoj doktorskoj disertaciji korišćena je metoda Ocene životnog ciklusa (LCA). Ova metoda uzima u obzir sve relevantne uticaje na životnu sredinu u toku celog životnog ciklusa ispitivanog proizvoda, odnosno kvantifikuje sve ulaze i izlaze prilikom svake pojedinačne operacije u životnom ciklusu, počevši od nabavke sirovina, proizvodnje, distribucije, upotrebe, ako je moguće ponovne upotrebe i reciklaže, do konačnog odlaganja. Prilikom izrade ove disertacije, praćene su preporuke o metodološkoj strukturi studije koja je data u seriji standarda ISO 14040. Ovim standardima se definišu obavezne četiri faze prilikom sprovođenja LCA studije: faza definisanja cilja i obima studije, faza prikupljanja inventara, faza ocenjivanja uticaja na životnu sredinu i faza interpretacije rezultata. U fazi definisanja cilja i obima studije su određene granice sistema i definisana je funkcionalna jedinica. Podaci o inventaru, odnosno podaci vezani za ulaze i izlaze za svaku pojedinačnu operaciju su prikupljeni detaljnom analizom dostupne literature kao i u komunikaciji sa ekspertima iz oblasti. Kod LCA analize prednost imaju primarni podaci, odnosno podaci koji su dobijeni merenjem parametara u ispitivanim sistemima. U slučaju kad takvi podaci nisu dostupni, koriste se sekundarni podaci, odnosno podaci (ili i kompletni procesi) iz već postojećih baza podataka koje su integrisane u SimaPRO softver (Ecoinvent, Agri-footprint, itd.) ili su modifikovani postojeći procesi. Usled nedostatka konkretnih eksperimentalnih podataka i odgovarajućih srpskih baza podataka, emisije polutanata su kvantifikovane uz pomoć nacionalne baze emisija Švajcarske državne agencije za zaštitu životne sredine. Nakon kreiranja celog sistema snabdevanja briketa miskantusa, urađena je faza Procene uticaja gde je korišćen pristup „ReCiPe“ koji podrazumeva analizu velikog broja uticajnih kategorija (klimatske promene, uništavanje ozona, acidifikacija zemljišta, eutrofikacija vodenih ekosistema, toksičnost, formiranje fotohemijskih oksidanata, formiranje čestica, ekotoksičnost zemljišta, ekotoksičnost vodenih ekosistema, jonizujuće zračenje, iscrpljivanje rezervi vode i fosilnih goriva). Za sprovođenje LCA analize energetskog lanca briketa od miskantusa korišćen je softver SimaPRO, jedan od tri najzastupljenija LCA softvera koji se koriste na univerzitetima i naučnim institucijama širom sveta. Za analizu drugog energetskog lanca, koji ispituje korišćenje miskantusa za dobijanje pirolitičkog dizela, korišćen je „otvoreni“ softver GREET, koji je isključivo namenjen za LCA goriva. Za procenu promene organskog ugljenika u zemljištu, korišćena je metodologija

razvijena od strane Internacionalnog Panela za Klimatske Promene (IPCC), koja se kao najpouzdanija i najpreciznija najčešće koristi u naučnim istraživanjima.

Analize i rezultati koji su prikazani u ovoj disertaciji, omogućavaju da se bolje razumeju mogućnosti i načini za uspostavljanje energetske zastave mase u Srbiji. Ključni rezultati disertacije su konstruisani opšti i optimizovani modeli energetskog lanca mase, koji predstavljaju osnovu za ispunjenje uslova o povećanju udela OIE u ukupnoj potrošnji energije u Srbiji, a u skladu sa ciljevima propisanim u Direktivi Evropske komisije o obnovljivim izvorima energije. Ostali naučni doprinosi ove disertacije su:

- Izrađena kompleksna LCA studija koja obuhvata šire granice sistema i analizu većeg broja uticajnih kategorija;
- Definisan finalni potrošač toplotne energije mase (koji koristi individualne sisteme grejanja) i date procene utroška energije i emisija CO₂ po m².
- Izrađena ulazno-izlazna matrica i evidentirani svi relevantni uticaji na životnu sredinu energetskih lanaca biomase mase,
- Konstruisani energetski lanci referentnih fosilnih goriva i analizirani njihovi uticaji na životnu sredinu,
- Razvijena metodologija za procenu uticaja na životnu sredinu koja je primenjiva i na druge energetske lance biomase,
- Urađena inventarizacija emisija polutanata prilikom korišćenja poljoprivrednih mašina koja se može primeniti u istraživanjima koja se bave ekonomskim i ekološkim aspektima uzgoja drugih poljoprivrednih kultura i drugih energetskih useva,
- Usvojena metodologija za optimizaciju energetskih lanaca biomase mase,
- Promocija korišćenja LCA metode u naučnim istraživanjima,

1.5. Pregled prethodnih istraživanja

Do sada je u svetu sproveden značajan broj LCA studija koje istražuju uticaj različitih vrsta OIE na životnu sredinu gde je dokazana opravdanost njihovog korišćenja kao zamene za tradicionalno korišćena fosilna goriva. Ispitivanje podobnosti biomase brzorastućih useva kao što je miskantus kao potencijalne zelene alternative za dobijanje toplotne i električne energije prikazano je u brojnim naučnim studijama i naučnim radovima koji su objavljeni u vrhunskim naučnim časopisima.

1.5.1. Istraživanja u vezi primene poljoprivredne mehanizacije: utrošci energije i goriva, produktivnost

S obzirom da se miskantus u Srbiji uzgaja na malim oglednim parcelama bez upotrebe poljoprivredne mehanizacije, eksperimentalni podaci o utrošcima energije, goriva i produktivnosti svih operacija u fazi uzgoja miskantusa nisu dostupni pa se pre konstruisanja modela životnog ciklusa miskantusa pristupilo detaljnoj analizi dostupne literature iz ove oblasti. U svim poljoprivrednim aktivnostima se kao glavna pogonska mašina koristi traktor pa su u najvećoj meri dostupni podaci o utrošcima energije i goriva za ovu mašinu.

Božić i saradnici [41] su dokazali da su četiri glavna faktora koji utiču na potrošnju goriva traktora: tehničko stanje traktora, organizaciono-tehnološke mere, različiti uslovi eksploatacije kao i osposobljenost traktoriste. Ercegović i saradnici [42] su merili utroške goriva uz pomoć Mühler-ovog protočnog merača prilikom svih poljoprivrednih operacija (zaoravanje strnjike, drljanje, duboko oranje, đubrenje, setva, primena herbicida/pesticida i žetva) pri proizvodnji merkantilnog kukuruza i suncokreta na proizvodnim površinama Instituta za kukuruz "Zemun Polje", na zemljištu tipa ritska crnica. Od pogonskih mašina korišćeni su traktori Belarus 82, John Deere 8230 i 4755 (snaga motora od 60 – 140 kW) i odgovarajući broj priključnih mašina. Utrošci energije i goriva prilikom poljoprivrednih operacija u semi-aridnim delovima Austrije, na zemljištu tipa černoziem merili su Moitzi i saradnici [43] uz pomoć merača protoka visokih performansi koji je bio priključen na traktor

Steyr 9125 snage 92 kW. Proučavani su i ekonomsko-tehnološki parametri optimalnog korišćenja traktora na zemljištima tipa černoziem i ritska crnica koristeći traktor snage motora 103 kW, specifične potrošnje goriva 195 g kWh^{-1} ($235 \text{ cm}^3 \text{ kWh}^{-1}$, 24.20 l h^{-1}) [44]. Efekte različitih sistema obrade teških zemljišta, kao što je ritska crnica ispitivani su i uz pomoć traktora tipa MF-8160 (147 kW, pogon 4 x 4) [45] a na zemljištu tipa karbonatni černoziem uz pomoć traktora marke John Deere [46].

S obzirom da se sadnja rizoma miskantusa osim upotrebom specijalizovanih sadilica može vršiti i dvorednom ili četvororednom sadilicom za krompir [47], razmatrani su utrošci energije i goriva prilikom sadnje krompira [48].

Izučavana je i produktivnost, ekonomičnost i potrošnja goriva različitih sistema navodnjavanja [49]–[51]. Na osnovu proučavanja tri tipa mobilnih sistema navodnjavanja kišenjem tipa samohodni kišni top i jednog tipa mobilnog linearnog sistema na dva lokaliteta i na dva različita tipa zemljišta (beskarbonatni černoziem i livadska crnica) zaključeno je da se usled 36 % nižih utrošaka energije, favorizuju linearni sistemi. Takođe, navodi se da visoki prinosi useva usled navodnjavanja ekonomski opravdavaju ulaganje u ove sisteme.

S obzirom na nedostatak podataka o produktivnosti mašina za žetvu, odnosno košenje miskantusa, razmatrana je studija koja ispituje energetske utroške i produktivnost tri različite vrste kosačica u SAD (u laboratoriji i na polju) koje se koriste za košenje zeljastih useva kao što su miskantus, prerijsko proso i prerijske visoke trave [52]. Od svih useva utvrđeno je da miskantus zahteva najviše utrošene energije za košenje i baliranje, $32,8 \text{ MJMg}^{-1}$ ali da ujedno predstavlja mali udeo ukupno utrošene energije u životnom ciklusu miskantusa. U drugoj studiji je zaključeno da između prinosa i cene košenja postoji inverzna korelacija a između prinosa i utroška goriva pozitivna korelacija [53].

U studiji autora sa Poljoprivrednog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu koja detaljno opisuje dostupne tehnologije prikupljanja i spremanja biomase žetvenih ostataka kao i ekonomsku opravdanost upotrebe žetvenih ostataka za proizvodnju toplotne energije u Srbiji, ističe se da je najzastupljeniji sistem za baliranje u Srbiji sistem malih četvrtastih bala [54]. Prese za velike okrugle i velike četvrtaste bale koje se često koriste na poljoprivrednim gazdinstvima širom sveta su retke u Srbiji zbog male investicione moći poljoprivrednih preduzeća i nepovoljnih kreditnih uslova ovih tehnologija. Takođe u ovoj studiji su

razmatrane i karakteristike i utrošci poljoprivredne mehanizacije koja se najčešće koristi kod utovara i/ili prevoza bala.

1.5.2. Istraživanja studija analize životnog ciklusa miskantusa kao obnovljivog izvora energije

Ocena životnog ciklusa je metoda koja podrazumeva kvantifikovanje svih relevantnih uticaja na životnu sredinu u toku životnog ciklusa ispitivanog proizvoda i/ili sistema. Za razliku od Srbije, u svetu je do sada sproveden veliki broj istraživanja koji ispituju uticaje na životnu sredinu tokom uzgoja i korišćenja miskantusa kao potencijalno obnovljivog izvora energije.

1.5.3. Miskantus kao sirovina za dobijanje toplotne i/ili električne energije

1.5.3.1. *Pristup od kolenke do groba (from cradle to grave)*

Studije koje se bave proučavanjem uticaja na životnu sredinu u toku celog životnog ciklusa miskantusa podrazumevaju kvantifikovane svih relevantnih uticaja prilikom pripreme zemljišta za sadnju rizoma ili mladica miskantusa, sadnju, negu useva (đubrenje, navodnjavanje), košenje, baliranje, transport, sušenje, formiranje briketa, peleta ili sečke i sagorevanje biomase miskantusa za dobijanje finalnog proizvoda, električne i/ili toplotne energije. Do sada je objavljeno nekoliko studija ovog tipa u svetu.

Lewandowski i saradnici [27] su istraživali utroške energije i emisije CO₂ tokom uzgoja i sagorevanja miskantusa u pulverizovanom sistemu za dobijanje električne energije i vršili poređenje sa antracitom (donja toplotna moć, 29,3 GJ t⁻¹). U uslovima zapadne Nemačke, na prethodno zaparloženom zemljištu površine 1 ha, nakon primene odgovarajućih melioracionih mera, dobijen je godišnji prinos miskantusa od 20 t s.m. Proračunato je se u toku celog životnog ciklusa miskantusa emituje 1534,2 kg ha⁻¹ CO₂ i 3,5 kg ha⁻¹ N₂O usled primene azotnog đubriva. Dobijeni EO:EI od 14:1 (372 GJ: 25 GJ) ukazuje da se više energije dobija konverzijom miskantusa u električnu energiju nego što se utroši na njegov uzgoj i obradu. Energetski najzahtevniji procesi u životnom ciklusu miskantusa su proizvodnja mineralnog đubriva, priprema biomase za sagorevanje (sitnjenje biomase miskantusa

mlevenjem), transport biomase sa polja do postrojenja, razmnožavanje biljaka (usled gajenja mladica u staklenicima nakon mikro-propagacije *in vitro* a pre sađenja na polju) i košenje. Usled 90% nižih emisija CO₂ prilikom sagorevanja biomase miskantusa umesto antracita, zaključeno je da je opravdano da se u postojećim elektranama na ugalj koristi biomasa miskantusa za dobijanje električne energije.

Lewandowski i Heinz [28] su izučavali efekat odložene žetve miskantusa na prinos i kvalitet biomase za sagorevanje u velikim postrojenjima za dobijanje toplotne energije. Na osnovu podataka sa tri ogledna polja u Nemačkoj sprovedena je detaljna LCA analiza koja je obuhvatala analizu neto bilansa primarne energije, ukupnih emisija gasova sa efektom staklene bašte (CO₂, CH₄, N₂O) i ukupnih emisije gasova koji doprinose acidifikaciji (NO_x, SO₂, HCl, NH₃). Prinos miskantusa pokošen početkom zime ima povišen sadržaj vlage (20-40 %) koji se mora smanjiti sušenjem (do 15% što predstavlja idealni odnos za sagorevanje) za šta je neophodno utrošiti dodatnu energiju, dok je prinos miskantusa pokošen krajem zime za 14 - 15 % niži, što ujedno znači i manje količine raspoložive finalne energije. Iako se količina ukupne dobijene finalne energije od miskantusa kreće od 187 do 528 GJ ha⁻¹, usled utroška energije za sušenje biomase, odnos EO:EI se kreće od 2,6:1 do 5,3:1. Emisije CO₂ ekvivalenta (CO₂ eq) se kreću od 1926 kg ha⁻¹ do 19060 kg ha⁻¹ a SO₂ ekvivalenta (SO₂ eq) od 8,2 kg ha⁻¹ do 112,5 kg ha⁻¹ u zavisnosti od oglednog polja, vremena žetve i metode sušenja. U slučaju ranije žetve, u decembru, veće su emisije SO₂ eq prilikom sagorevanja biomase jer je i sadržaj S, N i Cl veći. U kontekstu redukcije emisija SO₂ eq, zaključeno je da je optimalni mesec za košenje miskantusa februar. S druge strane redukcije emisije CO₂ eq su maksimalne kada je biomasa ranije pokošena i kad su ostvareni najviši prinosi. Ovakvi kontradiktorni rezultati ukazuju da je teško sa sigurnošću odrediti period kad je najpovoljnije vršiti košenje miskantusa. Navodi se da LCA može dati kvantitativne informacije o efektima odložene žetve na količinu emisija koje mogu biti korisne za sveobuhvatnu optimizaciju sistema žetve, koja takođe mora uzeti u obzir i druge faktore, posebno troškove žetve, skladištenja i sušenja biomase.

U studiji koju su objavili Styles i Jones [29] razmatrana je mogućnost gajenja energetskih useva u Irskoj, kvantifikovan je njihov potencijal za smanjenje emisija gasova staklene bašte usled uzgoja na obradivim površinama i korišćenja kao sirovine za dobijanje električne i

toplotne energije. Rezultati LCA studije su pokazali da su ukupne emisije CO₂ eq u toku životnog ciklusa miskantusa 1938 kg ha⁻¹ godišnje a najveći doprinosi potiču od proizvodnje mineralnih đubriva i emisija N₂O usled njegove primene. Uzgoj miskantusa na poljoprivrednim površinama umesto šećerne repe, uzgoja ovaca, uzgoja stoke i proizvodnje mleka, dovodi do smanjenja CO₂ eq emisija za 44,5 %, 48 %, 63 % i 84 %. Prilikom kogašenja miskantusa sa tresetom i ugljem u cilju dobijanja električne energije, oslobodi se 0,131 kg CO₂ eq kWh⁻¹ dok se prilikom kogašenja treseta i uglja oslobodi 1,150 i 0,990 kg CO₂ eq kWh⁻¹. Drugim rečima, smanjene emisije CO₂ prilikom korišćenja miskantusa umesto treseta i uglja za dobijanje električne energije iznosi 87- 89 %. Prilikom dobijanja toplotne energije kogašenjem peleta od miskantusa, emituje se 0,066 kg CO₂ eq kWh⁻¹ odnosno 73 % manje CO₂ eq nego prilikom kogašenja gasa, 80 % manje nego kogašenjem lož ulja i 89 % manje nego korišćenjem električne energije. Procenjeno je da uzgoj energetskih biljaka (kao što su miskantus i vrba) na samo 4,7 % ukupne obradive zemlje u Irskoj, može sniziti nacionalne emisije gasova staklene bašte za 3,86 Mt CO₂, što čini 5,6 % ukupnih emisija ovih gasova emitovanih u toku 2004. godine u ovoj zemlji.

Analizu celokupnog životnog ciklusa sečke miskantusa gajenog u Nemačkoj uradili su Felten i saradnici [30]. Ispitivane su neto redukcije emisija gasova staklene bašte i odnos dobijene i uložene energije za tri različite vrste useva: uljanu repicu, kukuruz i miskantus. Od svih ispitivanih useva, pokazano je da miskantus ima najvišu neto dobijenu energiju, 254 GJ ha⁻¹ godišnje u odnosu na uljanu repicu (66 GJ ha⁻¹ godišnje) i kukuruz (91 GJ ha⁻¹ godišnje), gde je odnos dobijene i uložene energije za uljanu repicu 4,7, kukuruz 5,5 a za miskantus čak 47,3. Poredivši ove sisteme sa referentnim fosilnim gorivima, dobijeno je da potencijalne redukcije CO₂ eq variraju od 30-76 % u slučaju električne energije dobijene od kukuruza, od 29 do 82 % u slučaju dobijanja biodizela od uljane repice a u slučaju sečke od miskantusa, od 96-117 %. U odnosu na ostale ispitivane useve jedino je tokom uzgoja miskantusa došlo do skladištenja ugljenika u zemljištu. Ova studija ukazuje na veliki potencijal miskantusa kao obnovljivog izvora energije.

Uticaje na životnu sredinu u toku celog životnog ciklusa miskantusa i njegovog korišćenja kao potencijalne zamene prirodnog gasa u postrojenjima za kogeneraciju i u kotlovima za dobijanje toplotne energije u Danskoj ispitivali su Parajuli i saradnici [31]. Pokazano je da

zamenom prirodnog gasa miskantusom u postojenjima za kogeneraciju dolazi do većih redukcija CO₂ eq emisija i smanjene upotrebe fosilnih goriva, 51 % i 25 % u poređenju sa dobijanjem toplotne energije koja se dobija prilikom sagorevanja u kotlu. S druge strane, korišćenje miskantusa u ovim postrojenjima bi zahtevalo upotrebu oko 30 % dodatne obradive zemlje, u poređenju sa zamenom u kotlovima za daljinsko grejanje. Pa ipak, korišćenje miskantusa kao energenta predstavlja ozbiljan nedostatak kad se uzmu u obzir veće potrebe za toplotnom energijom zbog povećane konkurencije oko zemljišta sa biljkama koje se koriste u ishrani ljudi i životinja.

1.5.3.2. Pristup od klevke do kapije (from cradle to gate)

Za razliku od pristupa od klevke do groba, pristup od klevke do kapije podrazumeva ispitivanje uticaja na životnu sredinu koji počinje od pripreme zemljišta za sadnju a završava se transportom biomase do bioenergetskog postrojenja ili daljom distribucijom proizvoda. Clair i saradnici [33] su ispitivali emisije gasova staklene bašte prilikom gajenja miskantusa. Zaključeno je da uzgoj miskantusa na obradivom zemljištu ili pašnjacima dovodi do povećanja zemljišnog ugljenika a da su uštede gasova staklene bašte nakon petogodišnjeg uzgoja miskantusa slične kao kod gajenja listopadnih šuma. Murphy i saradnici [35] su proučavali energetske potrebe i uticaje na životnu sredinu tokom gajenja, košenja, prerade (peletiranja i briketiranja) i transporta biomase miskantusa do krajnjeg distributera. Osim energetske potrebe i emisija gasova staklene bašte, odnosno uticaja na globalno zagrevanje, analizirani su i potencijalni uticaji na acidifikaciju (kg SO₂ eq) i eutrofikaciju (kg PO₄ eq). Rezultati studije ukazuju da održavanje useva miskantusa i prerade biomase imaju najveći uticaj na životnu sredinu dok je uticaj transporta zanemarljiv. Zamena mineralnog đubriva organskim smanjuje uticaj na globalno zagrevanje za 23–33 % i potrebe za energijom za 12–18 % dok istovremeno povećava uticaj na acidifikaciju i eutrofikaciju za 290–400 % i 258–300 %. Dokazano je da je briketiranje biomase miskantusa energetski manje zahtevno od peletiranja i da se može porediti sa proizvodnjom peleta od drveta, uglja i kerozina.

Pored detaljne ekonomske analize, upotrebe fosilnih goriva i evidentiranja emisija gasova staklene bašte, Smeets i autori [55] su evidentirali i uticaje na rezerve slatke vode, eroziju tla i biodiverzitet u toku gore navedenih faza životnog ciklusa miskantusa. S obzirom na

razmatranje prinosa miskantusa na pet različitih lokaliteta, dobijeni prinosi se kreću u opsegu od 17 do 25 t s.m. ha⁻¹, a samim tim i ukupne kvantifikovane emisije CO₂ eq se kreću u rangu od 1173 do 2150 kg a dobijena energija od 311,1 do 457,5 GJ ha⁻¹. Odnos dobijene bioenergije i uložene primarne energije fosilnih goriva se kreće od 23-40 što potvrđuje da je miskantus dobra zamena za fosilna goriva. Još jednom je potvrđeno da je peletiranje nepovoljno zbog visokih emisija gasova staklene bašte i utroška primarne energije. Zaključeno je da višegodišnje energetske trave imaju nižu stopu erozije tla u odnosu na jednogodišnje useve, ali višu u odnosu na pašnjake. Pozitivni efekti na biodiverzitet se ogledaju u tome što, za razliku od jednogodišnjih useva, višegodišnji usevi podržavaju veći broj ekoloških niša, imaju nižu stopu uznemiravanja tla, manju upotrebu pesticida i herbicida i što košenje na jesen pruža zaštitu životinjama tokom zime. Zaključeno je da se biodiverzitet višegodišnjih brzorastućih useva može povećati optimizovanjem veličine polja, lociranjem polja u blizini različitih vrsta vegetacije i diferenciranjem vremena žetve.

Potencijal za skladištenje ugljenika usled gajenja miskantusa na poljoprivrednom zemljištu su proučavali i Hamelin i saradnici i Styles i Jones [36], [56] a na pašnjacima Roth i saradnici i Zatta i saradnici [37], [38]. Emisije polutanata (ugljen-monoksida, azotnih oksida, ugljovodonika i čestica) usled sagorevanja miskantusa su kvantifikovali Ana Elisabeta Daraban i saradnici i Schmidl i saradnici [40], [57].

1.5.4. Miskantus kao sirovina za dobijanje pirolitičkog dizela

Osim upotrebe kao sirovine za dobijanje toplotne i električne energije, biomasa miskantusa se može koristiti i za sintezu pirolitičkog bio-ulja, odnosno dobijanje pirolitičkog dizela ili benzina.

Do sada je korišćenje biomase miskantusa kao sirovine za proces brze pirolize razmatrano u nekoliko istraživanja koja su se uglavnom bavila identifikacijom i ostvarivanjem optimalnih uslova za sintezu visokih prinosa tečne frakcije, odnosno sirovog pirolitičkog ulja [58]–[68]. Dokazano je da su sadržaj pepela i sastav ćelijskog zida miskantusa od presudne važnosti za kvalitet tečne frakcije pirolize. Viši prinosi tečne frakcije pirolitičkog ulja dobijaju se pri ranoj žetvi [61] dok se kvalitetnija biomasa za pirolizu dobija odlaganjem žetve, kad je niži sadržaj vlage (oko 10 %) [69] i pepela [65], ili predtretmanom biomase

kojim se uklanja mineralni sadržaj (pepeo) [63], [64]. Primenom đubriva niskog sadržaja azota snižava se sadržaj pepela u biljci ali se povećava sadržaj lignina [58]. Iako je visok sadržaj lignina povoljan za sagorevanje jer povećava toplotnu vrednost biomase, u procesu brze pirolize visoke koncentracije lignina negativno utiču na kvalitet pirolitičkog bio-ulja povećavajući viskoznost i nestabilnost [62]. Kim i saradnici [60] su proučavali idealne uslove za dobijanje pirolitičkog ulja u reaktoru sa fluidizovanim slojem i utvrdili da se maksimalni prinosi pirolitičkog ulja (57,2 wt %) od vrste *Miscanthus sacchariflorus* dobijaju na relativno niskim temperaturama od 350°C sa rezidentnim vremenom od 1,9 s.

Međutim, u ovim studijama nisu ispitivane faze stabilizacije i unapređivanja pirolitičkog ulja niti je vršena procena uticaja na životnu sredinu. Podaci o celokupnom procesu proizvodnje pirolitičkog goriva, prinosima pirolitičkog ulja, utrošenim količinama energije i emisijama gasova staklene bašte su uglavnom dostupni za dve najčešće korišćene sirovine za pirolizu, kukuruznu slamu [70]–[73] i drvenu biomasu [70], [71], [74]–[78]. S obzirom na veću morfološku sličnost između biomase miskantusa i kukuruza, u pripremi ove doktorske disertacije korišćeni su rezultati istraživanja koji se odnose na kukuruznu slamu.

Dosadašnja istraživanja analize životnog ciklusa pirolitičkih goriva od kukuruzne slame kao zamene fosilnih goriva (benzina i dizela) ukazuju da je najkritičniji proces proizvodnja vodonika koji se koristi u procesima unapređenja i stabilizacije. Ispitivanjem nekoliko različitih putanja dobijanja vodonika, pokazano je da jedan ekstremni slučaj (gde se sav vodonik dobija konverzijom prirodnog gasa), ima manju upotrebu fosilnih goriva i niže emisije gasova staklene bašte, redom 50 % i 51 % u odnosu na referentne fosilne sisteme, a drugi (gde se vodonik dobija interno - reformacijom frakcije pirolitičkog ulja) 79 % i 96 % [70]. Rezultati su pokazali da se na račun visine prinosa povećava ekološka pogodnost goriva. Putanja tokom koje su kvantifikovani najniži uticaji na životnu sredinu (sa najmanje utrošenim neobnovljivim izvorima energije i najmanjim uticajem na Globalno zagrevanje) je ujedno putanja u kojoj su ostvareni najniži prinosi goriva i obrnuto [71], [72]. Dodavanje pirolitičkog bio-uglja zemljištu umanjuje uticaj na globalno zagrevanje usled mogućnosti velikog zadržavanja ugljenika (36 g CO₂ eq MJ⁻¹ benzina) [71].

Kauffman i saradnici [73] su zaključili da bi bio gorivo dobijeno sa jednog hektara prinosa kukuruza moglo da emituje 52,1 % manje gasova staklene bašte u odnosu na benzin ukoliko bi se zrno koristilo za dobijanje etanola a stabljika za dobijanje pirolitičkog benzina.

2. Biomasa – definicija, vrste, primena

2.1. Uopšteno o biomasi

Biomasa predstavlja jedan od najzastupljenijih obnovljivih izvora energije, kako u svetu tako i u Republici Srbiji. U Direktivi 2009/28/EZ navodi se da je biomasa biorazgradiv deo proizvoda, otpada i ostataka biološkog porekla iz poljoprivrede (uključujući materije biljnog i životinjskog porekla), šumarstva i povezanih industrija, kao i biorazgradivi deo industrijskog i komunalnog otpada [79].

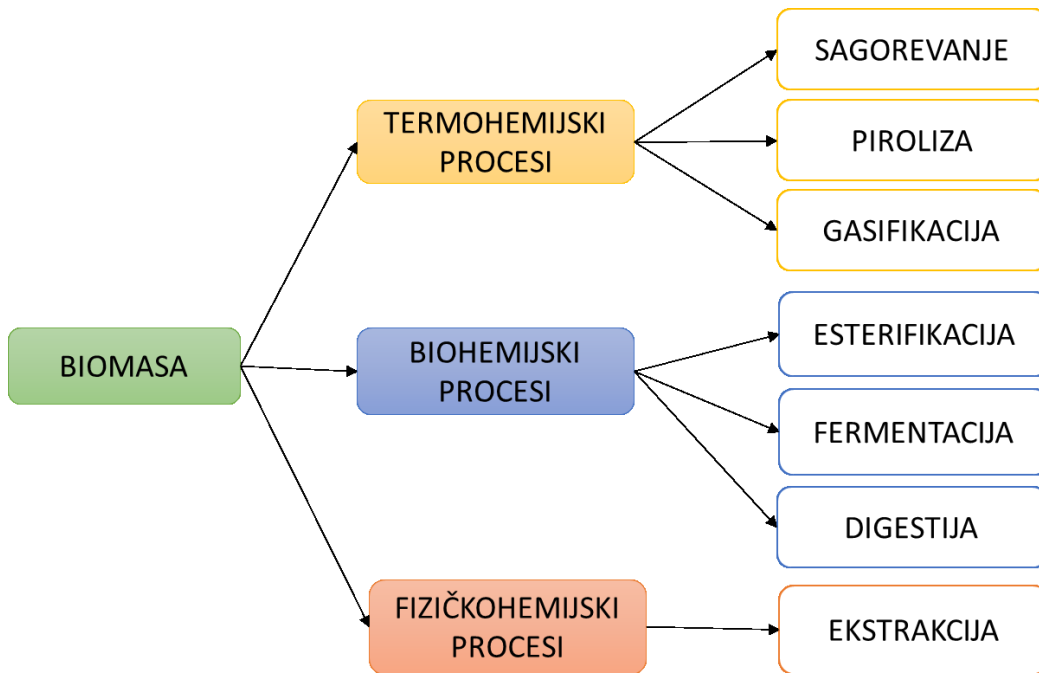
Kada se govori o biomasi koja se koristi za energetske svrhe, može se reći da ona predstavlja gorivo za dobijanje toplotne i električne energije, bilo direktnim sagorevanjem čvrstih oblika drvene materije (stabala i granjevine drveta, različitih biljaka i biljnih ostataka, kao i namenskih gajenih energetskih zasada), ili sagorevanjem gasovitih i tečnih oblika, koji se mogu dobiti odgovarajućim tehnološkim procesima od različitih oblika biomase [80].

Na osnovu agregatnog stanja biomasa se može podeliti na:

- Čvrstu biomasu – u koju spadaju ostaci ratarske proizvodnje, ostaci rezidbe iz voćarstva i vinogradarstva, ostaci šumarstva, biljna masa brzorastućih biljaka, deo komunalnog otpada, ostaci iz drvoprerađivačke industrije, ostaci primarne i sekundarne prerade poljoprivrednih proizvoda i dr.
- Tečnu biomasu – u koju spadaju tečna biogoriva, kao što su biljna ulja i transesterifikovana biljna ulja, odnosno bio-dizel, bio-etanol, sintetička biogoriva i dr.
- Gasovitu biomasu – u koju spada bio-gas koji se proizvodi iz životinjskih ekskremenata, od energetskih biljaka ili od druge orpadne materije. U gasovitu i tečnu biomasu spadaju i produkti gasifikacije/pirolize čvrste materije [80].

2.2. Tehnologije konverzije biomase

Biomasa se može konvertovati u energiju primenom termo-hemijskih, bio-hemijskih i fizičko-hemijskih procesa (slika 2.1) [81].



Slika 2.1. Načini konverzije biomase [81]

Od svih pomenutih tehnologija konverzija biomase u ovoj disertaciji se razmatraju termohemijski procesi kao što su sagorevanje i piroliza.

2.2.1. Sagorevanje

Sagorevanje biomase je najstarija tehnologija energetske konverzije i predstavlja najčešći način za dobijanje energije. Sagorevanje biomase u industriji ili u sistemima grejanja se odvija u pećima i kotlovim određene snage gde se kao finalni proizvod dobija toplotna energija koja se koristi u raznim procesima ili za grejanje domaćinstava. U poslednje vreme sagorevanjem biomase se dobija i električna energija, posebno u postrojenjima za kogeneraciju [80].

2.2.1.1. *Priprema biomase za sagorevanje*

Da bi biomasa mogla da se koristi u postrojenjima i/ili instalacijama za sagorevanje neophodno ju je prethodno prikupiti, transportovati i skladištiti na odgovarajući način. Proces prikupljanja podrazumeva seču drvenastih ili kosidbu zeljastih biljaka i njeno prikupljanje i grupisanje. Kod zeljastih biljaka, kao sto su poljoprivredne kulture, nakon košenja na polju ostaje slama koja se dalje može spremati na tri načina: u obliku bala (malih ili velikih, cilindričnih, okruglih ili četvrtastih), u obliku stogova ili u rinfuzi. Svi ovi oblici spremanja poljoprivredne biomase su ekonomski isplativi ukoliko se biomasa koristi u okviru poljoprivrednog gazdinstva na čijem posedu je vršeno prikupljanje [54]. Za primenu biomase kao energenta u objektima koji su udaljeni od poljoprivrednih gazdinstava i, uopšte, od ruralnih sredina, neophodna je dodatna obrada kako bi bio moguć i isplativ njen dalji transport i rukovanje. Ovo podrazumeva povećanje nasipne gustine (mase) proizvoda biomase što se postiže operacijama kao što su briketiranje ili peletiranje. Ovi procesi se mogu primeniti u slučaju kad se vlažnost biomase kreće između 16 i 18 %, i kad se izvrši usitnjavanje biomase na komade veličine <10 mm [54]. Procesi briketiranja i peletiranja podrazumevaju primenu odgovarajućih presa kojima se osušena i usitnjena biomasa zagreva i presuje. Kao krajni proizvod dobija se jako komprimovani proizvod (briket ili pellet) koji je lakši za transport, manipulaciju i sagorevanje. U poređenju sa baliranom slamom koja ima nasipnu gustinu od 70 do 100 kg m⁻³, briket ima nasipnu gustinu od 300 do 500 kg m⁻³, što znači da se briketiranjem gustina slame povećava oko pet puta [54].

Dobijeni briketi su valjkastog oblika, poprečnog preseka do 7 cm sa centralnim otvorom (prečnika oko 2 cm) (slika 2.2) koji služi za odvođenje viška vodene pare koja se formira prilikom procesa briketiranja. Dužina briketa zavisi od same sirovine i načina briketiranja i može se kretati od 5 cm do 20 cm, sa proskom od oko 10 cm [82].



Slika 2.2. Briketi od slame: 1) miskantusa, 2) ječma i 3) livadskog sena [82].

Peleti su valjkastog, cilindričnog oblika prečnika 6-10 mm i dužine 10-30 mm. S obzirom na male dimenzije dobijenih peleta u odnosu na briket, prilikom pripreme biomase za peletiranje i u toku procesa peletiranja troši se više energije nego prilikom briketiranja [35], [55] i emituju se veće količine gasova staklene bašte [55]. Zaključuje se da su najoptimalnije sirovine za peletiranje drvena sečka, piljevina i strugotina dok peletiranje poljoprivrednih useva nije uvek isplativo. Za razliku od briketa koji se mogu koristiti u bilo kojim pećima i kotlovima za sagorevanje čvrstih goriva bez prethodnih modifikacija, korišćenje peleta zahteva delimične izmene konstrukcije i načina sagorevanja. Ovo je u vezi sa samim karakteristikama peleta koji u odnosu na druga čvrsta goriva imaju niži sadržaj pepela i vlage, veći sadržaj isparljivih materija i visoku toplotnu moć [80].

Takođe, za razliku od peleta koji relativno brzo izgore, sagorevanje briketa je dosta ravnomernije i odvija se u dužem vremenskom periodu. Na osnovu svega nabrojanog, u ovoj disertaciji se razmatra korišćenje briketa kao ulazne sirovine za proces sagorevanja i dobijanja toplotne energije.

2.2.1.2. *Sagorevanje biomase*

Sušenje, piroliza i gasifikacija su početni koraci prilikom sagorevanja čvrstih goriva. Prednost sagorevanja drvene i zeljaste biomase se ogleda u neutralnosti emisija CO₂ s obzirom da se smatra da se sagorevanjem biomase oslobađa ona količina CO₂ koju je biljka asimilovala u toku rasta [27], [30], [83]. Ova pretpostavka se može smatrati tačnom ukoliko se posmatra sagorevanje biomase od zeljastih, brzorastućih useva koji se kose jednom godišnje ali se ne može primeniti i na spororastuću biomasu drveća. Emisije CO₂ prilikom sagorevanja biomase se ispuštaju u atmosferu u toku kraćeg vremenskog perioda, ali vezivanje ove količine CO₂ od strane nove vegetacije traje mnogo duže, u okviru nekoliko godina, u zavisnosti od odabranog perioda ophodnje [84]. S obzirom da drveću treba i do 100 godina da izraste, sistem se može označiti kao CO₂ neutralan tek na kraju odgovarajućih vremenskih granica dok se kod brzorastućih energetskih useva CO₂-neutralnost ostvaruje u mnogo kraćem vremenskom roku.

Osim emisija CO₂, sagorevanjem biomase se oslobađaju i oksidi azota (NO_x) koji nastaju od N sadržanog u tkivima biljaka, i dobija se pepeo (kalijum i hlor kao izvori KCl). Drvna biomasa predstavlja najoptimalniju sirovinu za sagorevanje jer sadrži male količine azota i pepela a zeljasta (slama, miskantus, switchgrass, itd.) sadrži veće količine N, S, K, Cl, itd. koje uzrokuju veće emisije NO_x i čestica, stvaraju veće količine pepela, i uzrokuju koroziju i taloženje. Za smanjenje emisija NO_x prilikom sagorevanja biomase koristi se sagorevanje izgaranjem [81].

2.2.2. *Piroliza*

Proces pirolize podrazumeva termalnu razgradnju biomase u odsustvu kiseonika gde se kao finalni proizvodi dobijaju: 1) pirolitičko bio-ulje (tečna frakcija), 2) bio-ugalj (čvrsta frakcija) i 3) ne-kondezujući gasovi (CH₄, CO) [85].

U zavisnosti od reakcione temperature, brzine zagrevanja i vremena boravka, razlikuju se tri tipa pirolize: spora, brza i fleš piroliza [86]. Detaljne razlike između sve tri vrste pirolize prikazane su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Vrste pirolize i tipovi reaktora [86]:

	spora piroliza	brza piroliza	fleš piroliza
Uslovi odvijanja procesa			
Brzina zagrevanja (°C/s)	0,1 - 10	10 - 200	> 1000
Veličina čestice (mm)	5 - 50	< 1	< 0,2
Vreme boravka pare (s)	450 - 550	0,5 - 10	< 0,5
Prinos produkata (% maseni udeo, vlaža osnova)			
Tečna faza	~ 30	60 - 75	~ 80
čvrsti ostatak	~ 35	15 - 25	~ 15
Gas	~ 35	15	~ 5
Tip reaktora	- Reaktor sa fiksnim slojem; - Vakuum reaktor	- Reaktor sa barbotaznim fluidizovanim slojem; - Reaktor sa fluidizovanim i cirkulacionim slojem; - Ablativni reaktor; - Vakuum reaktor	- Reaktor sa fluidizovanim slojem; - Reaktor sa fluidizovanim i cirkulacionim slojem;

2.2.2.1. Brza piroliza

U ovoj disertaciji detaljnije će se obrađivati brza piroliza u reaktoru sa fluidizovanim slojem. Tokom ovog procesa, pored kinetike hemijskih reakcija, dešavaju se i prenos toplote i mase kao i fenomen tranzicije faza. Visoke prinose sirovog bio-ulja je moguće ostvariti ako se obezbedi veoma usitnjena biomasa (za bolji transfer toplote), strogo kontrolisana temperatura procesa pirolize od oko 500°C, temperatura parne faze od 400 do 450°C, kratko vreme zadržavanja pare (uglavnom ispod 2 sekunde) i brzo hlađenje para pirolize

(„quenching“ – gašenje) [85]. Wright i saradnici [70] su analizirali postrojenje za brzu pirolizu biomase koje ima dnevni kapacitet od 2000 metričnih tona suve-kondicionirane kukuruzne šaši i čija je šema data na Slika 2.3.

2.2.2.1.1. *Priprema biomase za pirolizu i piroliza*

Pripremna faza biomase za proces pirolize se sastoji od procesa sušenja i sitnjenja. Supstrat za pirolizu se usitnjava na komade od nekoliko mm veličine koji se potom suše dok udeo vode bude oko 7 % ukupne težine. Udeo vode u sirovini veći od 7 % troši toplotu procesa i utiče na smanjenje prinosa bio-ulja. Ovako pripremljena biomasa se dalje šalje u reaktor gde se vrši proces pirolize. Dobijena para pirolize se nakon nekoliko sekundi hladi i kondenzuje u tamno-braon tečnost, bio-ulje, a dobijaju se i bio-ugalj i ne-kondenzujući gasovi. Sitne čestice bio-uglja se mogu izdvojiti ciklonima i sagoreti u gorioniku pri čemu je moguće obezbediti toplotu za sam proces pirolize kao i za proces sušenja biomase (slika 2.3). Ne-kondenzujući gasovi, zbog velikog sadržaja metana, takođe predstavljaju dobar izvor toplote za proces pirolize i/ili sušenja [85].

2.2.2.1.2. *Stabilizacija (hidrotretiranje) i unapređivanje (hidrokrakovanje) sirovog bio-ulja*

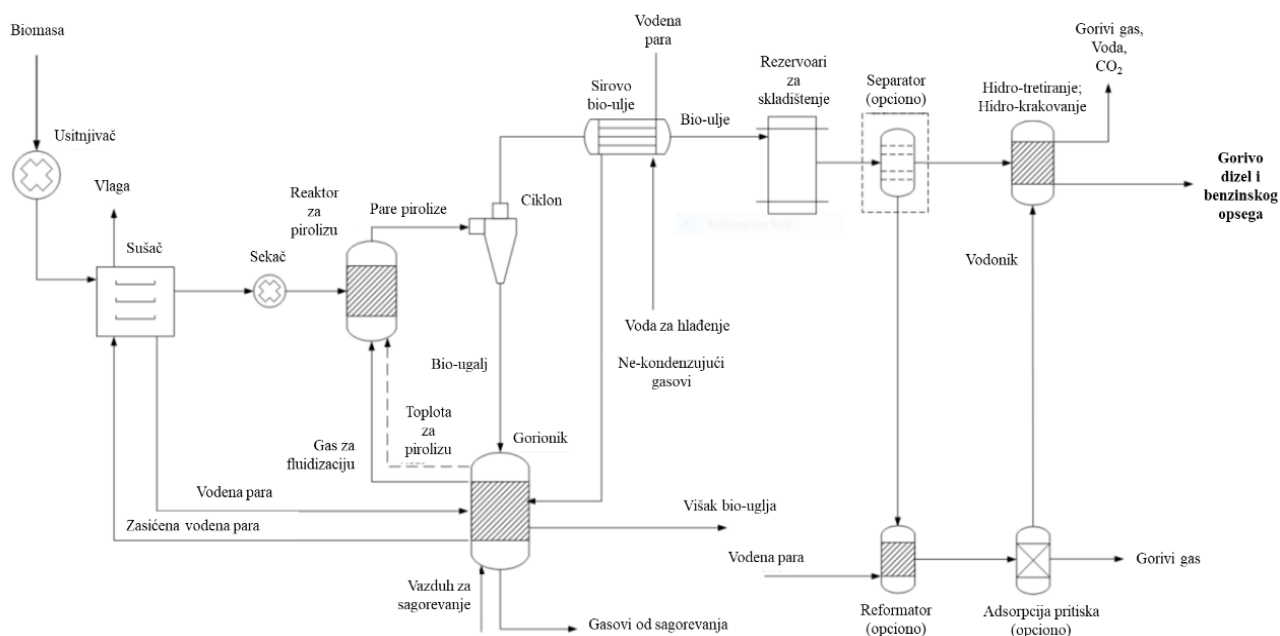
Dobijeno bio-ulje je hemijski nestabilno, veoma viskozno sa velikim udelom čvrstih materija, delimično isparljivo i ima nisku toplotnu moć [87] i mora se stabilizovati za šta se uglavnom koristi vodonik. Hidrotretiranje, odn. tretiranje vodonikom je egzotermni proces koji se uglavnom koristi u industriji nafte da selektivno ukloni nečistoće koje mogu nepovoljno da utiču na opremu. Tretiranje vodonikom se odigrava u sredini bogatoj vodonikom (oko 95 mol % ili 5 % težine) gde su tipični uslovi procesa pritisak od 7–10 MPa (1,000–1,500 psi) i temperature od 300°- 400°C u prisustvu kobalt-molibden katalizatora [88].

Hidrokrakovanje je sledeći korak pri dobijanju pirolitičkog dizela ili benzina u kome se teški molekuli bio-ulja (od oko 30 C atoma i više) razlažu na kraće lance približne veličine dizela (C12) ili benzina (C8). Uslovi za odigravanje ovog procesa su nešto strožiji nego za

hidro-tretiranje: pritisci od 10–14 MPa (1,500–2,000 psi) a temperature od 400°-450°C a kao katalizator se koristi se niki-molibden [88].

Procesi stabilizacije i unapređivanja bio-ulja se mogu dešavati na istom mestu (napr. u biorafineriji) ili odvojeno (biorafinerija-stabilizacija, rafinerija nafte-unapređivanje). Prvi slučaj je označen kao *integrisana pirolitička putanja* a drugi kao *distribuirana pirolitička putanja* [70].

Sintetisano bio-ulje sadrži veliki broj lakih i teških jedinjenja. Sadrži vodo-rastvornu „vodenu“ fazu od čijeg dela se reformacijom može proizvesti potreban vodonik i sadrži težu frakciju koja se uglavnom sastoji od lignina i koja se može hidrokrakovati na lakše molekule [89]. Teža frakcija se odvaja gravitacijom a preostala lakša frakcija se meša sa parom i šalje u visoko-temperaturni pre-reformator gde se konvertuje u sintetički gas. Ovaj sintetički gas se zajedno sa metanom dalje šalje u reformator gde se vrši sinteza vodonika [89]. Pirolitička putanja u kojoj se vodonik dobija eksterno, reformacijom prirodnog gasa, se označava kao - *H₂ eksterna putanja* a putanja u kojoj se vodonik dobija interno, odnosno od lakše frakcije sirovog bio-ulja, se označava kao - *H₂ interna putanja* [70]. U internoj putanji se dobijaju niži prinosi finalnog proizvoda, pirolitičkog dizela ili benzina u odnosu na eksternu.



Slika 2.3. Dijagram toka celokupnog procesa brze pirolize i procesa unapređivanja pirolitičkog ulja sa opcionalnim proizvodnjim vodonika [70].

2.3. Energetski usevi

Pod energetskim usevima smatraju se biljke koje se zbog određenih karakteristika koriste za dobijanje energije [90]–[92]. Te karakteristike su veoma efikasna konverzija solarne energije u biomasu [93], obrazovanje visokih prinosa biomase, niske potrebe za agrohemijskim i energetskim unosima, niske potrebe za vodom i niska vlažnost pokošene biomase [94]. U odnosu na dužinu životnog ciklusa, energetski usevi se mogu podeliti na jednogodišnje i višegodišnje. Među jednogodišnjim energetskim usevima izdvajaju se šećerna trska, šećerna repa, žitarice, uljana repica i ostale uljarice, koji se uglavnom koriste za dobijanje biogoriva (prva i druga generacija biogoriva) dok se višegodišnji usevi koriste kao sirovine za dobijanje električne i toplotne energije. Među višegodišnjim energetskim usevima izdvajaju se zeljaste biljke: miskantus (*Miscanthus spp.*), prerijsko proso ili Switchgrass (*Panicum virgatum* L.), trstika (*Phalaris arundinacea* L.) i mediteranska trska (*Arundo donax*) (slika 2.4), i drvenaste: vrba (*Salix spp.*) i topola (*Populus spp.*) [91], [92]. Za razliku od jednogodišnjih useva, utrošci energije prilikom uzgoja višegodišnjih biljaka su mnogo niži jer se energetski intenzivne poljoprivredne aktivnosti (oranje, sadnja, đubrenje) obavljaju samo u toku prve godine [47]. Ove biljke imaju visok potencijal smanjivanja emisija CO₂ i zadržavanja ugljenika u zemljištu. Smatra se da se sagorevanjem ovih biljaka emituje onoliko CO₂ koliko je asimilovano prilikom rasta.

Za sada ne postoje pouzdani podaci o uzgoju energetskih useva u Republici Srbiji. Na osnovu dosadašnjih istraživanja sprovedenih u Sjedinjenim Američkim Država (SAD) i u Evropi, procenjeno je da su miskantus (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) i prerijsko proso najpovoljniji izbor za uzgoj energetskih plantaža u smislu niskih inputa energije [23]–[25]. Simić i Dželetović [26] zaključuju da se prerijsko proso veoma otežano zasniva iz semena u agroekološkim uslovima Srbije i ističu da za sada ne postoji interes za uzgoj ove biljke. Takođe, napominju da miskantus pokazuje najbolje karakteristike u odnosu na ostale ispitivane energetske biljke. Obična trska i mediteranska trska imaju nešto lošiji kvalitet biomase za sagorevanje od miskantusa (veća emisija azot oksida i sumpor oksida, niža toplotna moć) u odnosu na miskantus a trstika, iako poseduje kvalitetnu biomasu za

sagorevanje, obrazuje niske prinose pa se smatra da nije od značaja za korišćenje u energetske svrhe [26].



