



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
ИНЖЕЊЕРСТВО ЗАШТИТЕ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

РАЗВОЈ ХИБРИДНОГ МОДЕЛА ЗА ОЦЕЊИВАЊЕ ЖИВОТНОГ ЦИКЛУСА ПРОИЗВОДА И ПРОЦЕСА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор: Проф. др Игор Будак

Кандидат: Бранислав Милановић

Нови Сад, 2016. године

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ**НАЗИВ ФАКУЛТЕТА Факултет техничких наука****KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Branislav Milanović
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Dr Igor Budak, vanredni profesor
Naslov rada: NR	Razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa
Jezik publikacije: JP	Srpski
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2016.
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Fizički opis rada: FO	7 poglavlja / 115 stranica / 27 slika / 23 tabele / 125 referenci / 8 priloga
Naučna oblast: NO	Tehničko-tehnološke nauke

Naučna disciplina: ND	Inženjerstvo zaštite životne sredine
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Ocenjivanje životnog ciklusa, eksergetska analiza, hibridni model, laminatne drvene podne obloge, bazne predajničke stanice
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad
Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IZ	<p>U okviru doktorske disertacije predstavljen je razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa. Razvoj hibridnog modela se ogleda kroz unapređenje postojećeg metodskog okvira LCA, te je stoga uključio razvoj svih faza LCA, a koje obuhvataju definisanje cilja i predmeta, inventar životnog ciklusa, ocenjivanje uticaja životnog ciklusa i interpretaciju rezultata. Najznačajnija unapređenja su sprovedena u okviru faza inventara životnog ciklusa i ocenjivanja uticaja životnog ciklusa. Izmene koje se odnose na način prikupljanja podataka, su razvijene zbog uključivanja parametara potrebnih za izračunavanje vrednosti sadržaja eksergije tokova. Unapređenje faze ocenjivanja uticaja životnog ciklusa se ogleda kroz razvoj originalnog pristupa za izračunavanje ukupne potrošnje eksergije, kroz uključivanje dodatne kategorije uticaja, razvijanje indikatora kategorije uticaja i razvijanje pristupa za izračunavanje karakterizacionih faktora. Sprovedena je i analiza postojećih LCIA metoda, radi izbora adekvatnog metoda u koji će biti uključena dodatna kategorija uticaja, kao i indikator kategorije uticaja, koji zajedno opisuju ukupnu potrošnju eksergije tokom čitavog životnog ciklusa. Takođe, prilikom razvoja kategorije uticaja su poštovani određeni kriterijumi, koje ona mora da zadovolji da bi mogla biti adekvatno uključena u odabrani LCIA metod. Pored toga, bitan deo unapređenja ocenjivanja uticaja životnog ciklusa, leži u razvoju proračuna karakterizacionih faktora. Razvijena dodatna kategorija uticaja nazvana je <i>Ukupna potrošnja eksergije - UPE</i>, a izražava se preko indikatora <i>MJex</i>. LCIA metod koji je odabran na osnovu SWOT analize u koji je ova dodatna kategorija uticaja uključena je CML metod. Postavljeni hibridni metodski okvir posmatra kompletan životni ciklus, ali i svaki od jediničnih procesa koji uključuju elementarne tokove, odnosno tokove uzete iz prirodnog sistema bez dodatne obrade, kao i tokove proizvoda, odnosno tokove</p>