Slika 2.4. Višegodišnji energetske usevi: a) miskantus (*Miscanthus x giganteus*); b) prerijsko proso (*Panicum virgatum*); c) trstika (*Phalaris arundinacea*); d) mediteranska trska (*Arundo donax*) [95]–[98].

2.4. Miskantus kao obnovljiv izvor energije

2.4.1. Uopštene karakteristike

Miscanthus x giganteus je višegodišnja biljka iz porodice trava, C₄ fotosintetskog puta [99], triploidni hibrid poreklom iz Azije nastao ukrštanjem dve vrste, *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus sacchariflorus* [100].

Prosečna koncentracija ugljenika u biomasi miskantusa iznosi 48,3 %, količina kiseonika iznosi 42,2 %, vodonika 5,6 %, azota 0,3 %, fosfora <0,1 %, kalijuma 0,8 %, kalcijuma 0,1 %, sumpora <0,1 %, hlora <0,2 % a sadržaj pepela je oko 2,6 % [82]. Donja toplotna moć biomase od miskantusa se kreće u opsegu od 17 do 19,2 GJ t⁻¹ [82], [101].

U toku životnog veka, od 15. do 20. godina miskantus ostvaruje visoke godišnje prinose biomase [102]. U centralnoj i severnoj Evropi, zabeleženi su godišnji prinosi miskantusa od 10 do 25 t suve materije (s.m.) po hektaru, a čak do 30 t s.m. u južnim delovima Evrope [20], [35], [99], [103].

Do sada je u Evropi osnovano nekoliko energetske plantaže miskantusa: u Francuskoj se miskantus gaji na 400 ha [32], [104], u Rumuniji na preko 600 ha [39], [57] u Nemačkoj na oko 3,000 ha, u Poljskoj na 4,000 ha, u SAD na 6,600 ha a u Ujedinjenom Kraljevstvu na 9,000 ha [100], [105].

U Srbiji još uvek nije započelo komercijalno plantažno gajenje miskantusa za energetske potrebe već je uzgoj miskantus još uvek u eksperimentalnoj fazi.

2.4.2. Potencijal za uzgoj miskantusa u agroekološkim uslovima Srbije

Osim uticaja različitih klimatskih uslova na prinos miskantusa su utiče i tip zemljišta na kome se vrši sadnja, gustina sadnje rizoma, primenjena količina đubriva tokom faze rasta, obezbeđenost vodom i vreme žetve [20], [47], [99].

U Srbiji su 2007. godine osnovane prve ogledne parcele sa miskantusom na dva različita lokaliteta, odnosno na dva različita tipa zemljišta, na kojima se vrše ispitivanja u cilju identifikovanja optimalnih uslova za dobijanje visokih prinosa biomase.

Prva parcela je osnovana na karbonatnom černozeu, na lokaciji Zemun (44°51' SGŠ, 20°22' IGD; laka glinuša, pH_{H2O} 7,3; srednje humozno zemljište, ukupni sadržaj azota 0.141%) koji pripada zemljištu I kategorije (slika 2.5), a druga na gajnjači, odnosno eutričnom kambisolu, na lokaciji Rajja (44°34' SGŠ, 20°34' IGD; laka glinuša, pH_{H2O} 5,3; slabo humozno zemljište, ukupni sadržaj azota 0,114%) [47] koja pripada zemljištu II kategorije. Ogledne parcele su dimenzija 5×4 m² i nasumično su odabrane na svakoj lokaciji u tri replikacije [106]. Primijenjena su tri različita tretmana đubrenja: unošenje 667 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹ (odnosno: 100 kg N ha⁻¹ + 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 100 kg K₂O ha⁻¹), unošenje 333 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹ (50 kg N ha⁻¹ + 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 50 kg K₂O ha⁻¹) i bez unošenja đubriva i tri različita režima gustine sadnje rizoma: jedan rizom po m², dva rizoma po m² i tri rizoma po m². Zaključeno je da su za agroekološke uslove šire okoline Beograda, optimalna gustina sadnje dva rizoma po m² i optimalan režim đubrenja sa 333 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹, s obzirom da su dobijene male razlike u visini prinosa prve tri godine između ovog tretmana i tretmana sa 667 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹ (slika 2.5). U tabeli 2.2 dati su dobijeni prinosi miskantusa gajenog na černozeu za sva tri različita režima sadnje i đubrenja u prve tri godine.

Od 2012. godine otpočelo je gajenje miskantusa na još tridesetak lokacija širom Srbije (okolina Šapca, Skorenovca, Vranja, Snegotina), na zemljištima I i II kategorije, uglavnom na parcelama u privatnom vlasništvu te reprezentativni i pouzdani podaci o prinosima miskantusa na ovim lokalitetima nisu dostupni. U svakom slučaju, očekivani prinosi biomase miskantusa gajenog na svim ovim lokacijama i tipovima zemljišta u Srbiji trebalo bi da se kreću u rasponu između onih koji su ostvarenih na černozeu i gajnjači, s obzirom da se nalaze u opsegu I i II kategorije zemljišta [95].

a)



b)





Slika 2.5. Ogljedno polje miskantusa u Zemunu (Institut za primenu nuklearne energije - INEP) na zemljištu tipa černozem, decembar 2015. godine: a) i b) režim sadnje 2 rizoma po m^2 (levo) i režim sadnje 3 rizoma po m^2 , uz primenu 333 kg NPK đubriva (sredina) i 667 kg NPK đubriva (desno); c) režim sadnje bez primene đubriva, 2 rizoma po m^2 (levo) i 1 rizom po m^2 (desno). Metlice se formiraju pri nepovoljnijim uslovima uzgoja (slike iz privatne arhive doktorantkinje).

Tabela 2.2. Prinos nadzemne biomase miskantusa u odnosu na sva tri različita režima gustine sadnje i primene mineralnih đubriva na karbonatnom černozemu (Zemun) u toku prve tri godine od zasnivanja ogleda (februarska žetva, tona suve materije po ha \pm SD)[47].

Tretman	Gustina sadnje	1.godina (2008/2009.)	2.godina (2009/2010.)	3.godina (2010/2011.)
0	1 rizom m^{-2}	0,06 \pm 0,01	0,32 \pm 0,14	3,83 \pm 1,27
(bez unošenja đubriva)	2 rizoma m^{-2}	0,20 \pm 0,09	2,17 \pm 0,83	14,85 \pm 3,37
	3 rizoma m^{-2}	0,12 \pm 0,05	0,43 \pm 0,83	5,85 \pm 3,37
333 kg NPK	1 rizom m^{-2}	0,18 \pm 0,08	1,07 \pm 0,71	9,09 \pm 3,53

15:15:15	ha ⁻¹	2 rizoma m ⁻²	0,29 ± 0,10	4,67 ± 1,42	18,60 ± 7,03
godišnje		3 rizoma m ⁻²	0,20 ± 0,09	1,23 ± 0,23	7,66 ± 0,58
667 kg	NPK	1 rizom m ⁻²	0,24 ± 0,16	2,33 ± 0,61	10,55 ± 6,33
15:15:15	ha ⁻¹	2 rizoma m ⁻²	0,34 ± 0,09	4,48 ± 1,00	20,22 ± 1,26
godišnje		3 rizoma m ⁻²	0,23 ± 0,13	2,49 ± 0,09	15,26 ± 0,02

Rezultati ukazuju da se na kvalitetnijem zemljištu (černozem) dobijaju ujednačeniji prinosi miskantusa, što se ogleda kroz dobijene niže vrednosti standardne devijacije (tabela 2.2).

Najveći problem prilikom uzgoja energetskih biljaka predstavlja zauzimanje kvalitetnog, plodnog zemljišta koje se može koristiti za gajenje poljoprivrednih kultura koje se koriste u ishrani ljudi i životinja. Prema poslednjem Popisu poljoprivrede iz 2012. godine, ustanovljeno je da Srbija ima veliki broj napuštenih i zaparloženih poljoprivrednih površina (60000 ha u severnom delu zemlje) koje bi se mogle koristiti za gajenje energetskih useva bez ugrožavanja snabdevenosti hranom u bliskoj budućnosti [107], [108]. Pa ipak za dalja istraživanja vezana za uspostavljanje energetskih plantaža, neophodno je ispitati i mogućnosti gajenja ovih biljaka i na zemljištima nižeg kvaliteta, na marginalnim zemljištima, kao što su odlagališta pepela i šljake.

U dosadašnjim istraživanjima pokazano je da se miskantus može gajiti na pepelu bez upotrebe đubriva [109], utiče na smanjenje rizika od erozije [25], koristan je u procesu fitoremedijacije teških metala u zemljištima [110] i može se koristiti za remedijaciju ocednih voda iz zemljišta [111]. U svim ovim slučajevima se ostvaruju niži prinosi biomase miskantusa.

Dobijeni prinos miskantusa gajenog na odlagalištima pepela i šljake termoelektrane „Kolubara“ u toku prve četiri godine od zasnivanja useva prikazani su u tabeli 2.3 [112].

Tabela 2.3. Prosečni prinosi biomase miskantusa u toku zimske žetve, na dva kvalitetna tipa zemljišta u toku prvih pet godina i na marginalnom zemljištu u toku prve četiri godine od zasnivanja, uz primenu 667 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹ mineralnog đubriva i gustinu sadnje od 2 rizoma po m² [t s.m. ha⁻¹] [47]

tip zemljišta	1.godina (2008/2009)	2.godina (2009/2010)	3.godina (2010/2011)	4.godina (2011/2012)	5.godina (2012/2013)
černozem (Zemun)	0,34 ± 0,09	4,48 ± 1,00	20,22 ± 1,26	28,29 ± 6,54	21,86 ± 1,35
gajnjača (Ralja)	1,01 ± 0,80	7,68 ± 6,47	15,50 ± 9,53	18,89 ± 6,54	11,26 ± 3,18
odlagalište pepela TA „Kolubara“ (Veliki Crljeni, Lazarevac)	1.godina (2011/2012)	2.godina (2012/2013)	3.godina (2013/2014)	4.godina (2014/2015)	
	0,08 ± 0,02*	0,25 ± 0,02	2,20 ± 0,45	5,88 ± 1,17	

*u obzir su uzeti najviši prinosi miskantusa na pepelištu dobijeni pri gustini sadnje od 3 rizoma po m² i đubrenje samo tokom prve godine.

Suša negativno deluje na prinos miskantusa pogotovo u prvoj godini od zasnivanja useva. Dželetović navodi da je glavni uzrok niskih prinosa u prvoj godini još uvek nedovoljno razvijen korenov sistem miskantusa koji je podložan sušenju i propadanju usled toplotnih udara i izraženih perioda suše tokom letnjih meseci koji su sve učestalija pojava u Srbiji, što je i bio slučaj 2008. godine kad su rizomi zasađeni [47]. Niske prinose biomase miskantusa u toku prve godine od osnivanja zasada dobili su i Riche i saradnici [113] 0,24-0,42 t s.m. ha⁻¹ odnosno 0,1-3,7 t s.m. ha⁻¹.

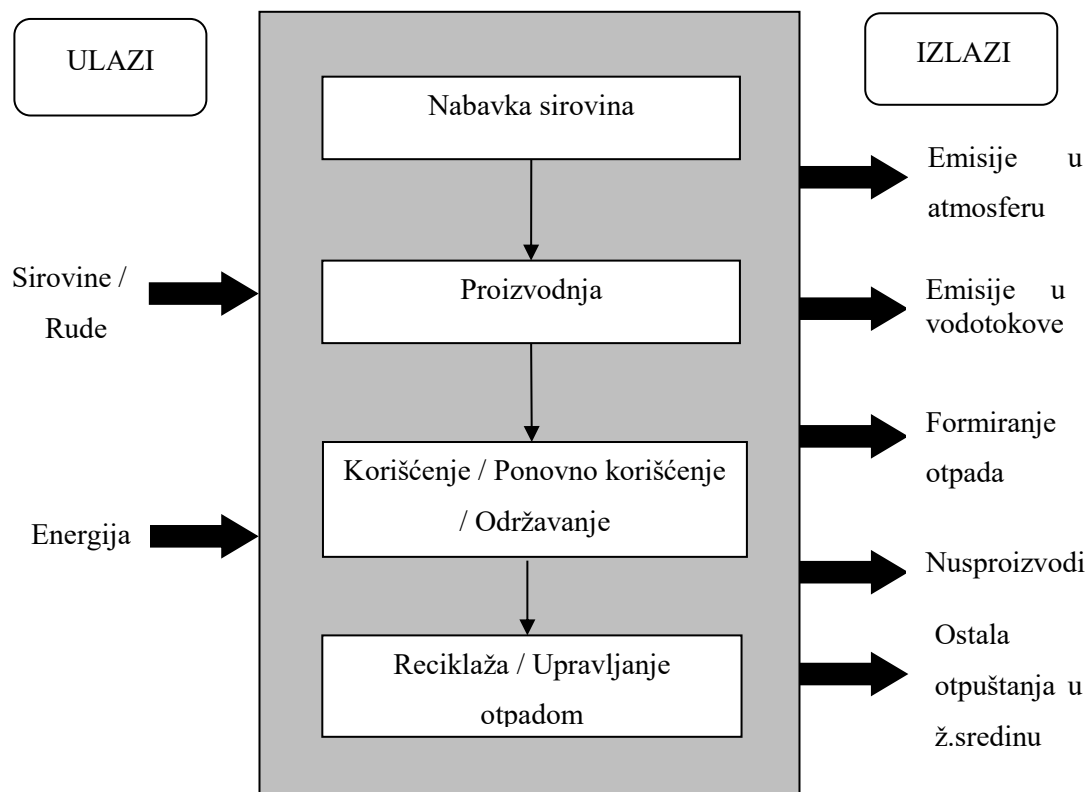
Žetva miskantusa se vrši u periodu od prvih mrazeva do ponovnog nicanja useva u proleće, uglavnom između novembra i aprila [47]. U poređenju sa jesenjom žetvom, gde se dobijaju viši prinosi biomase, zimskom žetvom se dobijaju niži prinosi (usled sušenja, otpadanja listova i gornjih delova stabala) ali bolji kvalitet biomase za sagorevanje usled nižeg sadržaja pepela i vode [20],[103], [114]. Dželetović i saradnici su ustanovili prosečno umanjeње prinosa biomase miskantusa od 33 % do 38 % u zimskoj žetvi u odnosu na jesenju [106].

Rezultati ovih istraživanja potvrđuju da uzgoj miskantusa u energetske svrhe u Srbiji ima veliki potencijal. Osim za dobijanje energije, biomasa miskantusa se može koristiti i kao sirovina za proizvodnju papira, za proizvodnju biorazgradivih proizvoda (sudovi od miskantusa, biodegradabilna plastika), kao građevinski materijal, za ulepšavanje parkova i zelenih površina ali i za fitoremedijaciju zagađenih zemljišta [47].

3. Metoda Ocene životnog ciklusa

Najčešće korišćena metoda koja se koristi kao pomoć donosiocima odluka u cilju favorizovanja korišćenja OIE u odnosu na tradicionalna, fosilna goriva je *Ocena životnog ciklusa* (eng. *Life Cycle Assessment - LCA*) [94], [115]. LCA kvantifikuje potencijalne opasnosti po životnu sredinu tokom čitavog životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti. Danas je ocena životnog ciklusa jedna od vodećih i najčešće korišćenih alatki za upravljanje životnom sredinom, kao i za procenu uticaja životnog ciklusa goriva od biomase [94].

Ocena životnog ciklusa nekog proizvoda uspostavlja stvaranje masenog bilansa u ispitivanom sistemu analizom svih ulaza i izlaza proizvoda tokom čitavog njegovog životnog ciklusa ili tokom nekih faza životnog ciklusa [10]. Drugim rečima, LCA obezbeđuje sistematski, holistički i multidisciplinarni pristup u kvantifikaciji opterećenja u životnoj sredini i njihovim potencijalnim uticajima tokom čitavog životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti (slika 3.1). Iako se u nekim industrijskim sektorima koristi već oko 20 godina, tek od početka devedesetih godina prošlog veka LCA doživljava metodološki razvoj za pomoć pri upravljanju životnom sredinom u privatnom i javnom odlučivanju [115]. Uključivanje ekoloških performansi zasnovanih na konceptu životnog ciklusa u procese donošenja odluka korisno je za akademske institucije, javne ustanove, kompanije i industrijske organizacije [116]. LCA metodologija se još uvek razvija i širi svoju primenu na više različitih oblasti, tj. proizvoda i procesa [10].

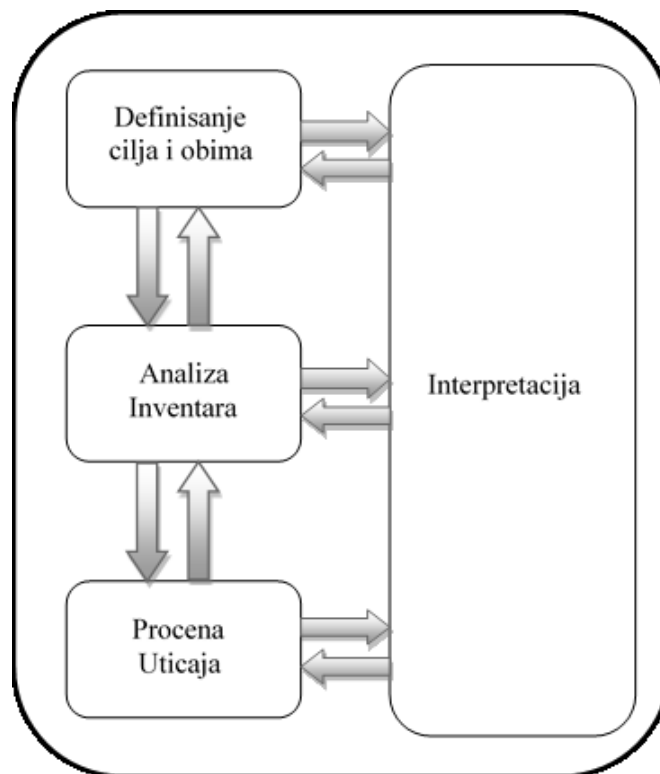


Slika 3.1. Šema životnog ciklusa proizvoda

U svetu su prihvaćena dva međunarodna standarda koja pružaju okvire za LCA: ISO 14040 (ISO 14040:2006) i ISO 14044 (ISO 14044:2006). ISO 14040 razmatra principe i okvire LCA dok ISO 14044 određuje uslove i daje smernice za sprovođenje LCA studije [10].

LCA studija obuhvata četiri faze (slika 3.2):

1. faza definisanja svrhe (cilja) i obima (predmet i područje primene) istraživanja - (engl. „*Goal and scope definition*“);
2. faza analize inventara životnog ciklusa - (engl. „*Life Cycle Inventory (LCI) analysis*“);
3. faza ocene uticaja životnog ciklusa - (engl. „*Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*“);
4. faza interpretacije odnosno tumačenja rezultata – (engl. „*Life cycle interpretation*“).



Slika 3.2. Faze i interaktivna priroda LCA metode [10].

3.1. Faza definisanja svrhe i obima istraživanja

U prvoj fazi se osim definisanja cilja studije, navode razlozi za sprovođenje LCA studije, primena i korisnici studije [117], [118], definišu se granice sistema i određuje funkcionalna jedinica. Funkcionalna jedinica predstavlja kvantifikovanu funkciju ispitivanog proizvoda ili sistema, (kao na primer 1 MJ proizvedene toplote, 1 m³ ogrevnog drveta itd.) u odnosu na koju se proračunavaju svi ulazi i izlazi ispitivanog sistema i vrši poređenje sa drugim referentnim sistemima ili vrši benčmarking proizvoda. Pojam koji još detaljnije kvantifikuje funkciju ispitivanog sistema je referentni protok (engl. “*reference flow*”). Referentni protok predstavlja količinu proizvoda koja je neophodna da bi se ispunila funkcija ispitivanog sistema. Razlike između funkcije sistema, funkcionalne jedinice i referentnog protoka sistema se najbolje mogu ilustrovati na primeru građevinske boje. Funkcija građevinske boje

je da oboji i zaštiti određenu površinu, funkcionalna jedinica boje je da napr. oboji i zaštiti 10 m² ofarbane površine na deset godina, a referentni protok je 1 l boje, što predstavlja količinu boje neophodnu da se oboji i zaštiti 10 m² površine na deset godina. Definisanje funkcionalne jedinice i/ili referentnog protoka predstavlja kamen temeljac svake LCA studije pa treba posebno biti oprezan i pažljiv pri njenom određivanju [119].

Postavljanjem granica sistema se određuje koji jedinični procesi će biti uključeni u ispitivani sistem. Na osnovu različitih granica sistema može se izdvojiti pet tipova LCA studija [120]:

- 1) “Od koevke do groba” (cradle-to-grave) studije podrazumevaju analizu uticaja u toku celog životnog ciklusa proizvoda, od ekstrakcije sirovina za proizvodnju (cradle) do odlaganja finalnog proizvoda na deponiju na kraju njegovog životnog ciklusa (grave).
- 2) “Od koevke do koevke” (cradle-to-cradle) studije podrazumevaju još “šire” granice sistema u odnosu na cradle-to-grave, jer obuhvataju i proces reciklaže na kraju životnog ciklusa proizvoda. U ovim studijama podrazumeva se da se istrošeni proizvod na kraju životnog ciklusa reciklira u nov proizvod, istog tipa (zatvoreni tip reciklaže – napr. iskorišćena staklena flaša se reciklira u novu staklenu flašu) ili različitog tipa (otvoreni tip reciklaže – napr. dobijanje staklene vune od iskorišćenih staklenih flaša) [120]–[123].
- 3) “Od koevke do kapije” (cradle-to-gate) studije podrazumevaju “uže” granice sistema, od ekstrakcije sirovine za proizvodnju ispitivanog proizvoda, do dolaska u postrojenje za dalju preradu (“factory gate”), ili finalnog potrošača, gde su faze upotrebe i finalnog odlaganja izostavljene [124]–[126].
- 4) “Od kapije do groba” (grave-to-grave) studije su studije jako uskih granica sistema, koja ispituju uticaje na životnu sredinu od momenta upotrebe proizvoda do kraja njegovog životnog ciklusa, odnosno kvantifikuju uticaje proizvoda nakon napuštanja fabrike.
- 5) “Od kapije do kapije” (gate-to-gate) studije takođe imaju uske granice sistema, jer kvantifikuju uticaje u toku samo jednog proizvodnog procesa.

U odnosu na predmet ispitivanja mogu se izdvojiti još dve specifične LCA studije:

- 1) “Od bunara do točkova” (*well-to-wheels*) studije su ustvari studije tipa „od klevke do groba“ koje se koriste za procenu uticaja na životnu sredinu prilikom ekstrakcije sirovine za proizvodnju goriva (napr. ekstrakcija nafte) preko proizvodnje goriva za transport (benzin ili dizel goriva) i korišćenja u odgovarajućim vozilima. U okviru ovih studija se može izdvojiti studija “od bunara do pumpe” (*well-to-pump*) koja podrazumeva uže granice sistema, od ekstrakcije sirovina za proizvodnju goriva do transporta proizvedenog goriva do pumpe, (što ustvari predstavlja vrstu studije „od klevke do kapije“) i studija „od pumpe do točkova“ (*pump-to-wheels*) gde se ispituju samo uticaji na životnu sredinu usled sagorevanja goriva u vozilima [127], [128] („od kapije do groba“ tip studije).
- 2) Ekonomske input–output LCA (EIOLCA) studije istražuju koliko se uticaj na životnu sredinu može pripisati svakom sektoru ekonomije i koliko se svaki sektor snabdeva iz drugih sektora [129]–[131].

3.2. Faza analize inventara životnog ciklusa

U fazi analize inventara životnog ciklusa kvantifikuju se količine potrebne energije i sirovina, emisije u atmosferu, vodotokove, tokovi otpada i ostale emisije u toku celog životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti, koji su proračunati u odnosu na funkcionalnu jedinicu [10], [116]. Ova faza zahteva mnoštvo podataka i uglavnom se smatra najzahtevnijom u pogledu utroška vremena i uloženog rada. Kako bi se pojednostavilo prikupljanje podataka, u zadnjih par decenija osnovan je veliki broj nacionalnih, regionalnih, industrijskih i konsultantskih baza inventara, među kojima se posebno izdvaja “Ecoinvent”, internacionalna baza razvijena od strane švajcarskog centra za LCI [132]–[134].

3.3. Faza ocene uticaja životnog ciklusa

U fazi ocene uticaja životnog ciklusa, vrši se procena svih potencijalnih uticaja na životnu sredinu i zdravlje ljudi usled korišćenja energije, vode, resursa i emisija koje su identifikovane i fazi analize inventara. LCIA ima za cilj razumevanje i procenu veličine i značaja potencijalnih uticaja na životnu sredinu proučavanog sistema [117], [118]. Prema ISO standardima, prilikom izvršavanja LCIA, postoje tri obavezna koraka. Prvo, neophodno je da se odaberu i definišu kategorije uticaja koje su od značaja za ispitivanu LCA studiju. Najčešće ispitivane kategorije uticaja na životnu sredinu u LCA studijama su: potencijal globalnog zagrevanja, potencijal oštećivanja ozonskog omotača, potencijal zakišeljavanja odn. acidifikacije tla, potencijal eutrofikacije, potencijal ekotoksičnosti, potencijal fotohemijske oksidacije, potencijal smanjenja neobnovljivih resursa, potencijal upotrebe zemljišta, itd. [120].

Sledeći korak je *Klasifikacija*, gde se rezultati LCI dodeljuju odgovarajućim kategorijama uticaja u odnosu na njihove poznate potencijalne efekte. Tako, na primer, emisije ugljen-dioksida, metana i azot sub-oksida se dodeljuju kategoriji potencijal globalnog zagrevanja, haloni i freoni kategoriji potencijal oštećivanje ozonskog omotača, itd. [10]. LCI rezultati se mogu klasifikovati i u više kategorija uticaja napr. oksidi azota utiču i na kategoriju globalno zagrevanje ali i na acidifikaciju. U praksi, ovaj proces dodeljivanja je uglavnom automatski u LCI bazama i LCA softverima [135].

U trećem koraku, *Karakterizaciji*, vrši se modelovanje LCI uticaja koristeći naučno-zasnovane faktore konverzije, odnosno faktore karakterizacije. Cilj karakterizacije je da objedini rezultate inventara preračunavši ih u indikatore za svaku kategoriju uticaja. Za određivanje karakterizacionog faktora od presudne je važnosti odrediti vremenski period posmatranja. Što je vremenski period duži, karakterizacioni faktor je manji. U studijama se uglavnom razmatra vremenski period od 100 godina [120]. Tako na primer, u kategoriji globalno zagrevanje se svi gasovi sa efektom staklene bašte preračunavaju u specifičan indikator, CO₂ ekvivalente, na osnovu faktora karakterizacije. Ako se na primer, posmatra vremenski okvir od 100 godina, ugljen dioksid ima karakterizacioni faktor jedan, odnosno CO₂ = 1 CO₂ eq, CH₄ = 21-25 CO₂ eq [100 godina], što znači da emisija 1 kg metana ima isti

efekat na globalno zagrevanje kao 21-25 kg ugljen-dioksida, a $N_2O = 298-310 CO_2 eq$ [100 godina] što znači da emisija 1 kg azot sub-oksida ima isti efekat kao emitovanih 298-310 kg ugljen-dioksida [116], [120], [136], [137]. Modeliranje karakterizacionog faktora je dosta kompleksno jer uključuje korišćenje različitih modela i parametara i uglavnom se vrši od strane eksperata za svaku kategoriju uticaja [135].

Kategorije uticaja se mogu podeliti na kategorije orijentisane na problem, “*midpoint*” kategorije i kategorije orijentisane na nastalo oštećenje, “*endpoint*” kategorije. *Midpoint* pristup se fokusira na probleme životne sredine koji se nalaze u sredini uzročno-posledičnog lanca i uglavnom se označava kao potencijal za izazivanje određenog oštećenja, a *endpoint* pristup se fokusira na efekte na kraju lanca, odnosno na nastalu štetu usled emisija određenih polutanata [132]. Na primer, prilikom razmatranja kategorije uticaja “oštećenje ozona” kao posledica emisija trihloroflorometana, tj. freona-11 (CFC-11), “*midpoint*” pristup razmatra samo potencijal za uništavanje ozonskog omotača, s obzirom da je to glavni problem uzrokovan emisijama ovih jedinjenja, dok “*endpoint*” pristup proučava krajnju posledicu potencijalnih emisija, kao što je rak kože i oštećenje rožnjače kod izloženih ljudi, uništavanje useva na izloženom zemljištu i degradacija plastike [10]. Korišćenje “*endpoint*” pristupa je kompleksnije s obzirom da zahteva više znanja i podataka za modelovanje velikog dela ekosistema i za proračun sinergije i kumulativnih efekata [137]–[139].

Postoji veliki broj metoda za Procenu uticaja (ReCiPe, Eco-indicator 99, IMPACT 2002+, TRACI, IPCC 2001 (klimatske promene), Ecosystem damage potential – EDP, CML 2001, EDIP’97 i 2003 - Environmental Design of Industrial Products, itd.) koji se koriste u softverima za LCA kako bi olakšali i ubrzali proces procene uticaja [140], [141]. Svaka od ovih metoda razmatra određene kategorije uticaja. Kao i Klasifikacija, i Karakterizacija se uglavnom vrši automatski u LCA softverima.

Metod „ReCiPe“ je jedan od najnovijih i najharmonizovanijih metoda koje se koriste u oceni životnog ciklusa i koji je razmatran u ovoj disertaciji. S tim u vezi dat je pregled osnovnih „*midpoint*“ kategorija uticaja koje se analiziraju ReCiPe metodom [141].

3.3.1. Potencijal za klimatske promene (CC)

Termin klimatske promene se koristi kada se govori o promenama klime koje se događaju od početka dvadesetog veka, a nastale su kao rezultat čovekovih aktivnosti. Jedna od glavnih posledica klimatskih promena je globalno zagrevanje čiji je glavni uzročnik emisija gasova sa efektom staklene baste. Među najznačajnijim gasovima sa efektom staklene bašte izdvajaju se ugljen-dioksid, metan i azot-suboksid. Od svih gasova staklene baste CO₂ ima najveći uticaj na globalno zagrevanje. Iako ima najmanji potencijal za globalno zagrevanje (GWP) ovaj gas se emituje u mnogo većim količinama u odnosu na ostale gasove. Oko 25 milijardi tona ugljen-dioksida ispusti se u atmosferu svakoga dana, 800 tona svake sekunde. Gas sa najvećim potencijalom za globalno zagrevanje je sumpor heksafluorid (1 kg SF₆ = 22800 kg CO₂ eq u vremenskom okviru od 100 godina) koji se najviše koristi kao električni izolator u visokonaponskim aplikacijama ali s obzirom da su količine otpuštenog SF₆ mnogo manje od CO₂, njegov doprinos globalnom zagrevanju je svega 0,2 % na godišnjem nivou. Samim tim, u midpoint pristupu koriste se CO₂ ekvivalentni faktori, proračunati na osnovu metodologije predložene od strane *Međuvladinog panela za promenu klime – IPCC* (“*Intergovernmental panel on climate change*”). Ovi ekvivalentni faktori uzimaju u obzir apsorpciju infracrvenog zračenja određenih supstanci i njihovo vreme zadržavanja u atmosferi (tabela 3.1).

Tabela 3.1. Lista gasova sa efektom staklene baste i njihov 100 godišnji GWP potencijal izražen putem CO₂ ekvivalentata (prema IPCC metodologiji)

Gas sa efektom staklene baste:	100-godišnji GWP CO₂ eq
Ugljen-dioksid CO ₂	1
Metan CH ₄	25
Azot sub-oksid N ₂ O	298
Sumpor heksafluorid SF ₆	22800
Hidrofluorokarbon -23 CHF ₃	14800
Hidrofluorokarbon-32 CH ₂ F ₂	675

Tetrafluorometan CF ₄	7390
Heksafluoroetan C ₂ F ₆	12200
Oktafluoropropan C ₃ F ₈	8830
Perfluorobutan C ₄ F ₁₀	8860
Perfluorociklobutan	10300
c-C ₄ F ₈	
Perflenapent C ₅ F ₁₂	13300
Perfluorohesan C ₆ F ₁₄	9300

3.3.1.1. Klimatske promene i procena promene zemljišnog ugljenika

Prilikom proučavanja potencijalnih klimatskih promena usled uzgoja biljnih kultura, a posebno energetske zasada, značajno je kvantifikovati eventualne promene u količinama organskog ugljenika u zemljištu (engl. “*soil organic carbon*”, skr. SOC).

Zemljišni organski ugljenik se nalazi u zemljištu u vidu organske materije i sastoji se od relativno dostupnog ugljenika u vidu svežih biljnih ostataka i relativno inertnog ugljenika u materiji nastaloj od razloženih biljnih ostataka, kao što su humus i ugalj [142]. Količina organskog ugljenika u zemljištu je toliko velika da čak i procentualno mali porast ili smanjenje njegove količine može značajno da utiče na ravnotežu gasova staklene baste. Naime, “rezervoar” organskog ugljenika u zemljištu služi kao “hvatač” CO₂ iz atmosfere, pri čemu utiče na bilans gasova staklene baste a samim tim i na ublažavanje klimatskih promena [143].

S obzirom da ugljenik ulazi u zemljište raspadanjem biljnih tkiva i da je njegov sadržaj u drvenastim i višegodišnjim biljkama znatno viši nego u zeljastim i jednogodišnjim biljkama, zemljište šumskih ekosistema sadrži više ugljenika po jedinici površine nego bilo koji drugi tip zemljišta [144]. Zaključuje se da nije svaka promena namene korišćenja zemljišta povoljna za sadržaj C u zemljištu, odnosno za količinu CO₂ u atmosferi i da važan aspekt prilikom procene promene organskog ugljenika u zemljištu čini *promena namene korišćenja zemljišta* (engl. “*land use change*”, skr. LUC). LUC može umanjiti benefite uštede emisija gasova sa efektom staklene baste prilikom gajenja poljoprivrednih useva i energetske

zasada, zavisno od prirode promene i predviđenog vremenskog perioda. Promena korišćenja zemljišta se može podeliti na: *DIREKTNU* i *INDIREKTNU*.

DIREKTNA promena korišćenja zemljišta se dešava kada se prvobitna namena zemljišta promeni i počne se sa gajenjem poljoprivrednih ili energetskih kultura (na primer kada se umesto šume zasadi plantaža pšenice, šećerne trske, uljane repice i itd). U zavisnosti od prethodne namene zemljišta, ova promena može biti negativna ili pozitivna.

- 1) Negativan primer promene korišćenja zemljišta je pretvaranje šume u poljoprivredno zemljište za proizvodnju biogoriva, gde osim gubitka biodiverziteta, dolazi i do gubitka zemljišnog ugljenika. Ove promene utiču na ukupni balans emitovanih gasova sa efektom staklene baste i mogu učiniti da ovakav energetski lanac ima veći negativni efekat na životnu sredinu (klimatske promene) u odnosu na referentni fosilni sistem.
- 2) Pozitivan primer promene korišćenja zemljišta je kada se na mestu zaparloženog, zapuštenog zemljišta uzgajaju energetske kulture ili kada se umesto jednogodišnjih useva počnu gajiti višegodišnji usevi. Na ovaj način rezerve ugljenika u zemljištu se povećavaju jer se u njega "ugrađuje" CO₂ iz atmosfere što dovodi do pozitivnog uticaja na ravnotežu gasova staklene baste.

INDIREKTNA promena korišćenja zemljišta se dešava kada se na zemljištu prethodno korišćenom za gajenje poljoprivrednih kultura počne gajiti energetska plantaža a proizvodnja prehrambenih useva se preseli na drugo mesto (primer je ekspanzija poljoprivrednog zemljišta nakon deforestacije). Kada se energetski usevi gaje na zapuštenom zemljištu gde se prethodno nisu gajile poljoprivredne kulture, nema *indirektne* promene zemljišta.

Promene u rezervama organskog zemljišnog ugljenika se obično procenjuju pomoću literature ili softverskih alata za modelovanje dinamike zemljišnog ugljenika. Pored toga, dostupne su podrazumevane vrednosti pomoću kojih je moguće proceniti godišnji efekat

direktne LUC (IPCC, 2006). Korišćenje IPCC podrazumevanih vrednosti preporučuje većina metodoloških standarda [143].

Prilikom procene uticaja ispitivanog energetskog lanca na klimatske promene posebno treba obratiti pažnju i na emisije sa obradivih površina gasova staklene bašte kao što su azot sub-oksida i metan.

3.3.1.1.1. Azot sub-oksida (N_2O)

Azot sub-oksida je jedan od najvažnijih gasova staklene bašte s obzirom na njegov 100-godišnji GHG potencijal od 268 CO_2 eq (tabela 4.1).

). Značajne su njegove emisije s poljoprivrednih površina koje zavise od vrste tla, klime, useva, načina oranja, i stope primene organskog i stajskog đubriva [143]. Azot sub-oksida je gasni intermedijer u reakcionoj sekvenci denitrifikacije i nusproizvoda nitrifikacije koja iz ćelija mikroorganizama dospeva u zemljište i na kraju u atmosferu. Nitrifikacija je aerobna mikrobiološka oksidacija amonijaka u nitrat koju prati oksidacija nitrata u nitrit, a denitrifikacija je anaerobna mikrobiološka redukcija nitrata u gasoviti azot (N_2). Jedan od glavnih kontrolnih faktora u ovoj reakciji je dostupnost neorganskog N u zemljištu [145]. N_2O se emituje i prilikom uzgoja jednogodišnjih energetskih useva jer je učestalost njihovog đubrenja veća u odnosu na đubrenje višegodišnjih energetskih useva. Uzgoj biljaka u kišnim klimatima ili plavnim područjima značajno emituje N_2O s obzirom da visoka vlažnost i nedostatak kiseonika pogoduju procesu denitrifikacije [143].

N_2O se sa obradivih površina može emitovati *direktno* i *indirektno*. Prema IPCC-u [145] postoje dve putanje indirektnih emisija N_2O .

Prva *indirektna* putanja emitovanja N_2O nastaje usled isparavanja N u vidu NH_3 i NO_x i taloženja ovih gasova i njihovih produkata NH_4^+ i NO_3^- na zemljištu i u površinskim vodama. U procesima denitrifikacije i nitrifikacije, deo NH_4^+ i NO_3^- se transformiše u N_2O . Ovo se dešava u podzemnim vodama ispod zemljišta na kome je primenjen azot ili u obalnim područjima koje primaju ocedne vode i vode od spiranja, ili u kanalima, potocima, rekama i estuarima u koje se sliva ocedna voda sa kopna.

Druga putanja *indirektnih* emisija N_2O se dešava u regionima sa čestim izlivanjima (plavljenjima) i oticanjima površinskih voda odnosno spiranjima sa zemljišta gde azot

dospeva primenom sintetičkih i organskih đubriva, od ostataka useva, mineralizacijom azota koja je u vezi sa gubitkom zemljišnog C u mineralnom i dreniranom i na drugi način upravljanoj zemljištu sa organskom proizvodnjom, kroz promene korišćenja zemljišta ili prakse upravljanja, i usled odlaganja urina i izmeta domaćih životinja sa pašnjaka. S obzirom da Srbija ne spada u takve regione, druga putanja indirektnih emisija N₂O nije uzeta u obzir prilikom izrade ove disertacije.

3.3.1.1.2. *Metan (CH₄)*

Oksidacija metana u zemljištima bogatim kiseonikom može biti smanjena usled gajenja poljoprivrednih i energetskih useva što pak povećava emisije ovog gasa u atmosferu. S obzirom da ovaj efekat ima jako mali uticaj na emisije GHG u toku životnog ciklusa energetskih useva [143], emisije metana su zanemarene prilikom izrade ove disertacije.

3.3.2. Potencijal za oštećivanje ozonskog omotača (OD)

Stratosferski ozon, koji čini 90 % ukupnog ozona u stratosferi ima ulogu u zaštiti zemljine površine jer apsorbuje štetno UV-B zračenje (315-280 nm). Ukoliko dospe do površine zemlje, kod izloženih ljudi UV-B zračenje izaziva prerano starenje, alergije, opekotine i rak kože i utiče na slabljenje dejstva imunog sistema. UV-B zračenje uzrokuje i oštećenja kod kopnenih i vodenih biljaka i životinja.

Supstance koje oštećuju ozonski omotač su antropogenog porekla i sadrže hlor, fluor, brom, ugljenik i vodonik. U ove supstance spadaju freoni (CFC-a i HCFC-a) i haloni, ugljen tetrahlorid, metil bromid, metil hloroform i bromohlorometan i koriste se kao rashladna sredstva u frižiderima, zamrzivačima i drugim rashladnim uređajima, klima-uređajima i toplotnim pumpama, aerosol raspršivačima, sredstvima za stvaranje pene, sredstvima za čišćenje i aparatima za gašenje požara. Atomi hlora u hlorofluoro ugljenicima (CFC) i atoma broma u halonima su efikasni u oštećenju ozona zbog heterogene katalize – oni imaju sposobnost uništavanja velike količine molekula ozona u stratosferi jer deluju kao katalizatori slobodnih radikala.

Potencijal za uništavanje ozonskog omotača supstanci (engl. - „*Ozone Depletion potential*“, skr. OD) definisan je kao relativna mera kapaciteta za uništenje ozonskog omotača supstanci (engl. - „*Ozone depletion substance*“, skr. ODS) i koristi CFC-11 (trihlorfluorometan) kao ekvivalentni faktor (tabela 3.2) [141].

Tabela 3.2. Jedinjenja koja oštećuju ozon i njihovi karakterizacioni faktori

Jedinjenja koja oštećuju ozon (ODS)	Karakterizacioni faktori “midpoint” kg CFC-11 eq./kg ODS
CFC-11	1
CFC-12	1
CFC-113	1
CFC-114	0,94
CFC-115	0,44
HCFC-123	0,02
HCFC-124	0,02
HCFC-141	0,12
HCFC-142	0,07
HCFC-22	0,05
HCFC-225	0,02
HCFC-225	0,03
Halon-1201 (HBFC 1201)	1,4
Halon-1202	1,3
Halon-1211	6
Halon-1301	12
Halon-2311 (HBFC 2311)	0,14
Halon-2401 (HBFC 2401)	0,25
Halon-2402	6
Ugljentetrahlorid	0,73

Metilhlороform	0,12
Metilbromid	0,38

3.3.3. Potencijal zakišeljavanja zemljišta (TA)

Acidifikacija ili zakišeljavanje tla (engl. - “*Terrestrial Accidification potential*”, skr. TA) označava pojavu u kojoj se usled taloženja neorganskih supstanci iz atmosfere, kao što su sulfati, nitrati i fosfati, menja kiselost zemljišta.

Svaka biljna vrsta toleriše određeni nivo kiselosti zemljišta. Ukoliko dođe do ozbiljnog odstupanja od tolerišućeg nivoa kiselosti, određene biljne vrste nestaju a zamenjuju ih druge. Drugim rečima, promena kiselosti zemljišta može dovesti do ozbiljnih promena u biljnim sastojinama.

Glavni faktori zakišeljavanja tla su emisije NO_x, NH₃, i SO₂ [141] a potencijal zakišeljavanja zemljišta se izražava preko SO₂-ekvivalenata (tabela 3.3).

Tabela 3.3. Potencijal zakišeljavanja zemljišta (u kg SO₂-ekvivalenata kg⁻¹)

Polutant	Vremenski period (godine)			
	20 godina	50 godina	100 godina	500 godina
SO ₂ (u atmosferu)	1,00	1,00	1,00	1,00
NO _x (u atmosferu)	0,49	0,52	0,56	0,71
NH ₃ (u atmosferu)	1,99	2,23	2,45	2,89

3.3.4. Potencijal za eutrofikaciju (FE, ME)

Eutrofikacija je process povećanog unošenja hranljivih materija u vodene ekosisteme (mora, reke, jezera ili ušća). Dešava kad se sa njiva i drugih kultivisanih površina, putem padavina određena količina đubriva spira i dospeva u vodene ekosisteme. Đubriva i otpadne vode iz prehrambene industrije ili kanalizacione vode iz gradova, kao i sve otpadne vode bogate mineralnim i organskim materijama sadrže visoke koncentracije nitrata i fosfata. S obzirom da su N i P su ograničavajući faktori rasta algi, njihovo izlivanje u vodene

ekosisteme dovodi do prekomernog rasta ovih organizama. Prilikom razlaganja velikog broja uginulih algi i vodenih biljaka troši se velika količina kiseonika što dovodi do masovnog pomora riba i drugih vodenih organizama koji kiseonik koriste u procesu disanja. S obzirom da je i sam proces razlaganja organske materije nepotpun u anaerobnim uslovima, voda dobija neprijatan miris i ukus usled nagomilavanja određenih nusprodukata razlaganja.

U slatkovodnim ekosistemima umerenog i subtropskog pojasa ograničavajući faktor rasta vodenih biljaka i algi je fosfor a u marinskim ekosistemima ograničavajući faktor je azot [141]. Izvori emisija fosfora i njihov potencijal za eutrofikaciju slatkovodnih ekosistema je prikazan u tabeli 3.4, a izvori emisije azota i njihov potencijal za eutrofikaciju marinskih ekosistema je prikazan u tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Izvori emisija fosfora i njihov potencijal za eutrofikaciju slatkovodnih ekosistema:

Izvor emisije fosfora:	mesto emitovanja:	Potencijal za eutrofikaciju slatkovodnih ekosistema (engl. - „ <i>Freshwater eutrophication</i> “, skr. FE)
postrojenja za tretman kanalizacionih voda	slatkovodni ekosistemi	1
đubrivo	zemljište	0,053
stajnjak	zemljište	0,050

Tabela 3.5. Izvori emisije azota i njihov potencijal za eutrofikaciju marinskih ekosistema:

Izvor emisije azota:	mesto emitovanja:	Potencijal za eutrofikaciju marinskih ekosistema, (engl. - „ <i>Marine eutrophication</i> “, skr. ME)
postrojenja za tretman kanalizacionih voda	slatkovodni ekosistemi	1

emisije NO ₂	u atmosferu	1,128
emisije NH ₃	u atmosferu	1,112
stajnjak	zemljište + atmosfera	0,079
đubrivo	zemljište + atmosfera	0,073

3.3.5. Potencijal za toksičnost (HT, TET, FET, MET)

Kategorije potencijal toksičnosti za ljude, ekotoksičnost kopnenih i vodenih ekosistema: slatkovodnih i marinskih (engl. - „*Human toxicity potential*“, skr. HT; „*Terrestrial ecotoxicity potential*, skr. TET; „*Freshwater ecotoxicity potential*“ skr. FET; „*Marine ecotoxicity potential*“, skr. MET), ispituju efekte različitih štetih materija po ljudsko i životinjsko zdravlje i opstanak.

Kao referentna supstanca, odnosno faktor karakterizacije u “midpoint” pristupu, za sve četiri navedene kategorije uticaja, koristi se 1,4-dihlorobenzen. Za kategoriju Toksičnost za ljude, prate se emisije i efekti usled emisije 1,4-dihlorobenzen u atmosferu urbanih područja, za kategoriju ekotoksičnost za slatkovodne ekosisteme emisije u slatke vode, za ekotoksičnost marinskih ekosistema, emisije u more i okeane a za ekotoksičnost zemljišta, emisije u zemljište u okolini industrijskih postrojenja [135].

3.3.6. Potencijal za formiranje čestica (PMF)

Fine čestice (engl. - „*Particulate matter*“, skr. PM) predstavljaju kompleksne mešavine organskih i neorganskih jedinjenja i obuhvataju aerosole, dim, čađ, prašinu, pepeo i polen i veličine su do 10 µm (PM10). Sekundarni PM10 aerosoli se formiraju u vazduhu usled emisija sumpor dioksida (SO₂), amonijaka (NH₃) i azotnih oksida (NO_x).

Ove čestice se inhalacijom unose u gornje disajne puteve i pluća. Što su čestice sitnije, one ispoljavaju štetnije dejstvo. U nedavnoj studiji Svetske Zdravstvene Organizacije potvrđeno je da je učestalost mortaliteta uglavnom uzrokovana emisijama čestica dijametra do 2,5 µm, odnosno PM2,5, dok čestice prečnika od 2,5-10 µm (PM2,5-10) uglavnom imaju uticaj na respiratorni morbiditet. Hronično izlaganje ovim česticama utiče na pojavu kardiovaskularnih i respiratornih oboljenja i na sve veću učestalost pojave karcinoma. PM2,5

se primarno formiraju usled hemijskih reakcija u atmosferi i usled sagorevanja goriva u motornim vozilima, prilikom proizvodnje električne energije, iz industrijskih postrojenja, loženja u domaćinstvima i sa poljoprivrednih površina. Ove čestice takođe utiču i na druge probleme u životnoj sredini kao što su korozija, zaprljanost, smanjena vidljivost i oštećenje vegetacije.

3.3.7. Potencijal za formiranje fotohemijskih oksidanata (POF)

Za razliku od stratosferskog ozona koji štiti živi svet na zemlji od štetnog kosmičkog zračenja, ozon koji se formira u troposferi je štetan po ljudsko zdravlje. Troposferski ozon nastaje kao rezultat fotohemijskih reakcija NO_x i lako isparljivih organskih jedinjenja koja ne sadrže metan, odnosno NMVOCs (engl., *Non Methane Volatile Organic Compounds*). Ove reakcije se posebno često dešavaju leti. Štetno dejstvo ozona na čovečiji organizam se manifestuje iritacijama disajnih puteva i oštećenjima pluća. Povišene koncentracije ozona u vazduhu kod izloženih ljudi mogu dovesti do ozbiljnih respiratirnih oštećenja kao što su astma i hronična opstruktivna bolest pluća.