	<p>koji su na neki način izmenjeni od strane pojedinih antropogenih sistema. Izračunavanje sadržaja eksergije i karakterizacionih faktora je sprovedeno kako za elementarne tokove tako i za tokove proizvoda.</p> <p>Funkcionalnost i praktična primenljivost razvijenog hibridnog modela je verifikovana na dva primera, koji su obuhvatili proizvodnju laminatnog parketa i međusobnu komparaciju hibridnih baznih predajničkih stanica i konvencionalnih baznih predajničkih stanica. Dobijeni rezultati daju jednu zaista detaljniju i širu sliku mehanizma nastanka i izvora negativnih uticaja tokom životnog ciklusa posmatranih industrijskih sistema. Time je potvrđena njegovu praktična primenljivost, kao i ukupni cilj istraživanja. Rezultati istraživanja realizovani u okviru doktorske disertacije, u opštem smislu, daju doprinos stvaranju osnove za izradnju puta ka razvoju i proizvodnji održivih proizvoda i procesa. Razvijeni hibridni model za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa pruža dodatne informacije, koje mogu biti korisne u procesu donošenja odluka na svim nivoima, kako u industriji tako i u državnim institucijama.</p>
Datum prihvatanja teme od strane Senata: DP	
Datum odbrane: DO	
Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO	<p>Dr Milan Martinov, redovni profesor, UNO: Inženjerstvo biosistema, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, predsednik</p> <p>Dr Srdan Glišović, vanredni profesor, UNO: Upravljanje kvalitetom radne i životne sredine, Fakultet zaštite na radu u Nišu, član</p> <p>Dr Đorđe Vukelić, vanredni profesor, UNO: Metrologija, kvalitet, pribori, i ekološko inženjerski aspekti, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, član</p> <p>Dr Ferenc Kiš, naučni saradnik, UNO: Menadžment i biznis, Tehnološki fakultet u Novom Sadu, član</p> <p>Dr Igor Budak, vanredni profesor, UNO: Metrologija, kvalitet, pribori, i ekološko inženjerski aspekti, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, mentor</p>

University of Novi Sad
Faculty of Technical Sciences
Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD Thesis
Author: AU	Branislav Milanović
Mentor: MN	Dr Igor Budak, associate professor
Title: TI	Development of the hybrid model for life cycle assessment of products and processes
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2016
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description: PD	7 chapters / 115 pages / 27 figures / 23 tables / 125 references / 8 appendixes
Scientific field SF	Technical-technological Sciences
Scientific discipline SD	Environmental engineering

Subject, Key words SKW	Life cycle assessment, exergy analysis, hzbrid model, laminated wood floorings, base transceiver stations
UC	
Holding data: HD	Library of Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad
Note: N	None
Abstract: AB	<p>This PhD thesis presented the development of a hybrid model for life cycle assessment of products and processes. The development of a hybrid model includes the improvement of the existing methodological LCA framework, and therefore of all phases of the LCA: definition of goal and scope, inventory analysis, life cycle impact assessment and interpretation. The most significant improvements have been made within the inventory analysis and life cycle impact assessment phases. Improvement have been made in relation to the method of data collection, due to the inclusion of parameters for calculation of the exergy content of in- and output flows. Improvement of the life cycle impact assessment phase is reflected through the development of original approach for calculating the total consumption of exergy, through the inclusion of additional impact category, development of indicator for impact category and development of method for calculation of characterization factors. The analysis of existing LCIA methods was performed, in order to choose the appropriate method that will incorporate this additional impact category, as well as an impact category indicator, which together should describe the total consumption of exergy throughout the entire life cycle. Further, development of this impact category have been complied with certain criteria which it must meet in order to be properly incorporated in the chosen LCIA method. Besides this, an important part of improvement of the life cycle impact assessment is the development of method for calculation of characterization factors. Developed additional impact category is named <i>Total exergy consumption</i>, and it's expressed through indicator of <i>MJex</i>. LCIA method that is chosen based on the performed SWOT analysis and which incorporated this additional impact category is CML method. Developed hybrid methodological framework takes into account the entire life cycle, and each of the unit processes that involves elementary flows (flows taken from the natural system without any further processing), as well as product flows</p>

	<p>(flows that are in some way altered by certain anthropogenic system). Calculation of exergy and characterization factors was performed for both elementary and product flows.</p> <p>Functionality and practical applicability of the developed hybrid model was verified through two case studies, which are the production of laminate parquet flooring and comparison of hybrid base transceiver stations and conventional base transceiver stations. The obtained results provided more detailed and more broader insight of the mechanism of the generation and source of negative impacts throughout the life cycle of observed industrial systems. Thus, the practical applicability of the developed hybrid model and goal of the research have been confirmed. The results of the research contribute to creation of the foundation for designing a path towards development and manufacturing of sustainable products and processes. The developed hybrid model for the life cycle assessment of products and processes provides additional information that may be useful in decision-making process at all levels, within both industry and government institutions.</p>
Accepted on Senate on: AS	
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>Dr Milan Martinov, Full Professor, Scientific field: Bio-System Engineering, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, president</p> <p>Dr Srdan Glišović, Associate Professor, Scientific field: Management of working and living environment quality, Faculty of Occupational Safety, Niš, member</p> <p>Dr Đorđe Vukelić, Associate Professor, Scientific field: Metrology, quality, fixtures and ecological-engineering aspects, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, member</p> <p>Dr Ferenc Kiss, Research Associate, Scientific field: Management and business, Faculty of Technology, Novi Sad, member</p> <p>Dr Igor Budak, Associate Professor, Scientific field: Metrology, quality, fixtures and ecological-engineering aspects, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, mentor</p>