Karakterizacioni faktori za PMF i POF kategorije su dati u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. “Midpoint“ karakterizacioni faktori za formiranje čestica i formiranje troposferskog ozona neke supstance x

Emitovana supstanca	Potencijal za formiranje čestica, (engl. - „ <i>Particulate Matter Formation potential</i> “, skr. PMF) (PM10-eq/kg)	Potencijal za formiranje fotohemijskih oksidanata, (engl. - „ <i>Photochemical Oxidant Formation potential</i> “, skr. POF) NMVOC-eq/kg
PM10 u atmosferu	1	
NH ₃ u atmosferu	0,31	
NO _x u atmosferu	0,21	1,0
SO ₂ u atmosferu	0,19	
NMVOCs u atmosferu		1

3.3.8. Potencijal zagađanja jonizujućim zračenjem (IR)

Jonizujuće zračenje predstavlja elektromagnetno ili čestično zračenje pri kome dolazi do jonizovanja materije što utiče na stvaranje oštećenja ćelija.

Radioaktivni elementi nose veliku količinu energije. U kontaktu sa neutralnim atomima i molekulima živih bića ovi elementi uzrokuju izbacivanje elektrona iz orbita pri čemu nastaju joni. Usled velike reaktivnosti jona dolazi do narušavanja biohemijskih procesa u ćelijama pri čemu se javljaju razni poremećaji u ćelijskom funkcionisanju i deljenju koji mogu dovesti do ozbiljnih bolesti, kao što su tumori.

U jonizujuće zračenje spadaju α , β , γ i H zraci, kosmičko zračenje i neutroni.

Karakterizacioni faktor jonizujućeg zračenja predstavlja nivo izloženosti, a midpoint karakterizacioni faktor u ReCiPE metodi je kBq Uranijum-235 ekvivalenata. Bekerel (Bq) U235 označava raspadanje jezgra uranijumovog izotopa 235 u jednoj sekundi (s^{-1}).

3.3.9. Potencijal za iscrpljivanje vodnih rezervi (WD)

Efekti povećanog korišćenja vodnih rezervi su posebno izraženi u delovima sveta u kojima vlada oskudica ovog resursa. U sušnim područjima iscrpljivanje vode može načiniti veliku štetu ekosistemima i naškoditi zdravlju ljudi.

Pri ispitivanju efekata u ovoj kategoriji uticaja u LCA studijama se koristi „midpoint“ indikator, s obzirom da još uvek nisu konstruisani modeli koji bi objasnili i kvantifikovali štetu na “endpoint” nivou. Midpoint indikator pokazuje ukupnu količinu utrošene vode u toku životnog ciklusa ispitivanog sistema i izražava se u m^3 .

Prilikom proučavanja potencijala iscrpljivanja vodnih rezervi (engl. - “*Water Depletion potential*”, skr. WD), neophodno je razmotriti na koji način upotreba vode može dovesti do iscrpljivanja vodnih rezervi a koji ne. U slučajevima neposrednog isparavanja vode ili njenog korišćenja u procesu proizvodnje betona, smatra se da dolazi do gubitaka vode u određenoj oblasti, a u slučajevima gde se voda koristi ali i vraća jako blizu mesta konzumacije, smatra se da ne postoje gubici vode [141].

3.3.10. Potencijal za iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva (FD)

Pod potencijalom za iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva označava se potencijal za iscrpljivanje rezervi prirodnog gasa, nafte i uglja po stopi koja je veća od stope njihove obnove.

Kao referentni resurs za potencijalno iscrpljivanje fosilnih goriva (engl. - “*Fossil Depletion potential*”, skr. FD), određena je “Sirova nafta, 42 MJ po kg, u zemljištu” (kg oil eq).

3.4. Faza interpretacije rezultata LCA studije

U fazi interpretacije rezultata LCA studije vrši se procena rezultata prethodnih faza u odnosu na postavljeni cilj i obim studije, iznose se zaključci i preporuke i definišu se sve nejasnoće i pretpostavke koje su korišćene pri generisanju rezultata [117], [118], [133], [137], [146].

Sprovođenje LCA studije je skoro uvek iterativni proces. Kada se definiše cilj i obim studije, postavljaju se zahtevi za naredne faze. Međutim, zbog više informacija dostupnih nakon LCI, LCIA faze ponekad je neophodno inicijalno podešavanje kao i menjanje obima studije (slika 3.2).

U svetu je razvijeno nekoliko softvera koji se koriste za sprovođenje LCA studije: SimaPro (PRé Consultant, Holandija), Umberto (Institut za informatiku životne sredine, Hamburg, i Institut za istraživanje energetike i životne sredine, Hajdelberg), TEAM (Ecobalance), GaBi (Departman za Inženjerstvo životnog ciklusa, Univerzitet u Štutgartu, u saradnji sa firmom „PE International”), POLCAGE (Univerzitet “De La Salle”, Filipini, i Univerzitet u Portsmutu, Ujedinjeno Kraljevstvo) i GEMIS (Institut za primenjenu ekologiju, Öko-Institut, Berlin) [10], od kojih se uglavnom najviše koristi SimaPRO [115].

4. Životni ciklus miskantusa

Model životnog ciklusa miskantusa korišćen u ovoj doktorskoj disertaciji prikazan je na slici 4.1. Prilikom procene uticaja na životnu sredinu životnog ciklusa miskantusa gajenog u Srbiji konstruisana su dva energetska lanca:

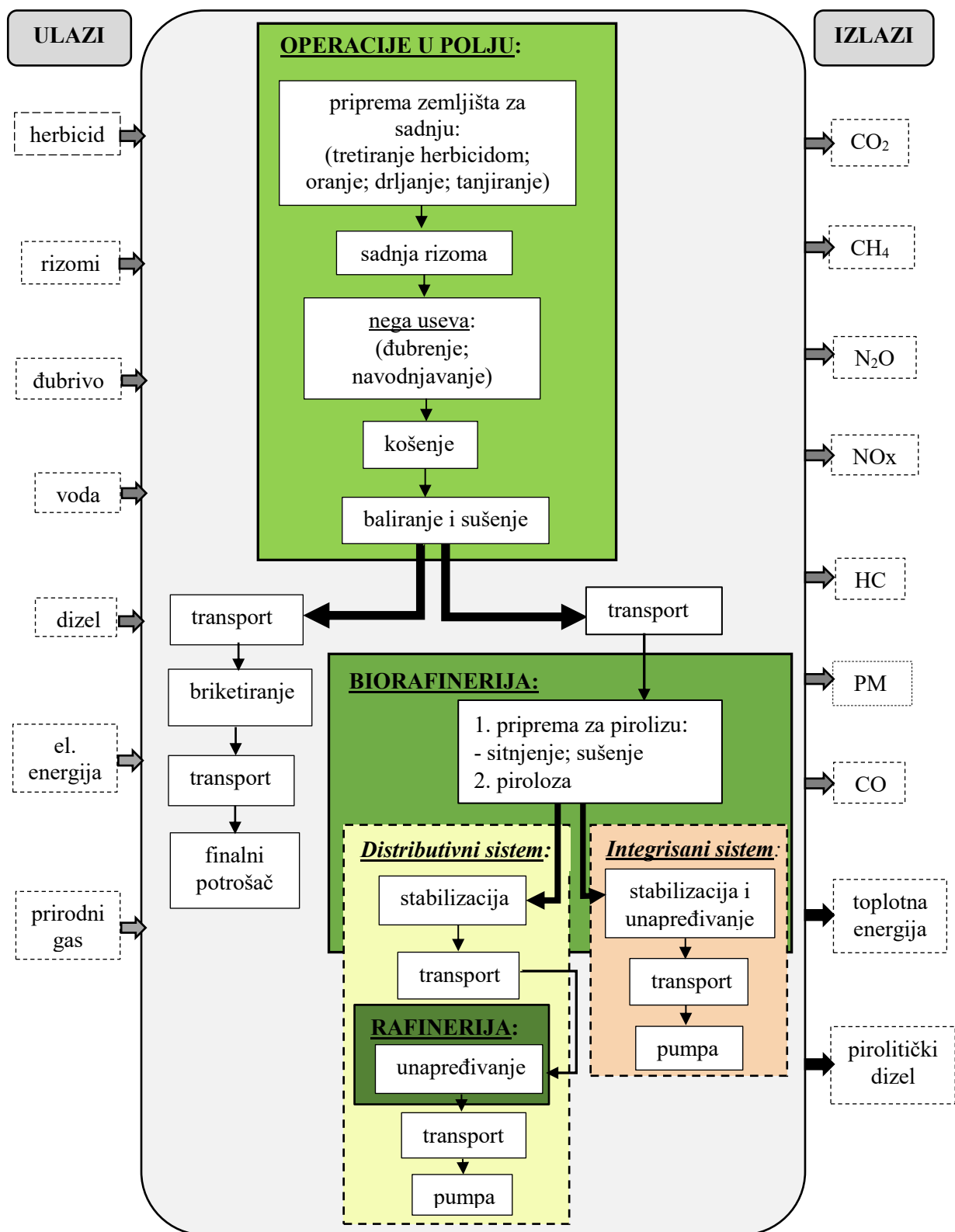
- I. energetski lanac briketa od miskantusa za dobijanje toplotne energije i
- II. energetski lanac miskantusa za dobijanje pirolitičkog dizela.

Zajedničke operacije u životnom ciklusu oba energetska lanca su operacije u polju:

- 1) Priprema zemljišta za sadnju rizoma;
- 2) Sadnja rizoma;
- 3) Nega useva;
- 4) Košenje;
- 5) Baliranje.

U razmatranje je uzeto da se miskantus gaji na zemljištu tipa černoziem, s obzirom da postoje pouzdani podaci sa eksperimentalnih zasada na ovom tipu zemljišta [102], [103], [106] i da postoji veliki broj zaparloženih poljoprivredne površina koje su pokrivena ovim tipom zemljišta (60000 ha u severnom delu zemlje) i smatra se da gajenje miskantusa na jednom delu ovog zemljišta ne bi ugrozilo snabdevanje hranom [107], [108].

Priprema zemljišta za sadnju rizoma miskantusa se obavlja početkom jeseni prskanjem odabrane površine herbicidom (glifozat), radi suzbijanja postojeće vegetacije. Krajem jeseni i početkom zime se izvrši duboko oranje, na dubini od 20-30 cm. Prednost dubokog oranja se ogleda u zaštiti useva od letnjih suša jer omogućava akumulaciju vlage u dubljim slojevima zemljišta koja je biljkama dostupna u toku letnjih meseci. Dubokim oranjem se obezbeđuje i dobra aeracija (provetrenost) zemljišta čime se pospešuje mikrobiološka aktivnost a samim tim i bolja razgradnja biljnih ostataka, pospešuje se migracija hranljivih materija iz dubljih slojeva zemljišta u površinska koja su dostupnija biljkama, omogućuje se



Slika 4.1. Šema životnog ciklusa miskantusa

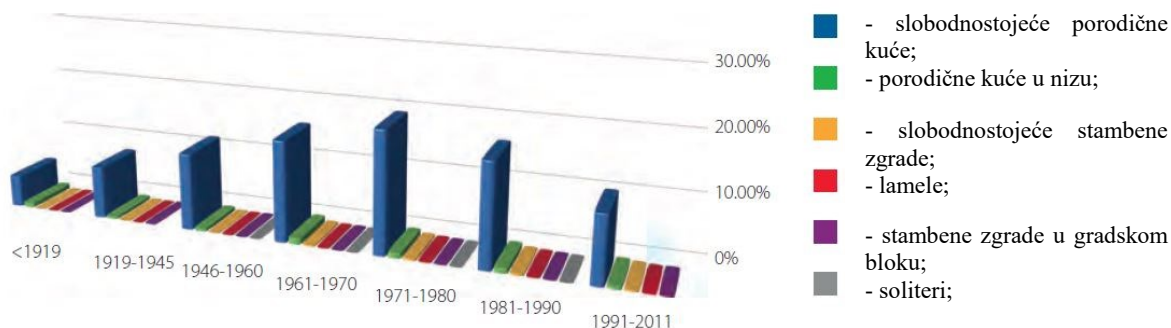
bolje unošenje đubriva i dodatno suzbijanje korova s obzirom da se preoravanjem seme korova dislocira u dublje slojeve zemljišta gde im je onemogućen rast.

Na proleće, nakon završetka perioda mrazeva, zemljište se dodatno istanjira i prodrlja da bi se biljake duboko ukorenile [47]. Sadnja rizoma se obavlja na dubini od 5-10 m, gustinom od 2 rizoma po m². Đubrenje se vrši sa 667 kg NPK 15:15:15 ha⁻¹. S obzirom da se smatra da je ograničenost vodom u stepskim uslovima Srbije (u kojima se razmatra uzgoj miskantusa) glavni ograničavajući faktor rasta miskantusa [106], prilikom izrade modela životnog ciklusa miskantusa uzeto je u obzir da se usevi navodnjavaju. Za navodnjavanje su odabrani linearni sistemi koji su jedni od najčešće korišćenih sistema za navodnjavanje u Srbiji [49], [51], [147], [148]. Uzeto je u obzir i da se usevi miskantusa kose u februaru kada se dobijaju niži prinosi ali i kvalitetnija biomasa za sagorevanje [106], [114], [149]. Za vrednosti godišnjeg prinosa miskantusa odabran je prosečan prinos od III-VII godine, koji iznosi 30 t (85 % s.m.) ha⁻¹ „vlažnog” prinosa, odnosno 23,5 t (66,5 % s.m.) ha⁻¹ „suvog” prinosa [103]. Prema još uvek nezvaničnim podacima dobijenim u komunikaciji sa dr Željkom Dželetovićem od perioda zasnivanja useva pa do sada, minimalni „vlažni” prinos miskantusa ostvaren na černozeru u toku žetve u februaru iznosi 23 t ha⁻¹, odnosno 18 t ha⁻¹ „suvog” prinosa, a maksimalni vlažni prinos iznosi 42 t ha⁻¹ odnosno 33 t ha⁻¹ suvog prinosa.

Za baliranje pokošenog miskantusa koristi se sistem malih pravougaonih bala. Prosečna veličina bala dobijenih presom je 800 mm x 490 mm x 360 mm, a prosečna težina jedne bale iznosi 15 kg [54]. Za prosečan suvi prinos miskantusa, korišćenjem prese za male četvrtaste bale može se dobiti oko 1566 bala. Kad vlažnost bala tokom sušenja na polju opadne na oko 15% i dobije se „suvi” prinos miskantusa, vrši se transport bala miskantusa za sledeću operaciju. U ovom delu životnog ciklusa diferenciraju se dva energetska lanca miskantusa. U jednom lancu bale se transportuju do postrojenja za briketiranje a u drugom do biorafinerije, gde se će se vršiti piroliza (slika 4.1).

U lancu za dobijanje briketa, u procesu briketiranja dobijaju se briketi prečnika 7 cm, sa centralnom rupom prečnika 2 cm, prosečne dužine od 8 cm i prosečne nasipne mase od 550 kg m⁻³ [82]. Dobijeni briketi se dalje transportuju do finalnog potrošača gde se sagorevaju u kotlovima, pri čemu se oslobađa toplotna energija koja se koristi za grejanje domaćinstava.

Kao finalni potrošač odabrana je „slobodnostojeća porodična kuća“ koja, prema analizi autora sa Arhitektonskog Fakulteta u Beogradu, „Nacionalna Tipologija stambenih zgrada Srbije“, predstavlja najzastupljeniji tip stambene zgrade u Republici Srbiji (Slika 4.2) [150].



Slika 4.2. Zastupljenost tipova stambenih objekata u Republici Srbiji [150].

Prema TABULA projektu, svi tipovi stambenih objekata u Srbiji su grupisani u određene kategorije u odnosu na: a) period izgradnje i b) tip zgrade. U ovoj studiji izdvojeno je sedam perioda izgradnje: A) pre 1919, B) 1919-1945, C) 1946-1960, D) 1961-1970, E) 1971-1980, F) 1981-1990 i G) 1991-2011 i šest tipova zgrada: 1) slobodnostojeće porodične kuće, 2) porodične kuće u nizu, 3) slobodnostojeće stambene zgrade, 4) lamele, 5) stambene zgrade u gradskom bloku i 6) soliteri (slika 4.2). Najzastupljeniji tip stambenog objekta u Srbiji pripada kategoriji slobodnostojeća porodična kuća (E1) koja je izgrađena u periodu između 1971. godine - 1980. godine [150].

Specifična godišnja energija potrebna za grejanje ovih objekata je određena kao 954 MJ po m². Za ovaj proračun korišćeni su podaci o specifičnim godišnjim potrebama energije za grejanje svih sedam podtipova ovog stambenog objekta [150], odnosno proračunata je prosečna vrednost specifične potrebne energije za grejanje svih slobodnostojećih porodičnih zgrada koje su izgrađene u periodu od pre 1919. godine do 2011. godine ((A1+B1+C1+D1+E1+F1+G1) / 7).

U lancu za dobijanje pirolitičkog dizela, nakon transporta u biorafineriju vrši se priprema biomase za pirolizu koja obuhvata operacije kao što su sitnjenje do veličine od oko

0,8 mm i sušenje sa 85% s.m. do 93 % s.m. gde se dobija finalna težina biomase miskantusa od 21,4 t.

Nakon procesa pirolize, u distributivnom sistemu sirova pirolitičko bio-ulje se stabilizuje u biorafineriji a unapređuje u rafineriji, odnosno ove dve operacije su prostorno odvojene a u integrisanom sistemu ove operacije se dešavaju na istom mestu, u biorafineriji (slika 4.1) [151]. Finalni proizvod, pirolitički dizel se dalje transportuje do pumpe gde se može upotrebiti kao transportno gorivo.

4.1. Ocena životnog ciklusa energetskeg lanca briketa od miskantusa

Ocena životnog ciklusa energetskeg lanca briketa od miskantusa urađena je u skladu sa standardima ISO 14040 [117] i ISO 14044 [118]. Od softverskih alatki korišćen je program SimaPro 8.0.4.7.

4.1.1. Cilj i obim studije, granice sistema i funkcionalna jedinica

Cilj ove LCA studije je procena uticaja na životnu sredinu životnog ciklusa briketa od miskantusa radi podsticanja njegove upotrebe kao sirovine za grejanja domaćinstava u Republici Srbiji u odnosu na tradicionalno korišćene energente.

U analizi uticaja na životnu sredinu energetskeg lanca briketa od miskantusa korišćen je pristup „od koevke do groba“, odnosno analizirane su sve aktivnosti u životnom ciklusu miskantusa, od pripreme zemljišta za sadnju do finalne upotrebe briketa od biomase za grejanje domaćinstva (slika 4.1). Određeno je da granice ispitivanog sistema ne obuhvataju proizvodnju mašinerije i drugih infrastrukturnih objekata kao ni uzgoj i transport rizoma i odlaganje pepela nakon procesa sagorevanja.

Kao funkcionalna jedinica sistema određena je površina zemljišta (1 ha) koja se koristi za kultivaciju miskantusa, a referentni protok je određen kao prosečan „suv“ prinos miskantusa dobijen tokom III do VII godine gajenja useva miskantusa na eksperimentalnom polju sa černozeom i iznosi 23,5 t (85% s.m.). Finalni proizvod sistema je određen kao količina toplote (GJ) koja se oslobađa sagorevanjem 23,5 t (85% s.m.) briketa miskantusa u kotlovima za grejanje domaćinstava.

4.1.2. Analiza inventara životnog ciklusa briketa od miskantusa

U fazi analize inventara životnog ciklusa briketa miskantusa razmatrani su svi relevantni energetske ulazi, potrošnja goriva i emisije polutanata. Najrelevantniji ulazi su: *iz prirode* - voda, koja se koristi prilikom primene herbicida i navodnjavanja i *iz tehnosfere*: dizel gorivo (za pogonjenje poljoprivrednih mašina), električna energija (za briketiranje i druge procese), herbicid (glifozat) i đubrivo (NPK 15:15:15) [20]. Detaljna analiza inventara data je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Operacije u toku životnog ciklusa miskantusa, korišćena mašinerija, produktivnost, potrošnja goriva i emisije polutanata proračunate na osnovu funkcionalne jedinice (1 ha) i referentnog protoka (23,5 t, 85% s.m.) i korišćena literatura [20]:

Operacija:	Korišćena mašinerija [literatura]:	Utrošak energije (MJ ha ⁻¹):	Produktivnost (t ha ⁻¹):	Utrošak dizela (kg ha ⁻¹):	Emisije polutanata (kg ha ⁻¹) ^a :
1. Upotreba herbicida	Traktor (60 kW) + prskalica, Glifozat: 3kg ha ⁻¹ [42], [43] ^b	32	0,20	1,54	HC: 0,0066
					CO: 0,0233
					NOx: 0,2211
					PM: 0,0310
					CO ₂ : 20,5917
					CH ₄ : 0,0017
2. Oranje (20-30 cm)	Traktor (103 kW) + plug [44], [152]	217	0,9	27,46	N ₂ O: 0,0007
					HC: 0,0295
					CO: 0,1658
					NOx: 0,3123
					PM: 0,0181
					CO ₂ : 20,1638
3. Tanjiranje	Traktor (>100kW) + tanjirača 450 cm [46], [152]	76	0,34	8,74	CH ₄ : 0,0007
					N ₂ O: 0,0009
					HC: 0,0112
					CO: 0,0626
					NOx: 0,1180
					PM: 0,0068
4. Drljanje	Traktor (>100kW) + drljača 700 cm [46], [152]	60	0,33	9,57	CO ₂ : 7,6174
					CH ₄ : 0,0003
					N ₂ O: 0,0003
					HC: 0,0108
					CO: 0,0608
					NOx: 0,1145
5. Sadnja rizoma	Traktor (35 kW) + polu-automatska sadilica za krompir (4-ro redna)	183	3,33	8,42	PM: 0,0066
					CO ₂ : 7,3934
					CH ₄ : 0,0003
					N ₂ O: 0,0003
					HC: 0,0669
					CO: 0,2634
					NOx: 0,2211

	[48], [103]				PM: 0,0035 CO ₂ : 2,5500 CH ₄ : 0,0001 N ₂ O: 0,0001
6. Đubrenje	Traktor (60kW) + Raspršivač mineralnog đubriva Rauch AXIS, 24m, NPK: 667 kg 15:15:15 ha ⁻¹ [42], [46], [152]	18	0,28	1,21	HC: 0,0092 CO: 0,0326 NOx: 0,0471 PM: 0,0050 CO ₂ : 3,5700 CH ₄ : 0,0002 N ₂ O: 0,0001
7. Navodnjavanje	Agregat tipa "Sever Valmont" - 15 kW sa dizel motorom "TAM" (110,4 kW), Voda: 180 m ³ ha ⁻¹ [49]-[51], [148]	163	0,41	7,57	HC: 0,0134 CO: 0,0755 NOx: 0,1423 PM: 0,0082 CO ₂ : 9,1857 CH ₄ : 0,0003 N ₂ O: 0,0004
8. Košenje	New Holland H8080, 168 kW, 750 HD Specijalna glava sa širinom sečiva 4,7 m [53], [153]	321	0,96	27,46	HC: 0,0887 CO: 0,5159 NOx: 1,0577 PM: 0,0564 CO ₂ : 59,5324 CH ₄ : 0,0021 N ₂ O: 0,0030
9. Baliranje i utovar	Traktor (26 kW) + Welger 730a presa [54]	216	5,22	13,46	HC: 0,1049 CO: 0,4129 NOx: 0,3466 PM: 0,0485 CO ₂ : 32,2789 CH ₄ : 0,0026 N ₂ O: 0,0010
10. Transport, traktor (tkm)	Traktor (60 kW) + 2 prikolice Zmaj-470/489 [54]	23,5x120 =2820	6	36,74	HC: 0,1968 CO: 0,6996 NOx: 1,0098 PM: 0,1062 CO ₂ : 76,5 CH ₄ : 0,0036 N ₂ O: 0,0030
11. Briketiranje	Biomasser 2Duo-Set: - šreder RK7 (7,5 kW) -2xBiomasser Duo BS 207 (12,4 kW) [82], specifikacije mašine	5922	79	-	
12. Transport, kamion (tkm)	Kamion >20t	23,5x100 =2350	2	32,25	Agri-footprint proces: "Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Mass"
UKUPNO		7208	87	121,27	HC: 0,5380; CO: 2,3125; NOx: 3,4031; PM: 0,2905;

					CO ₂ : 239,3833; CH ₄ : 0,0119; N ₂ O: 0,0099.
13. Sagorevanje u kotlu	kotao, snage 30 kW, efikasnosti 0,85, miskantus LHV=18,3 GJ t ⁻¹	Oslobodena energija (MJ ha⁻¹): 365542	-	-	HC: 0,3411; CO: 942,8898; NOx: 49,3373; PM: 5,2842;
	UKUPNO	EO:EI=50:1			HC: 0,8791; CO: 945,2023; NOx: 52,7404; PM: 5,5747; CO ₂ : 239,3833; CH ₄ : 0,0119; N ₂ O: 0,0099.

a: podaci dobijeni korišćenjem FOEN baze [154];

b: podaci dobijeni u komunikaciji sa eksperimentima;

HC: ugljovodonici;

CO: ugljen-monoksid;

NOx: oksidi azota;

PM: čestice;

CO₂: ugljen-dioksid;

CH₄: metan;

N₂O: azot sub-oksidi.

LHV: donja toplotna moć (*Lower Heating Value*)

4.1.2.1. Ulazi : poljoprivredna mehanizacija - utrošci goriva, produktivnost

S obzirom da se uzgoj miskantusa u Republici Srbiji za sada odvija samo na malim površinama u nekomercijalne svrhe, bez korišćenja poljoprivredne mehanizacije, eksperimentalni podaci o utrošcima goriva i energije kao i o emisijama zagađujućih materija u životnu sredinu prilikom uspostavljanja i gajenja useva miskantusa u uslovima srpske poljoprivredne prakse nisu dostupni. Za konstruisanje hipotetičkog energetskog lanca briketa miskantusa korišćeni su sekundarni podaci, odnosno podaci dobijeni detaljnom analizom naučnih i tehničkih publikacija, izveštaja, kao i podaci dobijeni u komunikaciji sa relevantnim naučnim institucijama i stručnjacima iz oblasti.

U tabeli 4.1, dat je prikaz literature koja je korišćena za određivanje poljoprivredne mehanizacije za svaku operaciju u životnom ciklusu miskantusa.

Pri odabiru literature, favorizovani su oni rezultati koji se odnose na podatke dobijene eksperimentalnim istraživanjima u Republici Srbiji ili regionu i koji daju najrealniju sliku stanja poljoprivrednih mašina u Srbiji. Izbor poljoprivredne mehanizacije vršen je na osnovu

analize raspoloživih podataka o najčešće korišćenim mašinama za specifične poljoprivredne operacije. Pošto je traktor osnovna poljoprivredna mašina u većini poljoprivrednih operacija, razmatrani su utrošci energije i emisije vezani za potrošnju dizel goriva ovih mašina. Prema poslednjem popisu poljoprivrede, 95 % traktora koji se koriste na poljoprivrednim gazdinstvima u Srbiji je starije od 15 godina i pripada klasi snage motora od 19 do 37 kW (62 % svih popisanih traktora) [147] što je korišćeno kao polazna osnova pri izradi inventara ove studije. Za operacije kao što su *upotreba herbicida, oranje, tanjiranje, drljanje i đubrenje* korišćeni su podaci vezani za traktore snage motora oko 100 kW jer su istraživanja vezana za ove poljoprivredne operacije vršena uglavnom na traktorima ove snage. Za operaciju *sadeenje rizoma*, korišćeni su podaci vezani za traktor snage motora 35 kW a za *baliranje*, traktor snage 26 kW što pripada najzastupljenijoj klasi traktora snage od 19 do 37 kW. Za navodnjavanje, košenje i briketiranje korišćene su specijalizovane mašine za tu namenu.

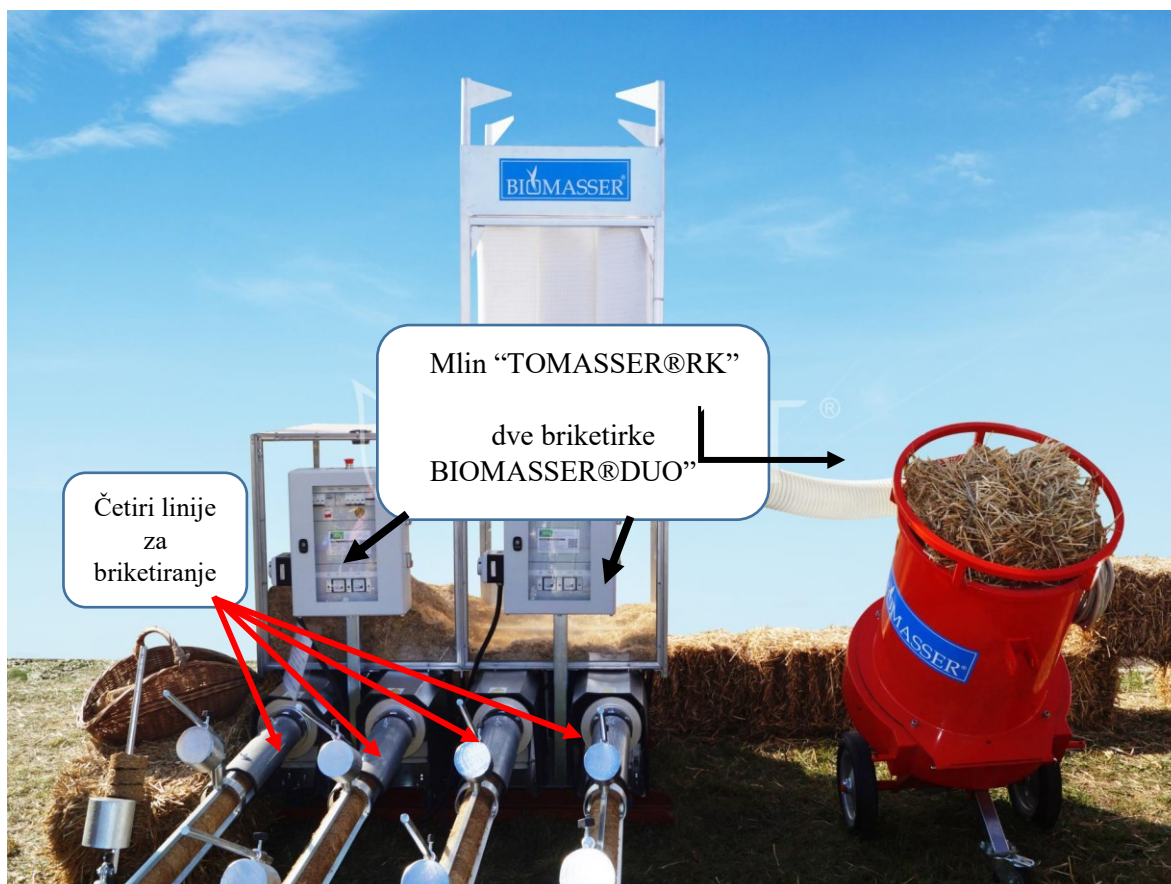
U operaciji *upotreba herbicida*, kao ulaz je korišćen modifikovani proces iz Ekoinvent baze podataka, u kome se podrazumeva da se utrošena električna energija u životnom ciklusu proizvodi u Srbiji. Isti pristup je korišćen prilikom modelovanja količine korišćene električne energije u procesu briketiranja. U operaciji *đubrenje* za proizvodnju NPK đubriva korišćen je gotov proces iz “Agri-footprint” baze podataka.

Sve primenjene modifikacije procesa korišćenih baza inventara u „SimaPro“ programu su prikazane u tabeli 4.2.

Transport bala sa polja je vršen najčešće korišćenim transportacionim agregatom u Srbiji, traktorom sa dve modifikovane prikolice tipa Zmaj 470/483, čiji je kapacitet oko 300 bala. Da bi se prevezlo svih 1566 bala miskantusa, agregat mora da napravi šest (povratnih) tura. Kao prosečna udaljenost između polja i lokacije na kojoj je smeštena briketirka uzeto je 10 km sa čime se slažu i autori ostalih studija [31], [155], [156]. Uzimajući u obzir prosečnu udaljenost između polja i briketirke i prosečnu brzinu traktora od oko 20 km h⁻¹, dobija se da transport 23,5 t miskantusa traje oko 6 sati (tabela 4.1).

U operaciji *briketiranje* koristi se oprema poljskog proizvođača “BIOMASSER® 2DUO-SET”, za koje postoje eksperimentalni podaci za briketiranje bala miskantusa gajenog u Srbiji [82]. Ovaj agregat se sastoji od jednog mlina za male četvrtaste bale marke “TOMASSER®RK” i dve briketirke vrste “BIOMASSER®DUO” sa po dve linije za

briketiranje (slika 4.3). S obzirom da je u specifikacijama za ovu mašinu navedeno da je produktivnost oko 320 kg h^{-1} a utrošak električne energije 252 MJ po toni briketa [157], za briketiranje $23,5 \text{ t}$ biomase miskantusa potrebno je 79 h i 5922 MJ električne energije (tabela 4.1).



Slika 4.3. Agregat za sitnjenje i briketiranje bala, "BIOMASSER® 2DUO-SET" [157]

Tabela 4.2. Modifikovani procesi Ecoinvent i Agri-footprint baza inventara koji su korišćeni u LCA za miskantus, ogревно drvo, brikete od lignita i prilikom analize osetljivosti (budući scenario)[20]:

	Ime procesa:	Primenjena modifikacija:		
<i>miskantus</i>	“Glyphosate {RER} production Alloc Def, U”	“Electricity, medium voltage {RS} market for Alloc Def, U”		1,2 kWh kg ⁻¹
	Briquetting	“Electricity, medium voltage {RS} market for Alloc Def, U”		7,7 kWh h ⁻¹
<i>ogревно drvo</i>	“Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, mixed logs, at furnace 30 kW”	“Electricity, low voltage {RS} market for Alloc Def, U”		0,014 MJ MJ ⁻¹
	↳ Cleft timber, measured as dry mass {GLO} market for Alloc Def, U	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {GLO} market for Alloc Def, U		0,1 tkm kg ⁻¹
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} cork forestry Alloc Def, U		0 kg
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} hardwood forestry, beech, sustainable forest management Alloc Def, U		0,47 kg kg ⁻¹
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} hardwood forestry, oak, sustainable forest management Alloc Def, U		0,26 kg kg ⁻¹
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} hardwood forestry, birch, sustainable forest management Alloc Def, U		0,17 kg kg ⁻¹
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} softwood forestry, pine, sustainable forest management Alloc Def, U		0,04 kg kg ⁻¹
		Cleft timber, measured as dry mass {RoW} softwood forestry, spruce, sustainable forest management Alloc Def, U		0,06 kg kg ⁻¹
<i>briketi od lignita</i>	“Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, lignite briquette, at stove 5-15 kW”	Lignite briquettes {GLO} market for Alloc Def, U	Transport, freight, light commercial vehicle {GLO} market for Alloc Def, U	9,23077E-05 tkm
			Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U	0,007471795 tkm
			Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for Alloc Def, U	0,00225641 tkm
		Lignite briquettes {RoW} production Alloc Def, U	Electricity, high voltage {RS} market for Alloc Def, U	
<i>budući scenario</i>	Briquetting	“Electricity, medium voltage {RS} market for Alloc Def, U”	Electricity, high voltage {RoW} electricity production, geothermal Alloc Def, U	0,0619574071919004 kWh
			Electricity, high voltage {RoW} electricity production, wind, 2,3MW turbine, precast concrete tower, onshore Alloc Def, U	0,0619806819504248 kWh
			Electricity, high voltage {RoW} heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW Alloc Def, U	0,082625392761550 kWh

Briketi se dalje transportuju velikim kamionima (>20 t) do finalnog potrošača. Smatra se da svih 23,5 t briketa miskantusa preveze u jednoj turi. Za ovu operaciju korišćen je postojeći proces iz Agri-footprint baze “*Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Mass*”. Udaljenost između briketirke i finalnog potrošača je određena kao 100 km, s obzirom da je to udaljenost do koje je transport biomase kamionom finansijski isplativ [34].

Prilikom izrade modela životnog ciklusa miskantusa uzeto je u obzir je kapacitet kotla u kome se vrši sagorevanje briketa miskantusa 30 kW a efikasnost sagorevanja 85 %.

Uzimajući u obzir donju toplotnu moć (engl. - „*Lower Heating Value*“, skr. LHV) miskantusa od 18,3 GJ t⁻¹ [82], [101] i efikasnost sagorevanja u kotlu od 85 %, dobija se da se sagorevanjem 23,5 t miskantusa oslobađa 365,5 GJ neto toplotne energije [20].

4.1.2.2. Izlazi: emisije prilikom korišćenja poljoprivredne mehanizacije

Za proračun emisija prilikom korišćenja mašina u toku operacija u životnom ciklusu miskantusa, korišćena je baza podataka “*Non-road emissions database*”, Švajcarske državne Kancelarije za Zaštitu Životne Sredine – FOEN (engl. “*Federal Office for the Environment*”) [154]. Ova baza podataka je korišćena jer sadrži podatke o emisijama najznačajnijih polutanata za veliki broj različitih poljoprivrednih mašina, uzimajući u obzir mogućnost odabira godine proizvodnje mašine i snage motora (slika 4.4). Osim emisija prilikom korišćenja poljoprivrednih mašina, u ovoj bazi se mogu naći emisije prilikom korišćenja svih mašina koje se ne koriste za prevoz ljudi i/ili dobara, kao što su industrijske mašine, građevinske mašine, mašine vojne industrije, mašine koje se koriste u šumarstvu, itd. (slika 4.4). Količine emitovanog ugljen-dioksida (CO₂), ugljen-monoksida (CO), metana (CH₄), ugljovodonika (HC), azotnih oksida (NO_x), azot-suboksida (N₂O) i čestica (PM) su date u kg h⁻¹ i razlikuju se za svaki period proizvodnje mašina.

Proračun emisija prilikom svake operacije u životnom ciklusu briketa miskantusa je vršen u odnosu na snagu korišćenog traktora (kW) i produktivnost (h ha⁻¹). Kao godina proizvodnje mašina, odabrana je 1995. godina s obzirom da je starost poljoprivrednih mašina u Srbiji veća od 15 godina (slika 4.5).

Result type:

1) Emission factors, operating hours per machine (independent of number of machines)

2) Total stock, operating hours and emissions according to the Swiss non-road emissions inventory

Machine family:	Pollutant/consumption:	Year:
<input type="checkbox"/> Select all	<input type="checkbox"/> Select all	<input type="checkbox"/> Select all
<input type="checkbox"/> Construction machinery	<input checked="" type="checkbox"/> HC	<input type="checkbox"/> 1980
<input type="checkbox"/> Industrial machinery	<input checked="" type="checkbox"/> CO	<input type="checkbox"/> 1985
<input checked="" type="checkbox"/> Agricultural machinery	<input checked="" type="checkbox"/> NOx	<input type="checkbox"/> 1990
<input type="checkbox"/> Forestry machinery	<input checked="" type="checkbox"/> Fuel cons.	<input checked="" type="checkbox"/> 1995
<input type="checkbox"/> Garden-care/hobby appliances	<input checked="" type="checkbox"/> PM	<input type="checkbox"/> 2000
<input type="checkbox"/> Railway machinery	<input checked="" type="checkbox"/> CO2	<input type="checkbox"/> 2005
<input type="checkbox"/> Marine machinery	<input checked="" type="checkbox"/> CH4	<input type="checkbox"/> 2010
<input type="checkbox"/> Military machinery	<input checked="" type="checkbox"/> NMHC	<input type="checkbox"/> 2015
	<input checked="" type="checkbox"/> N2O	<input type="checkbox"/> 2020
	<input checked="" type="checkbox"/> Benzene	<input type="checkbox"/> 2025
		<input type="checkbox"/> 2030
		<input type="checkbox"/> 2035
		<input type="checkbox"/> 2040
		<input type="checkbox"/> 2045
		<input type="checkbox"/> 2050

Slika 4.4. Prikaz menija za odabir vrste mašina, emitovanih polutanata i godine proizvodnje (slika preuzeta iz FOEN baze) [154].

Year	Group	Category	Engine type	Power class	Pollutant	Specific operating hours (h/a)	EF (kg/h)	EF (kg/h) [min. PF]	EF (kg/h) [100% PF]
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	HC	101.4	0.0201	0.0201	0.0201
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	CO	101.4	0.0791	0.0791	0.0791
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	NOx	101.4	0.0664	0.0664	0.0664
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	Fuel cons.	101.4	1.9630	1.9630	2.0219
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	PM	101.4	0.0093	0.0093	0.0009
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	CO2	101.4	6.1837	6.1837	6.3692
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	CH4	101.4	0.0005	0.0005	0.0005
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	NMHC	101.4	0.0196	0.0196	0.0196
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	N2O	101.4	0.0002	0.0002	0.0002
1995	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	18-37 kW	Benzene	101.4	-	-	-

Slika 4.5. Emisije polutanata prilikom korišćenja traktora snage 18-37 kW, proizvedenog 1995. godine (slika preuzeta iz FOEN baze) [154].

Za operacije kao što su transport i briketiranje, emisije su već kvantifikovane u odgovarajućim procesima Ecoinvent i Agri-footprint baza inventara koji se koriste u ovoj analizi. Budući da do sada nisu dostupni nikakvi primarni podaci o količini emitovanih polutanata prilikom sagorevanja miskantusa u Srbiji, korišćeni su sekundarni podaci iz studije koju su objavili Schmidl i saradnici [40]. Emisije CO₂ prilikom sagorevanja briketa se zanemaruju na osnovu pretpostavke o CO₂-neutralnosti biomase [27], [30], [83].

4.1.3. Analiza inventara životnog ciklusa referentnih fosilnih sistema (briketa od lignita i ogrevnog drveta)

Prilikom ispitivanja uticaja na životnu sredinu energetskog lanca biomase, neophodno je izvršiti poređenje sa referentnim fosilnim sistemom [94], [158]. S obzirom da se briketi miskantusa koriste za grejanje domaćinstava, izvršeno je poređenje sa najčešće korišćenim energentima za grejanje domaćinstava u Srbiji: briketima lignita i ogrevnim drvetom (poglavlje 1.2.1). Kako se ovi energenti proizvode u Srbiji, izvršene su odgovarajuće modifikacije korišćenih Ecoinvent procesa (tabela 4.2).

Električna energija koja se koristi u energetskim lancima briketa od lignita i ogrevnog drveta proizvedena je u Srbiji. Transport sirovina i proizvoda preko-okeanskim tankerima je isključeno iz analize. Za transport ogrevnog drveta razmatran je samo prevoz kamionima a za transport briketa lignita transport teretnim vozom, kamionom i kombijem.

Energetski lanac ogrevnog drveta („Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW}| heat production, mixed logs, at furnace 30kW“ - Ecoinvent) podrazumeva korišćenje drvnih trupaca, odnosno ogrevnog drveta („Cleft timber, measured as dry mass {GLO}“ - Ecoinvent) i korišćenje električne energije proizvedene u Srbiji. Proces dobijanja drvnih trupaca podrazumeva inventarizaciju svih vrsta drveća koji se koriste za dobijanje drvnih trupaca i njihov transport od mesta nastanka do mesta za sagorevanje. S obzirom da je korišćen generalizovan Ecoinvent proces, pri izradi ove disertacije miks korišćenih drvnih vrsta je modifikovan u skladu sa zastupljenošću određenih vrsta drveća u Srbiji. U studiji autora Glavonjića i saradnika [159] navodi se da je najzastupljenija vrsta drveta u Srbiji bukva (47 %), zatim hrast (25 %) i ostale listopadne vrste (16 %), pa četinari, gde je smrča

zastupljena sa 5 %, jela sa 3 % i bor sa 2 %. Ovaj odnos je iskorišćen prilikom konstruisanja energetskog lanca ogrevnog drveta (tabela 4.2). Proizvodnja peći za sagorevanje ovih energenata kao i bilo koje infrastrukture nije uzeta u obzir prilikom izrade ovog modela. Donja toplotna moć ogrevnog drveta je određena kao $18,5 \text{ GJ t}^{-1}$ (podaci iz korišćenog Ecoinvent procesa).

Energetski lanac briketa od lignita se sastoji od dva procesa: dobijanja briketa i sagorevanja briketa u kotlovima. U opisu korišćenog Ecoinvent procesa za dobijanje briketa navodi se da briket lignita ima donju toplotnu moć od $19,5 \text{ GJ t}^{-1}$, nasipnu gustinu 730 kg m^{-3} , da podaci o proizvodnom procesu nisu dostupni a da su podaci o emisijama tokom sušenja i mlevenja dobijeni analizom odgovarajuće literature. Emitovani elementi u tragovima su proporcionalni elementima u tragovima koji se nalaze u samom lignitu. Gubici iz procesa (0,5 %) su obračunati u vidu pepela lignita. Energetske potrebe su dobijene na licu mesta, iz termoelektrane lignita. Pri kreiranju ovog energetskog lanca uzeto je u obzir da se briketi lignita transportuju teretnim vozovima, kamionima i kombijima.

Finalni proizvod u životnom ciklusu energetskog lanca briketa od miskantusa, neto količina oslobođene toplote prilikom sagorevanja prosečnog prinosa miskantusa, $365,5 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ određena je kao funkcionalna jedinica prilikom poređenja ovog energetskog lanca sa referentnim energetskim lancima. Uzimajući u obzir donje toplotne moći lignita i ogrevnog drveta i efikasnost sagorevanja od 0,85, za dobijanje $365,5 \text{ GJ}$ toplotne energije potrebno je sagoreti 22 t lignita i 23 t ogrevnog drveta [20].

4.1.4. Analiza ocene uticaja na životnu sredinu energetskog lanca briketa miskantusa

Za fazu analize ocene uticaja na životnu sredinu korišćen je midpoint pristup „ReCiPE“ koji predstavlja jedan od najnovijih, najusklađenijih, najobimnijih i najčešće korišćenih LCIA pristupa (poglavlje 3.3). U razmatranje je uzeto četrnaest uticajnih kategorija (detalji o svakoj razmatranoj kategoriji uticaja, kategorizacionim faktorima su opisani u poglavlju 3.3.). Radi bolje preglednosti rezultata istraživanja, u nazivu ovih kategorija se dalje u tekstu ove disertacije je izostavljen je pojam „potencijal“ (umesto termina *Potencijal za klimatske promene*, koristi se samo termin *Klimatske promene*, itd.). Analizirane kategorije uticaja,

odgovarajući indikatori i mediji prijema zagađujućih materija prikazani su u tabeli 4.3. Ostale kategorije koje se odnose na zauzimanje poljoprivrednog i gradskog zemljišta i transformaciju prirodnog zemljišta (engl. *Agriculture land occupation*, *Urban land occupation* i *Natural land transformation*), zajedno sa utroškom metala (*Metal depletion*), ne razmatraju se u ovoj disertaciji s obzirom da se ne razmatraju ni proizvodnja mašina i infrastrukture koji predstavljaju glavne faktore uticaja u ovim kategorijama.

Tabela 4.3. Analizirane kategorije uticaja, odgovarajući indikatori i mediji prijema zagađujućih materija [20].

Kategorije uticaja:	Jedinice i mediji prijema (midpoint pristup):
Klimatske promene (CC)	kg CO ₂ eq (u vazduh)
Uništavanje ozona (OD)	kg CFC-11 ^a eq (u vazduh)
Zakišeljavanje zemljišta (TA)	kg SO ₂ eq (u vazduh)
Eutrofikacija slatkovodnih ekosistema (FE)	kg P eq (u slatkovodne ekosisteme)
Eutrofikacija marinskih ekosistema (ME)	kg N eq (u slatkovodne ekosisteme)
Toksičnost za ljude (HT), Ekotoksičnost kopnenih, slatkovodnih i marinskih ekosistema (TET, FET, ME)	kg 1,4-DB ^b eq (u vazduh iznad ljudskih naselja, u zemljište u i oko ljudskih naselja, u slatkovodne i marinske ekosisteme)
Formiranje fotohemijskih oksidanata (POF)	kg NMVOC ^c (u vazduh)
Formiranje čestica (PMF)	kg PM10 eq (u vazduh)
Jonizujuće zračenje (IR)	kBq ^d U235 ^e eq (u vazduh)
Iscrpljivanje vodnih rezervi (WD)	Voda m ³
Iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva (FD)	kg oil eq

^a CFC-11: Hlorofluorouglenik;

^b 1,4-DCB: 1,4 dihlorobenzen;

^c NMVOC: lako isparljiva ne-metanska organska jedinjenja;

^d kBq: kilobekerel;

^e U-235: Izotop uranijuma;

4.2. Ocena životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa

Ocena životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa urađena je po smernicama datim u ISO 14040 standardima, odnosno prilikom izrade ove analize definisani su cilj i obim studije, urađena je analiza inventara, faza procene uticaja i interpretacija rezultata.

4.2.1. Cilj i obim studije, granice sistema i funkcionalna jedinica

Glavni cilj ove LCA studije je kvantifikovanje relevantnih uticaja na životnu sredinu usled proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa kako bi se evidentiralo da li proizvodnja pirolitičkog dizela od miskantusa predstavlja "zeleniju" alternativu konvencionalnoj proizvodnji dizel goriva. Drugi cilj sprovođenja ove LCA studije je određivanje prinosa pirolitičkog dizela (kg) koji se sintetiše pirolizom prosečnog prinosa miskantusa sa 1 ha obradive površine u Srbiji.