ZAHVALNICA

Prvenstveno, želim da se zahvalim svom mentoru vanr. prof. dr Igoru Budaku, na podršci i strpljenju tokom pisanja disertacije, kao i na svim konstruktivnim kritikama, smernicama i savetima koji su doprineli da ova disertacija dobije sadašnji oblik. Osim toga, na svim naporima ulozenim u recenziju i ispravljanje rukopisa, koji su učinili da disertacija postane čitljivija i razumljivija.

Želeo bih da se posebno zahvalim dr Ferencu Kišu, sa Tehnološkog fakulteta, koji je svojim savetima i predlozima, kao i diskusijama doprineo rešavanju, na prvi pogled, bezizlaznih situacija, i time vraćao ovo istraživanje na pravi put. Takođe bih želeo da se zahvalim mom prijatelju i saborcu iz kancelarije, Darku Milankoviću, koji je glavni "krivac" za početak ovog istraživačkog putovanja. Bilo je to zanimljivo putovanje. Pored toga, želeo bih i da se zahvalim svim kolegama i prijateljima sa Katedre za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko-inženjerske aspekte, sa Fakulteta tehničkih nauka, na stvaranju odlične timske atmosfere. Na kraju, želeo bih da spomenem i prof. dr Janka Hodoliča, koji, nažalost, više nije sa nama, a koji je doprineo stvaranju uslova za početak istraživanja.

Posebno bih želeo da se zahvalim i svim dragim prijateljima, koji su direktno ili indirektno doprineli mojoj doktorskoj disertaciji.

Rad na ovom istraživanju i ovoj disertaciji je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz moje stipendiranje tokom doktorskih studija.

Na kraju, ipak najvažniju zahvalnost dugujem članovima svoje porodice, koji su i najviše doprineli ovoj disertaciji, kroz безусловnu podršku, razumevanje i strpljenje koje su mi davali tokom ovog putovanja, koje je za mene bilo sve, samo ne jednostavno, ali je na kraju ipak dobilo svoj uspešan epilog.

Ovu doktorsku disertaciju posvećujem svojoj sestričini Mili, koja mi je bila najveća motivacija kad mi je najviše trebala, i koja mi je pokazala da nakon svake noći ipak svane Sunce.

Hvala.

Branislav Milanović

Sadržaj

PREGLED SLIKA	III
PREGLED TABELA	IV
PREGLED SKRAĆENICA	V
1. UVOD	1
1.1 Problem istraživanja	2
1.2 Pregled stanja u oblasti istraživanja.....	3
1.2.1 Ocenjivanje životnog ciklusa – LCA.....	3
1.2.2 Eksergetska analiza.....	6
1.3 Cilj i hipoteze istraživanja	8
1.4 Struktura doktorske disertacije	9
2. ANALIZA MOGUĆNOSTI INTEGRACIJE EKSERGETSKE ANALIZE U OKVIR OCENJIVANJA ŽIVOTNOG CIKLUSA.....	10
2.1 Materijal i metodi.....	10
2.2 Analiza LCA sa aspekta mogućnosti integracije sa eksergetskom analizom	10
2.2.1 Analiza prednosti i nedostataka LCA metoda	10
2.2.2 Analiza oblasti primene LCA	12
2.3 Analiza eksergetske analize sa aspekta mogućnosti integracije u okvir LCA.....	13
2.3.1 Analiza prednosti i nedostataka eksergetske analize	13
2.3.2 Analiza oblasti primene eksergetske analize	16
2.4 Opravdanost integracije LCA i eksergetske analize	18
2.5 Dosadašnji pristupi u oblasti integrisanja LCA i eksergetske analize	19
2.6 Integracija eksergije u LCA baze podataka	21
3. RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA PROIZVODA I PROCESA.....	23
3.1 Materijal i metodi.....	23
3.2 Definisane cilja i predmeta hibridnog modela.....	23
3.3 Inventar životnog ciklusa hibridnog modela.....	27
3.3.1 Izračunavanje sadržaja eksergije za potrebe inventara životnog ciklusa hibridnog modela.....	30
3.3.2 Prilagođavanje eksergetskog proračuna hibridnom modelu.....	32
3.3.3 Vrste gubitaka eksergije	33
3.4 Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa hibridnog modela.....	34
3.4.1 Osnove za razvoj LCIA modula hibridnog modela.....	35

3.4.2	Razvoj i uvođenje nove kategorije uticaja.....	37
3.4.3	Razvoj karakterizacionog modela	37
3.5	Interpretacija rezultata hibridnog modela	41
4.	VERIFIKACIJA FUNKCIONALNOSTI I PRAKTIČNE PRIMENLJIVOSTI RAZVIJENOG HIBRIDNOG MODELA NA REALNIM INDUSTRIJSKIM PRIMERIMA.....	43
4.1	Materijal i metodi	43
4.2	Studija slučaja ocenjivanja životnog ciklusa laminatnog parketa	43
4.2.1	Definisanje cilja i predmeta	44
4.2.2	Analiza inventara životnog ciklusa.....	47
4.2.3	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa.....	57
4.2.4	Rezultati i diskusija	57
4.2.5	Zaključak	60
4.3	Studija slučaja komparativnog ocenjivanja baznih predajničkih stanica.....	62
4.3.1	Definisanje cilja i predmeta	63
4.3.2	Analiza inventara životnog ciklusa.....	67
4.3.3	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa.....	72
4.3.4	Rezultati i diskusija	72
4.3.5	Zaključak	80
5.	DISKUSIJA.....	82
6.	ZAKLJUČCI.....	85
6.1	Doprinosi realizovanih istraživanja	85
6.2	Pravci daljih istraživanja.....	87
7.	LITERATURA	88
PRILOZI	95

Pregled slika

Slika 1.1 Životni ciklus proizvoda.....	4
Slika 1.2 Primer sistema proizvoda u LCA	5
Slika 1.3 Faze LCA	6
Slika 1.4 Analiza toka energije i eksergije kroz sistem.....	7
Slika 1.5 Sistem (S) u interakciji sa okolinom (O).....	8
Slika 2.1 Odnos između eksergije i održivosti	14
Slika 2.2 Eksergetske metode primenjene na industrijski sistem i životni ciklus proizvoda	17
Slika 3.1 Šematski prikaz procedure i obaveznih elemenata definisanja cilja i predmeta hibridnog modela.....	24
Slika 3.2 Postupak analize inventara životnog ciklusa.....	28
Slika 3.3 Tri standardne referentne okoline sa svojim referentnim supstancama	32
Slika 3.4 Obavezni i izborni elementi u okviru LCIA faze.....	34
Slika 3.5 Šematski prikaz strukture LCIA modula hibridnog modela	35
Slika 3.6 Šematski prikaz strukture interpretacije rezultata hibridnog modela.....	42
Slika 4.1 Šematski prikaz laminatnog parketa.....	45
Slika 4.2 Dijagram toka laminatnog parketa	46
Slika 4.3 Tokovi u okviru faza seče drveta u šumi i obrade drveta u pilani	48
Slika 4.4 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa (gate-to-gate).....	52
Slika 4.5 Tokovi u okviru faza instalacije, upotrebe i konačnog odlaganja.....	55
Slika 4.6 Rezultat indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa laminatnog parketa	58
Slika 4.7 Rezultat indikatora kategorija uticaja faze proizvodnje (sa jediničnim procesima) laminatnog parketa po kategorijama uticaja.....	60
Slika 4.8 Šematski prikaz osnovnih delova BPS i HBPS sistema.....	64
Slika 4.9 Rezultati komparativne analize BPS i HBPS sistema po kategorijama uticaja ...	73
Slika 4.10 Rezultati analize BPS sistema po fazama životnog ciklusa	74
Slika 4.11 Rezultati analize HBPS sistema po fazama životnog ciklusa	76
Slika 4.12 Rezultati komparativne analize BPS i HBPS sistema bez faze upotrebe.....	77
Slika 4.13 Analiza osetljivosti poređenja različitih scenarija po kategorijama uticaja središnjeg nivoa za BPS sistem	79
Slika 4.14 Analiza osetljivosti poređenja različitih scenarija po kategorijama uticaja središnjeg nivoa za HBPS sistem	79