U analizi uticaja na životnu sredinu korišćen je pristup „od klevke do kapije“, koji se u slučaju LCA goriva označava kao studija „od bunara do pumpe“ („well-to-pump“). Granice ispitivanog sistema obuhvataju pripremu za sadnju rizoma, sadnju, uzgoj i negu useva, košenje, baliranje, transport bala do postrojenja za pirolizu, pripremu za pirolizu, sam proces pirolize (i unapređivanja i stabilizacije) i transport do dobijenog pirolitičkog goriva do pumpe (slika 4.1). Granice sistema ne obuhvataju proizvodnju mašinerije i druge infrastrukture ni uzgoj i transport rizoma.

Funkcionalna jedinica je određena kao površina poljoprivrednog zemljišta (1 ha) pod černozeom koja se koristi za kultivaciju miskantusa, a referentni protok predstavlja prosečan „suv“ prinos miskantusa dobijenog od III-VII godine gajenja na eksperimentalnom polju, na zemljištu tipa černozeom, koji iznosi 23,5 t (85 % s.m.). Prilikom poređenja sa konvencionalno proizvedenim dizelom, funkcionalna jedinica je određena kao energetski sadržaj dobijenog pirolitičkog dizela, odnosno 406,75 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³ 9,85 t pirolitičkog dizela (tabela 4.4).

S obzirom da nisu poznati podaci u vezi sa unapređivanjem i stabilizacijom bio-ulja od miskantusa, usled morfološke sličnosti kukuruza i miskantusa, korišćena je modifikovana putanja dobijanja pirolitičkog ulja i njegovih derivata od kukuruzne šaši.

Kao softverska alatka za izradu LCA korišćen je softver GREET (skr. od “*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation*”) koji je razvijen od strane Nacionalne laboratorije Argon u SAD [6,38]. Za *analizu osetljivosti*, konstruisana je još jedna pirolitička putanja gde su očekivane niže emisije i manji utrošci resursa.

4.2.2. Analiza inventara životnog ciklusa pirolitičkog dizela

Životni ciklus pirolitičkog dizela od miskantusa je podeljen u nekoliko operacija (slika 4.1):

- 1) Uzgoj (podrazumeva operacije pripreme zemljišta za sadnju, sadnju, negu useva, košenje i baliranje);
- 2) transport balirane biomase miskantusa sa polja do postrojenja za pirolizu;
- 3) sitnjenje biomase;
- 4) sušenje biomase;
- 5) piroliza i stabilizacija (hidrotretiranje) sirovog pirolitičkog ulja;
- 6) hidrokrakovanje i formiranje stabilnog produkta pirolize – pirolitičkog dizela;
- 7) transport dizela iz postrojenja do pumpe.

Detaljan prikaz input/output matrice je predstavljen u tabeli 4.4

Tabela 4.4. Input-output matrica za energetski lanac pirolitičkog dizela od miskantusa gajenog na 1 ha zemljišta tipa černozem:

Ulazi i izlazi	jedinica	količina	Opis
<i>Input</i>			
Herbicid	kg	3	proizvodnja i transport herbicida su integrisani u model
Miskantus (rizomi)			proizvodnja i transport rizoma nije u okvirima studije
Đubrivo	kg	667	NPK 15:15:15 (100 kg N ha ⁻¹ + 100 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ + 100 kg K ₂ O ha ⁻¹)
Voda	m ³	180	proizvodnja i transport đubriva je integrisan u model
Dizel	kg	120	za navodnjavanje useva miskantusa (ha ⁻¹ god ⁻¹) za poljoprivrednu mehanizaciju (ha ⁻¹ god ⁻¹)

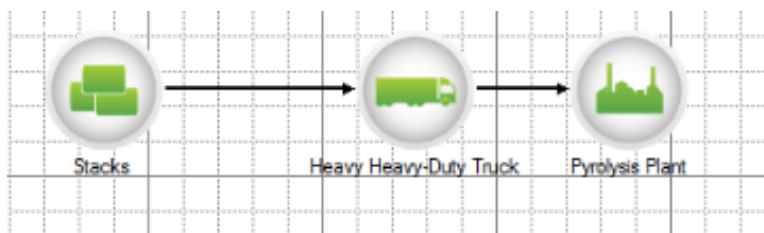
<i>Output</i>				
Miskantus (bale) (85% s.m.)	t	23,5		masa pokošenog miskantusa nakon sušenja u polju [47]
<i>Input</i>				
Miskantus (bale) (85% s.m.)	t	23,5		
Sitnjenje	GJ	4,23		el.energija (iz el.mreže)
Sušenje	GJ	8,63		toplota dobijena usled sagorevanja pirolitičkog uglja (efikasnost sagorevanja 0,90)
<i>Output</i>				
Miskantus (93% s.m.)	t	21,4		masa miskantusa nakon sušenja
<i>Input</i>				
Miskantus (93% s.m.)	t	21,4		biomasa miskantusa za pirolizu
Piroliza (fluidizovani sloj)				količina toplotne energije dobijena usled sagorevanja nusprodukata pirolize
- sirovo pir.ulje	t	12,24		prinos 57,2 % (temp 350 °C, vreme zadržavanja pare 2 s) [60]
- ugalj	t	4,47		prinos 20,9%, HVV/LHV= 22000,47 MJ t ⁻¹ [60]
- gas	t	4,41		prinos 22%, HVV/LHV= 19920 MJ m ⁻³ [60]
<i>Hidro stabilizacija</i>				
<i>Input</i>				
Vodonik (gas)	GJ	103,35		dobijen od prirodnog gasa
Prirodni gas	GJ	332,18		
El.energija	GJ	70,88		
<i>Output/Input</i>				
Tečno gorivo	t	9,85		gustina:0,78t m ⁻³ ; LHV/HHV=33200,35 MJ m ⁻³
<i>Hidrokrakovanje</i>				
Vodonik (gas)	GJ	0,27		dobijen od prirodnog gasa
Prirodni gas	GJ	14,93		
El.energija	GJ	0,24		
<i>Output</i>				
Pirolitički dizel	t	9,85		gustina:0,83 t m ⁻³ ; LHV/HHV=34373,78 MJ m ⁻³
Transport (kamion)	tkm	9,85x50		udaljenost između postrojenja i pumpe je 50 km

1) Uzgoj Miskantusa

Svi ulazi i izlazi (input/output) operacija vezanih za uzgoj miskantusa su obrađeni prilikom analize životnog ciklusa briketa od miskantusa i kvantifikovani u tabeli 4.1.

2) Transport bala do postrojenja

Nakon košenja, baliranja i sušenja na polju, bale mискantusa se tovarе u kamnion i transportuju do postrojenja za pirolizu (biorafinerije) (slika 4.6). Razdaljina između polja i postrojenja je određena kao 50 km (isplativost transporta kamionom je do 100 km [55]).



Slika 4.6. Transport Mискantusa bala do postrojenja za pirolizu (preuzeto iz GREET).

3) *Sitnjenje biomase*

Prva faza pripreme biomase za process pirolize je sitnjenje. S obzirom na uopštenu pretpostavku da je za sitnjenje jedne tone biomase potrebno utrošiti 50 kWh električne energije [88] za sitnjenje 23,5 t mискantusa treba utrošiti 4230 MJ energije. Sličan rezultat su dobili Mani i saradnici [160] gde se za sitnjenje jedne tone trave Switchgrass (prerijskog prosa) u mlinu, (približnog sadržaja vlage kao mискantus, 12 % finalne veličine od 0,8 mm, pod pretpostavkom da je najpribližniji Mискantusu od ostalih ispitivanih sirovina) utroši 56,57 MJ, odnosno ukupno 4785,775 MJ (4,8 GJ) energije ili 1329,395 kWh el. energije (posto je mlin na struju).

4) *Sušenje biomase*

Usitnjena biomasa mискantusa se zatim suši dok količina vlage sa 15 % ne padne na 7 %, pri čemu se dobija 21,4 t biomase (tabela 4.4). Sušenje se vrši u parnom sušaču gde je količina utrošene toplote za sušenje dobijena sagorevanje nus-produkta pirolize, pirolitičkog uglja.

Za proračun mase nakon sušenja korišćena je formula:

$$W_f = W_i \frac{100 - M_{ci}}{100 - M_{cf}} \quad (1.1)$$

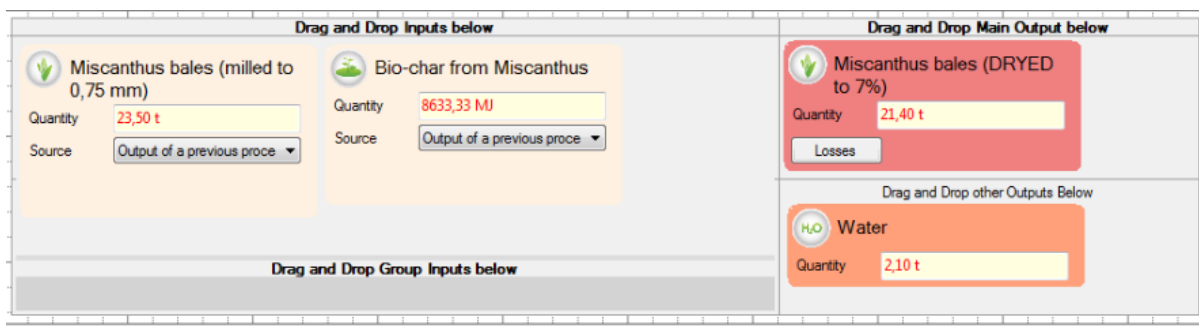
Gde je:

W_f - finalna težina biomase (nakon sušenja) [t], = 21,4 t dobijena proračunom

W_i - inicijalna težine biomase (pre sušenja) [t], = 23,5 t

M_{cf} – sadržaj vlage nakon sušenja [%], = 7 %
 M_{ci} – sadržaj vlage pre sušenja [%], = 15 %

Količina potrebne toplote za sušenje je proračunata u skladu sa smernicama datim od strane Wright i saradnika [88] gde se navodi da „sušenje biomase uglavnom zahteva oko 50% više energije nego teoretski minimum od 2442 kJ po kg isparene vlage“, što znači da je potrebno utrošiti bar 3663 kJ po kg isparene vlage. S obzirom da u toku procesa sušenja ispari 2,1 t, odnosno 2100 kg vode (23,5-21,4 t), za sušenje biomase miskantusa treba utrošiti 3,7 MJ x 2100 kg = 7770 MJ, odnosno 7,8 GJ toplotne energije. Kao sirovina za dobijanje toplotne energije koristi se pirolitički ugalj iz procesa pirolize. S obzirom da je efikasnost sagorevanja 90%, treba utrošiti ukupno 8633,33 MJ, odnosno 8,63 GJ toplotne energije (tabela 4.4). Šematski prikaz procesa sušenja u programu GREET dat je na slici 4.7.



Slika 4.7. Proces sušenja biomase miskantusa (GREET)

5) Proces brze pirolize

Kao bazični scenario proizvodnje pirolitičkog dizela označen je scenario **Distributivne rafinerije** u kome se proces brze pirolize i stabilizacije sirovog pirolitičkog ulja dešava u bio-rafineriji (koja nije deo postojeće rafinerije nafte) a produkt pirolize se distribuira na drugo mesto (uglavnom u rafineriju nafte) gde se odvija proces unapređivanja goriva.

Podaci o prinosima produkata pirolize su preuzeti iz rada objavljenog od strane Kima i saradnika [60] koji predstavlja jedini rad u kojem je vršena detaljna analiza pirolize miskantusa. U ovom radu je dobijeno da najviši prinos sirovog pirolitičkog ulja od miskantusa iznosi 57,2 % (dobija se na temp od oko 350 °C, gde je vreme zadržavanja pare

2 s), pirolitičkog uglja 20,9 % a pirolitičkih gasova 22 %. Ovo znači da se od 21,4 t biomase miskantusa u procesu pirolize dobija:

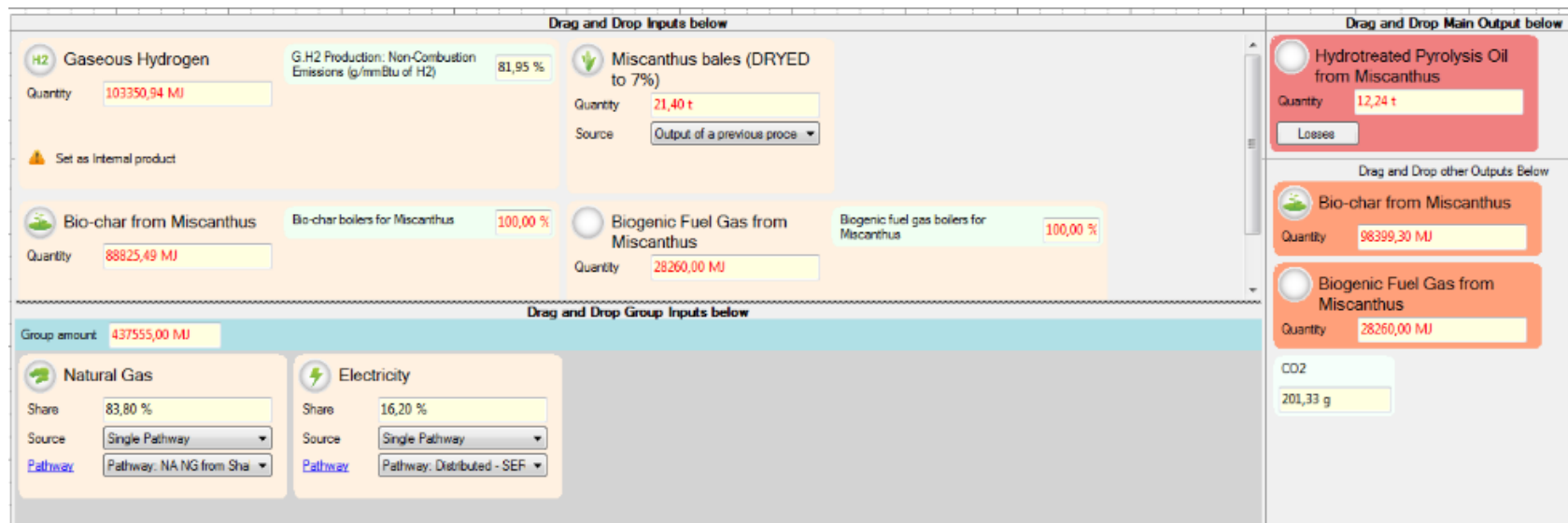
- 12,24 t sirovog pirolitičkog ulja,
- 4,47 t pirolitičkog uglja (HVV/LHV: 22000,47 MJ t⁻¹) i
- 4,71 t pirolitičkog gasa (ne kondenzujućih gasova) (HVV/LHV: 19920 MJ m⁻³).

5) Hidrotretiranje i formiranje stabilnog produkta pirolize – pirolitičkog dizela

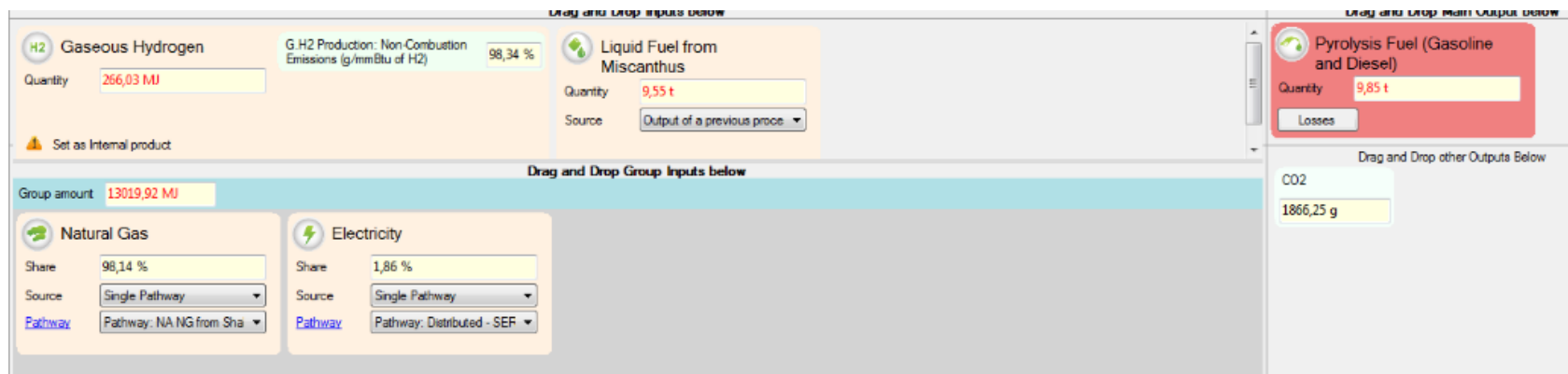
Stabilizacija (hidrotretiranje) sirovog pirolitičkog ulja se vrši uz pomoć vodonika (H₂) koji se u uglavnom dobija reformacijom prirodnog gasa, odnosno predstavlja **H₂ eksternu putanju**. **Distributivna - H₂ eksterna putanja** je označena kao bazični scenario dobijanja pirolitičkog dizela od miskantusa.

Količina pirolitičkog uglja sa leve i desne strane procesa (slika 4.8) nije u balansu (za razliku od pirolitičkog gasa, odn. ne-kondenzujućih gasova) zato što je jedna frakcija pirolitičkog uglja iskorišćena za sušenje biomase, tačnije 8633,33 MJ (8,6 GJ).

Kao što je ranije navedeno, ostale faze u formiranju pirolitičkog dizela od miskantusa su preračunate u odnosu na podatke vezane za kukuruznu šaš iz programa GREET u okviru grupe „*Renewable Gasoline and Diesel*“, podgrupa „*Pyrolysis Fuel (Gasoline and Diesel)*“, putanja „*Pyrolysis Diesel from Corn Stover via pyrolysis - Distributed Standalone Bio-Refinery*“. Na osnovu energetske i masene bilansa ovih procesa, proračunate su količine ulaza i izlaza izučavanih operacija u životnom ciklusu miskantusa. Najveća razlika između pirolitičke putanje kukuruzne šaši iz GREET softvera i pirolitičke putanje konstruisane u ovoj disertaciji je u funkcionalnoj jedinici. U procesima sa kukuruznom šaši, funkcionalna jedinica je određena kao 1 MJ dobijenog goriva (output) a u energetskom lancu miskantusa funkcionalna jedinica je određena kao prinos miskantusa gajenog na 1 ha, koji predstavlja ulaznu sirovinu za proces pirolize (input). Kao finalni proizvod na kraju ove putanje se dobija 9,83 t pirolitičkog dizela (tabela 4.4).



Slika 4.8. Proces pirolize i stabilizacije Miskantusa: sa leve strane su dati ulazi u proces a sa desne izlazi iz procesa (GREET).



Slika 4.9. Proces krakovanja pirolitičkog bio-ulja vodonikom: sa leve strane su dati ulazi u proces a sa desne izlazi iz procesa (GREET).

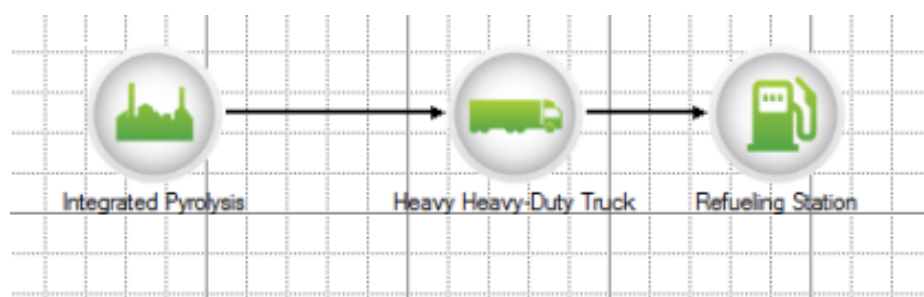
6) Hidrokrakovanje i formiranje finalog produkta pirolize – pirolitičkog dizela

Nakon stabilizacije, sintetisano pirolitičko ulje se hidrokrakuje posle čega se kao finalni proizvod dobija pirolitički dizel, u prinosu od 9,85 t.

U toku faze hidrostabilizacije i hidrokrakovanja troši se ukupno 103,62 GJ vodonika (usled konverzije 335,86 GJ prirodnog gasa) i 71,12 GJ električne energije. Od toga skoro 100% ovih resursa se utroši samo u procesu stabilizacije (tabela 4.4). Na slici 4.9 dat je šematski prikaz procesa hidrikrakovanja bio-ulja iz GREET procesa.

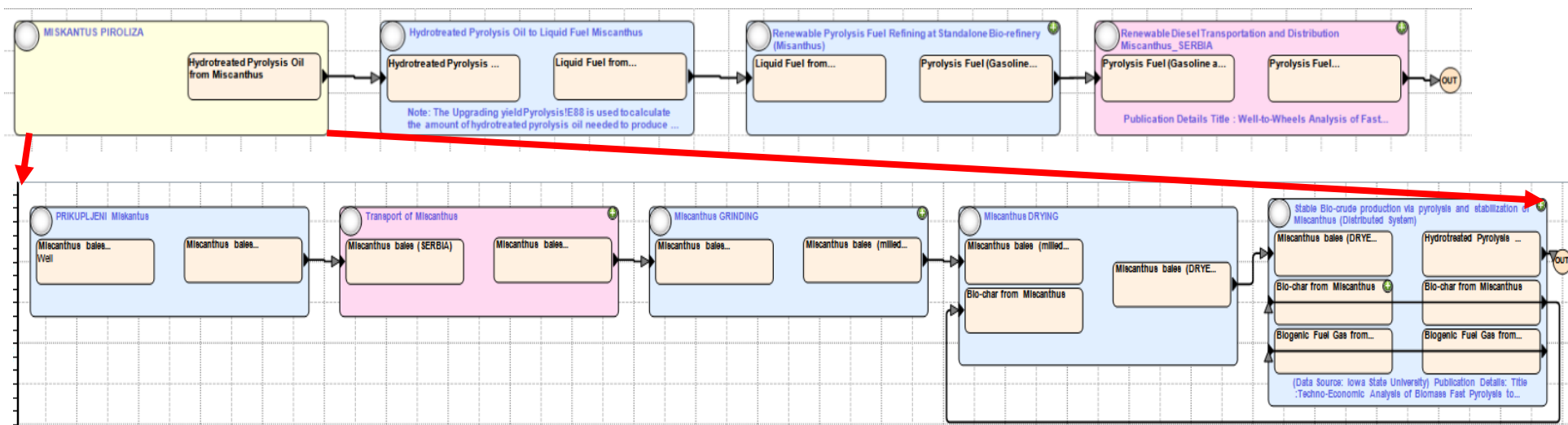
7) Transport

Poslednja operacija pri proizvodnji pirolitičkog dizela je transport 9,85 t pirolitičkog dizela kamionom od rafinerije do pumpe, gde se kao rastojanje takođe uzima 50 km (slika 4.10).



Slika 4.10. Transport pirolitičkog dizela od rafinerije do pumpe (GREET).

Na slici 4.11 dat je šematski prikaz celokupne putanje proizvodnje pirolitičkog dizela konstruisan u GREET softveru.

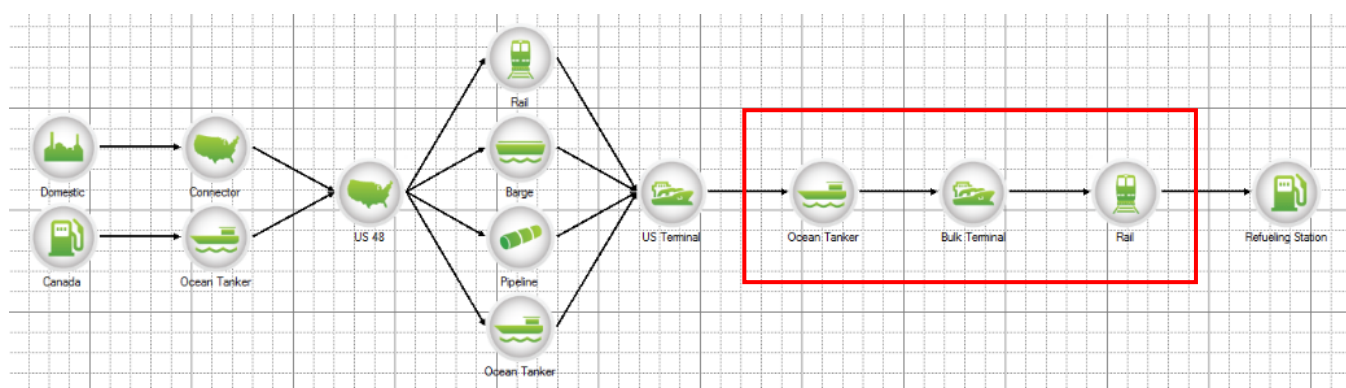


Slika 4.11. Šematski prikaz „well to pump“ proizvodnje pirolitičkog dizela od Miskantusa iz GREET softvera. U GREET softveru se plavom bojom označavaju *stacionarni procesi*, roze bojom *procesu transporta*, a žutom bojom *putanje procesa* (engl. “pathway”). Crvenim strelicama označeni su svi procesi koji se nalaze u okviru putanje procesa “MISKANTUS PIROLIZA”.

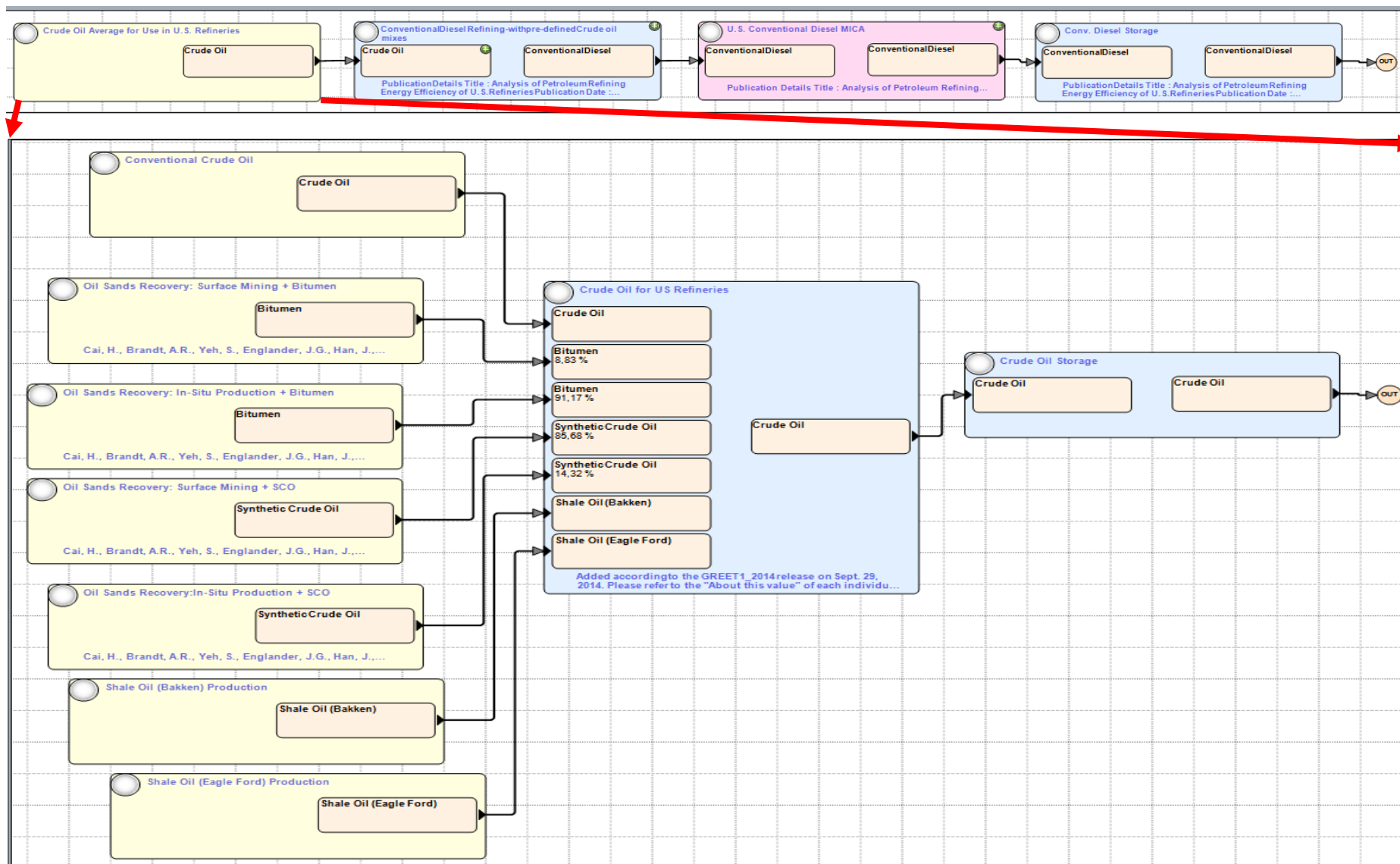
4.2.3. Uporedna analiza sa konvencionalnom proizvodnjom dizela

Za poređenje proizvodnje pirolitičkog dizela sa konvencionalno proizvedenim dizelom, korišćen je proces iz GREET softvera: „*Conventional diesel from Crude Oil for US Refineries*“ u kome je prikazana proizvodnja dizela u SAD [161].

Ova putanja podrazumeva ceo proizvodni tok dizela, od naftnog koksa, bitumena, uljanih škriljaca, sirove nafte, i sve procese transporta (železnicom, baržom, cevovodom i prekookeanskim tankerima) kao i korišćenje prirodnog gasa, električne energije i dizela (slika 4.13). Ovako proizveden dizel se dovozi do Republike Srbije. S tim u vezi, u ovoj putanji promenjen je poslednji jedinični proces („*U.S. Conventional Diesel SRB*“) u kome je dodat i prekookeanski transport između SAD i Evrope (od Portlanda u Mainu do Roterdama u Holandiji) i železnički transportom od Roterdama do Beograda. Udaljenost između dve luke je 3175 nmi [162] a od Roterdama do Beograda 1800 km (slika 4.12).



Slika 4.12. Proces transporta dizela iz GREETa dopunjen za prekookeanski i železnički transport (Ocean Tanker, Bulk Terminal, Rail).



Slika 4.13. Šematski prikaz „well-to-pump“ konvencionalne putanje proizvodnje dizela iz GREET softvera.

4.2.4. Analiza ocene uticaja na životnu sredinu proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa

Faza ocene uticaja na životnu sredinu proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa podrazumeva kvantifikovanje emisija polutanata (kg) kao što su: ugljen-dioksid (CO_2), lako isparljiva organska jedinjenja (engl. - “*volatile organic compounds*”, skr. VOC), ugljen-monoksid (CO), oksidi azota (NO_x), čestice dijametra 10 i 2,5 mikrometara (PM10, PM2,5), oksidi sumpora (SO_x), metan (CH_4) i azot-suboksid (N_2O). U odnosu na ove emisije, proračunati su uticaji u tri kategorije: Potencijal Globalnog zagrevanja (GWP), Potencijal Zakišeljavanja tla (TA) i Potencijal formiranja čestica (PMF). U kategoriji Potencijal globalnog zagrevanja korišćeni su sledeći karakterizacioni faktori na 100 godišnjoj skali (CO_2 eq) : $\text{CO}_2 = 1$; $\text{CH}_4 = 25\text{kg CO}_2$; $\text{N}_2\text{O} = 298\text{ kg CO}_2$ (tabela 3.1) [136], u kategoriji Potencijal zakišeljavanja tla na 100-godišnjoj skali: (SO_2 eq): $\text{SO}_2 = 1$, za $\text{NO}_x = 0,56\text{ kg SO}_2$ (tabela 3.3) i u kategoriji Potencijal za formiranje čestica (PM10 eq): $\text{NO}_x = 0,21\text{ kg PM10}$; $\text{SO}_2 = 0,19\text{ kg PM10}$ (tabela 3.1). U toku procena uticaja na životnu sredinu od proizvodnje dizela kvantifikuju se i utrošci resursa (u vidu utošene energije, MJ) kao što su: sirova nafta, prirodni gas, ugalj, naftni koks, bitumen, uljani škriljici, ostaci šumske biomase, hidroenergija, nuklearna energija, geotermalna energija, solarna energija i energija vetra. Radi bolje preglednosti, utrošeni resursi su grupisani u dve grupe: u grupu *Fossilna goriva* i grupu *Obnovljivi izvori energije*.

5. Rezultati i interpretacija

5.1. Ocena uticaja na životnu sredinu životnog ciklusa briketa *miscantusa*

Rezultati ocene uticaja energetskog lanca briketa *miscantusa* na životnu sredinu (LCIA) predstavljeni su na grafikonima koji su dobijeni korišćenjem softvera SimaPro 8.0.4.7. i u tabeli 5.5.

Analiza doprinosa svakog jediničnog procesa u životnom ciklusu briketa *miscantusa* u svakoj ispitivanoj kategoriji uticaja je dostupna funkcija u okviru softvera SimaPRO (*process contribution*) i predstavljena je u vidu nezavisnih grafikona koji su prikazani na kraju ove disertacije kao PRILOZI (1-14). Ova funkcija omogućava bolje razumevanje rezultata LCA studije.

Na grafikonu 5.1, su predstavljeni uticaji na životnu sredinu u toku ovog lanca *miscantusa* kroz četrnaest odabranih uticajnih kategorija.

Rezultati ukazuju da je operacija sa najvećim uticajem na životnu sredinu *briketiranje* koje u devet od četrnaest ispitivanih uticajnih kategorija ispoljava najveći uticaj. U kategorijama FE, FET, MET, HT briketiranje ispoljava skoro maksimalni uticaj, oko 100%. Ovako visok uticaj potiče od tretiranja jalovišta površinskih kopova lignita koji se koristi kao energent za dobijanje električne energije u Republici Srbiji (PRILOG 1). Analiza inventara jediničnog procesa dobijanja električne energije u Republici Srbiji, ukazuje da se čak 55 % električne energije koja se koristi u elektrodistributivnoj mreži Republike Srbije, proizvodi sagorevanjem lignita u termoelektranama.

Iskopavanjem uglja uklanja se velika količina površinskog materijala, odnosno površinske stene koja se ne koristi direktno u procesu proizvodnje uglja i koja se označava terminom jalovina a mesto njihovog odlaganja - jalovište. Ovaj sloj zemljišta, odnosno stene u netaknutom stanju ne predstavljaju opasnost po životnu sredinu ali ga mehanički poremećaji prilikom iskopavanja čine reaktivnijim usled sitnjenja i lomljenja materijala. Ovakav materijal postaje podložan procesima hidratacije i kristalizacije usled čega se povećavaju

odnos površina i zapremina što dodatno ubrzava proces usitnjavanja jalovine. Na ovaj način prethodno dobro zaštićene mineralne faze postaju izložene atmosferskim prilikama čime se povećavaju reaktivnost i potencijalne emisije štetnih materija. Mešanje sa vodom i izlaganje atmosferskim padavinama i kiseoniku podstiče mikrobiološku oksidaciju sulfidnih minerala, poput pirita, do sumporne kiseline, koja utiče na smanjenje pH na povećanje rastvorljivosti mnogih teških metala pri čemu nastaju *kisele rudničke vode*. Ova pojava predstavlja glavni ekološki problem rudarskih operacija, naročito gde je sadržaj sulfida visok, a sadržaj pH puferinga je nizak.

Jalovina se ili odlaže na površinu ili se vraća kao pokrivka na površinskim kopovima. Procenjeno je da na godišnjem nivou nastane 22240 miliona tona jalovine usled iskopavanja uglja a usled iskopavanja lignita 3900 miliona tona [163]. Kod jalovišta sa lignitskih kopova najveći problem po životnu sredinu predstavljaju ocedne vode sa visokom koncentracijom soli i rastvorenih teških metala i kisele rudničke vode. S tim u vezi u toku procesa *briketiranja* kvantifikovane su visoke emisije 1,4 DB ekvivalenata, oko 98 % ukupnih emisija ovog jedinjenja u toku celog životnog ciklusa miskantusa (1130,8 kg u odnosu na 1154,9 kg) i visok uticaj u kategorijama *Toksičnost za ljude* (PRILOG 6), *Ekotoksičnost kopnenih i vodenih (slatkovodnih i marinskih) ekosistema* (PRILOG 9, 10 i 11). Visok uticaj u kategoriji *Eutrofikacija slatkovodnih ekosistema* potiče usled visokih koncentracija fosfora u samoj jalovini kao i u ocednoj vodi (PRILOG 4) [163]. Takođe visoke emisije CO₂ eq i uticaj u kategoriji klimatske promene potiču od proizvodnje električne energije od lignita.

U kategoriji *Jonizujuće zračenje* briketiranje ima najveći uticaj usled korišćenja električne energije koja se jednim delom uvozi iz Rumunije, Bugarske i Mađarske gde se delimično proizvodi u nuklearnim elektranama (podaci iz Ecoinvent procesa). Proces koji najviše doprinosi ovom uticaju je nastanak jalovine prilikom iskopavanja i mlevenja rude uranijuma i koja predstavlja radioaktivni mulj (PRILOG 12). Usled niskim emisija CFC-11 i NMVOC, (svega 2% ukupnih emisija), briketiranje ima najniži uticaj u kategorijama OD i POF.

Osnovni razlog visokog uticaja opracije briketiranje u ovim uticajnim kategorijama leži u korišćenju električne energije za rad briketirke, kao i usled jako niske produktivnosti ovog procesa (oko 80 sati je potrebno za briketiranje 23,5 t s.m. miskantusa, tabela 4.1) u odnosu na ostale operacije u životnom ciklusu miskantusa.

Jedina kategorija u kojoj briketiranje ispoljava pozitivni uticaj na životnu sredinu je *Iscrpljivanje vodnih rezervi* (-103,16%), s obzirom da se skoro 19% električne energije koja se koristi u Srbiji proizvodi iz mini hidroelektrana gde se sva upotrebljena količina vode vraća u korito reke i gde ne postoje dodatni rezervoari vode (PRILOG 13) [164]. Prema Goedkoop-u i saradnicima [141], smatra se da u scenariju korišćenja vode u kome se se voda ispušta jako blizu mesta njene upotrebe ne dovodi do nestašice vode. U životnom ciklusu miskantusa se uštedi 5819,26 m³ vode. Ovakva situacija, u kojoj nisu zabeleženi negativni uticaju na životnu sredinu se obeležava znakom minus („-,“).

Sledeća operacija koja ima najveće opterećenje na životnu sredinu u životnom ciklusu miskantusa je *sagorevanje u kotlu*. Ova operacija ispoljava uticaj u svega četiri od četrnaest ispitivanih kategorija – u POF, PMF, TA i ME. U kategoriji *Formiranje fotohemijskih oksidanata* (PRILOG 8), sagorevanje briketa od miskantusa ima uticaj oko 92 % u odnosu na ostale operacije jer se prilikom sagorevanja briketa emituje oko 92 % ukupno emitovanih ugljovodonika. Takođe, sagorevanjem briketa emituje se 92 % ukupno emitovanih čestica, odnosno 16 g PM10 eq od ukupno 20 g PM10 eq (PRILOG 7). Visok uticaj u kategorijama *Zakiseljavanje zemljišta* (71 %) (PRILOG 3) i *Eutrofikacija marinskih ekosistema* (58 %) (PRILOG 5) potiče od emisija NO_x koje su u korelaciji sa sadržajem azota u miskantusu [40]. U kategoriji *Klimatske promene*, uticaj sagorevanja je 0% usled CO₂ neutralnosti sagorevanja biomase (poglavlje 2.2.1).

Treća operacija po nivou opterećenja na životnu sredinu u životnom ciklusu miskantusa je *transport briketa kamionom* (do finalnog potrošača). Ova operacija ima najviši uticaj u kategoriji *Oštećivanje ozonskog omotača*, oko 22 % usled emisija 0,000198 kg CFC-11 eq (od ukupnih 0,000911 kg of CFC-11 eq) (tabela 4.1) koje se emituju kao posledica sagorevanja dizela u motoru kamiona (PRILOG 2). Uticaj istog opsega, od oko 22 % je zabeležen i u kategoriji TET, a 12 % u kategorijama CC i FD usled relativno visokih emisija CO₂ eq (oko 146,3 kg od ukupno 1181,21 kg CO₂ eq) i relativno visoke potrošnje dizela u odnosu na ostale operacije u životnom ciklusu miskantusa (32,25 kg ha⁻¹, tabela 4.1, PRILOG 1, PRILOG 14). Iako operacija *transport traktorom* ima veću potrošnju goriva u odnosu na *transport kamionom* (36,47 kg ha⁻¹, tabela 4.1) i nižu produktivnost (6 h ha⁻¹ u odnosu na 2 h

ha⁻¹, tabela 4.1), ona ispoljava sličan ili čak malo niži uticaj na životnu sredinu. Razlog ovome je korišćenje manje detaljne analize inventara operacije transporta traktorom. Kao što je već napomenuto, za kreiranje operacija *transport kamionom* je korišćen process iz “Agri-footprint” baze podataka (tabela 4.2) a za operaciju *transport traktorom* su korišćeni dostupni podaci iz literature koji podrazumevaju kvantifikovanje emisija dosta manjeg broja potencijalnih polutanata.

Radi bolje preglednosti uticaja *operacija u polju* njihov uticaj na životnu sredinu je predstavljen na zasebnom grafikonu (grafikon 5.2). *Košenje* i *oranje* imaju najveće utroške energije i dizel goriva i traju duže u odnosu na sve ostale operacije u polju (tabela 4.1). Ove operacije imaju jako sličan uticaj u kategorijama kao što su OD, TE i FD i sličnu potrošnju goriva po ha ali *košenje* ima veći uticaj u kategorijama CC, TA, ME, POF i PMF usled različitih emisionih faktora koji su u korelaciji sa korišćenjem različitih snaga motora traktora. U FOEN bazi, emisije usled sagorevanja dizela u poljoprivrednim mašinama su veće za traktore iste starosti a veće snage motora. Naime, operacija oranje je vršena traktorom snage 103 kW, a operacija košenje kosačicom snage 168 kW (tabela 4.1). Obe ove operacije imaju najveći uticaj u OD kategoriji odmah posle operacija transporta, i to oko 15 % upravo zbog visoke potrošnje dizel goriva, 27,46 t ha⁻¹.

Pa ipak, ‘hotspot’ svih operacija u polju je operacija *upotreba herbicida* koja ima najveći uticaj u čak pet kategorija, FE, HT, FET, TET i MET (49 %, 23 %, 49 %, 33 % i 43 %), usled upotrebe a i proizvodnje herbicida *glifozat* od prekursora kao što su anhidridi sirćetne kiseline, amonijak, hlor, formaldehid, fosforni hlorid, natrijum hidroksid i dekarbonizirana voda. Operacija *đubrenje* takođe ima visoke uticaje, oko 49 % u FE kategoriji, 28 % u CC kategoriji, 23 % u TA kategoriji i 16 % u FD kategoriji, usled proizvodnja NPK đubriva i utroška dizel goriva. Proizvodnja NPK đubriva podrazumeva prijem sirovina (kalijum hlorida, amonijum-nitrata, diamonijum-fosfata i drobljenog kamena) i njihovu sintezu do NPK jedinjenja.

Uticaji operacije *baliranje* se kreću u rangu od 13 % do 17 % i potiču od korišćenja dizel goriva. U kategoriji WD jedini process koji ispoljava uticaj je *navodnjavanje* usled utroška 180 m³ ha⁻¹ vode (tabela 4.1). Operacije *navodnjavanje*, *tanjiranje*, *drljanje* i *sadnja rizoma*

ispoljavaju najmanje uticaje na životnu sredinu s obzirom da u odnosu na ostale operacije vremenski kraće usled čega imaju i manju potrošnju dizela.

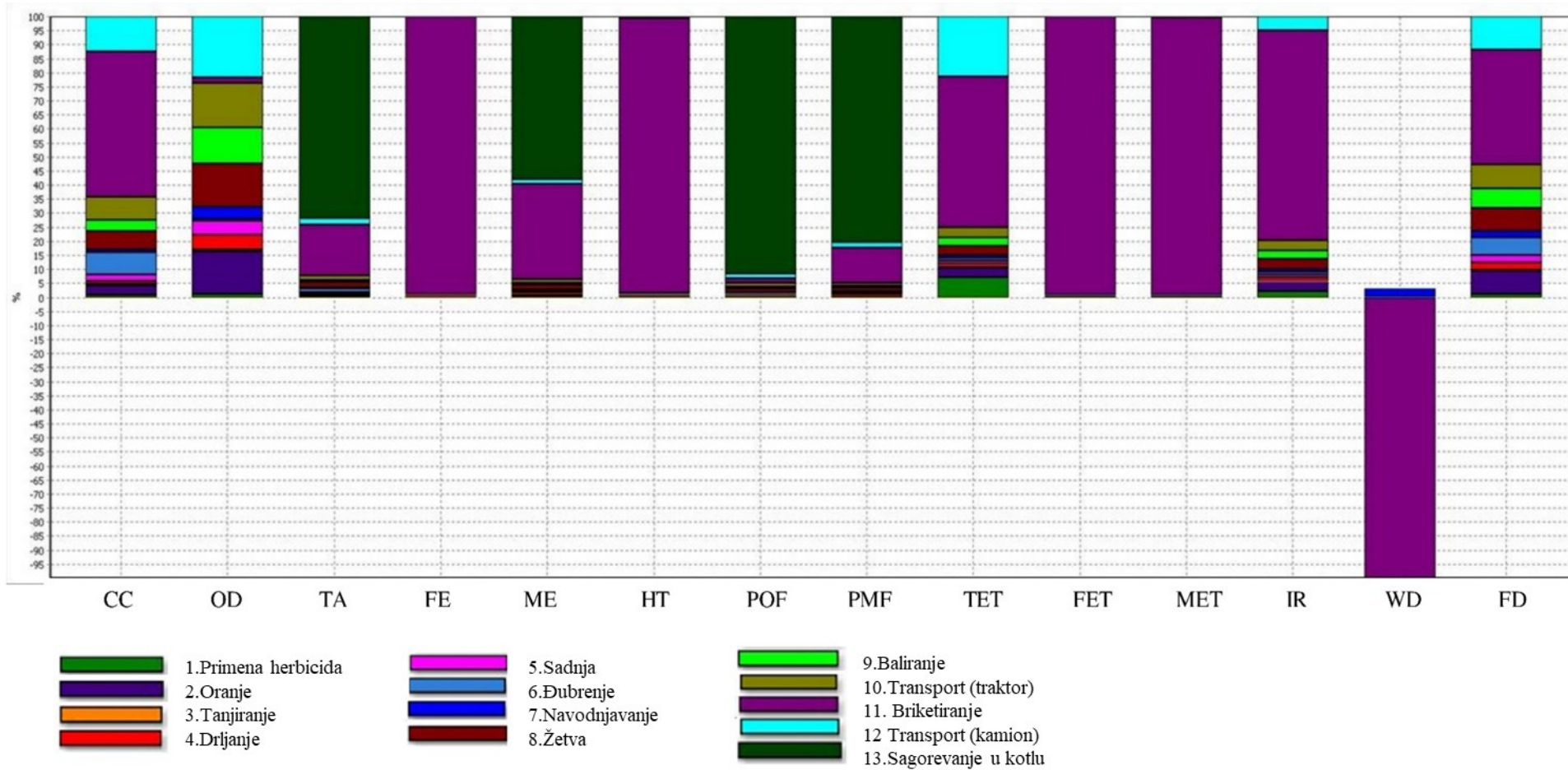
Zaključuje se da uticaj određene operacije na životnu sredinu zavisi od produktivnosti, potrošnje goriva i snage motora. Drugim rečima, što je niža produktivnost operacije u životnom ciklusu a veća potrošnja goriva i veća snaga motora mašine koja obavlja operaciju, ona ispoljava veće uticaje na životnu sredinu.

Tabela 5.1. Emisije polutanata (kg) u toku svih 13 operacija životnog ciklusa briketa od miskantusa preračunate u ekvivalentne faktore svih 14 ispitivanih kategorija uticaja.