Pregled tabela

Tabela 1.1 Energija i eksergija	6
Tabela 2.1 Pregled pristupa integracije LCA i eksergije u literaturi	21
Tabela 3.1 LCI modul razvijen za potrebe hibridnog modela	29
Tabela 3.2 Različiti energetske tokovi i njihov sadržaj eksergije	31
Tabela 3.3 Pokrivene kategorije uticaja u okviru CML metoda.....	36
Tabela 4.1 Tokovi u okviru faze seča drveta iz šume i njihov ukupan sadržaj eksergije....	49
Tabela 4.2 Tokovi u okviru faze obrade drveta u pilani i njihov ukupan sadržaj eksergije	50
Tabela 4.3 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa i njihov ukupan sadržaj eksergije.....	53
Tabela 4.4 Tokovi u okviru faze instalacije i njihov ukupan sadržaj eksergije.....	55
Tabela 4.5 Tokovi u okviru faze upotrebe i i njihov ukupan sadržaj eksergije.....	56
Tabela 4.6 Tokovi u okviru faze kraja životnog veka i i njihov ukupan sadržaj eksergije .	56
Tabela 4.7 Rezultat indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa laminatnog parketa	57
Tabela 4.8 Rezultat indikatora kategorija uticaja faze proizvodnje (sa jediničnim procesima) laminatnog parketa po kategorijama uticaja	59
Tabela 4.9 Specifikacija opreme i ostalih materijala i procesa za HBPS i BPS sistem	65
Tabela 4.10 Proračun funkcionalne jedinice	66
Tabela 4.11 Proračun potrošnje električne energije u fazi upotrebe na osnovu pretpostavki	67
Tabela 4.12 Tokovi potrebni za dobijanje telekomunikacionu opremu i njihov ukupan sadržaj eksergije	68
Tabela 4.13 Tokovi potrebni za dobijanje pomoćnih delova i opreme i njihov ukupan sadržaj eksergije	69
Tabela 4.14 Tokovi potrebni za dobijanje opreme za napajanje i njihov ukupan sadržaj eksergije.....	70
Tabela 4.15 Tokovi potrebni za fazu instalacije i njihov ukupan sadržaj eksergije	70
Tabela 4.16 Pregled potrošnje električne energije u fazi upotrebe.....	71
Tabela 4.17 Rezultat indikatora kategorija uticaja BPS i HBPS sistema.....	72
Tabela 4.18 Rezultati indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa BPS sistema	74
Tabela 4.19 Rezultati indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa HBPS sistema	75
Tabela 4.20 Rezultat indikatora kategorija uticaja BPS i HBPS sistema bez faze upotreb	77

Pregled skraćenica

CExC	Cumulative Exergy Consumption
CExD	Cumulative Exergy Demand
BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability
BPS	Bazna predajnička stanica
CC	Climate change (Impact category)
CML	Institute of Environmental Sciences of Leiden University
EEA	Extended Exergy Accounting
ELCA	Exergetic Life Cycle Assessment
EPD	Environmental product declaration
FJ	Funkcionalna jedinica
GHG	Greenhouse gases
GSMA	Groupe Speciale Mobile Association
GWP	Global warming potential
HBPS	Hibridna bazna predajnička stanica
IFIAS	International Federation of Institutes for Advanced Study
IKU	Indikator kategorije uticaja
ISES	International Solar Energy Society
ISO	International Organization for Standardization
KF	Karakterizacioni faktor
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
NIST	The National Institute of Standards and Technology
PCR	Product category rules
PV	Photovoltaic
PVC	Polyvinyl chloride
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
RI	Rezultat toka iz inventara životnog ciklusa
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SWOT	Strengths, weaknesses, opportunities and threats
VOC	Volatile organic compounds

1. UVOD

Tokom 70-tih godina prošlog veka budi se svest o znatnoj potrošnji prirodnih resursa koja će potencijalno dovesti do iscrpljivanja istih u budućnosti. Kasnije, zagađenje nastalo njihovom znatnom potrošnjom je postalo veliki problem čovečanstva. Kao rešenje ovoga problema uvodi se koncept održivog razvoja. On je definisan od strane komiteta Ujedinjenih nacija kao „razvoj koji osigurava potrebe sadašnjih generacija, bez ugrožavanja *sposobnosti* budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“ (Brundtland i dr., 1987).