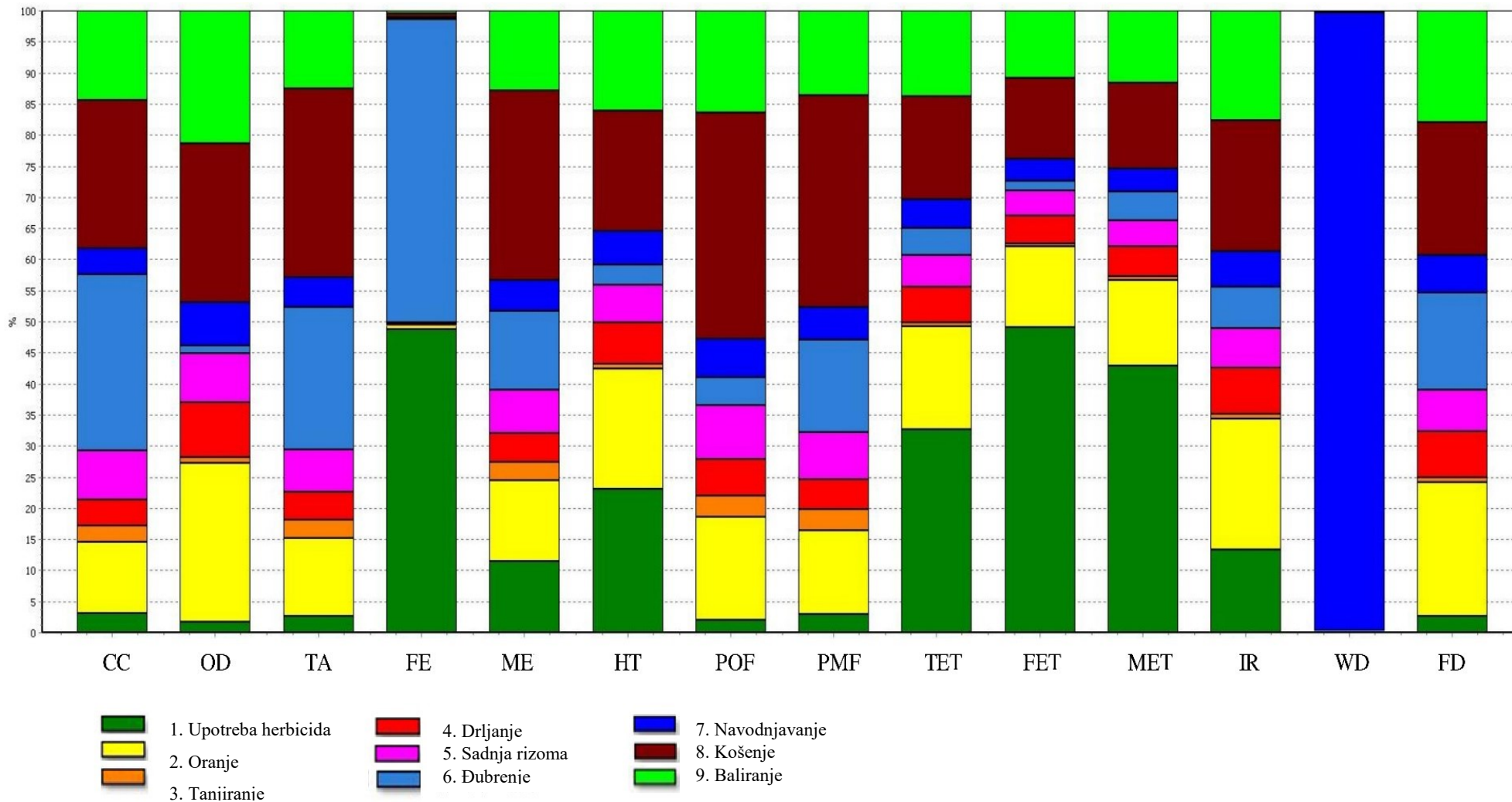
Kategorija Uticaja	Jedinica	Ukupno	1. Primena herbicida	2. Oranje	3. Tanjiranje	4. Drljanje	5. Sađenje	6. Đubrenje	7. Navodnjavanje	8. Košenje	9. Baliranje	10. Transport, traktor	11. Briketiranje	12. Transport, kamion	13. Sagorevanje u kotlu
CC	kg CO ₂ eq	1181,212	10,14719	37,59094	8,349537	13,47023	26,09096	92,11849	14,04327	77,61112	46,99278	95,08752457	613,4438897	146,2661	0
OD	kg CFC-11 eq	0,000911	9,59E-06	0,00014	5,11E-06	4,89E-05	4,31E-05	6,75E-06	3,87E-05	0,00014	0,000117	0,00014413	1,84747E-05	0,000198179	0
TA	kg SO ₂ eq	38,4267	0,060528	0,29147	0,070313	0,104743	0,159592	0,531007	0,111822	0,708896	0,291615	0,685215381	6,895978873	0,886657005	27,62886
FE	kg P eq	1,492718	0,009005	0,000116	4,21E-06	4,03E-05	3,55E-05	0,009022	3,19E-05	0,000116	9,66E-05	0,000118666	1,47396911	0,000163166	0
ME	kg N eq	3,326632	0,018973	0,021696	0,004948	0,007781	0,011543	0,021048	0,008173	0,050766	0,021477	0,049154946	1,123224845	0,063694171	1,924153
HC	kg 1,4-DB eq	1101,578	3,167376	2,647754	0,096387	0,922476	0,812377	0,462689	0,730203	2,647464	2,214706	2,719205137	1078,11551	7,041718926	0
POF	kg NMVOC	100,9631	0,074358	0,637522	0,132402	0,227955	0,330602	0,175746	0,233321	1,398895	0,631164	1,367964615	1,634466305	1,785627702	92,33303
PMF	kg PM10 eq	20,06252	0,023296	0,106776	0,027341	0,038456	0,060325	0,118726	0,041799	0,270766	0,108098	0,261253582	2,489905268	0,377373066	16,13841
TET	kg 1,4-DB eq	0,043839	0,003065	0,001552	5,65E-05	0,000541	0,000476	0,000412	0,000428	0,001552	0,001298	0,00159361	0,02344549	0,009419297	0
FET	kg 1,4-DB eq	27,2396	0,102429	0,027033	0,000984	0,009418	0,008294	0,003339	0,007455	0,02703	0,022612	0,027762781	26,95939828	0,043842192	0
MET	kg 1,4-DB eq	25,98868	0,095302	0,030611	0,001114	0,010665	0,009392	0,010265	0,008442	0,030608	0,025605	0,031437094	25,64974211	0,085492787	0
IR	kBq U235 eq	74,48394	1,644172	2,599745	0,094639	0,90575	0,797647	0,806683	0,716963	2,599461	2,174549	2,669901343	55,80331515	3,671114347	0
WD	m ³	-5640,42	0,212169	0,231754	0,008437	0,080743	0,071106	0,060954	177,1839	0,231729	0,19385	0,238008	-5819,262803	0,327261	0
FD	kg oil eq	393,9305	4,066349	32,65501	1,188752	11,37699	10,01912	23,97574	9,005665	32,65144	27,31418	33,53622283	162,0287273	46,11230639	0

Tabela 5.2. Emisije polutanata u procentima (%) u toku svih 13 operacija životnog ciklusa briketa od miskantusa preračunate u ekvivalentne faktore svih 14 ispitivanih kategorija uticaja. Zbir uticaja svih 13 operacija u jednoj uticajnoj kategoriji je označen sa 100 %.

Kategorija Uticaja	Jedinica	Ukupno	1. Primena herbicida	2. Oranje	3. Tanjiranje	4. Drljanje	5. Sađenje	6. Đubrenje	7. Navodnjavanje	8. Košenje	9. Baliranje	10. Transport, traktor	11. Briketiranje	12. Transport, kamion	13. Sagorevanje u kotlu
CC	%	100	0,86	3,18	0,71	1,14	2,21	7,80	1,19	6,57	3,98	8,05	51,93	12,38	0,00
OD	%	100	1,05	15,41	0,56	5,37	4,73	0,74	4,25	15,40	12,89	15,82	2,03	21,76	0,00
TA	%	100	0,16	0,76	0,18	0,27	0,42	1,38	0,29	1,84	0,76	1,78	17,95	2,31	71,90
FE	%	100	0,60	0,01	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,01	0,01	0,01	98,74	0,01	0,00
ME	%	100	0,57	0,65	0,15	0,23	0,35	0,63	0,25	1,53	0,65	1,48	33,76	1,91	57,84
HC	%	100	0,29	0,24	0,01	0,08	0,07	0,04	0,07	0,24	0,20	0,25	97,87	0,64	0,00
POF	%	100	0,07	0,63	0,13	0,23	0,33	0,17	0,23	1,39	0,63	1,35	1,62	1,77	91,45
PMF	%	100	0,12	0,53	0,14	0,19	0,30	0,59	0,21	1,35	0,54	1,30	12,41	1,88	80,44
TET	%	100	6,99	3,54	0,13	1,23	1,09	0,94	0,98	3,54	2,96	3,64	53,48	21,49	0,00
FET	%	100	0,38	0,10	0,00	0,03	0,03	0,01	0,03	0,10	0,08	0,10	98,97	0,16	0,00
MET	%	100	0,37	0,12	0,00	0,04	0,04	0,04	0,03	0,12	0,10	0,12	98,70	0,33	0,00
IR	%	100	2,21	3,49	0,13	1,22	1,07	1,08	0,96	3,49	2,92	3,58	74,92	4,93	0,00
WD	%	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,14	0,00	0,00	0,00	-103,17	0,01	0,00
FD	%	100	1,03	8,29	0,30	2,89	2,54	6,09	2,29	8,29	6,93	8,51	41,13	11,71	0,00



Grafikon 5.1. Ocena životnog ciklusa briketa miskantusa (SimaPro) [20].



Grafikon 5.2. Ocena životnog ciklusa briketa miskantusa - operacije u polju [20].

5.1.1. Uporedna analiza sa referentnim fosilnim sistemima – briketima lignita i ogrevnim drvetom

Rezultati komparativne analize energetske lanaca briketa od lignita (LB), ogrevnog drveta (OD) i briketa od miskantusa (MB), su predstavljani u tabeli 5.3 i na grafikonu 5.3. Za istu proizvedenu neto toplotnu energiju, energetski lanac briketa lignita ostvaruje najveći uticaj u svim ispitivanim kategorijama, usled potrošnje velike količine lignita i električne energije u odnosu na druge energetske lance. Nasuprot energetskom lancu LB, energetski lanac MB ostvaruje najniže uticaje u svim uticajnim kategorijama, osim u OD kategoriji gde LB ostvaruje najniži uticaj (oko 73 %) a MB najviši (oko 100%) kao posledicu korišćenja dizela za pogonjenje poljoprivredne mehanizacije. Kategorija u kojoj nije zabeležen negativan uticaj na životnu sredinu od strane sva tri ispitivana energetska lanca je *iscrpljivanje rezervi vode*, usled korišćenja električne energije proizvedene u mini hidroelektranama. Ušteda vode je najveća za LB jer se u ovom energetskom lancu koristi najviše električne energije.

Zaključuje se da zamenom 22 t of lignita sa 23,5 t miskantus briketa dolazi do smanjenja emisija CO₂ eq za 70059 kg CO₂ eq, 208 kg SO₂ eq, 174 kg P eq, 66 kg N eq, 115,403 kg 1,4-DB eq, 158 kg NMVOC, 100 kg PM10 eq, 1640 kBq U235 eq i 17734 kg ekvivalenata nafte (tabela 5.3). Drugim rečima, korišćenjem briketa miskantusa za grejanje domaćinstava umesto briketa lignita, emituje se 98% manje CO₂ eq, 84% manje SO_x eq, 99% manje P eq, 95% manje N eq, 99% manje 1,4-DB eq, 61% manje NMVOC, 83% manje PM10 eq, 96% manje U235 eq i 98% manje ekvivalenata nafte (slične uštede CO₂ ekvivalenata su dobili Lewandowski i saradnici, oko 90% [27]). Jedino je uticaj u kategoriji OD za 27% veći usled emisije veće emisije CFC-11 eq za 0,00025 kg. Iako nisu zabeleženi negativni uticaji na rezerve vode, uštede vode u MB lancu su za 118341 m³ niže u poređenju sa lancem briketa lignita.

Zamena 23 t ogrevnog drveta sa 23,5 t briketa miskantusa dovodi do sledećeg smanjenja emisija polutanata: 4,852 kg CO₂ eq, 23 kg SO₂ eq, 3 kg P eq, 34 kg N eq, 3466 kg 1,4-DB eq, 29 kg NMVOC, 28 kg PM10 eq, 369 kBq U235 eq i 1271 kg eq nafte. Uštede vode su za 9202 m³ niže a emisije CFC-11 eq za 0,00022 kg veće (tabela 5.3).

S obzirom na ovakav rezultat uporedne analize energetskih lanaca miskantusa u referentnih fosilnih sistema zaključuje se da se miskantus može smatrati ekološki podobnijom alternativom za grejanje domaćinstava u odnosu na ispitivane referentne sisteme.

5.1.2. Energetski ulazi i izlazi, EO:EI odnos

Ukupni energetski ulazi, odnosno utrošci u celom životnom ciklusu miskantusa iznose oko 7,2 GJ, od čega na operacije u polju odlazi 1,2 GJ (tabela 4.1). Slične rezultate su dobili i Lewandowski i Schmidt, oko 2 GJ za operacije u polju - obradu zemljišta, negu useva, navodnjavanje i košenje [165].

U slučaju kada se priprema zemljišta za sadnju i sadnja rizoma izostave, odnosno kad se posmatra životni ciklus miskantusa od druge godine pa do kraja životnog veka plantaže, utrošci energije se kreću u proseku od oko 6,57 GJ godišnje.

Uzimajući u obzir LHV miskantusa od 18,3 GJ t⁻¹ [82], [101] i efikasnost sagorevanja u kotlu od 85 %, sagorevanjem 23,5 t miskantusa oslobađa se 365,5 GJ neto toplotne energije. Iz ovoga sledi da je količnik dobijene i uložene energije veoma visok, oko 50:1, u slučaju kada se razmatraju i aktivnosti tokom prve godine uzgoja useva, kao što su priprema za sadnju (treriranje zemljišta herbicidima, oranje, tanjiranje, drljanje) i sadnja, ili čak 55:1 u toku ostalih godina životnog ciklusa miskantusa. Slični rezultati su dobijeni za miskantus gajen u zapadnoj Nemačkoj, 47,3:1 [30] i 54:1 [165].

Uzimajući u obzir specifičnu godišnju toplotnu energiju potrebnu za grejanje ispitivanih stambenih objekata koja iznosi 954 MJ m⁻², zaključuje se da se prilikom sagorevanja prosečnog godišnjeg prinosa miskantusa od 23,5 t ha⁻¹ (LHV 18,3 GJ t⁻¹) u kotlovima za centralno grejanje (čija je efikasnost 85 %) oslobađa 365,5 GJ neto toplotne energije kojom se može grejati oko 383 m² ovih stambenih objekata.

Tabela 5.3. Kategorije uticaja, jedinice i mediji prijema emitovanih polutanata i utrošak resursa tokom životnog ciklusa briketa lignita, ogrevnog drveta i briketa miskantusa (u sadašnjem i budućem scenariju proizvodnje) i povećanje/smanjenje emisija prilikom zamene briketa lignita i ogrevnog drveta briketima miskantusa i prilikom poređenja budućeg i sadašnjeg scenarija proizvodnje briketa miskantusa, izraženo u [kg] i u [%]:

kategorije uticaja: (midpoint pristup):	Jedinice i mediji prijema	briketi lignita (LB)	ogrevno drvo (OD)	briketi miskantusa (MB)	Budući scenario (BS)	Redukcija emisija:					
						LB→MB	%	OD→MB	%	MB→BS	%
Klimatske promene (CC)	kg CO ₂ eq (u vazduh)	71240,30	6032,66	1181,1 ^X	3389,43	-70059,09	-98,34	-4851,45	-80,42	2208,21	65,15%
Uništavanje ozona (OD)	kg CFC-11 ^a eq (u vazduh)	0,00066	0,00069	0,00091	0,00061	+0,00025	+27,30	+0,00022	+24,40	-0,00029	-32,81
Zakiseljavanje zemljišta (TA)	kg SO ₂ eq (u vazduh)	246,63	60,90	38,43	36,18	-208,2	-84,42	-22,47	-36,90	-2,25	-5,86
Eutrofikacija slatkovodnih ekosistema (FE)	kg P eq (u slatkovodne ekosisteme)	175,89	4,07	1,49	1,37	-174,4	-99,15	-2,58	-63,31	-0,13	-8,51
Eutrofikacija marinskih ekosistema (ME)	kg N eq (u slatkovodne ekosisteme)	69,06	37,15	3,33	3,10	-65,73	-95,18	-33,82	-91,04	-0,23	-6,89
Toksičnost za ljude (HT), Ekotoksičnost kopnenih, slatkovodnih i marinskih ekosistema (TET, FET, ME)	kg 1,4-DB eq (u vazduh iznad ljudskih naselja, u zemljište u i oko ljudskih naselja, u slatkovodne i marinske ekosisteme)	116557,53	4620,55	1154,85	1061,93	-115402,68	-99,01	-3465,70	-75,01	-92,88	-8,04
Formiranje fotohemijskih oksidanata (POF)	kg NMVOC (u vazduh)	259,25	130,33	100,96	97,32	-158,28	-61,06	-29,37	-22,54	-3,64	-3,61
Formiranje čestica (PMF)	kg PM10 eq (u vazduh)	120,19	47,87	20,06	19,25	-100,13	-83,31	-27,81	-58,09	-0,81	-4,03
Jonizujuće zračenje (IR)	kBq ^d U235 eq (u vazduh)	1714,33	443,39	74,48	24,06	-1639,84	-95,66	-368,91	-83,20	-50,42	-67,69
Iscrpljivanje vodnih rezervi (WD)	Voda m ³	-123981,75	-14842,10	-5640,42	-5680,60	+118341,33	+95,45	+9201,68	+62,00	-40,18	0,71
Iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva (FD)	kg oil eq	18128,19	1664,98	393,93	295,06	-17734,25	-97,83	-1271,05	-76,34	-98,87	-25,10

^a CFC-11: hlorofluoro ugljenici;

^b 1,4-DCB: 1,4-dihlorobenzen;

^c NMVOC: organska jedinjenja koja ne sadrže metan;

^d kBq: kilobekerel;

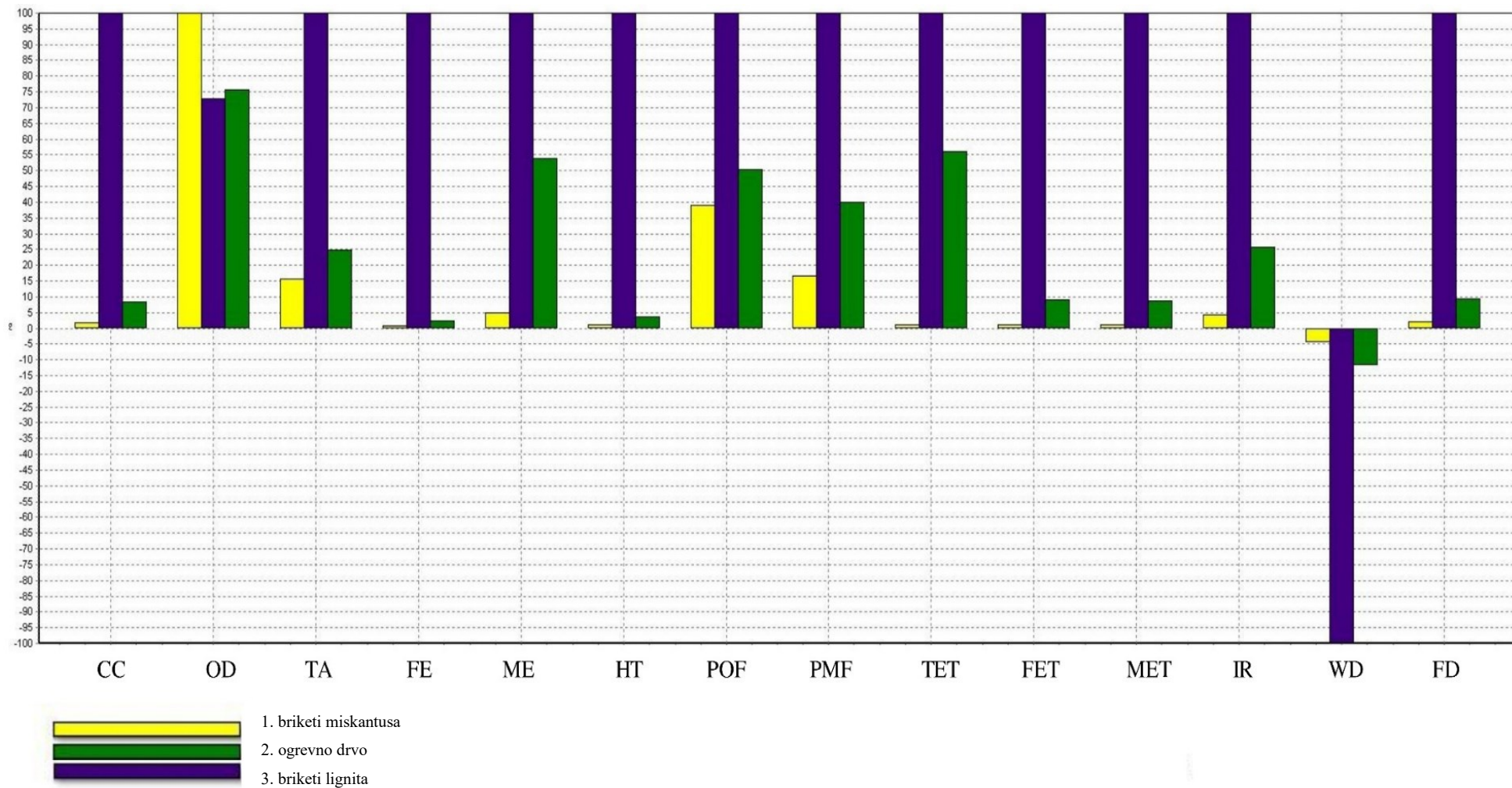
^e U235: izotop Uranijuma;

MB: Miskantus briketi – sadašnji scenario;

FS: Miskantus briketi - budući scenario;

smanjenje emisija je obeleženo sa znakom „-“;

povećanje emisija je obeleženo sa znakom „+“, za **X** videti tabelu 5.5.



Grafikon 5.3. Rezultati komparativne analize energetskih lanaca briketa od lignita (LB), ogrevnog drveta (OD) i briketa od miskantusa (MB) [20].

5.1.3. Analiza osetljivosti – Budući scenario

Uzimajući u obzir neizbežnu modernizaciju poljoprivredne mehanizacije, zajedno sa povećanjem udela energetski efikasnijih zgrada koja bi trebalo da se dogodi u bliskoj budućnosti u Srbiji, sprovedena je *Analiza osetljivosti* i kreiran je model *budućeg* energetskog lanca (scenaria). Ovaj scenario uzima u obzir:

- 1) korišćenje modernije i efikasnije poljoprivredne mehanizacije (proizvedene 2020. godine);
- 2) korišćenje traktora veće snage motora (klase 75-130 kW);
- 3) sniženu potrošnju goriva za 20 %;
- 4) povećanu produktivnost za 20 %;
- 5) proizvodnju 20% električne energije (umesto iz uvoza) iz OIE (geotermalna, energija vetra i sunca, kogeneracija biomase) (tabela 4.2);
- 6) 50% veću produktivnost operacije transport sa njive do briketirke usled 50% većeg tovarnog kapaciteta;
- 7) distanca između mesta briketiranja i finalnog potrošača je 50 % kraća (umesto 100 km iznosi 50 km);
- 8) smanjenje prosečne godišnje potrebe za grejanjem finalnog potrošača (oko 266,4 MJ m⁻²) usled povećanog broja energetski efikasnih zgrada kod kojih je došlo do primene bolje termalne izolacije i instalacije efikasnijih sistema za grejanje.

S obzirom da je kao godina proizvodnje poljoprivrednih mašina uzeta 2020. godina, korišćeni su emisioni faktori za ovu godinu iz FOEN baze i preračunati za ovaj scenario (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Emisioni faktori (kg h^{-1}) za traktore klase snage motora 75-130 kW koji su proizvedni 2020.godine sa EU5 standardom motora (preuzeto iz FOEN baze).

Year	Group	Category	Engine type	Power class	Emission level	Pollutant	EF (kg/h)
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	HC	0,0041
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	CO	0,0192
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	NOx	0,0185
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	PM	0,0003
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	CO ₂	245,928
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	CH ₄	0,0001
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	NMHC	0,0040
2020	Agricultural machinery	Tractors (agriculture)	diesel	75-130 kW	LandW_D_EU 5	N ₂ O	0,0011

Emisije polutanata tokom budućeg scenarija su prikazane u tabeli 5.3. Poređenje energetske lanaca mase je prikazano na grafikonu 5.4.

U svakoj ispitivanoj kategoriji uticaja budućer scenarij ispoljava malo niži uticaj osim u IR kategoriji gde je uticaj i do 68 % niži i CC kategoriji gde je uticaj 65 % veći (tabela 5.3). Niži uticaj u IR kategoriji je usled proizvodnje električne energije iz OIE a ne iz uvoza, gde se električna energija delimično proizvodila u nuklearnim elektranama. Povećanje uticaja u CC kategoriji, odnosno u emisijama CO₂ eq se dešava usled viših emisionih faktora ovih jedinjenja koje predviđa FOEN baza podataka za EU5 standarde motora proizvedenih 2020. godine.

Uticaji u kategoriji *Klimatske promene* oba scenarija su prikazani na posebnom grafikonu (grafikon 5.5). Udeo OIE od 20 % u proizvodnji električne energije koja se troši za rad

briketirke utiče na smanjenje negativnog uticaja operacije *briketiranje* za 12 %. Sa druge strane, korišćenje traktora veće snage motora povećava emisije CO₂ eq tokom svih operacija u polju. Ovo povećanje je posebno izraženo u operacijama gde su prvobitno korišćeni traktori jako male snage motora kao što su sađenje i baliranje, gde se uticaj povećao redom 25 i 22 puta.

Povećanje tovarnog kapaciteta prikolica prilikom transporta bala sa polja do briketirnice za 50% kao i smanjenje udaljenosti briketirnice do finalnog potrošača za 50% proporcionalno je smanjilo uticaje oba procesa transporta.

Iako se u budućem scenariju emituje više kg CO₂ eq nego u sadašnjem scenariju, u kategoriji *klimatske promene* budući scenario ostvaruje 95 % niži uticaj u odnosu na energetske lanac lignita i 44 % niži uticaj u odnosu na energetske lanac ogrevnog drveta (tabela 5.3) što i dalje čini energetske lanac briketa miskantusa ekološki povoljnijom alternativom za grejanje domaćinstava.

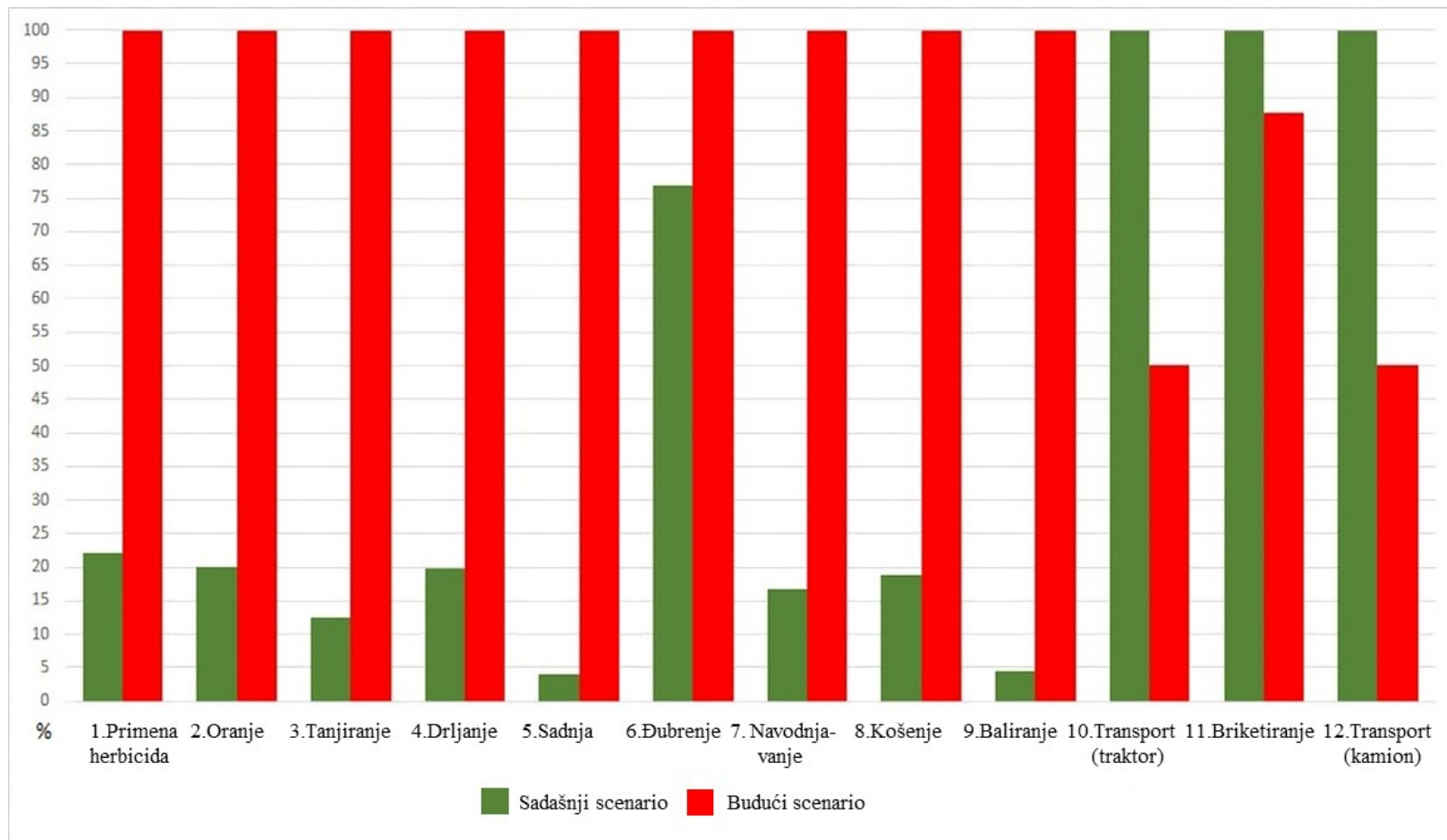
S obzirom da je specifična godišnja toplotna energija potrebna za grejanje kod unapređenih stambenih objekata smanjena na 266,4 MJ m⁻², oslobođenom neto toplotnom energijom od 365,5 GJ godišnje se može grejati čak 1372 m² ovih stambenih objekata.

Zaključuje se da optimizovano korišćenje poljoprivredne mehanizacije kao i povećanje udela OIE u svim fazama životnog ciklusa značajno doprinosi umanjenju uticaja na životnu sredinu energetskog lanca briketa miskantusa.



Comparing 23,5 ton 'SA-M-LCA Miskantus' with 23,5 ton 'M-LCA Miskantus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

Grafikon 5.4. Poređenje sadašnjeg i budućeg scenarija ocene životnog ciklusa briketa miskantusa (SimaPro) [20].



Grafikon 5.5. Poređenje sadašnjeg i budućeg scenarija energetskog lanca briketa miskantusa u kategoriji *Klimatske promene* [20].

5.1.4. Procena SOC i emisija gasova sa efektom staklene bašte sa obradive površine na kojoj je gaji miskantus

Rezultati procene promene zemljišnog ugljenika su predstavljeni u tabeli 5.5.

5.1.4.1. Proračun nadzemne i podzemne biomase miskantusa

Nakon maksimalne sezone rasta u toku leta pa do februara, kad se vrši prolećna kosidba useva miskantusa, smanjenje prinosa usled gubitka lišća i gornjih delova biljke je procenjeno na oko 35 % [103]. Ovo znači da u slučaju kad se dobije prosečan prinos miskantusa u vreme kosidbe u februaru od 30 t (85 % s.m.), u toku leta se ostvaruje maksimalan prinos od oko 46,15 t ha⁻¹. To znači da 16,15 t biomase ostaje na zemlji. Ona se dalje suši na vazduhu i sadržaj vode opada sa 55 % na 33,5 % [103]. U momentu žetve na zemlji ostaje 10,92 t (66,5 % s.m.) osušene nadzemne biomase. Ova količina nadzemne biomase je uzeta u razmatranje u daljim proračunima. Hamelin i Olsen su dobili slične rezultate - oko 10,88 t s.m. biomase ha⁻¹ god⁻¹ u toku 4-20 godina gajenja miskantusa [36].

Količina podzemne biomase miskantusa je proračunata u skladu sa smernicama datim od strane Hamelina i saradnika gde se podzemna biomasa miskantusa proračunava kao 16% ukupne nadzemne biomase miskantusa (pokošena + preostala) [36]. U slučaju prosečnog prinosa miskantusa od 23,5 t, podzemna biomasa koja ostaje u zemljištu iznosi 5,5 t:

$$16 \% (23,5 \text{ t} + 10,92 \text{ t}) = 16 \% (34,42) = 5,5 \text{ t.}$$

Isti princip je korišćen prilikom proračuna nadzemne i podzemne biomase prilikom ostavrenog maksimalnog i minimalnog godišnjeg prinosa na černozeru (tabela 5.5).

Tabela 5.5. Procena nadzemne i podzemne biomase miskantusa, sadržaja azota (N), direktnih i indirektnih emisija N₂O, CO₂ eq^Y, bruto i neto potencijala za skladištenje ugljenika (C) u zemljištu usled gajenja miskantusa na 1 ha zemljišta tipa černozem u slučaju kad su dobijeni minimalni, prosečni i maksimalni godišnji prinosi:

	Ostaci biomase		N sadržaj		N sadržaj	N ₂ O-N _{dir}	N ₂ O _{dir}	N ₂ O _{total}	CO ₂ eq ^Y	Ukupni C unos iz biomase u zemljište			Ukupni zemljišni C (UZC)	reduko van UZC u CO ₂ eq	emitovan CO ₂ eq (ukupni)	Neto CO ₂ eq	Neto C u zemljištu	
	(t)		(kg)		(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(t)	(t C ha ⁻¹ god ⁻¹)			(t CO ₂ eq ha ⁻¹ god ⁻¹)			(t C ha ⁻¹ god ⁻¹)		
prinos (85 % s.m.) t god ⁻¹	a	b	a	b	a+b	a+b	a+b	a+b	a+b	a	b	a+b	a+b (18%)	ukupno	X [#] +Y			
min:	18	8	4,16	80	20,8	100,8	2,01	3,16	3,32	0,99	3,86	2,00	5,86	1,05	3,83	2,19	1,64	0,45
prosečni:	23,5	10,92	5,5	109,2	27,5	136,7	2,37	3,72	3,88	1,16	5,27	2,66	7,93	1,43	5,24	2,36	2,88	0,79
max:	33	15,36	7,74	153,6	38,7	192,3	2,92	4,59	4,75	1,42	7,42	3,74	11,16	2,00	7,33	2,62	4,71	1,28

a - količina nadzemne biomase,

b - količina podzemne biomase,

#X: videti tabelu 5.3.

Tabela 5.6. Neto potencijal za skladištenje C u slučaju sadašnjeg i budućeg scenarija dobijanja briketa miskantusa i količina ugljenika koja ostaje ili se gubi usled zamene zapuštenog poljoprivrednog zemljišta usevima miskantusa po ha godišnje:

prinos miskantusa (t ha ⁻¹ god ⁻¹ , 85% s.m.)	Neto potencijal za skladištenje C (za MB)	Neto potencijal za skladištenje C (za BS)	MB: umesto zaparloženog zemljišta	BS: umesto zaparloženog zemljišta	
	(t C ha ⁻¹ god ⁻¹)	(t C ha ⁻¹ god ⁻¹)			
min:	18	0,45	-0,15	0,07	-0,53
prosečni:	23,5	0,79	0,19	0,41	-0,19
max:	33	1,28	0,69	0,9	0,31

MB: Energetski lanac briketa miskantusa, scenario u sadašnjosti;

BS: Energetski lanac briketa miskantusa, scenario u budućnosti;

Zamena zaparloženog zemljišta = Neto sekvstracioni potencijal zemljišnog C– 0,38 t C ha⁻¹ god⁻¹. 0,38 t C ha⁻¹god⁻¹ je C sekvstracioni potencijal zaparloženog zemljišta [166]–[168].

5.1.5. Procena direktnih i indirektnih emisija N₂O

5.1.5.1. Direktne emisije N₂O

U ovoj disertaciji se za proračun emisija N₂O koristi najosnovnija jednačina u okviru Nivoa 1 (Tier 1) data u Poglavlju 11. dokumenta “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use” [145].

Tier 1. Direktne emisije N₂O sa obradivih površina:

$$N_2O_{Direct-N} = N_2O-N_{N\ inputs} + N_2O-N_{OS} + N_2O-N_{PRP} \quad (1.2)$$

$$N_2O-N_{N\ inputs} = \left[\frac{(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM}) * EF_1}{[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} * EF_1]} \right] \quad (1.3)$$

$$N_2O-N_{OS} = \left[\begin{array}{l} (F_{OS,CG,Temp} * EF_{2CG,Temp}) + (F_{OS,CG,Trop} * EF_{2CG,Trop}) + \\ (F_{OS,F,Temp,NR} * EF_{2F,Temp,NR}) + (F_{OS,F,Temp,NP} * EF_{2F,Temp,NP}) + \\ (F_{OS,F,Trop} * EF_{2F,Trop}) \end{array} \right] \quad (1.4)$$

$$N_2O-N_{PRP} = [(F_{FRP, CPP} * EF_{3PRP, CPP}) + (F_{PRP, SO} * EF_{23PRP, SO})] \quad (1.5)$$

gde su:

$N_2O_{Direct-N}$ = direktne godišnje emisije N₂O–N sa obradivih površina, kg N₂O–N god⁻¹;

$N_2O-N_{N\ inputs}$ = direktne godišnje emisije N₂O–N usled unosa N na obradive površine, kg N₂O–N god⁻¹;

N_2O-N_{OS} = direktne godišnje emisije N₂O–N sa zemljišta sa organskom proizvodnjom, kg N₂O–N god⁻¹;

N_2O-N_{PRP} = direktne godišnje emisije N₂O–N od urina i izmeta sa pašnjaka,

kg N₂O–N god⁻¹;

F_{SN} = godišnje količine primenjenog veštačkog đubriva N na zemljište, kg N god⁻¹;

F_{ON} = godišnja količina stajnjaka, komposta, kanalizacionog mulja i drugih organskih izvora N koji se koriste na zemljištu, kg N god⁻¹;

F_{CR} = godišnji izvor N u ostacima biljaka (nadzemnim i podzemnim), uključujući i biljke koje vezuju N i od obnove krmnog bilja/pašnjaka, koji je vraćen u zemljište, kg N god⁻¹;

F_{SOM} = godišnja količina N u neorganskim zemljištima koja se mineralizuju, zajedno sa gubitkom zemljišnog C u zemljišnoj organskoj materiji, kao rezultat promena upravljanja i korišćenja zemljišta, kg N god⁻¹;

F_{OS} = godišnja površina korišćenog/dreniranog organskog zemljišta, ha:

CG – poljoprivredno zemljište i pašnjaci (engl. “*Cropland and Grassland*”);

F – šumsko zemljište (engl. “*Forest Land*”),

Temp – umerena (engl. “*Temperate*”),

Trop – tropska (engl. “*Tropical*”)

NR – bogata nutrijentima (engl. “*Nutrient Rich*”)

NP – siromašna nutrijentima (engl. “*Nutrient Poor*”)

F_{PRP} = godišnje količine N iz urina i izmeta od domaćih životinja, kg N god⁻¹ (CPP označava stoku, živinu i svinje (engl. “*Cattle, Poultry and Pigs*”) a SO ovce i druge životinje (engl. “*Sheep and Other animals*”));

EF_1 = emisioni faktori za N₂O usled unošenja N, kg N₂O–N (kg N input)⁻¹ (vrednosti u tabeli 11.1, IPCC);

EF_{1FR} je emisioni faktor za emisije N₂O usled unosa N prilikom uzgoja pirinča (plavljenja pirinča), kg N₂O–N (kg N input)⁻¹ (vrednosti u tabeli 11.1, IPCC);

EF_2 = emisioni faktori za N₂O kod dreniranog/korišćenog zemljišta, kg N₂O–N ha⁻¹ god⁻¹; (vrednosti u tabeli 11.1, IPCC);

EF_{3PRP} = emisioni faktori za N₂O od urina i izmeta sa pašnjaka, kg N₂O–N (kg N input)⁻¹; (vrednosti u tabeli 11.1, IPCC).

S obzirom da se u ovoj disertaciji razmatra uzgoj miskantusa na zemljištu bez primene organske metode i bez intenzivne ispaše domaćih životinja, u proračunu direktno emitovanog N_2O nisu uračunati N_2O-N_{OS} niti N_2O-N_{PRP} , tako da formula (1.1) glasi:

$$N_2O_{Direct-N} = N_2O - N_{N\ inputs} \quad (1.6)$$

a formule (1.3) i (1.4) se dalje ne koriste u proračunu. Prilikom proračuna $N_2O - N_{N\ inputs}$ (formula (1.2)) F_{ON} i F_{SOM} se zanemaruju jer se zemljište ne tretira stajnjakom niti dolazi do gubitka C (videti kasnije u rezultatima) kao i EF_{FR1} i ceo donji deo jednačine sa indeksom FR jer na uzgoja miskantusa ne utiče uzgoj ni plavljenje pirinča tako da formula (1.2) postaje:

$$N_2O - N_{N\ inputs} = [(F_{SN} + F_{CR}) * EF_1] + \quad (1.7) \text{ sledi da je}$$

$$N_2O_{Direct-N} = [(F_{SN} + F_{CR}) * EF_1] + \quad (1.8)$$

gde se kao vrednost EF_1 koristi 0,01 iz tabele 11.1 (IPCC dokument, [145]).

F_{SN} je 100 kg N god^{-1} , (videti poglavlje 2.4.2).

F_{CR} se računa kao sadržaj N u nadzemnim i podzemnim delovima biljaka. Prema Johnsonu i Hamelinu pretpostavlja se da sadržaj azota u nadzemnim delovima biljaka iznosi 0,005 kg N po kg suve materije biomase miskantusa dobijene u jesenjoj žetvi i 0,01 kg N po kg suve materije biomase dobijene u prolećnoj žetvi. Ovo važi za sve godine starosti useva miskantusa, (za I, II, III godinu kao i od IV-XX godine). Sadržaj azota u podzemnim delovima biljaka je uzet da je 0,005 kg po kg s.m. i u slučaju prolećne i jesenje žetve [36]. Neukirchen i saradnici i Strullu i saradnici [36] su izmerili koncentracije N u živoj podzemnoj biomasi između 0,005 i 0,017 kg N po kg s.m. Uzimajući u obzir količinu nadzemne (a) i podzemne (b) biomase miskantusa koja preostane kod prosečnog godišnjeg prinosa miskantusa na černozeu, F_{CR} se računa preko formule:

$$F_{CR} = (a \bullet 0,01) + (b \bullet 0,005), \text{ tj.}$$

$$F_{CR} = (10920 \text{ kg} \bullet 0,01) + (5500 \text{ kg} \bullet 0,005) = 109,2 \text{ kg} + 27,5 \text{ kg} = 136,7 \text{ kg}$$

Zamenom ovih vrednosti u formuli (1.6) dobija se:

$$N_2O_{Direct-N} = [(100 \text{ kg} + 136,7 \text{ kg}) \bullet 0,01$$

$$N_2O_{Direct-N} = 2,37 \text{ kg}$$

N_2O -N se konvertuje u N_2O po formuli:

$$N_2O = N_2O-N \bullet 44/28 \text{ (1.9)}$$

tj.

$$N_2O = 2,37 \text{ kg} \bullet 44/28,$$

$$N_2O = 3,72 \text{ kg}$$

5.1.5.2. Indirektne emisije N_2O

U proračunu indirektnih emisija N_2O sa obradivih površina, korišćena je prva jednačina u Tier-u 1, Poglavlja 11, IPCC dokumenta [145]:

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} * Frac_{GASF}) + ((F_{ON} + F_{PR}) * Frac_{GASF})] * EF_4 \quad (1.10)$$

pri čemu je:

$N_2O_{(ATD)}-N$ = godišnja količina N_2O -N proizvedena usled atmosferskog taloženja N koji isparava sa obradivih površina, kg N_2O -N god⁻¹;

F_{SN} = godišnja količina sintetičkog đubriva sa N primenjena na zemljištu, kg N god⁻¹; (100 kg N)

$Frac_{GASF}$ = frakcija sintetičkog đubriva N koja isparava u vidu NH_3 i NO_x , kg isparenog N (kg N primenjenog)⁻¹ (vrednosti su date u tabeli 11.3, IPCC dokumenta, [145]);

F_{ON} = godišnja količina primenjenog stajnjaka, komposta, kanalizacijskog mulja i ostalih organskih izvora N koji je primenjen na zemljište, kg N god⁻¹;

F_{PRP} = godišnja količina N iz urina i izmeta na pašnjacima, kg N god⁻¹;

$Frac_{GASM}$ = frakcija primenjenog N iz organskih đubriva (F_{ON}), urina i izmeta sa pašnjaka (F_{PRP}) koji isparava kao NH_3 i NO_x , kg isparenog N (kg N primenjenog ili nataloženog)⁻¹ (vrednosti su date u tabeli 11.3, IPCC dokumenta;

EF_4 = emisioni faktor za emisije N_2O iz atmosferskih taloga N sa zemljišta i vodenih površina, [kg N– N_2O (kg NH_3-N + NO_x-N koji su isparili)⁻¹] (vrednost je data u tabeli 11.3, IPCC dokumenta);

S obzirom da poljoprivredno zemljište na kome se gaji miskantus nije tretirano organskim đubrivima, i nije izloženo direktnoj ispaši domaćih životinja, vrednosti F_{ON} , F_{PRP} i $Frac_{GASM}$ se zanemaruju u daljem proračunu a formula (1.8) se modifikuje u:

$$N_2O_{(ATD)} - N = [(F_{SN} * Frac_{GASF})] * EF_4 \quad (1.11)$$

F_{SN} je 100 kg N god⁻¹, (videti poglavlje 2.4.2), $Frac_{GASF}$ je 0,1 a EF_4 je 0,01 (tabela 11.3, IPCC dokumenta).

N_2O-N se konvertuje u N_2O po formuli:

$$N_2O_{(ATD)} = N_2O-N_{(ATD)} \bullet 44/28 \quad (1.12)$$

S obzirom da je $N_2O_{(ATD)} = N_2O_{(IND)}$

Količina indirektnog emitovanog N_2O se računa po formuli:

$$N_2O_{(IND)} = \{[(100 \text{ kg} \bullet 0,1)] \bullet 0,01\} \bullet 44/28$$

$$N_2O_{(IND)} = 0,16 \text{ kg}$$

5.1.6. Procena skladištenja ugljenika u zemljištu

Potencijal skladištenja ugljenika u zemljištu usled gajenja miskantusa na 1 ha poljoprivredne površine je izračunat na osnovu količine preostale nadzemne i podzemne biomase i udela C od 48,3% [82]. U slučaju prosečnog prinosa od nadzemne biomase u zemljiše dospe 5,27 t C god⁻¹ a od podzemne 2,66 t C god⁻¹ (tabela 5.5).

Od ukupnog ugljenika koji se unosi u zemljište, (preko ostataka nadzemne i podzemne biomase) smatra se da samo 18% doprinosi godišnjem povećanju zemljišnog ugljenika (tabela 5.5), dok se ostatak smatra izgubljenim u procesu mikrobiološke respiracije [169]. U slučaju prosečnog prinosa miskantusa, godišnje se skladišti 1,43 t C god⁻¹, što je označeno

kao “*Ukupni Zemljišni C*” ili *UZC*. Preračunato u CO₂, godišnje se uštedi 5,24 t CO₂ (tabela 5.5).

Neto potencijal skladištenja C se dobija kad se od *UZC* oduzme *ukupni emitovani C (UEC)* u toku celog životnog ciklusa miskantusa briketa. Ukoliko je vrednost *Neto potencijala skladištenja C* pozitivna, dolazi do sekvestracije C u zemljištu a ukoliko je negativna, dolazi do gubitka zemljišnog C.

Radi procene uticaja na klimatske promene, ove tri vrednosti su preračunate u CO₂ eq. Za prosečni prinos miskantusa, *UZC* je 5,24 t CO₂ a *UEC* za CO₂ je 2,36 i računa se kao zbir svih CO₂ eq u toku životnog ciklusa miskantusa (**X** vrednost, tabela 5.3) i CO₂ eq izračunatih konverzijom N₂O (**Y** vrednost, tabela 5.5) koristeći za konverziju karakterizacioni faktor 298 CO₂ eq. Ove tri vrednosti su proračunate i u za slučajeve ostvarenih minimalnih i maksimalnih godišnjih prinosa miskantusa.

Zaključuje se da, usled gajenja miskantusa na 1 ha na černozeu, u skadu sa trenutnom poljoprivrednom praksom u Srbiji, može skladištiti od 1,05 do 2,00 t C godišnje u zavisnosti od visine ostvarenog prinosa miskantusa, odnosno u može se “vezati” od 3,83 do 7,33 t CO₂. Ukoliko se od ove vrednosti oduzmu količine C i CO₂ eq koje se emituju tokom celog životnog ciklusa briketa od miskantusa, dobije se neto potencijal skladištenja C od 0,45 do 1,28 t C god⁻¹. U oba slučaja, u razmatranju ukupnog i neto skladištenog C, za sve tri ispitivane visine prinosa, ne dolazi do gubitka C iz zemljišta.

Od 16,2 t (s.m.) ha⁻¹ god⁻¹ miskantusa gajenog na teškoj crnici, Borzecka-Walker i saradnici [170] su dobili da je *UZC* od 0,47 do 1,18 t C ha⁻¹ god⁻¹ a Matthews i Grogan [168] i Clifton-Brown i saradnici [170] su dobili vrednosti *UZC* do 0,93 t god⁻¹.

U odnosu na toplotnu energiju dobijenu sagorevanjem prosečnog prinosa miskantusa razmatranog u ovoj disertaciji, dobijene su emisije CO₂ ekvivalenata od 0,006 kg MJ⁻¹. Slične rezultate su dobili Smeets i saradnici [34] i Parajuli i saradnici [31], od 0,004 kg do 0,005 kg CO₂ eq MJ⁻¹. Emisije CO₂ eq po grejanom m² slobodno-stojeće kuće iznose 3,04 kg CO₂ eq.

5.1.7. LUC usled gajenja miskantusa

5.1.7.1. *Sadašnji scenario*

Uzimajući u obzir da je potencijal za skladištenja C kod zaparloženog zemljišta procenjen na $0,38 \text{ t C ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ [166]–[168], zamenom ovog tipa zemljišta plantažom miskantusa dobija se da se godišnje skladišti od $0,07 \text{ t C ha}^{-1}$ do $0,9 \text{ t C ha}^{-1}$. Ukoliko se uzme u obzir samo jedna trećina dostupnih zaparloženih poljoprivrednih površina pod černozeom, odnosno 20000 ha od 60000 ha, uzgoj miskantusa može da “sačuva” od 1,4 kt do 18 kt zemljišnog ugljenika godišnje.

5.1.7.2. *Budući scenario*

Neto C sekvestracioni potencijal je niži u budućem scenario u odnosu na sadašnji usled viših emisija CO₂ u toku životnog ciklusa ($3,4 \text{ t god}^{-1}$ u poredjenju sa $1,2 \text{ t god}^{-1}$) (tabela 5.3).

Neto potencijal za skladištenje ugljenika je pozitivan samo u slučajevima kada su ostvareni prosečni i maksimalni prinosi miskantusa, i kreće se od $0,68$ do $2,51 \text{ t C god}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (tabela 5.6). Nnegativna vrednost od $-0,47 \text{ t C god}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ukazuje da u slučaju ostvarenog minimalnog godišnjeg prinosa miskantusa ne dolazi do taloženja već gubitka ugljenika (tabela 5.6). Zamenom zaparloženog poljoprivrednog zemljišta usevima miskantusa, do skladištenja C dolazi samo u slučaju ostvarenog maksimalnog prinosa miskantusa, $0,3 \text{ t C god}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, dok u slučajevima ostvarenog minimalnog i prosečnog prinosa dolazi do gubitka od $0,5$ do $0,19 \text{ t C god}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Emisije CO₂ eq po MJ dobijene toplote usled sagorevanja prosečnog prinosa miskantusa su više nego u sadašnjem scenariju i iznose $0,012 \text{ kg}$.

Pa ipak, ukupne godišnje emisije CO₂ eq po m² grejane slobodnostojeće porodične kuće veće su u odnosu na sadašnji scenario usled povećanja energetske efikasnosti stambenih objekata u budućnosti i iznose $2,44 \text{ kg CO}_2 \text{ eq m}^{-2}$.

5.2. Ocena uticaja na životnu sredinu proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa

Rezultati LCIA faze studije “od bunara do pumpe” su predstavljeni u tabeli 5.7 i na grafikonima 5.6 i 5.7.

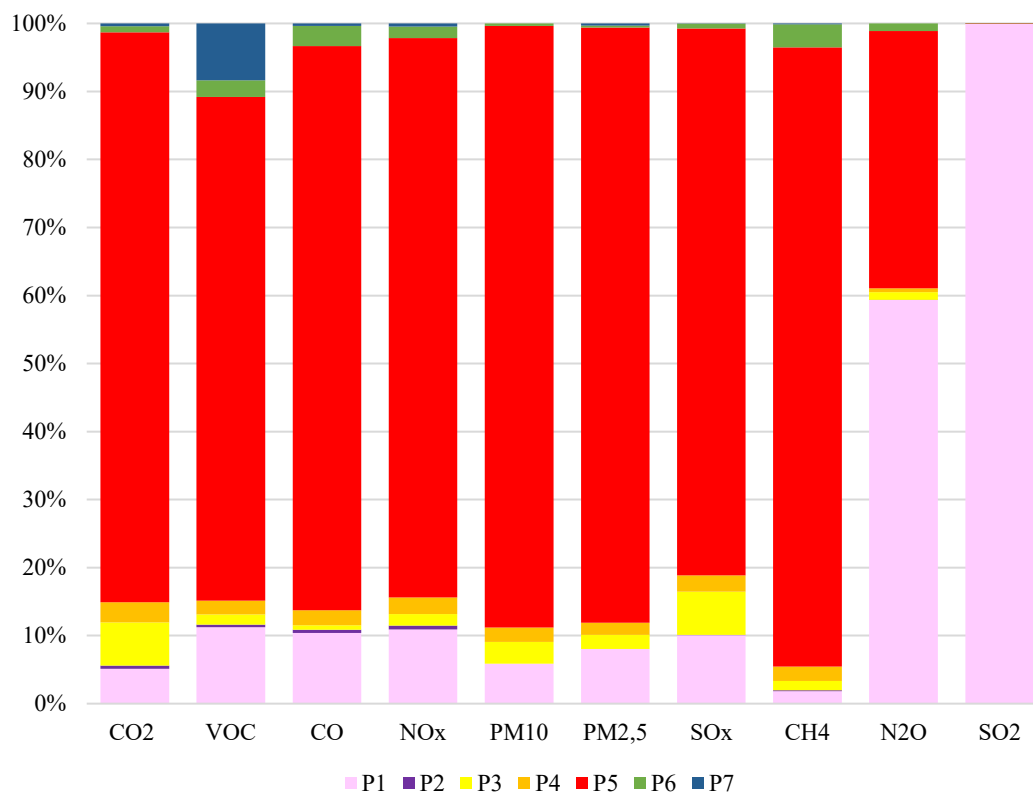
Tabela 5.7. Emisije polutanata i utrošak resursa tokom svake operacije u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela miskantusa (prosečnog prinosa, 23,5 t s.m. gajenog na 1 ha zemljišta černoze) [151]:

Emisije:	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	UKUPNO	jed.
CO ₂	790	70,23	981,04	450,45	12924,24	136,75	60,97	15413,68	kg
VOC	0,60	0,02	0,08	0,11	3,98	0,13	0,45	5,37	kg
CO	1,41	0,06	0,09	0,3	11,24	0,4	0,05	12,14	kg
NO _x	3,45	0,17	0,54	0,77	25,91	0,53	0,15	28,07	kg
PM10	0,31	0	0,17	0,11	4,65	0,02	0	5,26	kg
PM2,5	0,27	0	0,07	0,06	2,93	0,01	0,01	3,38	kg
SO _x	3,87	0,02	2,46	0,92	31,01	0,27	0,02	34,7	kg
CH ₄	1,94	0,15	1,45	2,23	96,1	3,6	0,13	103,66	kg
N ₂ O	1,05	0,000261	0,019739	0,010261	0,67	0,02	0	0,72	kg
SO ₂	2,25E-03	3,3E-10	5,64E-10	8,36E-10	2,02E-08	6E-10	3E-10	2,25E-03	kg
Resursi:									
Voda	183	0,07	8,67	3,14	102,5	0,66	0,06	298	m ³
Sirova nafta	4,542	602,49	207,39	758,47	2998,40	48,57	517,68	9,675	GJ
Prirodni gas	4,529	109,62	44,99	6457,77	321,651	14208,23	109,41	347,110	GJ
Ugalj	497	12,18	10082,93	3472,45	114,412	560,86	16,18	129053,6	GJ
Ostaci šum.biomase	4	0,09	0,16	0,24	5,74	0,18	0,08	10,49	GJ
Naftni koks	9	1,16	0,40	1,46	5,75	0,09	0,99	18,85	GJ
Hidro energija	33	0,81	1510,35	518,15	17094,43	82,07	1,55	19240,36	GJ
Nuklearna energija	107	2,68	4,59	6,79	164,41	5,26	2,31	293,04	GJ
Geotermalna energija	2	0,06	0,10	0,14	3,44	0,11	0,05	5,9	GJ
Solarna energija	3	0,07	0,13	0,19	4,56	0,15	0,06	8,16	GJ
Energija vetra	25	0,63	1,08	1,60	38,65	1,24	0,54	68,74	GJ
Bitumen	736	97,63	33,60	122,90	485,74	7,87	83,88	1567,62	GJ
Uljani škriljci	1,095	145,33	50,02	182,95	723,06	11,71	124,87	2,333	GJ

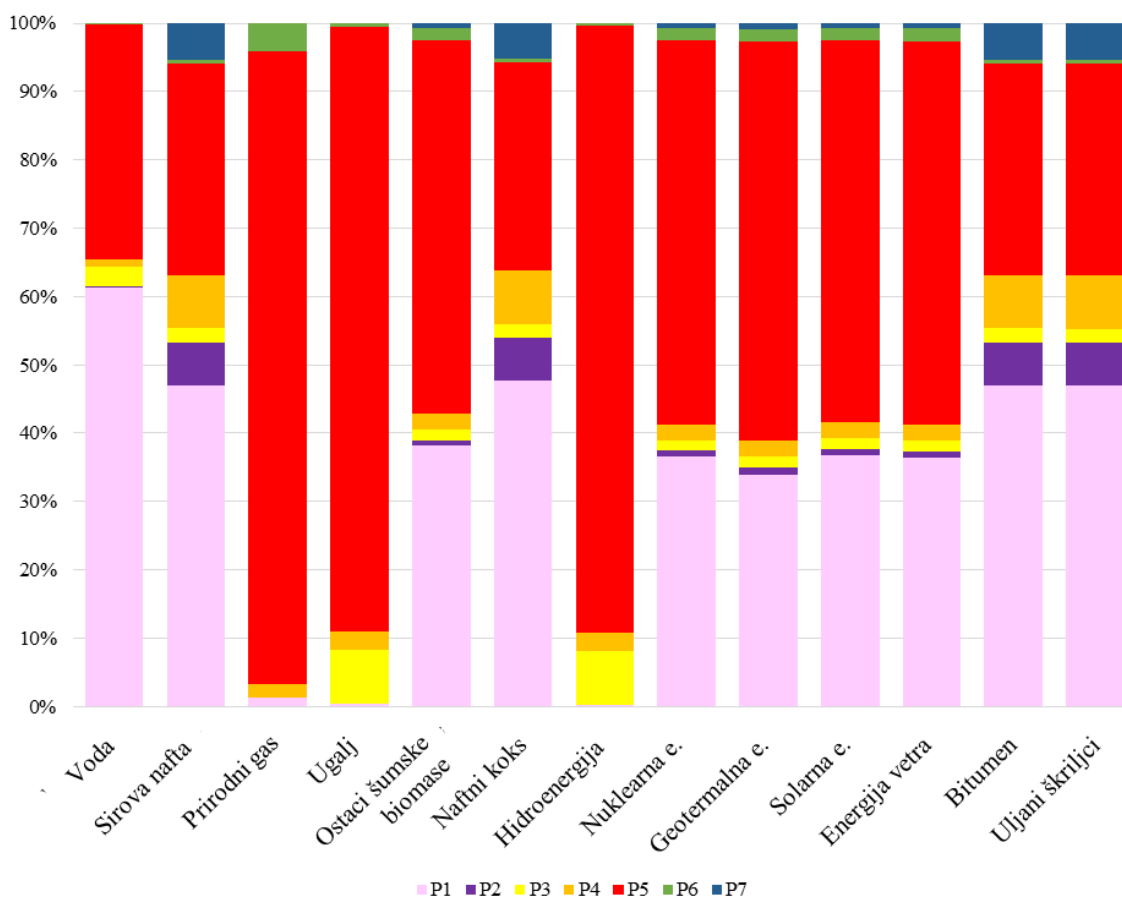
gde je:

P1 – Faza kultivacije miskantusa; P2 – Transport bala sa polja do rafinerije; P3 – Sitnjenje biomase; P4 – Sušenje biomase; P5 – Piroliza + Hidrotretiranje (stabilizacija) sirovog

pirolitičkog ulja; P6 – Hidrokrakovanje (unapređivanje) sirovog pirolitičkog ulja; P7 – Transport pirolitičkog dizela iz rafinerije do pumpe.



Grafikon 5.6. Emisije polutanata tokom svih faza proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa (kg): P1 – faza kultivacije miskantusa; P2 – transport bala sa polja do rafinerije; P3 – sitnjenje biomase; P4 – sušenje biomase; P5 – piroliza + hidrotretiranje (stabilizacija) sirovog pirolitičkog ulja; P6 – hidrokrakovanje (unapređivanje) sirovog pirolitičkog ulja; P7 – transport pirolitičkog dizela iz rafinerije do pumpe [151].



Grafikon 5.7. Utrošci resursa tokom svih faza proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa (MJ): P1 – faza kultivacije miskantusa; P2 – transport bala sa polja do rafinerije; P3 – sitnjenje biomase; P4 – sušenje biomase; P5 – piroliza + hidrotretiranje (stabilizacija) sirovog pirolitičkog ulja; P6 – hidrokrakovanje (uanpređivanje) sirovog pirolitičkog ulja; P7 – transport pirolitičkog dizela iz rafinerije do pumpe [151].

Od svih operacija u toku proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa, piroliza i stabilizacija ispoljavaju najveći uticaj na životnu sredinu usled upotrebe velikih količina prirodnog gasa, 332 GJ (tabela 4.4) čijom reformacijom se dobija vodonik koji se koristi u procesu stabilizacije (96% ukupno korišćenog vodonika). Za stabilizovanje 12,24 t sirovog pirolitičkog ulja, koristi se 103,35 GJ od ukupno utrošenih 103,62 GJ vodonika u ovoj proizvodnoj putanji (tabela 4.4). Najveći uticaj na životnu sredinu potiče od životnog ciklusa

samog prirodnog gasa, pošto je u GREET putanji za proizvodnju pirolitičkog dizela od kukuruzne šaši uključena i proizvodnja prirodnog gasa koja podrazumeva i korišćenje dizela u uređajima koji se ne koriste za transport, kao što su komercijalni kotao, stacionarni klipni motor, turbine, itd., kao i proizvodnja električne energije koja se koristi u lancu proizvodnje prirodnog gasa. S obzirom da se prirodni gas u analiziranoj putanji proizvodi u SAD, korišćen je proizvodni miks električne energije za SAD koji podrazumeva da se 34,30 % električne energije proizvodi sagorevanjem uglja, 31,92 % proizvodi od prirodnog gasa, 20,38 % iz nuklearne energije, 6,35 % iz hidro elektrana, 4,79 % iz energije vetra, 0,62 % sagorevanjem lož-ulja, 0,57 % iz solarne energije, 0,5 % iz biološkog otpada, 0,43 % iz geotermalne energije i 0,16 % od biomase (GREET).

U toku procesa pirolize i stabilizacije troše se velike količine fosilnih goriva pa se emituju velike količine CO₂, VOC, CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2,5} i CH₄ što objašnjava visok uticaj ovih operacija u kategorijama GWP, TA i PMF. Uticaj u GWP kategoriji se može donekle umanjiti ukoliko se uzme u obzir sekvencijacija ugljenika u zemljištu, odnosno vezivanje ugljen dioksida, koja za prosečni prinos miskantusa od 23,5 t ha⁻¹ godišnje, iznosi 5,24 t CO₂ eq (tabela 5.5). Na ovaj način dobija se da se umesto 15,4 t CO₂ godišnje emituje 10,2 t CO₂ (tabela 5.8).

Sledeća operacija koja ispoljava najveći negativan uticaj na životnu sredinu je *kultivacija miskantusa*. Najveći uticaji u ovoj operaciji potiču od proizvodnje i transporta herbicida i đubriva usled čega se troše velike količine sirove nafte, naftnog koksa, bitumena i uljanih škriljaca kao i OIE. Usled neefikasnog sagorevanja dizela sa visokim sadržajem sumpora u motorima zastarelih poljoprivrednih mašina u ovoj operaciji se emituju najveće količine N₂O i SO₂. U ovoj operaciji je zabeležena i najveća potrošnja vode usled navodnjavanja useva miskantusa (60% ukupno utrošene vode).

Negativan uticaj operacije *sitnjenje biomase* potiče od korišćenja električne energije za rad mlina. Električna energija koja se koristi u mlinu za biomasu miskantusa proizvedena je u Srbiji, gde se 70 % električne energije proizvodi u termoelektranama na ugalj a 30% u hidroelektranama (standardni miks za proizvodnju električne energije u Srbiji).

Rezultati uporedne analize „od bunara do pumpe“ za dizel proizveden procesom pirolize (distribuirana-H₂ eksterna putanja) i konvencionalno proizveden dizel su predstavljeni u u tabeli 5.8 i na grafikonima 5.8 i 5.9.

Tabela 5.8. Emisije polutanata i utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H₂ putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosa na funkcionalu jedinicu (f.u.) [151]:

<i>f.u. = 406,75 GJ</i>			
Emisije:	Pirolitički dizel, distribuirana-H₂ eksterna putanja	Konvencionalna putanja proizvodnje dizela	jed.
CO ₂	10173,68 ^a	6022,8	kg
VOC	5,37	3,53	kg
CO	12,14	6,67	kg
NO _x	28,07	22,32	kg
PM10	5,26	1,49	kg
PM2,5	3,38	1,29	kg
SO _x	34,7	12,72	kg
CH ₄	103,66	68,71	kg
N ₂ O	0,72	0,11	kg
SO ₂	2,25E-03	1,69E-07	kg
GWP _{(CO₂ eq)^b}	13580	7773,33	kg
TA _{(SO₂ eq)^c}	15,72	12,50	kg
PMF _{(PM10-eq)^d}	14,53	7,47	kg
Resursi:			
Voda	298	33,69	m ³
Sirova nafta	9675	309485,82	MJ
Prirodni gas	347110	56157,97	MJ
Ugalj	129053,6	6247,70	MJ
Ostaci šumske biomase	10,49	48,09	MJ
Naftni koks	18,85	593,85	MJ
Hidroenergija	19240,36	414,74	MJ
Nuklearna energija	293,04	1376,51	MJ
Geotermalna energija	5,9	28,78	MJ
Energija sunca	8,16	38,19	MJ
Energija vetra	68,74	323,62	MJ
Bitumen	1567,62	50148,93	MJ
Uljani škriljci	2333	74650,64	MJ
Fosilna goriva:	489,76	497,28	GJ
Obnovljivi izvori energije:	19,63	0,85	GJ

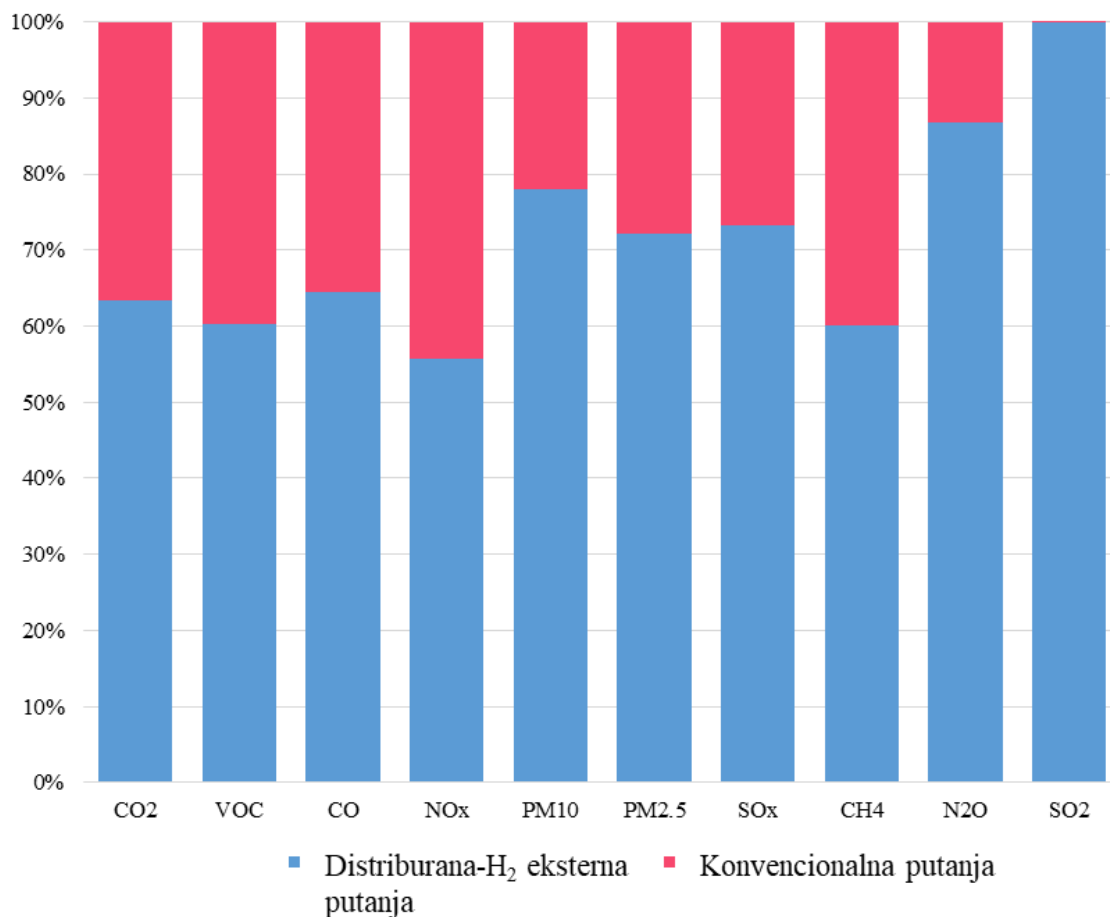
a - neto CO₂ emisije = Ukupne CO₂ emisije (15413,68 kg) minus UZC (CO₂, tabela 5.5)(5240 kg);

b - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal globalnog zagrevanja za period od 100 godina: (CO₂ eq): CO₂=1; CH₄=25kg CO₂; N₂O=298kg CO₂; IPCC(AR4); Podrazumevano je skladištenje C u zemljištu.

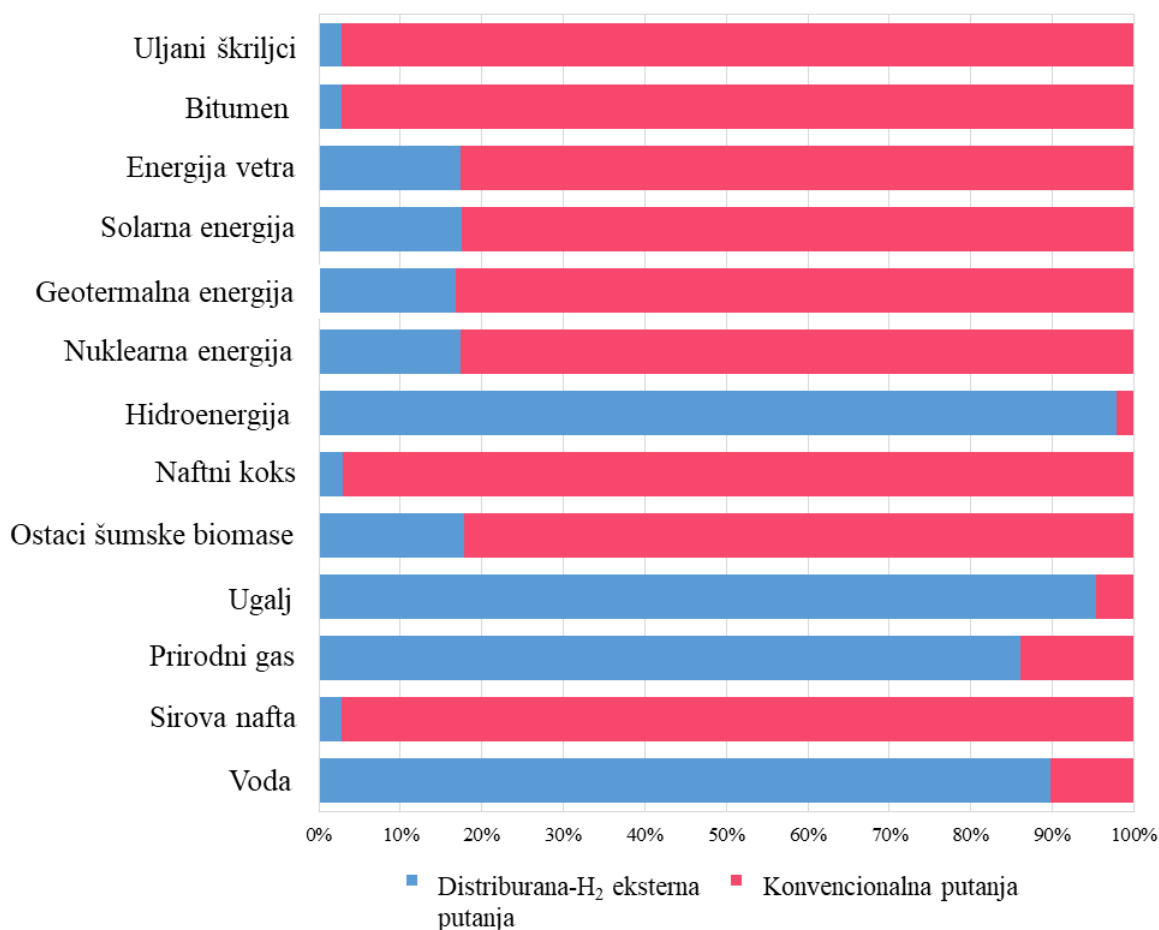
c - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal Zakišeljavanja tla za period od 100 godina:

(SO₂ eq) za NO_x = 0,56 kg SO₂ [141]

d - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal formiranja čestica (PM10 eq): NO_x = 0,21 kg PM10; SO₂ = 0,19 kg PM10 [141].



Grafikon 5.8. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H₂ putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, u odnosu na funkcionalna jedinicu, 406,75 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³ 9,85 t pirolitičkog dizela) [151].



Grafikon 5.9. Utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-eksternoj H₂ putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu, 406,75 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³ 9,85 t pirolitičkog dizela) [151].

Veće emisije polutanata su zabeležene u distribuiranoj-eksternoj H₂ putanji proizvodnje dizela. U konvencionalnoj putanji proizvodnje dizela emituje se 63 % manje CO₂, 60 % manje VOC, 63 % manje CO, 55 % manje NO_x, 78 % manje PM₁₀, 72 % manje PM_{2,5}, 73 % manje SO_x i 87 % manje N₂O u odnosu na distribuiranu-eksternu H₂ putanju (grafikon 5.8). Emisije SO₂ su skoro za 100% veće u pirolitičkoj putanji usled utroška velike količine dizela sa visokim sadržajem sumpora (kao što su komercijalni kotao, stacionarni klipni motor, turbine, itd.) u fazi kultivacije miskantusa. Od svih razmatranih polutanata najveće su

emisije CO₂: prilikom proizvodnje pirolitičkog dizela emituje se 10,4 t CO₂ a prilikom konvencionalne proizvodnje dizela emituje se 6 t CO₂. Konvencionalna putanja proizvodnje dizela ispoljava niži uticaj u sve tri ispitivane kategorije uticaja: u GWP uticaj je niži za 43 %, u TA za 20 % i u PMF za 49 %. Nasuprot tome, u toku ove putanje troše se veće količine resursa: skoro 97 % manje sirove nafte, naftnog koksa, bitumena i uljanih škriljaca i 78 % manje ostataka šumske biomase, nuklearne energije, energije vetra i sunca se troši u pirolitičkoj putanji proizvodnje dizela u odnosu na konvencionalnu (grafikon 5.9).

Izuzetak čini korišćenje prirodnog gasa, uglja i energije hidroelektrana koji se više troše u pirolitičkoj putanji proizvodnje dizela, redom, 84 %, 95 % i 98 %. Velike količine prirodnog gasa se troše u procesu stabilizacije i unapređivanja pirolitičkog goriva, a velike količine uglja i hidroenergije se koriste za proizvodnju električne energije u Srbiji, 75,35 GJ, (tabela 4.4). S obzirom da su naftni koks, sirova nafta, bitumen i uljani škriljci predstavljaju sirovine za konvencionalnu proizvodnju dizela (slika 4.13) njihova upotreba je veća u ovoj putanji proizvodnje dizela.

S druge strane, u konvencionalnoj putanji proizvodnje dizela zabeležena je veća upotreba obnovljivih izvora energije (energije vetra, solarne, geotermalne i nuklearne energije) što je u vezi sa načinom proizvodnje električne energije u SAD. Samo 4 % manje fosilnih goriva se troši u distributivnoj- H₂ eksternoj putanji (489,76 GJ u poređenju sa 497,28 GJ) dok se u konvencionalnoj putanji troši 96 % manje OIE. Iako se u konvencionalnoj putanji troše velike količine biomase, energije vetra, sunca, geotermalne i nuklearne energije one su za 96 % manje u odnosu na utrošak energije iz hidroelektrana pri proizvodnji pirolitičkog dizela (0,85 GJ u odnosu na 19206,55 MJ koja čini 98 % ukupne potrošnje OIE u ispitivanoj pirolitičkoj putanji) (tabela 4.4). Veća potrošnja vode u pirolitičkoj putanji potiče od navodnjavanja useva miskantusa.

5.2.1. Analiza osetljivosti – Integrisana - H₂ interna putanja

U cilju smanjenja uticaja na životnu sredinu prilikom proizvodnje pirolitičkog dizela, urađena je analiza osetljivosti i kreirana je još jedna putanja proizvodnje dizela od miskantusa, *Integrisana-H₂ interna putanja*. U ovoj putanji se operacija stabilizacije i

unapređivanja pirolitičkog ulja dešavaju na istom mestu (*integrirana putanja*) a vodonik koji se pri tom koristi se dobija od lakše frakcije sirove pirolitičkog ulja (*H₂ interna putanja*) (poglavlje 2.2.2.1.2).

S obzirom da se jedna frakcija sirovog pirolitičkog ulja koristi za proizvodnju vodonika, dobijaju se niži prinosi finalnog proizvoda pirolize, odnosno pirolitičkog dizela. Prema proceni Wright-a i saradnika, 38 % sirovog pirolitičkog ulja se utroši na proizvodnju vodonika koji se koristi za stabilizaciju i unapređivanje pirolitičkog ulja [88]. Ovo znači da se ovim načinom, od ukupnih 21,4 t biomase miskantusa koje predstavljaju ulaznu sirovina za process pirolize, dobija oko 6 t pirolitičkog dizela.

5.2.2. Uporedna analiza proizvodnje dizela pirolitičkom, integrisanom-H₂ internom putanjom i konvencionalnom putanjom

Uporedna analiza proizvodnje dizela pirolitičkom, *integriranom-H₂ Internom putanjom* i *konvencionalnom putanjom* je prikazana u tabeli 5.9 i na grafikonima 5.10 i 5.11.

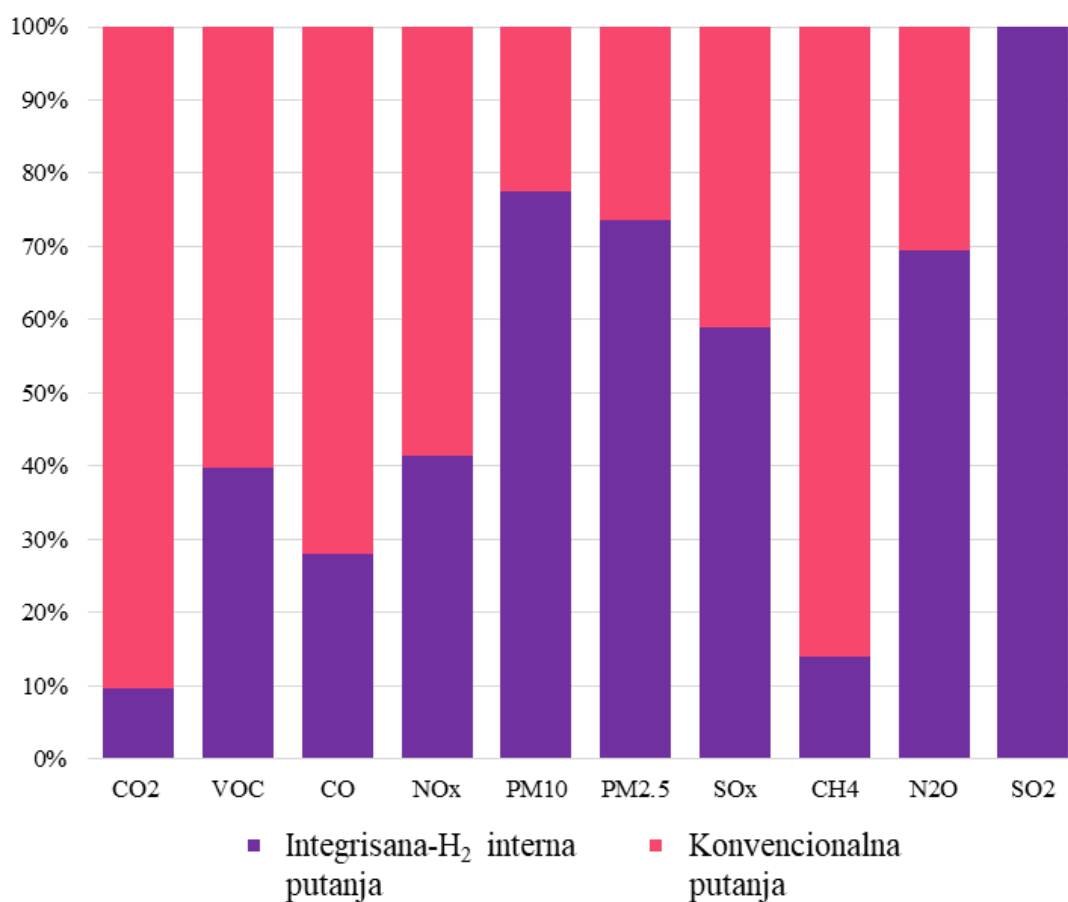
Korišćenje uglja, hidroenergije i vode je još uvek veće u pirolitičkoj putanji, odnosno niže u konvencionalnoj za, redom, 92 %, 96 % i 92 %. Zabeležena je i 85 % manja upotreba biomase, energije vetra, sunca, nuklearne i geotermalne energije i oko 97 % manja upotreba sirove nafte, naftnog koksa, bitumen, uljanih škriljaca i prirodnog gasa. Usled isključivanja prirodnog gasa kao sirovine za dobijanje vodonika, emisije VOC, CO, NO_x i CH₄ su manje u integriranoj-H₂ internoj putanji proizvodnji dizela za, redom, 62 %, 61 %, 30 % i 84 %. Takođe, zbog istog razloga su u ovoj putanji zabeležene niže emisije CO₂, i do 96 % u odnosu na konvencionalnu, što ujedno ukazuje na niže uticaje u kategoriji GWP (92 %). Emisije PM₁₀, PM_{2,5}, SO_x i N₂O su niže u konvencionalnoj putanji za, redom, 19 %, 68 %, 59 %, 30 % i 56 %, što rezultira u nižem uticaju u kategoriji *Potencijal za formiranje čestica* (PMF) za 38 %. Emisije SO₂ su i dalje skoro 100 % veće u integriranoj-H₂ internoj putanji (usled korišćenja dizela u poljoprivrednim mašinama) ali, usled većih emisija NO_x u konvencionalnoj putanji, integrirana-H₂ interna putanja ispoljava 30% niži uticaj u kategoriji *Zaklišeljavanje zemljišta* (TA). Takođe, usled isključivanja prirodnog gasa kao sirovine za sintezu H₂, u integriranoj-H₂ internoj putanji se koristi čak 80 % manje fosilnih goriva.

Obnovljivi izvori energije se koriste 92 % manje u konvencionalnoj putanji i dalje zbog velike upotrebe hidroenergije u pirolitičkoj putanji.

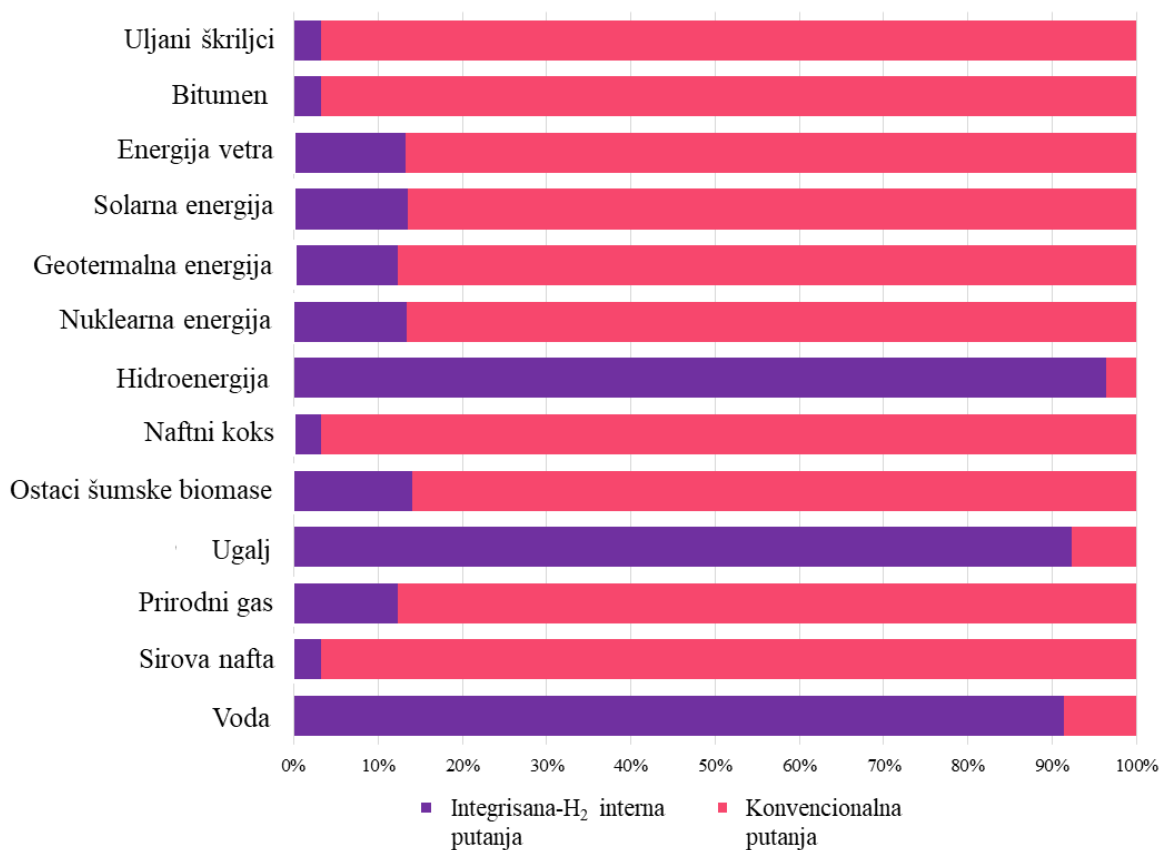
Tabela 5.9. Emisije polutanata i utrošci resursa u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u integrisanoj-H₂ internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu (f.u.) od 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³, 6 t pirolitičkog dizela) [151]:

<i>f.u. = 252,12 GJ</i>			
Emisije:	Pirolitički dizel, integrisana-H₂ interna putanja	Konvencionalna putanja proizvodnje dizela	jed.
CO ₂	156,82 ^a	3733,02	kg
VOC	1,44	2,19	kg
CO	1,61	4,13	kg
NO _x	9,74	13,83	kg
PM10	3,19	0,92	kg
PM2,5	2,23	0,8	kg
SO _x	11,34	7,88	kg
CH ₄	6,93	42,59	kg
N ₂ O	0,16	0,07	kg
SO ₂	2,25E-03	1,05e-07	kg
GWP_(CO₂ eq)^c	377,75	4818,63	kg
TA_(SO₂ eq)^d	5,45	7,74	kg
PMF_(PM10-eq)^e	7,47	4,62	kg
Resursi:			
Voda	223,00	20,88	m ³
Sirova nafta	6317,30	191824,00	MJ
Prirodni gas	4885,37	34807,56	MJ
Ugalj	46889,83	3872,42	MJ
Ostaci šumske biomase	4,87	29,80	MJ
Naftni koks	12,41	368,08	MJ
Hidroenergija	6980,92	257,06	MJ
Nuklearna energija	131,79	853,18	MJ
Geotermalna energija	2,52	17,84	MJ
Energija sunca	3,69	23,67	MJ
Energija vetra	30,83	200,59	MJ
Bitumen	1023,66	31083,07	MJ
Uljani škriljci	1523,20	46269,60	MJ
Fosilna goriva:	60,65	308,22	GJ
Obnovljivi izvori energije:	7,15	0,53	GJ

- a* - neto CO₂ emisije = Ukupne CO₂ emisije (5396,82 kg) minus UZC (CO₂, tabela 5.5) (5240 kg);
- b* - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal globalnog zagrevanja za period od 100 godina: (CO₂ eq): CO₂=1; CH₄=25kg CO₂; N₂O=298kg CO₂; IPCC(AR4); Podrazumevano je skladištenje C u zemljištu.
- c* - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal Zakišeljavanja tla za period od 100 godina: (SO₂ eq) za NO_x = 0.56 kg SO₂ [141]
- d* - podrazumevani karakterizacioni faktori za potencijal formiranja čestica (PM10 eq): NO_x = 0,21 kg PM10; SO₂ = 0,19 kg PM10 [141].



Grafikon 5.10. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od maskantusa u integriranoj-H₂ internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, u odnosu na funkcionalna jedinicu, 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³, 6 t pirolitičkog dizela) [151].



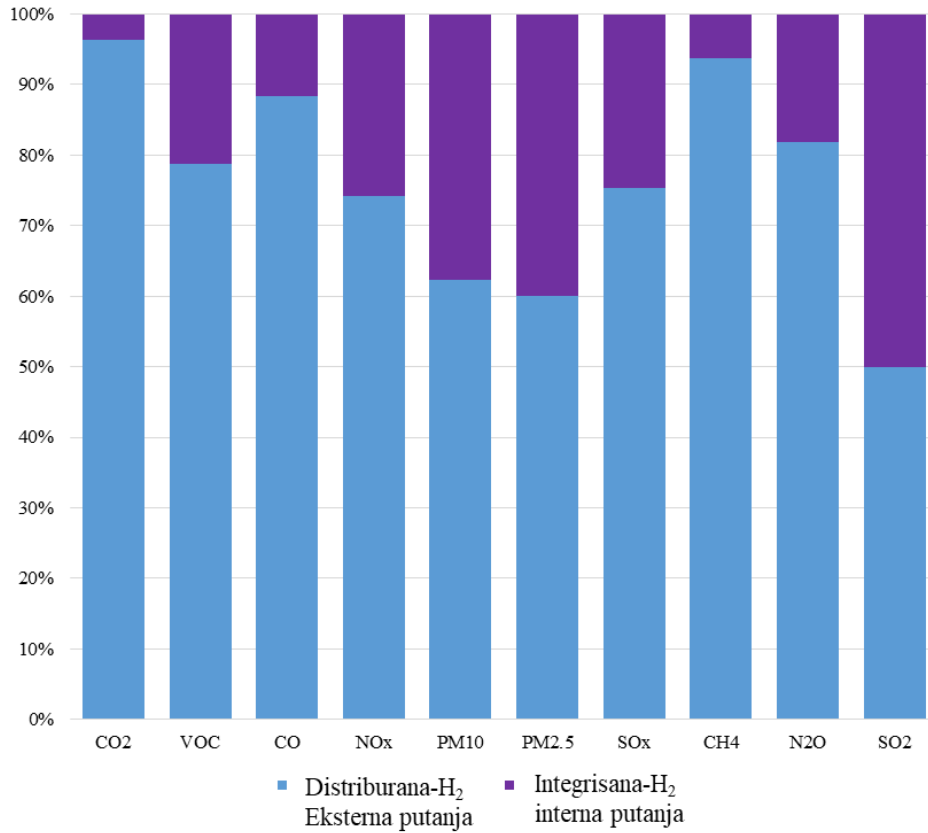
Grafikon 5.11. Utrošci resursa [GJ] u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u integriranoj-H₂ internoj putanji i za konvencionalno proizvedeni dizel, proračunate od odnosu na funkcionalu jedinicu, 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³, 6 t pirolitičkog dizela) [151].

5.2.3. Usporedna analiza proizvodnje dizela pirolitičkom, distribuiranom-H₂ eksternom putanjom i integrisanom-H₂ Internom putanjom

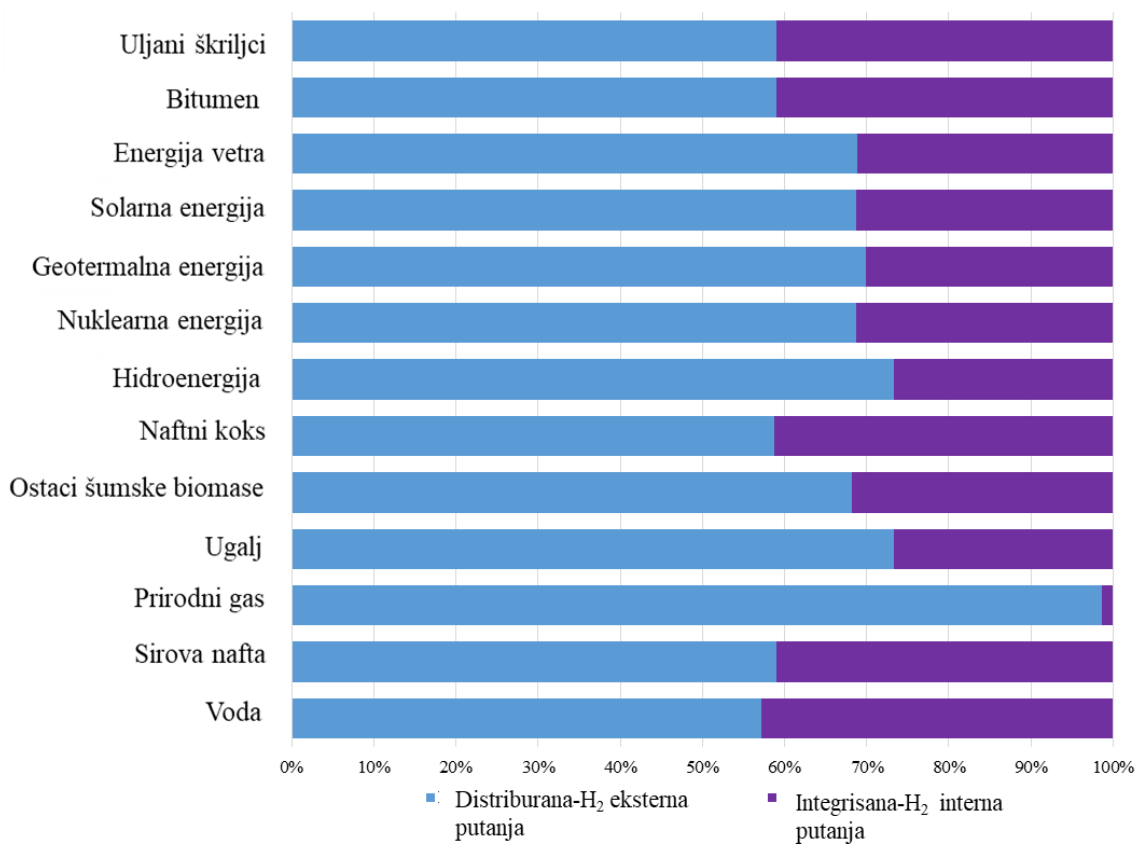
Radi boljeg prikaza i kvantifikovanja prednosti proizvodnje dizela na *integrirani* - H₂ *interni* način u odnosu na *distribuirani* - H₂ *eksterni* način, izvršena je usporedna analiza ovde dve putanje čiji su rezultati prikazani na grafikonima 5.12 i 5.13

Kao funkcionalna jedinica za poređenje ove dve putanje korišćen je energetski sadržaj prinosa pirolitičkog dizela sintetisanog u integriranoj-H₂ internoj putanji s obzirom na njegove niže vrednosti. Kao što su prethodne analize pokazale, ova putanja ima prednosti u manjoj upotrebi resursa i nižim emisijama polutanata u odnosu na distribuiranu-H₂ eksternu putanju ali i nedostatke u vidu dobijanja nižeg prinosa pirolitičkog dizela za oko 38%.

S obzirom da se u integriranoj - H₂ internoj putanji ne koristi prirodni gas, njegova potrošnja je skoro 100% niža. Upotreba uglja, hidroenergije i vode je 64% manja, upotreba sirove nafte, naftnog koksa, bitumena i uljanih škriljaca 61% manja a upotreba OIE 86% manja u odnosu na distribuiranu-eksternu H₂ putanju. U integriranoj-H₂ internoj putanji se emituje manje CO₂ za 96 %, VOC za 73 % CO za 87 % NO_x za 65 % PM10 za 40 %, PM2,5 za 33 %, SO_x za 67 %, CH₄ za 93 %, N₂O za 78 % a SO₂ se emituje u istim količinama u obe putanje. Uticaj u GWP, TA i PMF kategorijama je u integriranoj- H₂ internoj putanji niži za, redom, 97 %, 65 % i 49 %, a ukupna upotreba fosilnih goriva i OIE je niža za, redom, 87 % i 64 %, u odnosu na distribuiranu- H₂ eksternu putanju.



Grafikon 5.12. Emisije polutanata u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-H₂ eksternoj putanji i u integriranoj-H₂ internoj putanji, u odnosu na funkcionalna jedinicu: 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³, 6 t pirolitičkog dizela) [151].



Grafikon 5.13. Utrošci resursa [GJ] u toku energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa u distribuiranoj-H₂ eksternoj putanji i u integriranoj-H₂ internoj putanji, proračunate u odnosu na funkcionalu jedinicu: 252,12 GJ (LHV/HHV= 34373,78 MJ m⁻³, 6 t pirolitičkog dizela) [151].

6. Zaključak

U ovoj disertaciji ispitivana je ekološka podobnost korišćenja brzorastuće biljke miskantusa (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) kao potencijalnog izvora energije u cilju uspostavljanja prvih energetskeg lanca miskantusa u Republici Srbiji. Metodom Ocene životnog ciklusa analizirane su dve alternativne putanje, dva energetska lanca za dobijanje energije od miskantusa: 1) proizvodnja i korišćenje briketa od miskantusa za grejanje domaćinstava i 2) proizvodnja pirolitičkog dizela od miskantusa. Osnovni cilj istraživanja disertacije je kvantifikovanje svih ulaza i izlaza, odnosno korišćenih resursa, energije i emisije polutanata u toku životnih ciklusa razmatranih energetskeg lanca miskantusa i prihvatanje ili odbacivanje polazne pretpostavke da je miskantus zelenija alternativa u odnosu na tradicionalno korišćena fosilna goriva.