Danas, značaj zaštite životne sredine postaje sve aktuelniji u svim sferama ljudskog društva. Ljudima, kao i svim drugim organizmima, potrebni su energija i materijali (hrana) da bi se održali, a kao rezultat tehnološkog napretka i visokog standarda života ove potrebe su se povećale eksponencijalno. Tako je uočeno da čovek više „troši“ životnu sredinu nego što ona može da se obnovi. Ova činjenica ukazuje na to da će buduće generacije ostati bez osnovnih uslova za život, čistog vazduha, pijaće vode i ostalih prirodnih resursa. Zbog svega ovoga, počelo se sa istraživanjima u oblasti zaštite životne sredine, o tome kako sačuvati životnu sredinu bez gubitka standarda (Milanović, 2009).

Industrijska društva sve više prepoznaju potrebu prelaska na aktivnosti koje su više osveščene zaštitom životne sredine. Takve promene, nisu samo neophodne za sprečavanje negativnih socijalnih i ekoloških uticaja, već i za obezbeđivanje dugoročnog opstanka društva u celini. Iako industrija daje mogućnosti za ekonomski razvoj, ona je, takođe, tradicionalno bila jedna od problematičnijih oblasti sa aspekta životne sredine. U njoj se koriste tehnološki procesi koji imaju brojne štetne emisije (emisije gasova u atmosferu, ulja i emulzije koja dospevaju u vodu i zemljište, itd.), zatim uređaji koji se koriste u tehnološkim procesima proizvode buku, vibracije i elektromagnetno zračenje, itd. Proizvodi nastali u industrijskim procesima predstavljaju izazov za životnu sredinu, jer se većinom proizvode od neobnovljivih resursa, a otpad nastao tokom njihove proizvodnje se dugo razlaže. Vremenom su stvari počele da se menjaju i industrija se ne posmatra više kao izolovan sistem, već sistem koji je u vezi sa ekosistemom i biosferom uopšteno, tako da industrija postaje jedan od važnijih činilaca u zaštiti životne sredine. Sagledano sa druge strane, cene samih proizvoda su manje, ali su troškovi uništavanja otpada i drugi troškovi zaštite životne sredine znatno porasli. Shodno tome, zahtevi korisnika za materijalnim dobrima, posebno u visoko razvijenim zemljama, sve više se baziraju na zahtevima ka očuvanju životne sredine. Proizvodnja savremenih proizvoda koji zadovoljavaju oštre zahteve zaštite životne sredine je vrlo skupa, izuzetno kompleksna i ne može se rešiti samo tehnološki, te zahteva potpuno novi pristup u planiranju, radu, održavanju i upravljanju. U početku je zaštita životne sredine uzimana u obzir samo u okviru dodatnih, krajnjih tehnologija („end of pipe“). Ubrzo je uočeno da ovaj pristup ne daje zadovoljavajuće rezultate, a pri tom iziskuje velika ulaganja. Vremenom je sve više rasla potreba za uvođenjem preventivnog pristupa, u kome bi se tehnološkim i organizacionim merama preduhitriilo zagađenje životne sredine (Finnveden i Moberg 2005; Hodolič i dr., 2003; Hodolič i dr., 2013).

Razvijeni i primenjeni alati za sprovođenje preventivnog pristupa u okviru proizvodnih sistema su ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa (LCA) i eksergetska analiza. Ovi alati su se pokazali efikasnim u identifikaciji ključnih problema zagađenja životne

sredine od strane proizvodnih sistema, a potom i u otklanjanju istih. Iako ovi alati, ponaosob, posmatraju proizvodni sistem iz drugačijeg aspekta, njihova integracija i razvoj hibridnog modela omogućava dobijanje efikasnijeg pristupa za dizajniranje i razvoj održivih proizvodnih sistema.

1.1 Problem istraživanja

Predviđanjem porasta svetske populacije sa 7 milijardi u 2015. god. na 9,7 milijardi do 2050. god.¹, predviđa se i porast potrošnje prirodnih resursa. Smanjivanje neobnovljivih resursa i kvantifikacija tog uticaja na ekosistem je zaokupirala pažnju naučne zajednice. Povećanje potrošnje prirodnih resursa uglavnom je vezano za razvoj industrijskih sistema. Sa ciljem unapređenja sadašnjih industrijskih sistema u skladu sa postulatom održivog razvoja, razvijen je čitav spektar analitičkih alata za istraživanje i razvoj radi prevazilaženja postavljenih izazova i pronalaženja potencijalnih unapređenja.