6.1. Ocena životnog ciklusa energetskeg lanca briketa od miskantusa

Rezultati Ocene životnog ciklusa energetskeg lanca briketa od miskantusa pokazuju da je operacija sa najvećim negativnim uticajem na životnu sredinu proces briketiranja usled potrošnje velike količine električne energije za rad briketirke i usled niske produktivnosti samog procesa. Najnegativniji uticaji u toku životnog ciklusa energetskeg lanca briketa od miskantusa potiču od emisije polutanata usled sagorevanja dizela u zastarelim poljoprivrednim mašinama i usled velike količine utrošene električne energije koja se dobija sagorevanjem fosilnih goriva. Kao mere za smanjenja ovih uticaja predloženo je povećanje udela obnovljivih izvora energije u energetskeg mreži Republike Srbije i korišćenje savremenije i efikasnije poljoprivredne mehanizacije na poljoprivrednim gazdinstvima. Pokazano je da povećanje udela obnovljivih izvora energije u energetskeg mreži Srbije dovodi do smanjenja uticaja u kategoriji *klimatske promena* za 12 %, dok je korišćenje modernije poljoprivredne mehanizacije, veće snage i efikasnosti, pokazalo smanjenje uticaja u svim kategorijama osim u ovoj kategoriji gde je zabeleženo povećanje emisija CO₂ ekvivalenata (eq) za 65 %.

Sagorevanjem briketa od prosečnog prinosa miskantusa dobijenog od III-VII godine na černozeu, u skladu sa trenutnom poljoprivrednom praksom u Srbiji, oslobađa se 365,5 GJ energije koja se može koristiti za grejanje 383 m² porodičnih kuća godišnje. Ista ova količina energije se dobija sagorevanjem 22 t briketa lignita i 23 t ogrevnog drveta. Zamenom briketa lignita briketima miskantusa u kotlovima za grejanje domaćinstava, dobijaju se značajna smanjenja emisija polutanata: 98 % manje ekvivalenata ugljen-dioksida (CO₂ eq), 84 % manje ekvivalenata sumpor-dioksida (SO₂ eq), 99 % manje ekvivalenata fosfora (P eq), 95% manje ekvivalenata azota (N eq), 99 % manje ekvivalenata 1,4 dihlorobenzena (1,4-DB eq), 61 % manje organskih jedinjenja koja ne sadrže metan (NMVOC), 83 % manje čestica (PM₁₀ eq), 96 % manje ekvivalenata izotopa Urana (U₂₃₅ eq). Korišćenje briketa miskantusa umesto ogrevnog drveta dovodi do 98 % manjeg utroška ekvivalenata nafte kao i do 95 % manjeg uroška vode a emituje 27 % više ekvivalenata trihlorfluorometana (CFC-11 eq). Zamena ogrevnog drveta briketima miskantusa u kotlovima za grejanje domaćinstava bi dovela do 20 % nižih emisija CO₂ eq, 63 % nižih emisija SO₂ eq, 37 % nižih emisija P eq, 91 % nižih emisija N eq, 75 % nižih emisija 1,4-DB eq, 23 % nižih emisija NMVOC, 58 % nižih emisija PM₁₀ eq, 63 % nižih emisija U₂₃₅ eq, dovela bi do 76 % manjeg korišćenja ekvivalenata nafte i 62 % manje upotrebe vode a do 24 % većih emisija CFC-11 eq.

Rezultati ukazuju da gajenje miskantusa na zaparloženom poljoprivrednom zemljištu može dovesti do godišnjeg porasta količine ugljenika u zemljištu od 0,3 do 0,81 t ha⁻¹, u zavisnosti od toga da li su ostvareni minimalni, prosečni ili maksimalni prinosi biomase. U slučaju kada se razmatra korišćenje modernije poljoprivredne mehanizacije, godišnje „taloženje“ odnosno sekvestracija ugljenika je moguće samo u slučaju kada su ostvareni maksimalni prinosi miskantusa. Ovaj uticaj se može umanjiti kombinovanoma upotrebom poljoprivrednih mašina različitih snaga motora.

Ovim rezultatima se potvrđuje da je gajenje i korišćenje briketa miskantusa u kotlovima za individualno grejanje domaćinstava u Srbiji ekološki podobnija opcija u odnosu na tradicionalno korišćeni ugalj i drvo, kada se razmatraju oba slučaja: trenutno i buduće stanje.

6.2. Ocena životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa

Rezultati analize Ocene životnog ciklusa energetskog lanca proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa distributivnim putem sa eksternom proizvodnjom vodonika, pokazuju da je operacija sa najvećim negativnim uticajem na životnu sredinu stabilizacija sirovog bio-ulja usled velike količine vodonika (103,62 GJ) koji se koristi u ovom procesu a koji se dobija reformacijom prirodnog gasa (343 GJ). U odnosu na konvencionalnu putanju proizvodnje dizela gde se troše veće količine resursa, u toku distributivne-H₂ eksterne putanje emituju se veće količine polutanata. U konvencionalnoj putanji proizvodnje dizela najveći uticaji na životnu sredinu su uzrokovani korišćenjem fosilnih goriva i njihovih derivata kao što su sirova nafta, naftni koks, uljani škriljci i bitumen koji predstavljaju sirovine za dobijanje dizela. S druge strane, prednost ove putanje je u korišćenju većih količina obnovljivih izvora za dobijanje električne energije. U cilju favorizovanja proizvodnje pirolitičkog dizela od miskantusa, konstruisana je još jedna pirolitička putanja, integrisana-H₂ interna putanja. U ovoj putanji se vodonik dobija reformacijom frakcije sirovog bio-ulja i ostvaruju se manji uticaji na životnu sredinu ali i se sintetišu niži prinosi pirolitičkog dizela. Od 23,5 t biomase miskantusa koji predstavlja ulaznu sirovinu u proces pirolize, ovom putanjom se ostvaruje 38 % niži prinos pirolitičkog dizela [t] u odnosu na distributivnu-H₂ integrisanu putanju u kojoj se ostvaruje prinos od oko 9,85 t. U odnosu na konvencionalnu putanju proizvodnje dizela, tokom integrisane-H₂ interne putanje se emituje 96 % manje CO₂ i 84 % manje CH₄, ali se emituje oko 60 % više čestica, oko 30 % više oksida sumpora i 56 % više azot sub-oksida.

Rezultati Ocene uticaja na životnu sredinu oba energetska lanca miskantusa, ukazuju da je ekološki opravdano zasnivati energetske plantaže brzorastuće biljke miskantus u Republici Srbiji u cilju korišćenja miskantusa kao energenta za individualno grejanje domaćinstava ali ne i za proizvodnju pirolitičkog dizela. Zaključuje se da pirolitička putanja proizvodnje dizela još uvek ne može da zameni konvencionalnu putanju proizvodnje ovog goriva.

U cilju uspostavljanja plantažnog gajenja miskantusa i drugih energetskih zasada u Republici Srbiji treba razmotriti i sledeće aspekte:

- Promene prinosa miskantusa usled klimatskih promena – Klimatske promene imaju veliki uticaj na prinos miskantusa - u zadnjih par godina u Evropi a i širom sveta su zabeleženi ekstremni vremenski uslovi koji variraju od ekstremno visokih temperatura i suša do rekordnih padavina i poplava. Ove ekstremni vremenski uslovi će uzrokovati velike varijacije prinosa miskantusa u budućnosti što je neophodno da se uzme u obzir i kada se razmatra finansijska isplativost osnivanja energetskih plantaža ove biljke.
- Isplativost - S obzirom da je proizvodnja briketa od poljoprivredne biomase još uvek skuplja u odnosu na tradicionalno korišćena goriva za grejanje kao što su ugalj i ogrevno drvo, za favorizovanje osnivanja energetskih plantaža miskantusa u Srbiji, država bi trebala da ponudi subvencije poljoprivrednicima, a neophodna su i veća ulaganja u osavremenjavanje instalacija za individualno grejanje u domaćinstvima, kako bi se sagorevanje briketa miskantusa bilo što efikasnije.

6.3. Metoda Ocene životnog ciklusa – ključna razmatranja

Metoda Ocene životnog ciklusa predstavlja jednu od najčešće korišćenih metoda za procenu uticaja na životnu sredinu koje određeni proizvod ispoljava u toku celog životnog ciklusa ili u toku određenih faza. Ona daje okvirne informacije o potencijalnim rizicima kao i smernice koji mogu poslužiti kao dobra osnova prilikom donošenja odluka o započinjanju, nastavku ili unapređivanju proizvodnje određenih proizvoda. Pa ipak prilikom korišćenja metode Ocene životnog ciklusa treba uzeti u obzir sledeće činjenice:

- složenost - Metoda Ocene životnog ciklusa proizvoda je dosta komplikovana i složena metoda. Kompleksnost ove metode zavisi i od nivoa detalja ispitivanih procesa. Neki procesi mogu da se sastoje i od nekoliko desetina jediničnih procesa u čijem slučaju je kreiranje ulazno-izlazne matrice dosta složeno.

- dugotrajnost analize - Usled velike količine podataka koji se obrađuju, analiza Ocene životnog ciklusa ispitivanog proizvoda ili procesa je vremenski dosta zahtevna. Vremenski najzahtevnija faza je *faza analize inventara*, gde najviše vremena odlazi na prikupljanje svih relevantni podataka i konstruisanje ulazno-izlazne matrice za svaki pojedinačni proces ispitivanog lanca. Ostale faze su donekle olakšane jer su velikim delom automatizovane zahvaljujući primeni odgovarajućih softverskih programa za LCA.
- preciznost, pouzdanost i repetitivnost - Zbog analize velikog broja podataka, kriterijuma i procene potencijalnih rizika, prilikom proračuna se vrlo lako dešavaju greške. Ovo ukazuje na neophodnost repetitivnosti provere tačnosti proračuna. Pouzdanost rezultata zavisi i od preciznosti korišćenih podataka. Veća preciznost i pouzdanost rezultata analize se ostvaruje kada se koriste specifični, odnosno primarni podaci (dobijeni direktnim merenjem ili u razgovoru sa stručnjacima) u odnosu na dostupne podatke postojećih baza inventara koji uglavnom predstavljaju prosečne vrednosti merenja ispitivanog parametra. Vrlo često primarni podaci nisu dostupni pa se u tom slučaju moraju koristiti podaci dostupnih baza inventara.
- pravilno postavljanje granica sistema – U toku analize životnog ciklusa proizvoda, jako je bitno pravilno odrediti granice ispitivanog sistema. Ovo ponekad zahteva detaljnu analizu svih jediničnih procesa koji se koriste u ispitivanom sistemu, detaljnu proveru ulazno-izlaznih matrica i unošenje neophodnih izmena. Tako na primer, u okviru jediničnog procesa “električna energija, niske voltaže” koja je u ovoj disertaciji korišćena kao resurs za rad briketirke (iz baze inventara) uključena je i proizvodnja električne energije visoke voltaže iz različitih izvora, konverzija u električnu energiju niže voltaže, izgradnja infrastrukture (dalekovoda, trafostanica, itd.), i kvantifikovana je veličina prostora koje ova infrastruktura zauzima. Ukoliko je iz granica sistema isključena proizvodnja infrastrukture, kao što je slučaj sa

modelom životnog ciklusa koji je predstavljen u ovoj disertaciji, neophodno je bilo modifikovati sve jedinične procese koji se nalaze u okviru procesa “električna energija, niske voltaže” i sačuvati ih kao nove, modifikovane procese (kako bi se očuvali izvorni procesi iz baza podataka) i voditi računa prilikom odabira inventara kod drugih operacija u ispitivanom životnom ciklusu koje koriste ovaj resurs.

- budući scenario – Smatra se da je ocena životnog ciklusa ispitivanog proizvoda nepotpuna ako se ne razmotre i potencijalni trendovi u budućnosti. Prilikom kreiranja modela koji analizira trendove razvoja nekog ispitivanog procesa ili proizvoda u budućnosti treba biti jako oprezan i predvideti sve rizike što vrlo često nije lako izvodljivo.

U pravilno sprovedenoj metodi Ocene životnog ciklusa dat je osvrt na sve ove vrste problema, rizici i verovatnoće su određeni a svi potencijalni budući izazovi identifikovani i date su mere za njihovo umanjeње uvođenjem određenih izmena u ispitivanom lancu.

6.4. Ostvareni naučni doprinosi i budući pravci istraživanja

Ostvareni naučni doprinosi ove disertacije su:

- Izrađena kompleksna LCA studija koja podrazumeva šire granice sistema i analizu većeg broja uticajnih kategorija.
- Definisani finalni potrošači toplotne energije niskantusa koji koriste individualne sisteme grejanja i date procene utroška energije i emisija CO₂ po m².
- Izrađeni modeli životnog ciklusa niskantusa, koji podrazumeva izrađenu ulazno-izlaznu matricu (kvantifikovani utrošci resursa, energije, emisije polutanata) i evidentirani relevantni uticaji na životnu sredinu razmatranih energetskih lanaca niskantusa.
- Konstruisani energetski lanci referentnih fosilnih goriva i analizirani njihovi uticaji na životnu sredinu.

- Razvijena metodologija za procenu uticaja na životnu sredinu koja može da se primenjuje i na druge energetske lance biomase.
- Izvršena inventarizacija emisija polutanata prilikom korišćenja poljoprivrednih mašina koja može da se primeni i u drugim istraživanjima, koja se bave ekonomskim i ekološkim aspektima uzgoja poljoprivrednih kultura i optimizacijom učinka poljoprivrednih mašina.
- Predstavljena metodologija procene promena količine ugljenika u zemljištu usled gajenja miskantusa kao i benefiti usled gajenja miskantusa na zapuštenom poljoprivrednom zemljištu.
- Usvojena metodologija za optimizaciju energetskih lanaca biomase Miskantusa.
- Promovisana LCA metoda u cilju njene veće primene kao alatke za analizu štetnih uticaja na životnu sredinu u naučnim istraživanjima.

Predlažu se sledeći pravci istraživanja:

- Ispitivanje ekološke opravdanosti gajenja miskantusa na drugim tipovima zemljišta - Iako je zaključeno da postoje velike površine zaparloženog poljoprivrednog zemljišta pokrivenog černozeom (60000 ha u severnom delu zemlje) i da gajenje miskantusa na jednom delu tog zemljišta ne bi ugrozilo snabdevanje hranom, neophodno je ispitati uticaje uzgoja miskantusa na drugim tipovima zemljišta, nižeg kvaliteta.
- Razmatranje drugih vrsta uticaja na životnu sredinu - Osim ispitivanja uticaja na životnu sredinu kroz analizu uticajnih kategorija kao što su klimatske promene, oštećivanje ozona, zakišeljavanje tla, eutrofikacija vodenih ekosistema, ekotoksičnost vodenih i kopnenih ekosistema, formiranje fotohemisjkih oksidanata i čestica, jonizujuće zračenje i toksičnost, predlaže se da se u analizu uticaja na životnu sredinu uključe i druge kategorije uticaja kao što su procena uticaja na biodiverzitet, uticaj buke, itd., što podrazumeva razvoj odgovarajuće metodologije.

- Eksperimentalna potvrda modela prikazanih u ovoj disertaciji.
- Ispitivanje podobnosti primena biomase miskantusa u druge svrhe - Uzgoj miskantusa može biti favorizovan ne samo za energetske potrebe već i za fitoremedijaciju zagađenih zemljišta ili za proizvodnju sirovine za građevinske materijale i druge biodegradabilne industrijske proizvode u čijem slučaju se takođe može primeniti metoda Ocene životnog ciklusa.

7. Literatura:

- [1] K. Ponting, *Ekološka Istorija Sveta, Životna sredina i propast velikih civilizacija*. Beograd: ODISEJA, 2009.
- [2] “CO2.Earth,” 2018. [Online]. Available: <https://www.co2.earth/annual-co2>.
- [3] “Global Carbon project.” [Online]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
- [4] “IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.” [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spmssp-projections-of.html. [Accessed: 15-Oct-2018].
- [5] “European Commission, National action plans.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/national-action-plans>.
- [6] “European Commission, EU countries Progress report.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/progress-reports>.
- [7] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja, “Prvi izveštaj Republike Srbije prema Okvirnoj konvenciji UN o promeni klime”, Beograd, 2010.
- [8] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo poljoprivrede i zaštite životne sredine, “Rezime poglavlja promene klime, pogođenost i adaptacija drugog izveštaja R.Srbije prema Okvirnoj konvenciji UN o promeni klime”, 2015.
- [9] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo rudarstva i energetike, “Energetski Bilans Republike Srbije za 2016. godinu”.
- [10] M. Perić, M. Komatina, B. Bugarski, and D. Antonijević, “Best Practices of Biomass Energy Life Cycle Assesment and Possible Applications in Serbia-review paper,” *Croat. J. For. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 375–390, 2016.
- [11] “Zelena energija.” [Online]. Available:

<http://zelenaenergija.pks.rs/ZelenaEnergija.aspx?id=19&p=7&>.

- [12] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo rudarstva i energetike, “Strategija razvoja energetike republike Srbije do 2025. sa projekcijama do 2030”, 2015.
- [13] Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, “Nacrt strategije razvoja energetike Republike Srbije za period do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine”, 2013.
- [14] Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine, “Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2017.godinu”, Beograd, 2018.
- [15] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo rudarstva i energetike, “Energetski bilans Republike Srbije za 2015,” 2015.
- [16] Vlada Republike Srbije, “Odluka o utvrđivanju Energetskog bilansa Republike Srbije za 2018. godinu: 119/2017-7,” 2018.
- [17] Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine, “Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2016.godinu,” Beograd, 2017.
- [18] Vlada Republike Srbije, Ministarstvo rudarstva i energetike, “Bilans toplotne energije, 2017”, 2017.
- [19] Republika Srbija, Republički zavod za statistiku, "Popis stanovništva, domaćinstava i stanova 2011. u Republici Srbiji - *Stanovi prema vrsti energenata za grejanje*", Beograd 2013.
- [20] M. Perić, M. Komatina, D. Antonijević, B. Bugarski, and Ž. S. Dželetović, “Life Cycle Impact Assessment of Miscanthus Crop for Sustainable Household Heating in Serbia,” *Forests*, vol. 9, no. 654, pp. 1–26, 2018.
- [21] Republika Srbija, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, “Pojednostavljeni Nacionalni Akcioni Plan za Obnovljive Izvore Energije Republike

Srbije,” Beograd, 2012.

- [22] Republika Srbija, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, “Nacionalni Akcioni Plan za Korišćenje Obnovljivih Izvora Energije Republike Srbije”, Beograd, 2013.
- [23] M. Khanna, B. Dhungana, and J. Clifton-Brown, “Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 6, pp. 482–493, 2008.
- [24] I. Lewandowski, J. M. O. Scurlock, E. Lindvall, and M. Christou, “The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, no. 4, pp. 335–361, 2003.
- [25] E. Heaton, T. Voigt, and S. P. Long, “A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 1, pp. 21–30, Jul. 2004.
- [26] A. Simic and Ž. S. Dželetović, “Perspektive gajenja energetskih useva u Srbiji,” in *Zbornik radova Savetovanja poljoprivrednika i agronoma Srbije (Otvorena vrata)*, 2018, no. June.
- [27] I. Lewandowski, a Kicherer, and P. Vonier, “CO₂-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 8, no. 2, pp. 81–90, 1995.
- [28] I. Lewandowski and A. Heinz, “Delayed harvest of miscanthus — influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production,” *Eur. J. Agron.*, vol. 19, pp. 45–63, 2003.
- [29] D. Styles and M. B. Jones, “Energy Crops in Ireland : An Assessment of their Potential Contribution to Sustainable Agriculture , Electricity and Heat Production,” Dublin, 2006.
- [30] D. Felten, N. Fröba, J. Fries, and C. Emmerling, “Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (*Miscanthus*, rapeseed, and

- maize) based on farming conditions in Western Germany,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 160–174, 2013.
- [31] R. Parajuli, K. Sperling, and T. Dalgaard, “Environmental performance of Miscanthus as a fuel alternative for district heat production,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 72, pp. 104–116, 2015.
- [32] F. Morandi, A. Perrin, and H. Østergård, “Miscanthus as energy crop: Environmental assessment of a miscanthus biomass production case study in France,” *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 313–321, 2016.
- [33] S. S. Clair, J. Hillier, and P. Smith, “Estimating the pre-harvest greenhouse gas costs of energy crop production,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 5, pp. 442–452, 2008.
- [34] E. M. W. Smeets, I. M. Lewandowski, and A. P. C. Faaij, “The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1230–1245, 2009.
- [35] F. Murphy, G. Devlin, and K. McDonnell, “Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 412–420, 2013.
- [36] L. Hamelin, U. Jørgensen, B. M. Petersen, J. E. Olesen, and H. Wenzel, “Modelling the carbon and nitrogen balances of direct land use changes from energy crops in Denmark: A consequential life cycle inventory,” *GCB Bioenergy*, vol. 4, no. 6, pp. 889–907, 2012.
- [37] B. Roth, M. Jones, J. Burke, and M. Williams, “The Effects of Land-Use Change from Grassland to Miscanthus x giganteus on Soil N₂O Emissions,” *Land*, vol. 2, no. 3, pp. 437–451, 2013.
- [38] A. Zatta, J. Clifton-Brown, P. Robson, A. Hastings, and A. Monti, “Land use change from C3 grassland to C4 Miscanthus: Effects on soil carbon content and estimated mitigation benefit after six years,” *GCB Bioenergy*, vol. 6, no. 4, pp. 360–370, 2014.

- [39] A. E. Daraban, Ș. Jurcoane, I. Voicea, and G. Voicu, "Miscanthus Giganteus Biomass for Sustainable Energy in Small Scale Heating Systems," *Agric. Agric. Sci. Procedia*, vol. 6, pp. 538–544, 2015.
- [40] C. Schmidl *et al.*, "Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 39, pp. 7443–7454, 2011.
- [41] S. Božić, R. Radojević, and Z. Mileusnić, "Operacionalizacija ekonomičnosti potrošnje goriva traktora," *Poljopr. Teh.*, vol. 4, pp. 59–69, 2006.
- [42] Đ. Ercegović *et al.*, "Uticaj konzervacijske obrade zemljišta na prinos suncokreta i merkantilnog kukuruza (The influence of conservation tillage of soil on sunflower and maize yield)," *Agric. Eng.*, vol. 2, pp. 69–82, 2009.
- [43] G. Moitzi *et al.*, "Energy consumption and energy efficiency of different tillage systems in the semi-arid region of Austria," *Agric. Eng.*, vol. 4, pp. 25–33, 2013.
- [44] L. N. Ružičić, P. Petrović, K. Gligorević, M. Oljča, and T. Ružičić, "Ekonomsko-tehnološki parametri optimalnog korišćenja traktora (Economic and Technological Parameters for Optimal Use of Tractors)," *Agro-knowledge J.*, vol. 13, no. 2, pp. 259–266, 2012.
- [45] R. Radojevic, D. Raicevic, M. V. Oljaca, K. Gligorijevic, and M. Pajic, "Energetski aspekti obrade teških tipova zemljišta," *Agric. Eng.*, vol. 3, pp. 25–32, 2007.
- [46] N. Momirović, Ž. Dolijanović, M. V. Oljača, and Ž. Videnović, "Višegodišnji uticaj različitih sistema obrade zemljišta na energetska efikasnost i prinos kukuruza (Long term effects of different tillage systems influencing yield and energy efficiency in Maize)," *Agric. Eng.*, vol. 1, pp. 97–104, 2011.
- [47] Ž. S. Dželetović, *Miskantus (Miscanthus x giganteus Greef et Deu.) - proizvodne odlike i produktivnost biomase*. Beograd: Zaduzbina Andrejevic, 2012.
- [48] S. Gulati and M. Singh, "Energy requirement and management in a potato production

system,” *Potato J.*, vol. 38, no. 1, pp. 61–66, 2011.

- [49] R. Miodragović and M. Đević, “Rezultati primene mobilnih sistema navodnjavanja kišenjem u biljnoj proizvodnji (Investigation of mobile systems for plant production),” *Agric. Eng.*, vol. 1, pp. 61–69, 2007.
- [50] R. Miodragović, M. Đević, and Z. I. Mileusnić, “Energetski aspekti navodnjavanja kišenjem (Energy aspects of sprinkler irrigation),” *Agric. Eng.*, vol. 3, pp. 65–71, 2008.
- [51] R. Miodragović, D. Petrović, Z. Mileusnić, and M. Đević, “Energetski i distribicioni parametri linearnog sistema navodnjavanja (Energy and distributions parameters of linear irrigation system),” *Agric. Eng.*, vol. 3, pp. 47–55, 2009.
- [52] P. C. Johnson, “Energy requiremenst and productivity of machinery used to harvest herbaceous energy crops,” University of Illinois at Urbana-Campaign, 2012.
- [53] S. K. Mathanker and A. C. Hansen, “Impact of miscanthus yield on harvesting cost and fuel consumption,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, pp. 162–166, 2015.
- [54] N. Tica, V. Zekić, D. Milić, D. Janković, and T. Janić, “Izveštaj projekta: Mogućnosti i ekonomski aspekti upotrebe žetvenih ostataka za proizvodnju toplotne energije (Project report: Possibilities and economic aspects of using of agricultural residues for heat production),” Novi Sad, 2015.
- [55] E. Smeets, I. Lewandowski, A. Faaij, E. M. W. Smeets, and I. M. Lewandowski, “Costs and environmental performance of miscanthus biomass supply chains in different European regions production and supply chains in a European setting,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 1230–1245, 2009.
- [56] D. Styles and M. B. Jones, “Energy crops in Ireland: Quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 11–12, pp. 759–772, 2007.
- [57] A. E. Daraban, Ş. Jurcoane, and I. Voicea, “Miscanthus giganteus - an overview about

sustainable energy resource for household and small farms heating systems,” *Rom. Biotechnol. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 10369–10380, 2015.

- [58] E. M. Hodgson *et al.*, “Miscanthus as a feedstock for fast-pyrolysis: Does agronomic treatment affect quality?,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 15, pp. 6185–6191, 2010.
- [59] C. E. Greenhalf, D. J. Nowakowski, A. B. Harms, J. O. Titiloye, and A. V. Bridgwater, “A comparative study of straw, perennial grasses and hardwoods in terms of fast pyrolysis products,” *Fuel*, vol. 108, pp. 216–230, 2013.
- [60] J. Y. Kim, S. Oh, H. Hwang, Y. H. Moon, and J. W. Choi, “Assessment of miscanthus biomass (*Miscanthus sacchariflorus*) for conversion and utilization of bio-oil by fluidized bed type fast pyrolysis,” *Energy*, vol. 76, pp. 284–291, 2014.
- [61] C. E. Greenhalf, D. J. Nowakowski, N. Yates, I. Shield, and A. V. Bridgwater, “The influence of harvest and storage on the properties of and fast pyrolysis products from *Miscanthus x giganteus*,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, pp. 247–259, 2013.
- [62] E. M. Hodgson *et al.*, “Variation in *Miscanthus* chemical composition and implications for conversion by pyrolysis and thermo-chemical bio-refining for fuels and chemicals,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3411–3418, 2011.
- [63] J. Corton *et al.*, “Expanding the biomass resource: Sustainable oil production via fast pyrolysis of low input high diversity biomass and the potential integration of thermochemical and biological conversion routes,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 852–862, 2016.
- [64] S. W. Banks, D. J. Nowakowski, and A. V. Bridgwater, “Fast pyrolysis processing of surfactant washed *Miscanthus*,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 128, pp. 94–103, 2014.
- [65] M. Mos, S. W. Banks, D. J. Nowakowski, P. R. H. Robson, A. V. Bridgwater, and I. S. Donnison, “Impact of *Miscanthus x giganteus* senescence times on fast pyrolysis bio-oil quality,” *Bioresour. Technol.*, vol. 129, pp. 335–342, 2013.
- [66] S. Yorgun, “Fixed-Bed Pyrolysis of *Miscanthus x giganteus*: Product Yields and Bio-

Oil Characterization,” *Energy Sources*, vol. 25, no. 8, pp. 779–790, 2003.

- [67] H. Heo *et al.*, “Influence of operation variables on fast pyrolysis of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, pp. 3672–3677, 2010.
- [68] F. Melligan, R. Auccaise, E. H. Novotny, J. J. Leahy, M. H. B. Hayes, and W. Kwapinski, “Bioresource Technology Pressurised pyrolysis of *Miscanthus* using a fixed bed reactor,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3466–3470, 2011.
- [69] R. J. M. Westerhof, N. J. M. Kuipers, S. R. A. Kersten, and W. P. M. Van Swaaij, “Controlling the water content of biomass fast pyrolysis oil,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, no. 26, pp. 9238–9247, 2007.
- [70] J. Han, A. Elgowainy, I. Palou-Rivera, J. B. Dunn, and M. Q. Wang, “Well-to-Wheels Analysis of Fast Pyrolysis Pathways with GREET,” p. 76, 2011.
- [71] J. Han, A. Elgowainy, J. B. Dunn, and M. Q. Wang, “Life cycle analysis of fuel production from fast pyrolysis of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 133, pp. 421–428, 2013.
- [72] Q. Dang, C. Yu, and Z. Luo, “Environmental life cycle assessment of bio-fuel production via fast pyrolysis of corn stover and hydroprocessing,” *Fuel*, vol. 131, pp. 36–42, 2014.
- [73] N. Kauffman, D. Hayes, and R. Brown, “A life cycle assessment of advanced biofuel production from a hectare of corn,” *Fuel*, vol. 90, no. 11, pp. 3306–3314, 2011.
- [74] D. D. Hsu, “Life cycle assessment of gasoline and diesel produced via fast pyrolysis and hydroprocessing,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 45, pp. 41–47, 2012.
- [75] J. F. Peters, D. Iribarren, and J. Dufour, “Simulation and life cycle assessment of biofuel production via fast pyrolysis and hydrougrading,” *Fuel*, vol. 139, pp. 441–456, 2015.
- [76] D. Iribarren, J. F. Peters, and J. Dufour, “Life cycle assessment of transportation fuels from biomass pyrolysis,” *Fuel*, vol. 97, pp. 812–821, 2012.

- [77] P. Steele, M. E. Puettmann, V. K. Penmetsa, and J. E. Cooper, "Life-Cycle Assessment of Pyrolysis Bio-Oil Production*," *For. Prod. J.*, vol. 62, no. 4, pp. 326–334, 2012.
- [78] S. Jones, C. Valkenburg, and C. Walton, "Production of gasoline and diesel from biomass via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking: a design case," *Energy*, no. February, p. 76, 2009.
- [79] European Commission, "EU Directive 2009/28/EC." [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2009:140:FULL&from=EN>. [Accessed: 04-Apr-2015].
- [80] N. G. Manić, "Sagorevanje peleta od biomase u pećima za domaćinstvo". Beograd: Univerzitet u Beogradu, Mašinski Fakultet, 2014.
- [81] M. R. Trninić, "Modeliranje i optimizacija procesa pirolize kukuruznog oklaska", doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2015.
- [82] Ž. S. Dželetović, V. Dimitrijević, S. Stojanović, and M. Pavlović, "Tehnološki parametri briketiranja biomase Miskantusa," *Agric. Eng.*, vol. 631, no. 3, pp. 81–90, 2012.
- [83] J. Schweinle *et al.*, "Assessing the environmental performance of biomass supply chains," 2015.
- [84] F. Cherubini, G. P. Peters, T. Berntsen, A. H. Strømman, and E. Hertwich, "CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming," *GCB Bioenergy*, vol. 3, no. 5, pp. 413–426, 2011.
- [85] A. V. Bridgwater, S. Czernik, and J. Piskorz, "An Overview of Fast Pyrolysis", *Prog. Thermochem. Biomass Convers.*, no. 1, pp. 977–997, 2008.
- [86] M. Čeranić, "Uticaj procesnih parametara na pirolizu i gasifikaciju oklaska kukuruza, doktorska disertacija," Univerzitet u Novom sadu, Fakultet tehničkih nauka u Novom sadu, 2015.
- [87] G. W. Huber, S. Iborra, and A. Corma, "Synthesis of Transportation Fuels from

- Biomass Chemistry, Catalysts, and Engineering,” *Chem. Rev.*, vol. 106, pp. 4044–4098, 2006.
- [88] M. M. Wright, J. a. Satrio, R. C. Brown, D. E. Daugaard, and D. D. Hsu, “Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels,” 2010.
- [89] T. R. Brown, R. Thilakaratne, R. C. Brown, and G. Hu, “Techno-economic analysis of biomass to transportation fuels and electricity via fast pyrolysis and hydroprocessing,” *Fuel*, vol. 106, pp. 463–469, 2013.
- [90] B. Jovanović and M. Parović, “Stanje i Razvoj biomase u Srbiji,” Beograd, 2009.
- [91] W. Zegada-Lizarazu and A. Monti, “Energy crops in rotation. A review,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 12–25, 2011.
- [92] Ž. S. Dželetović and N. Mihailović, “Status, Development and Prospects of Using Bioenergy Crops,” *J. Process. Energy Agric.*, vol. 15, no. 2, pp. 90–93, 2011.
- [93] N. V. Babović, G. D. Dražić, and A. M. Đorđević, “Mogućnosti korišćenja biomase poreklom od brzorastuće trske *Miscanthus × giganteus*,” pp. 223–233, 2007.
- [94] F. Cherubini, N. D. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger, and S. Woess-Gallasch, “Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, pp. 434–447, 2009.
- [95] Ž. S. Dželetović, G. Z. Andrejić, I. B. Živanović, R. N. Pivić, A. S. Simić, and J. S. Maksimović, “Zaštita, uređenje i održivo korišćenje poljoprivrednog zemljišta na teritoriji Republike Srbije gajenjem bioenergetske trave *Miscanthus × giganteus*.” Univerzitet u Beogradu, INEP - Institut za primenu nuklearne energije, 2014.
- [96] “*Panicum virgatum*” - [Online]. Available: <https://www.mijntuin.org/shop/24134-6-x-panicum-virgatum-northwind-gierst-pot-9x9-cm>.”
- [97] “*Arundo donax*” - [Online]. Available: https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Arundo_donax_001.JPG” .

- [98] "Phalaris arudinacea" - [Online]. Available: <https://caballotoro.com/wp-content/uploads/2017/08/IMAGEN-4-PASTOS-PARA-GANADO.jpg> .
- [99] I. Lewandowski, J. C. Clifton-Brown, J. M. O. Scurlock, and W. Huisman, "Miscanthus: European experience with a novel energy crop," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no. 4, pp. 209–227, 2000.
- [100] K. Głowacka, "A review of the genetic study of the energy crop Miscanthus," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 2445–2454, 2011.
- [101] K. Reisinger, C. Haslinger, M. Herger, and H. Hofbauer, "BioBib - A database for biofuels." Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology, University of Technology, Vienna, Austria, 1998.
- [102] Ž. Dželetović, N. Mihailović, and I. Živanović, "Prospects of using bioenergy crop Miscanthus × giganteus in Serbia," *Mater. Process. energy Commun. Curr. Res. Technol. Dev.*, pp. 360–370, 2013.
- [103] Ž. S. Dželetović, *Мискантус (Miscanthus × giganteus Greef et Deu.) – производне одлике и продуктивност биомасе (Miscanthus - production quality and biomass productivity)*. Задужбина Андрејевић, 2012.
- [104] A. Perrin *et al.*, "Integrated design and sustainable assessment of innovative biomass supply chains: A case-study on miscanthus in France," *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 66–77, 2017.
- [105] S. Xue, O. Kalinina, and I. Lewandowski, "Present and future options for Miscanthus propagation and establishment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1233–1246, 2015.
- [106] Ž. Dželetović, J. Maksimović, and I. Živanović, "Prinos Miscanthus × giganteus gajenog na dve lokacije u Srbiji," *J. Process. Energy Agric.*, vol. 18, no. 2, pp. 62–64, 2014.
- [107] S. Oljača, M. Oljača, D. Kovačević, and Đ. Glamočlija, "Ekološke posledice upotrebe

- biljaka za dobijanje energije,” *Agric. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 91–97, 2007.
- [108] M. M. Ševarlić, “Popis poljoprivrede 2012 - Poljoprivredno zemljište u Republici Srbiji,” Belgrade, 2015.
- [109] D. Técher *et al.*, “An appraisal of *Miscanthus x giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 36, no. 1, pp. 427–433, 2012.
- [110] W. Hartley, N. M. Dickinson, P. Riby, and N. W. Lepp, “Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with *Miscanthus*,” *Environ. Pollut.*, vol. 157, no. 10, pp. 2654–2662, Oct. 2009.
- [111] D. L. Jones, K. L. Williamson, and A. G. Owen, “Phytoremediation of landfill leachate,” *Waste Manag.*, vol. 26, no. 8, pp. 825–837, Jan. 2006.
- [112] Ž. S. Dželetović, N. Mihajlović, I. Zivanovic, R. Pivic, I. Glišić, and A. Simic, “Fitostabilizacija odlagališta pepela termoelektrana bioenergetskim usevom *Miscanthus x giganteus*,” *ECOLOGICA*, vol. 22, no. 78, pp. 187–191, 2015.
- [113] D. G. Christian, A. B. Riche, and N. E. Yates, “Growth, yield and mineral content of *Miscanthus × giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 28, no. 3, pp. 320–327, 2008.
- [114] I. Lewandowski and A. Kicherer, “Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*,” *Eur. J. Agron.*, vol. 6, no. 96, pp. 163–177, 1997.
- [115] C. Pieragostini, M. C. Mussati, and P. Aguirre, “On process optimization considering LCA methodology,” *J. Environ. Manage.*, vol. 96, no. 1, pp. 43–54, 2012.
- [116] Epa, *Life Cycle Impact Assessment: Principles and Practice*. 2006.
- [117] ISO, “ISO 14040:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.” [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456. [Accessed: 04-Apr-2015].

- [118] ISO, “ISO 14044:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.” [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38498. [Accessed: 04-Apr-2015].
- [119] H. Stevanović Čarapina, A. Jovović, and J. Stepanov, “Ocena životnog ciklusa lca (life cycle assessment) kao instrument u strateškom planiranju upravljanja otpadom,” in *Univerzitet Educons*, Sremska Kamenica, 2010.
- [120] N. Zrnić and M. Đorđević, *Dizajn i ekologija - održivi razvoj proizvoda*. Beograd: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2012.
- [121] M. Braungart, W. McDonough, and A. Bollinger, “Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions e a strategy for eco-effective product and system design,” 2007. [Online]. Available: <http://www.ima.kth.se/utb/MJ1501/2010/Cradle1.pdf>. [Accessed: 04-Apr-2015].
- [122] H.-N. Hsieh and J. N. Meegoda, “Sustainable Industrial Design and Waste Management – Cradle-to-Cradle for Sustainable Development. Academic Press, (2007), ISBN: 9780123736239,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 5. p. 570, 2009.
- [123] P. Llorach-Massana, R. Farreny, and J. Oliver-Solà, “Are Cradle to Cradle certified products environmentally preferable? Analysis from an LCA approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 243–250, Jan. 2015.
- [124] S. González-García, M. T. Moreira, A. C. Dias, and B. Mola-Yudego, “Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of forest operations in Europe: Environmental and energy profiles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 188–198, 2014.
- [125] H.-P. Mattila, H. Hudd, and R. Zevenhoven, “Cradle-to-gate life cycle assessment of precipitated calcium carbonate production from steel converter slag,” *J. Clean. Prod.*, vol. 84, pp. 611–618, 2014.
- [126] P. W. R. Adams, J. E. J. Shirley, and M. C. McManus, “Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction,” *Appl. Energy*, vol.

138, pp. 367–380, Jan. 2015.

- [127] E. Heracleous, “Well-to-Wheels analysis of hydrogen production from bio-oil reforming for use in internal combustion engines,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 18, pp. 11501–11511, Sep. 2011.
- [128] F. Møller, E. Slentø, and P. Frederiksen, “Integrated well-to-wheel assessment of biofuels combining energy and emission LCA and welfare economic Cost Benefit Analysis,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 60, pp. 41–49, 2014.
- [129] C. T. Hendrickson, L. B. Lave, and H. S. Matthews, “Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input–Output Approach,” *Resour. Futur. Press*, 2005.
- [130] Y. Chang, R. J. Ries, and Y. Wang, “The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input–output LCA model,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 11, pp. 6597–6603, Nov. 2010.
- [131] G. Egilmez, M. Kucukvar, and O. Tatari, “Sustainability assessment of U.S. manufacturing sectors: An economic input output-based frontier approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 53, pp. 91–102, 2013.
- [132] J. B. Guinée *et al.*, *Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards*, vol. 7. 2002.
- [133] G. Finnveden *et al.*, “Recent developments in Life Cycle Assessment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 91, pp. 1–21, 2009.
- [134] European Commission -- Joint Research Centre -- Institute for Environment and Sustainability, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook -- General guide for Life Cycle Assessment -- Detailed guidance*. 2010.
- [135] M. Hauschild, R. K. Rosenbaum, S. I. Olsen, and E. Al., *Life Cycle Assessment - Theory and Practice*. 2017.
- [136] IPCC, *Climate Change 2007 Synthesis Report*. 2007.

- [137] D. W. Pennington *et al.*, “Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice,” *Environ. Int.*, vol. 30, pp. 721–739, 2004.
- [138] J. B. Guinée *et al.*, “Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards | Springer.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/gp/book/9781402002281>. [Accessed: 04-Apr-2015].
- [139] G. Rebitzer *et al.*, “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,” *Environ. Int.*, vol. 30, pp. 701–720, 2004.
- [140] R. Frischknecht *et al.*, “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,” Dübendorf, 2007.
- [141] M. Goedkoop, R. Heijungs, A. De Schryver, J. Struijs, and R. van Zelm, “ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation,” 2013.
- [142] R. Lal, “Carbon Management in Agricultural Soils,” *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 12, no. 2, pp. 303–322, Feb. 2007.
- [143] F. Cherubini and A. H. Strømman, “Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 437–451, 2011.
- [144] R. Kadovic, S. Belanovic, M. Knezevic, M. Danilovic, O. Kosanin, and J. Beloica, “Organic carbon stock in some forest soils in Serbia,” *Glas. Sumar. Fak.*, no. 105, pp. 81–98, 2012.
- [145] IPCC, “N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea application,” 2006.
- [146] S. Muench and E. Guenther, “A systematic review of bioenergy life cycle assessments,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 257–273, 2013.
- [147] D. Radivojević, “Popis poljoprivrede 2012-Poljoprivredna mehanizacija, oprema i

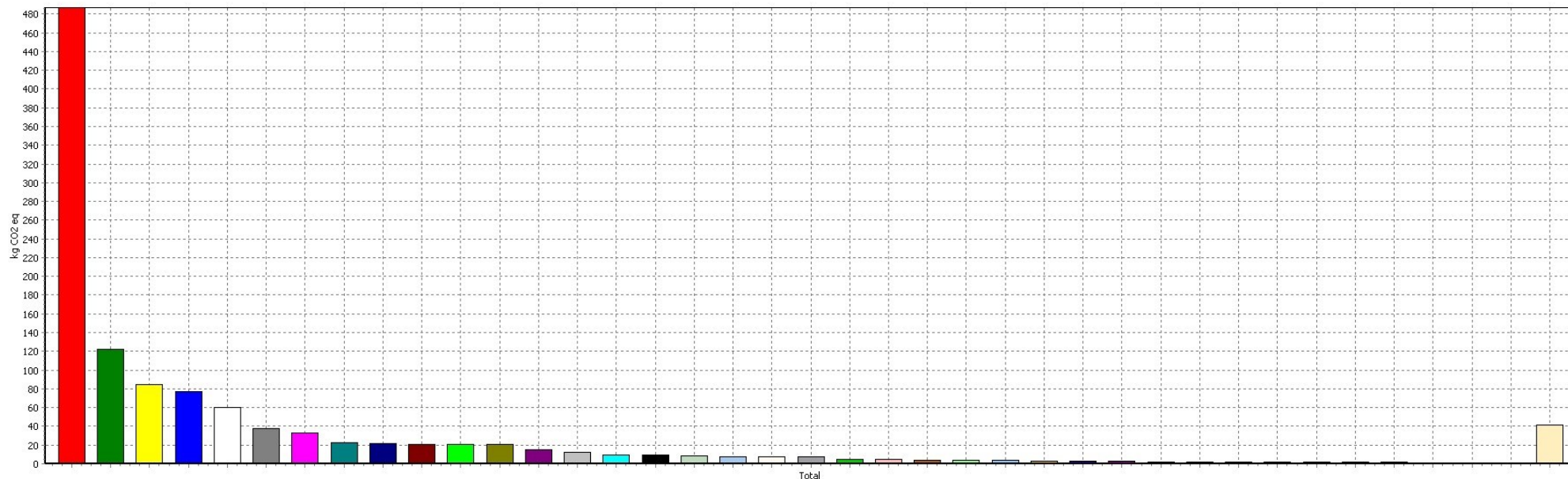
objekti,” Beograd, 2014.

- [148] R. Miodragović, Z. Mileusnić, and A. Dimitrijević, “Utrošak energije mobilnih irigacijskih sustava,” in *Proceedings of the 41. International Symposium on Agricultural Engineering - Actual Tasks on Agricultural Enineering*, 2013, pp. 181–188.
- [149] S. Fournel *et al.*, “Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops,” *Appl. Energy*, vol. 141, pp. 247–259, 2015.
- [150] M. Jovanović-Popović *et al.*, “Nacionalna tipologija stambenih zgrada Srbije,” 2013.
- [151] M. M. Perić, M. S. Komatina, D. L. Antonijević, B. M. Bugarski, and Ž. S. Dželetović, “Diesel production by fast pyrolysis of *Miscanthus giganteus*, well-to-pump analysis using the GREET model,” *Therm. Sci.*, pp. 1–16, 2018.
- [152] P. Radić, *Cenovnik Mašinskih Usluga u Poljoprivredi*. Novi Sad: Zadružni savez Vojvodine, 2009.
- [153] P. C. Johnson, C. L. Clementson, S. K. Mathanker, T. E. Grift, and A. C. Hansen, “Cutting energy characteristics of *Miscanthus x giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed,” *Biosyst. Eng.*, vol. 112, no. 1, pp. 42–48, 2012.
- [154] FOEN, “Non road emissions database.” [Online]. Available: <http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/06906/offroad-daten/index.html?lang=en> 2015.
- [155] M. Brkić and T. Janić, “Upotreba biobriketa za zagrevanje objekata u poljoprivredi,” *PTEP - J. Process. energy Agric.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 77–79, 2002.
- [156] V. Zekic, V. Rodic, and M. Jovanovic, “Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, pp. 1789–1795, 2010.
- [157] “ASKET.” [Online]. Available: http://en.asket.pl/biomasser_2duo-set.html.

- [158] B. Schlamadinger *et al.*, “Towards a standard methodology for Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems in comparison with fossil energy systems,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, no. 6, pp. 359–375, 1997.
- [159] B. Glavonjic, D. Jovic, A. Vasiljevic, and R. Kankaras, “Forest and Forest Products Country Profile: Serbia and Montenegro -Generva timber and forest discussion paper 40,” Geneva, Switzerland, 2005.
- [160] S. Mani, L. G. Tabil, and S. Sokhansanj, “Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws , corn stover and switchgrass,” vol. 27, pp. 339–352, 2004.
- [161] “GREET®,” *Argonne National Laboratory, IL, USA*. [Online]. Available: <https://greet.es.anl.gov>.
- [162] “Sea-distances.org.” [Online]. Available: <http://www.sea-distances.org/>.
- [163] G. Doka, “Life Cycle Inventory of the disposal of lignite spoil, coal spoil and coal tailings,” *Ecoinvent*, no. November, pp. 1–29, 2009.
- [164] J. M. Pedraza, *Electrical Energy Generation in Europe- The Current Situation and perspectives in the Use of Renewable Energy Sources and Nuclear Power for Regional Electricity Generation*. Springer, 2015.
- [165] I. Lewandowski and U. Schmidt, “Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 112, pp. 335–346, 2006.
- [166] A. Freibauer, M. D. A. Rounsevell, P. Smith, and J. Verhagen, “Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe,” *Geoderma*, vol. 122, pp. 1–23, 2004.
- [167] P. Smith, “Carbon sequestration in croplands : the potential in Europe and the global context,” *Eur. J. Agron.*, vol. 20, pp. 229–236, 2004.
- [168] Eccep, “European Climate Change Programme (ECCP). Working Group Sinks Related to Agricultural Soils. Final Report,” 2003.

- [169] R. B. Matthews and P. Grogan, "Potential C-sequestration rates under short-rotation coppiced willow and *Miscanthus* biomass crops: a modeling study," *Asp. Appl. Biol.*, vol. 65, pp. 303–312, 2001.
- [170] M. Borzêcka-Walker, A. Faber, and R. Borek, "Evaluation of carbon sequestration in energetic crops (*Miscanthus* and coppice willow)," *Int. Agrophysics*, vol. 22, pp. 185–190, 2008.

8. PRILOZI

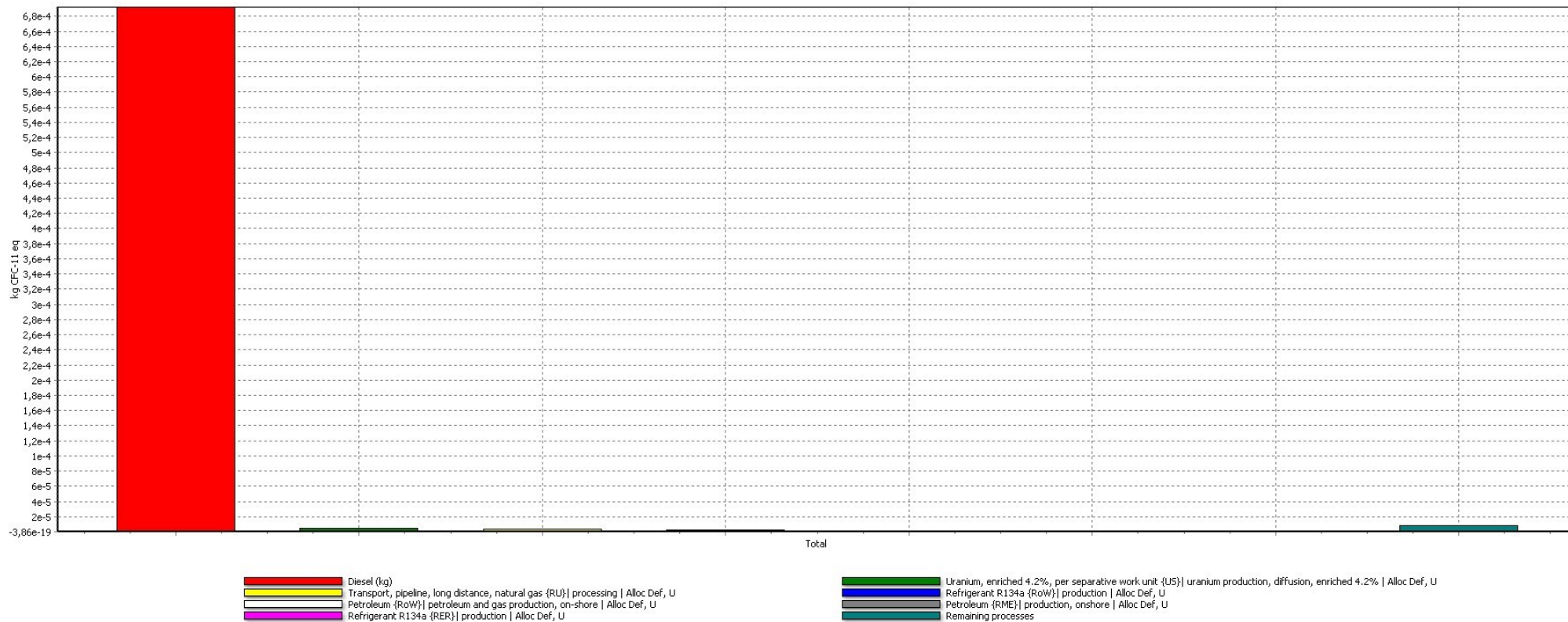


- Electricity, high voltage {RS} | electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Diesel (kg)
- 8.Košenje (Harvesting)
- 9.Baliranje (Baling)
- Ammonia, as 100% NH3 (NPK 82-0-0), at plant/RER Mass
- Electricity, high voltage {RO} | electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Diesel, from crude oil, consumption mix, at refinery, 200 ppm sulphur EU-15 S System - Copied from ELCD
- 7.Navodnjavanje (Irrigation)
- Electricity, high voltage {HU} | electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Electricity, high voltage {BG} | electricity production, hard coal | Alloc Def, U

- 12.Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Mass
- 10ab.Transport, tractor and trailer, agricultural, Alloc Def, U
- Nitric acid, in water (60% HNO3) (NPK 13.2-0-0), at plant/RER Mass
- Electricity, high voltage {BG} | electricity production, lignite | Alloc Def, U
- 5.Sađenje (Planting)
- 2.Oranje (Plowing)
- Process steam from natural gas, heat plant, consumption mix, at plant, M3 EU-27 S System - Copied from ELCD
- Electricity, high voltage {HU} | electricity production, natural gas, at conventional power plant | Alloc Def, U
- 3.Tanjiranje (Disc harrowing)
- 4.Drljanje (Harrowing)

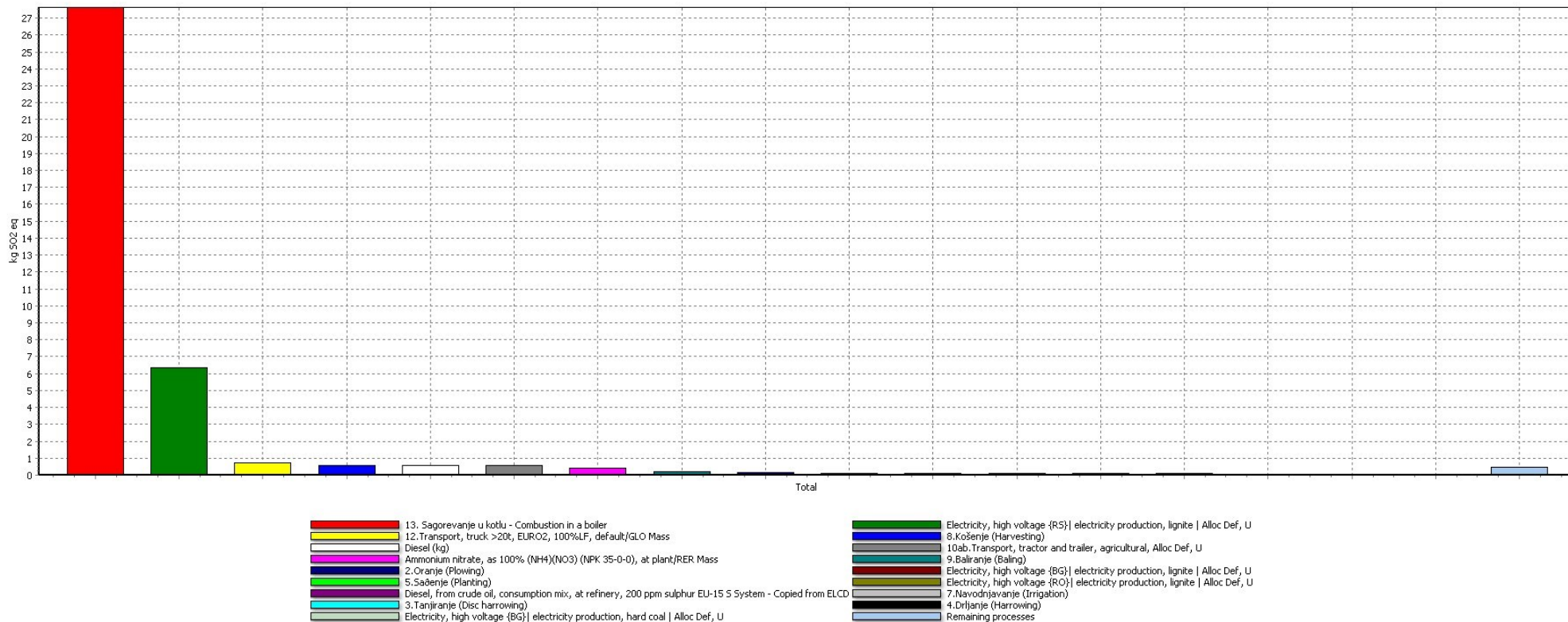
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miskantus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 1. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Klimatske promene* (SimaPRO).



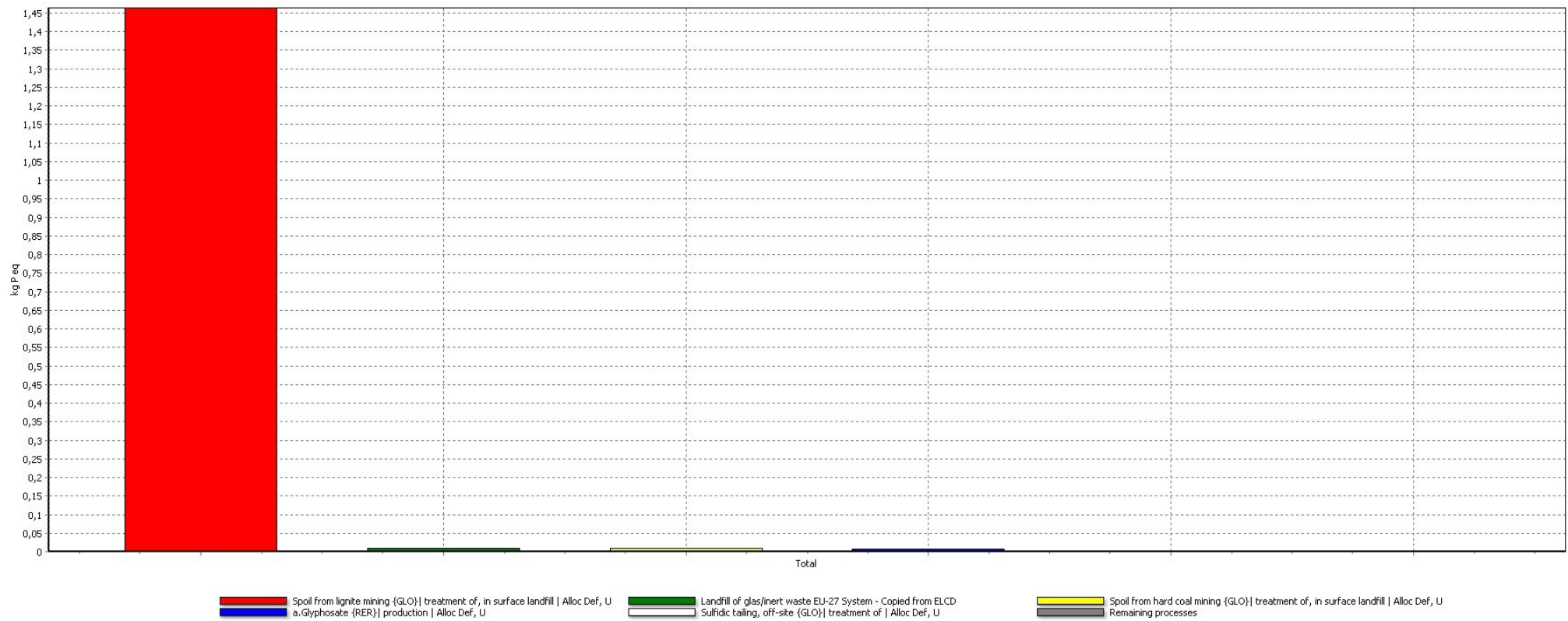
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
Method: ReCiPe Midpoint (h) V1.11 | Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 2. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Oštećivanje ozonskog omotača* (SimaPRO).



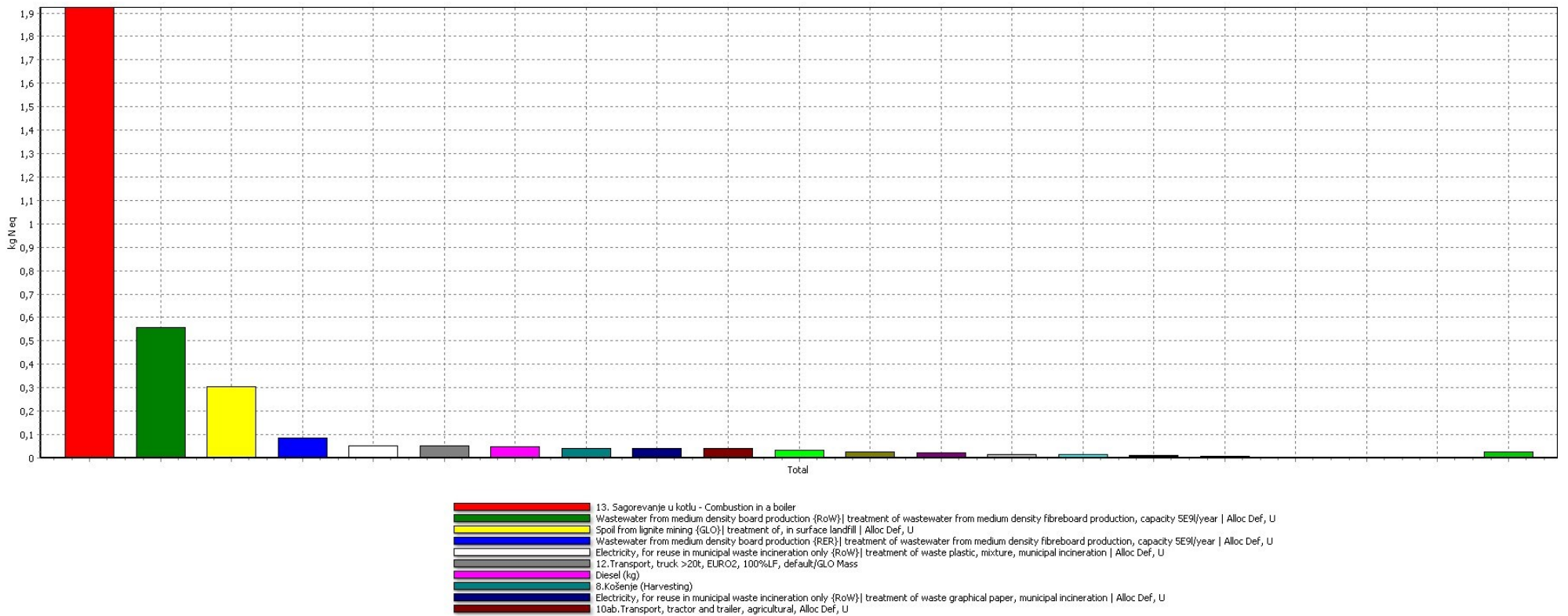
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miskantus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 3. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Zašišeljavanje tla* (SimaPRO).



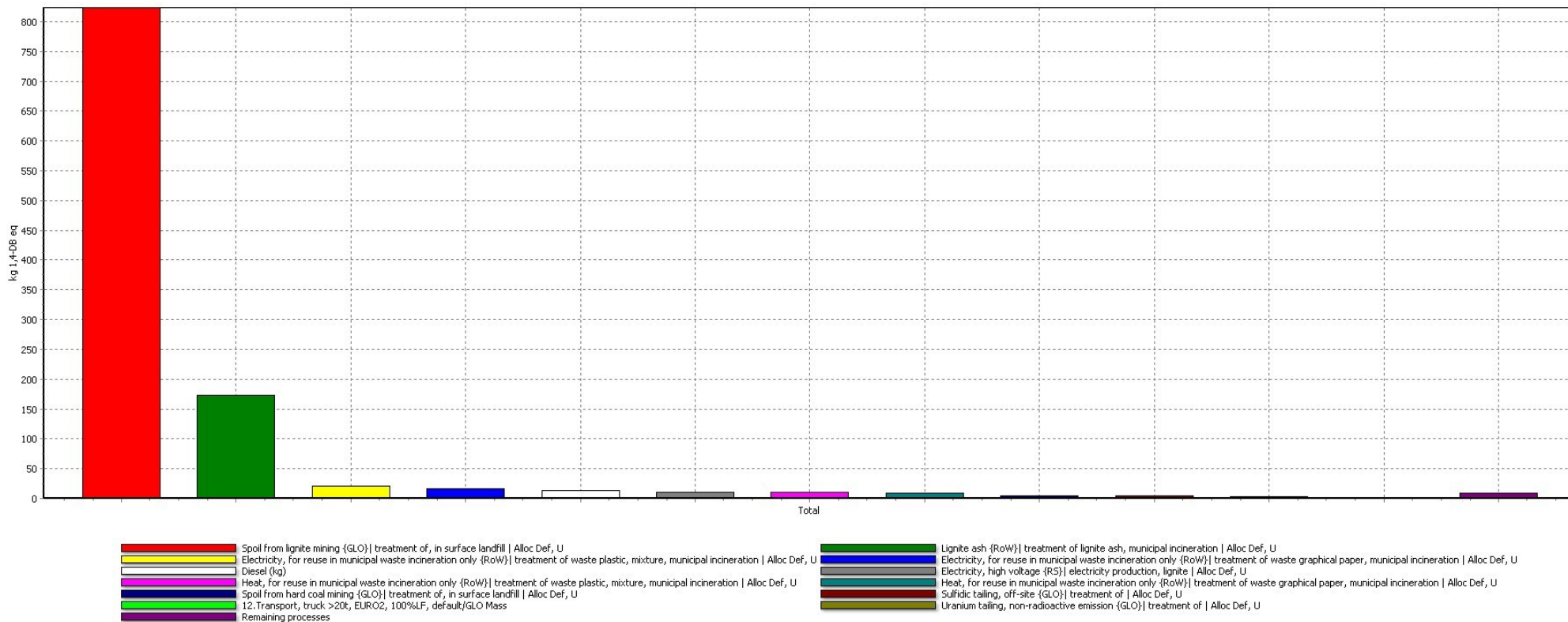
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miskantus':
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 4. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Eutrofikacija slatkovodnih ekosistema* (SimaPRO).



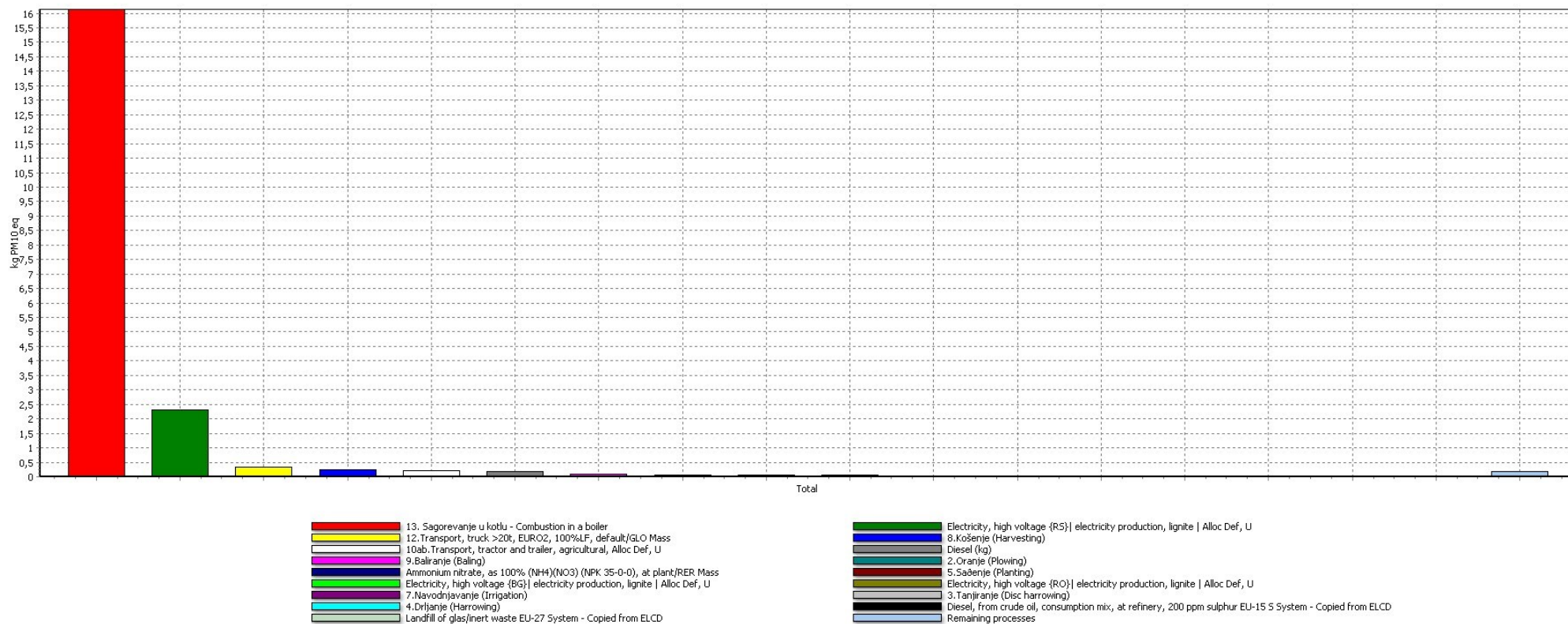
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miskantus';
Method: ReCPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 5. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Eutrofikacija marinskih ekosistema* (SimaPRO).



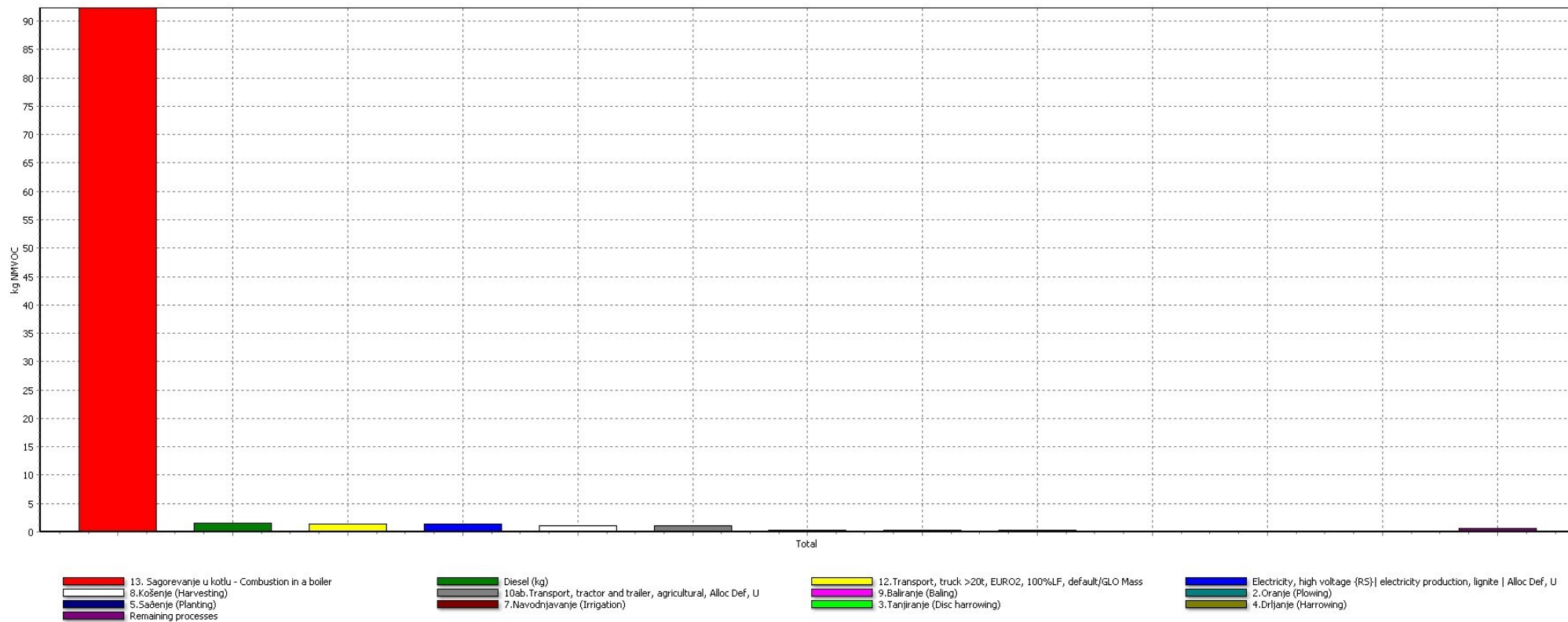
Analyzing 23,5 ton M-LCA Miscanthus;
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 6. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Toksičnost za ljude* (SimaPRO).



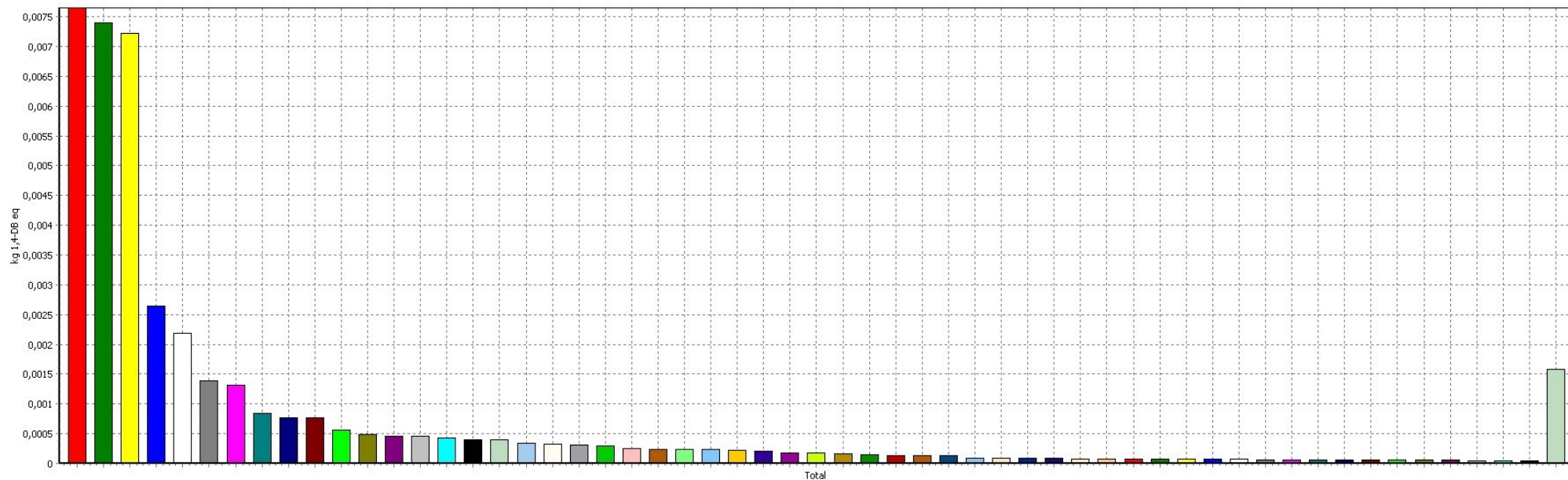
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miskantus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 7. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Formiranje čestica* (SimaPRO).



Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 8. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Formiranje fotohemijskih oksidanata* (SimaPRO).

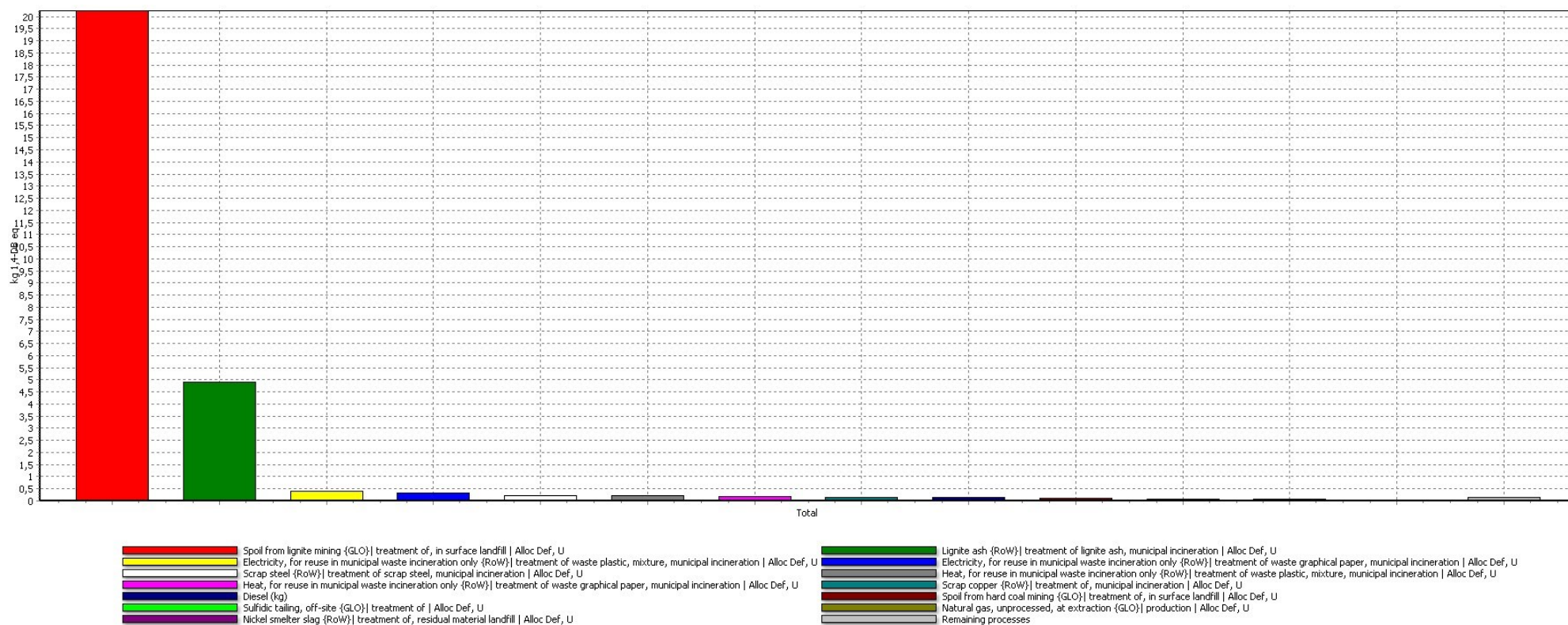


- Diesel (kg)
- 12.Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Mass
- Electricity, for reuse in municipal waste incineration only (GLO) treatment of biowaste, municipal incineration | Alloc Def, U
- a. Glyphosate (RER) production | Alloc Def, U
- Brake wear emissions, lorry (RoW) treatment of | Alloc Def, U
- Palm fruit bunch (MY) production, on land recently transformed | Alloc Def, U
- Electricity, for reuse in municipal waste incineration only (RoW) treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration | Alloc Def, U
- Electricity, high voltage (BG) electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Electricity, high voltage (RO) electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Sugarcane (BR) production, on land recently transformed | Alloc Def, U

- Electricity, high voltage (RS) electricity production, lignite | Alloc Def, U
- Lignite ash (RoW) treatment of lignite ash, municipal incineration | Alloc Def, U
- Heat, for reuse in municipal waste incineration only (GLO) treatment of biowaste, municipal incineration | Alloc Def, U
- Natural gas, unprocessed, at extraction (GLO) production | Alloc Def, U
- Electricity, high voltage (RS) electricity production, oil | Alloc Def, U
- Diesel, from crude oil, consumption mix, at refinery, 200 ppm sulphur EU-15 S System - Copied from ELCD
- Sugarcane (BR) production | Alloc Def, U
- Electricity, high voltage (BG) electricity production, oil | Alloc Def, U
- Electricity, for reuse in municipal waste incineration only (RoW) treatment of waste graphical paper, municipal incineration | Alloc Def, U
- Brake wear emissions, lorry (RER) treatment of | Alloc Def, U

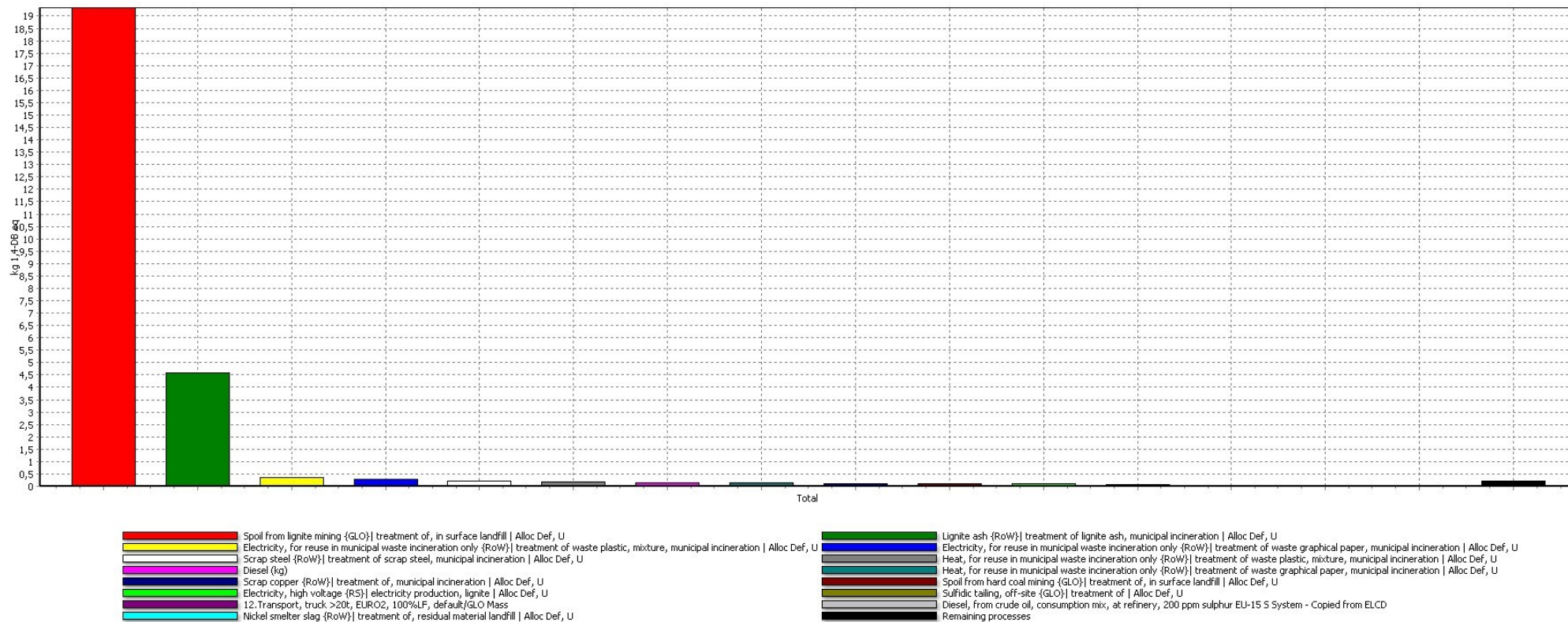
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRIOLOG 9. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Ekotoksičnost kopnenih ekosistema* (SimaPRO).



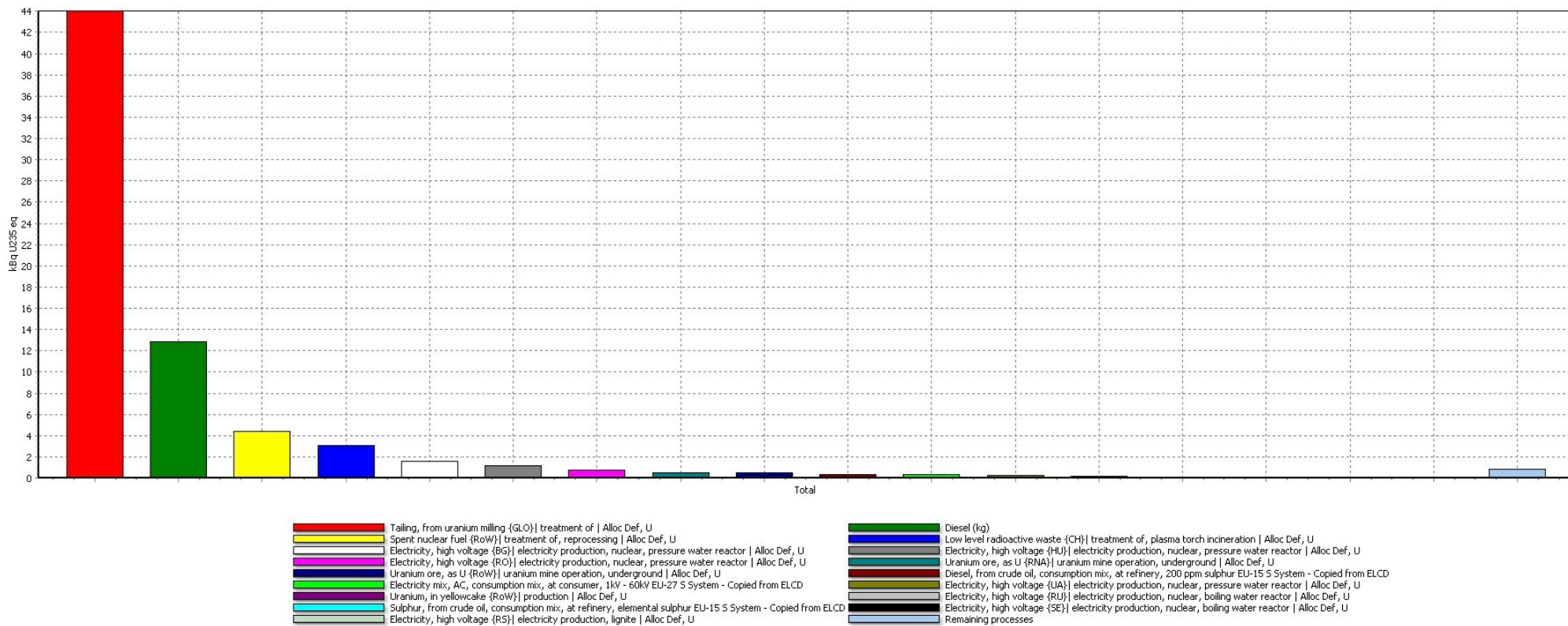
Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
Method: ReCiPe Midpoint (H) v1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 10. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Ekotoksičnost slatkovodnih ekosistema* (SimaPRO).



Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 11. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Ekotoksičnost marinskih ekosistema* (SimaPRO).



Analyzing 23.5 ton 'M-LCA Miscantus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 12. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Zagađenje jonizujućim zračenjem* (SimaPRO).

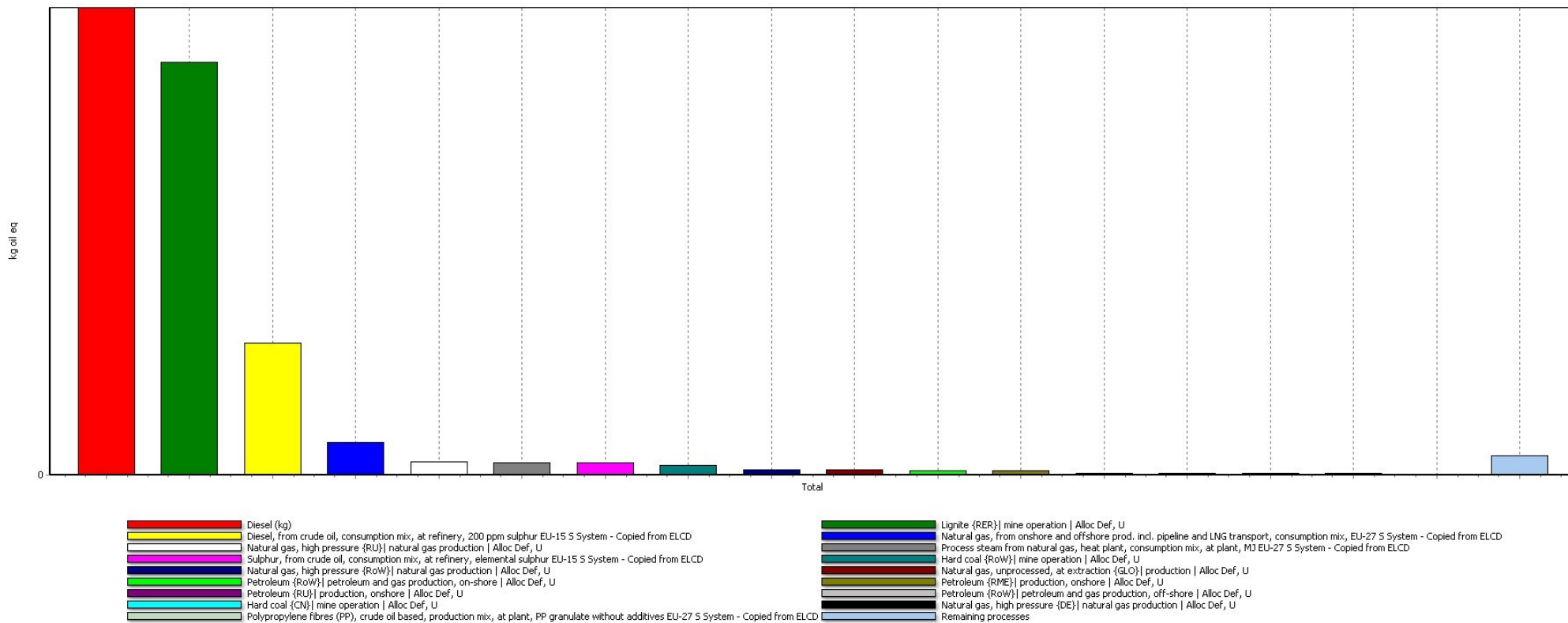


■ 7.Navodnjavanje (Irrigation)
 ■ Electricity, high voltage {RS} electricity production, hydro, reservoir, alpine region | Alloc Def, U
 ■ Electricity, high voltage {RS} electricity production, lignite | Alloc Def, U

■ Electricity, high voltage {RS} electricity production, hydro, pumped storage | Alloc Def, U
 ■ Electricity, high voltage {RS} electricity production, hydro, run-of-river | Alloc Def, U
 ■ Remaining processes

Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
 Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 13. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Iscrpljivanje vodnih rezervi* (SimaPRO).



Analyzing 23,5 ton 'M-LCA Miscanthus';
Method: ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H / Characterization

PRILOG 14. Doprinosi procesa u životnom ciklusu briketa miskantusa u kategoriji *Iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva* (SimaPRO).

Biografija

Milica (Milivoje) Perić je rođena 11. septembra 1981. godine u Beogradu, Republika Srbija, gde je završila osnovnu školu a potom i XIV beogradsku gimnaziju. Školske 2000/2001. godine upisala je osnovne studije na Biološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na smeru Biologija i zaštita životne sredine, i diplomirala je 2008. godine sa prosečnom ocenom 9,00 (devet i 00/100) i ocenom 10 (deset i 00/100) na diplomskom ispitu. Školske 2010/2011. godine upisuje doktorske akademske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na studijskom programu Biohemijsko inženjerstvo i biotehnologija pod rukovodstvom mentora prof. dr Branka Bugarskog, redovnog profesora Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, i prof. dr Mirka Komatine, redovnog profesora Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Od januara 2011. godine zapošljava se u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, kao istraživač-pripravnik, gde je angažovana na projektu „Unapređenje industrijskog postrojenja sa fluidizovanim slojem u okviru razvoja tehnologije za energetski efikasno i ekološki opravdano sagorevanje različitih otpadnih materija u fluidizovanom ložištu“ (evidencioni broj projekta : TR33042). Tokom ovog perioda, boravila je na studijskim usavršavanjima u inostranstvu (Danskoj, Italiji i Nemačkoj) i učestvovala na brojnim seminarima (u Finskoj, Bosni i Hercegovini, Italiji i Irskoj). U zvanje istraživač-saradnik izabrana je 23.06.2016. godine. U zvanje istraživač-saradnik izabrana je 23.06.2016. godine. Univerzitet u Beogradu je na sednici 27.08.2018. godine dao saglasnost na predlog teme doktorske disertacije pod nazivom: „Procena ekološke opravdanosti korišćenja brzorastuće biljke *Miscanthus giganteus* kao obnovljivog izvora energije upotrebom metode Ocene životnog ciklusa“.

Kao prvi autor i koautor objavila je jedan rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21), dva rada istaknutim međunarodnim časopisima (M22), jedan rad u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja (M24), četiri saopštenja sa međunarodnog skupa štampana u celini (M33) i dva saopštenja štampana u izvodu (M34). Kao koautor objavila je i poglavlje u monografiji međunarodnog značaja (M13).

Oblast kojom se kandidatkinja bavi se odnosi na ekološku procenu korišćenja biomase kao obnovljivog izvora energije metodom Ocene životnog ciklusa (LCA). S tim u vezi, 2012, 2013, 2014. godine kandidatkinja je u boravila na stranim Univerzitetima gde se dodatno usavršavala u pomenutoj oblasti:

- April 2012.godine - Faculty for Forestry and Landscape, University of Copenhagen, Copenhagen, Danska (COST Akcija FP0902);
- Februar/mart 2013. godine - University of Milano - Bicocca, Milano, Italija (COST Akcija FP0902);
- Septembar/decembar 2014. godine - Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Nemačka (finansirano od strane DAAD i GIZ).

Pored navedenih studijskih usavršavanja, kandidatkinja je učestvovala na četiri treninga koja su se bavila obnovljivim izvorima energije organizovanih u Finskoj, Bosni i Hercegovini, Italiji i Irskoj:

- 22-26. avgust 2016. godine - COST 1st Training School: "Renewable energy and landscape quality", Dublin Institute of Technology, Dablin, Irska (COST Akcija TU1401).
- 10-15. maj 2015. godine - COST 2nd Training School: "Coppice harvesting and use of products as source of renewable energy", University of Florence, Vallombrosa, Italija (COST Akcija FP1301 - Eurocoppice).
- 21.avgust-1.septembar 2012. godine - Eight International Summer School course „Renewable Energy and Energy Efficiency in South-East Europe“, u organizaciji REIC, GIZ i UNDP, Fojnica, BiH.
- 22-27. maj 2011. godine - Joensuu Forestry Networking Week, Training School in Joensuu, Finska (COST Akcija FP0902).

Tokom ovih boravaka kandidatkinja je stekla korisna znanja, kvalifikacije i sposobnosti za samostalno bavljenje naučno-istraživačkim radom kao i radom u multidisciplinarnom okruženju u institucijama i na univerzitetima u inostranstvu.

Spisak objavljenih i saopštenih naučnih i stručnih radova

1. Poglavlje u monografiji međunarodnog značaja (M13)

1. Hut I., Matija L., **Perić M.**, Nikolovski P., Pelemis S., Nanomaterials for Sustainable Energy Production and Storage: Present day Applications and Possible Developments, In Commercialization of Nanotechnologies - A Case Study Approach, Springer, New York 2018 ISBN: 978-3-319-56978-9, doi: 10.1007/978-3-319-56979-6, pp 31-72.

2. Radovi objavljeni u naučnim časopisima međunarodnog značaja (M20)

2.1. Radovi objavljeni u vrhunskim časopisima međunarodnog značaja (M21)

1. **Perić M.**, Komatina M., Antonijević D., Bugarski B., Dželetović Ž., Life Cycle Impact Assessment of Miscanthus Crop for Sustainable Household Heating in Serbia,” *Forests*, vol. 9, no. 654, DOI: 10.3390/f9100654, pp. 1–26, 2018, IF=1,956.

2.2. Radovi objavljeni u istaknutim časopisima međunarodnog značaja (M22)

1. **Perić M.**, Komatina M., Antonijević D., Bugarski B., Dželetović Ž., “Diesel Production By Fast Pyrolysis of *Miscanthus giganteus*, Well-To-Pump Analysis Using The GREET Model”, *Thermal Science*, 2018, IF=1,431, <https://doi.org/10.2298/TSCII71215113P>.
2. **Perić M.**, Komatina M., Bugarski B., Antonijević D., „Best Practices of Biomass Energy Life Cycle Assessment and Possible Applications in Serbia”, *CROJFE (Croatian Journal of Forest Engineering)*, No.2, Vol 37, 2016, pp.375-390, UDK 630*3, ISSN: 1845-5719, IF=1,415.

2.3. Radovi objavljeni u nacionalnim časopisima međunarodnog značaja (M24)

1. **Perić M.**, Hut I., Pelemis S., Matija L., Possible approaches to LCA methodology for nanomaterials in sustainable energy production, *Contemporary Materials (Renewable energy sources)*, VI-2 (2015), pp. 160-169, UDK 502.174.3:620.92, doi: 10.7251/COMEN1502160P.

3. Zbornici međunarodih naučnih skupova (M30)

3.1. Zbornici skupova međunarodnog značaja štampani u celini (M33)

1. Komatina M., Stupak I, **Perić M.**, “Legal framework for sustainable use of biomass in Serbia and Denmark, 7th Symposium “Recycling technologies and sustainable development” SRTOR, Soko Banja, 2012, pp.547-553, ISBN: 978-86-80987-97-2.
2. Stupak I., Titus B., Clarke N., Smith T., Lazdins A., Varnagiryte-Kabasinskiene I., Armolaitis K., **Perić M.**, Guidi C., “Approaches to soil sustainability in guidelines for forest biomass harvesting and production in forests and plantations”, Conference paper, EUROSIL Congress, Workshop W6.1 Forest bioenergy and soil sustainability, At Bari, Italy, July 2012.
3. **Perić M.**, Milošević M., Hut I., Mitrović N., Jovović A., “Education Of Teachers in the Field Of Environmental Protection And Sustainable Development: Experiences And Guidelines”, IV Regional Conference Industrial Energy And Environmental Protection In South Eastern European Countries, IEEP '13, Divcibare, Serbia, Proceedings (cd-rom), Book Of Abstracts p. 49, ISBN 978-86-7877-023-4 COBISS.SR-ID 199209996, 2013.
4. Bevk T., Mestre Martinez N., Brereton P., Lalošević M., **Perić M.**, “Iterative Digital Photo-based Assessment for Rural Landscape Perception: A Small Experiment from County Wicklow, Ireland”, *Journal of Digital Landscape Architecture*, 2-2017. 18th

Digital Landscape Architecture Conference (2017), ISBN 978-3-87907-629-1, ISSN 2367-4253, doi:10.14627/537629003, pp.18-27.

3.2. Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34)

1. **Perić M.**, Komatina M., Bugarski B., Antonijević D., Dželetović Ž., „Implementation of the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology for the Promotion of Renewable Energy Sources, Climate Change Mitigation and Pollution Prevention“, Humboldt Kolleg 2018, Sustainable Development and Climate Change: Connecting Research, Education, Policy and Practice, Beograd, 19-22.septembar, 2018, p 52.
2. Antonijević D., Jelić I., Petrić I., Zakić D., Savić A., Komatina M., **Perić M.**, Šljivić-Ivanović M., „Energy Efficiency and Sustainability of Biofibres-based Thermal Insulation“, Humboldt Kolleg 2018, Sustainable Development and Climate Change: Connecting Research, Education, Policy and Practice, Beograd, 19-22.septembar, 2018, p 51.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Милица М. Перић

Број индекса: 4036/2017

Изјављујем

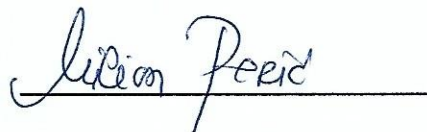
да је докторска дисертација под насловом:

„Процена еколошке оправданости коришћења брзорастуће биљке *Miscanthus giganteus* као обновљивог извора енергије употребом методе Оцене животног циклуса“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 28. јануара 2019.године



Handwritten signature of Milica M. Perić, written in black ink on a horizontal line.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Милица М. Перић

Број индекса: 4036/2017

Студијски програм: Биохемијско инжењерство и биотехнологија

Наслов рада: „Процена еколошке оправданости коришћења брзорастуће биљке *Miscanthus giganteus* као обновљивог извора енергије употребом методе Оцене животног циклуса“

Ментор: Проф. др Бранко Бугарски

Ментор: Проф. др Мирко Коматина

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 28. јануара 2019. године



Handwritten signature of Milica M. Perić in cursive script, written over a horizontal line.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Процена еколошке оправданости коришћења брзорастуће биљке *Miscanthus giganteus* као обновљивог извора енергије употребом методе Оцене животног циклуса“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 28. јануара 2019.године



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.