Ocenjivanje životnog ciklusa (*eng. Life Cycle Assessment - LCA*) je revolucionaran analitički i sistematični alat koji služi za ocenjivanje negativnih uticaja na životnu sredinu od strane nekog proizvoda ili procesa tokom celokupnog životnog ciklusa. Uvodeći ideju „od koevke do groba” (tj. aktivnosti od ekstrakcije resursa, preko proizvodnje, distribucije, upotrebe do konačnog odlaganja, odnosno kraja životnog veka) u analizu određenih proizvoda, LCA omogućava identifikaciju potencijalnih negativnih uticaja na životnu sredinu i ključnih problema vezanih za određeni proizvod ili proces, i to pomoću:

- sakupljanja i sastavljanja inventara životnog ciklusa kojeg sačinjavaju svi relevantni energetske i materijalni ulazi i izlazi u okviru granica posmatranog sistema;
- ocenjivanja potencijalnih uticaja na životnu sredinu koji su povezani sa utvrđenim ulazima i izlazima iz prethodnog koraka;
- interpretacije dobijenih rezultata u cilju unapređenja procesa donošenja odluka.

LCA je jedinstven i sveobuhvatan alat i kao takav predstavlja značajan doprinos boljem informisanju u okviru procesa donošenja odluka, te stoga je neophodno njegovo uključivanje među ostale kriterijume važne za donošenje odgovarajuće odluke (SRPS ISO 14040:2008; U.S. EPA, 2006). LCA alat će detaljnije biti predstavljen u okviru poglavlja 1.2.1.

Drugi značajan alat u oblasti održivog razvoja je eksergetska analiza (*eng. Exergy analysis*). Ova metoda se koristi za istraživanje neefikasnosti procesa i zato je relevantna za otkrivanje potencijalnih poboljšanja u okviru industrijskih sistema (Szargut, 2005). Eksergetska analiza je zasnovana na eksergiji, koja opisuje „kvalitet” energije koji se degradira tokom proizvodnih puteva, odnosno eksergija predstavlja deo energije koji je raspoloživ za upotrebu. Ona se gubi ili troši u svim procesima, što je čini glavnim resursom za funkcionisanje svih sistema. Eksergija nekog sistema predstavlja maksimalni korisni rad koji se može postići tokom određenog procesa, dok se posmatrani sistem dovodi u ravnotežu sa svojom okolinom. Da bi se projektovao efikasniji proces ili sistem, degradacija ili gubitak eksergije mora biti sveden na najmanju moguću meru (Dincer i Rosen, 2007). Eksergetska analiza će detaljnije biti predstavljena u okviru poglavlja 1.2.2. Svaki od ovih alata pristupa zajedničkom „problemu“ iz specifičnog ugla. Zajednički problem se odnosi na unapređenje industrijskih sistema u cilju smanjenja njihovog uticaja

¹ United Nations, World population prospects, The 2015 Revision.
http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf

na životnu sredinu. Cilj primene LCA metode i eksergetske analize je stvaranje procesa koju su u skladu sa postulatima održivog razvoja. Dok se LCA fokusira na ocenjivanje negativnih uticaja na životnu sredinu sa aspekta životnog ciklusa, eksergetska analiza obraća pažnju na neefikasnosti u okviru procesa ili sistema sa aspekta njegove optimizacije u energetske smislu.

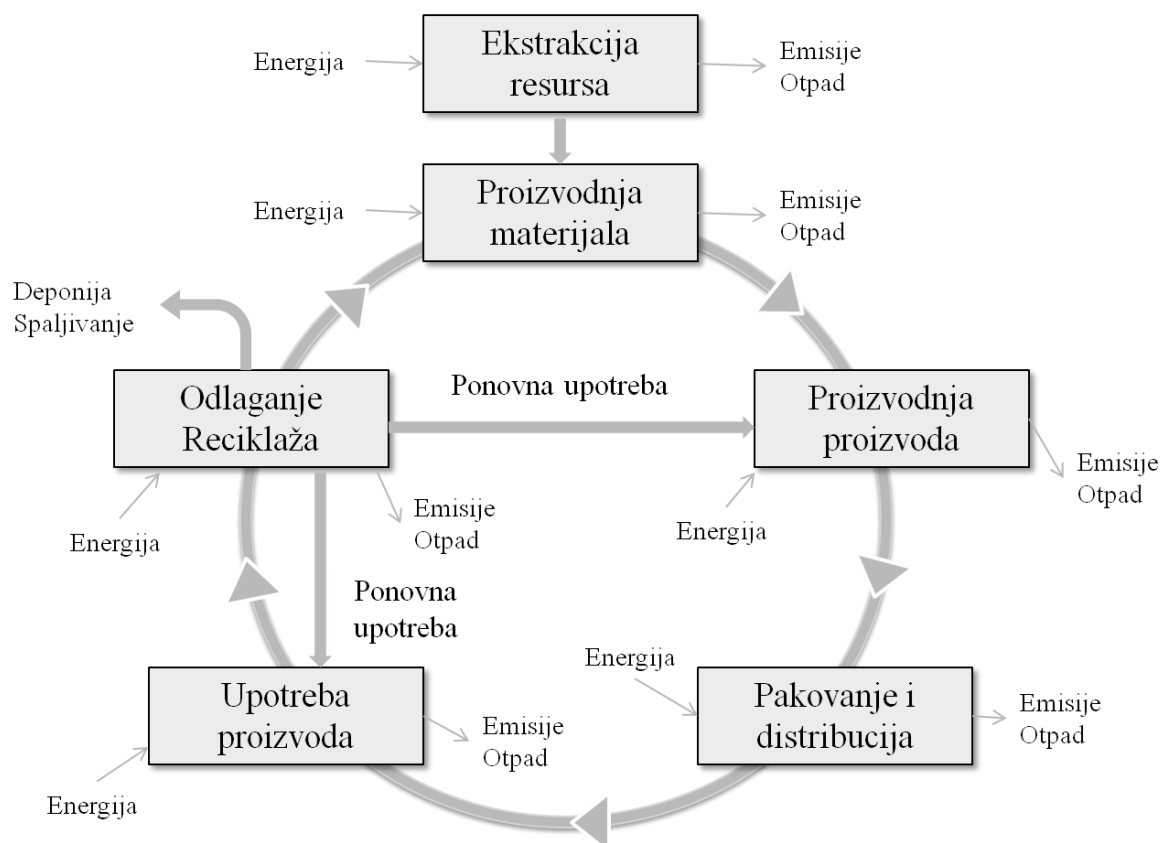
1.2 Pregled stanja u oblasti istraživanja

1.2.1 Ocenjivanje životnog ciklusa – LCA

LCA je metod za analizu i kvantifikaciju mogućih uticaja proizvoda na životnu sredinu, tokom celokupnog životnog veka proizvoda, odnosno od ekstrakcije sirovina, preko proizvodnje, upotrebe i postupanja na kraju životnog veka proizvoda, recikliranja i konačnog odlaganja (SRPS ISO 14040:2008).

Upotreba LCA metoda datira još od 1963. god., iako je u početku nazivana različitim imenima, kao što su: Energy Analysis, Product Ecobalances, Resource and Environmental Profile Analysis (REPA), Integral Environmental Analysis, Environmental Profiles, Product Line Analysis, and Integrated Chain Management. Iako postoje različita tumačenja oko početka primene LCA, postoji opšta saglasnost da je prva urađena LCA studija, ona koju je sprovedla kompanija „Coca-Cola“ 1969. god. u SAD-u. Ovom studijom su istražene alternativne opcije za pakovanje napitaka. Istraživanje je obuhvatilo potrošnju energije i materijala i posledice po životnu sredinu i nazvano je REPA. Otprilike u isto vreme, slične studije, vođene problemima u vezi sa potrošnjom energije i nastankom otpada kod pakovanja, su izvršene u Evropi (Švedska, Engleska i Nemačka). Prve LCA studije su većinom bile usmerene na materijale korišćene kod pakovanja proizvoda. Naftna kriza 1973. god. dalje podstiče razvoj LCA šireći interes na detaljnu energetske analizu (Curran, 1996; Guinée, 2002; Baumann i Tillman, 2004).

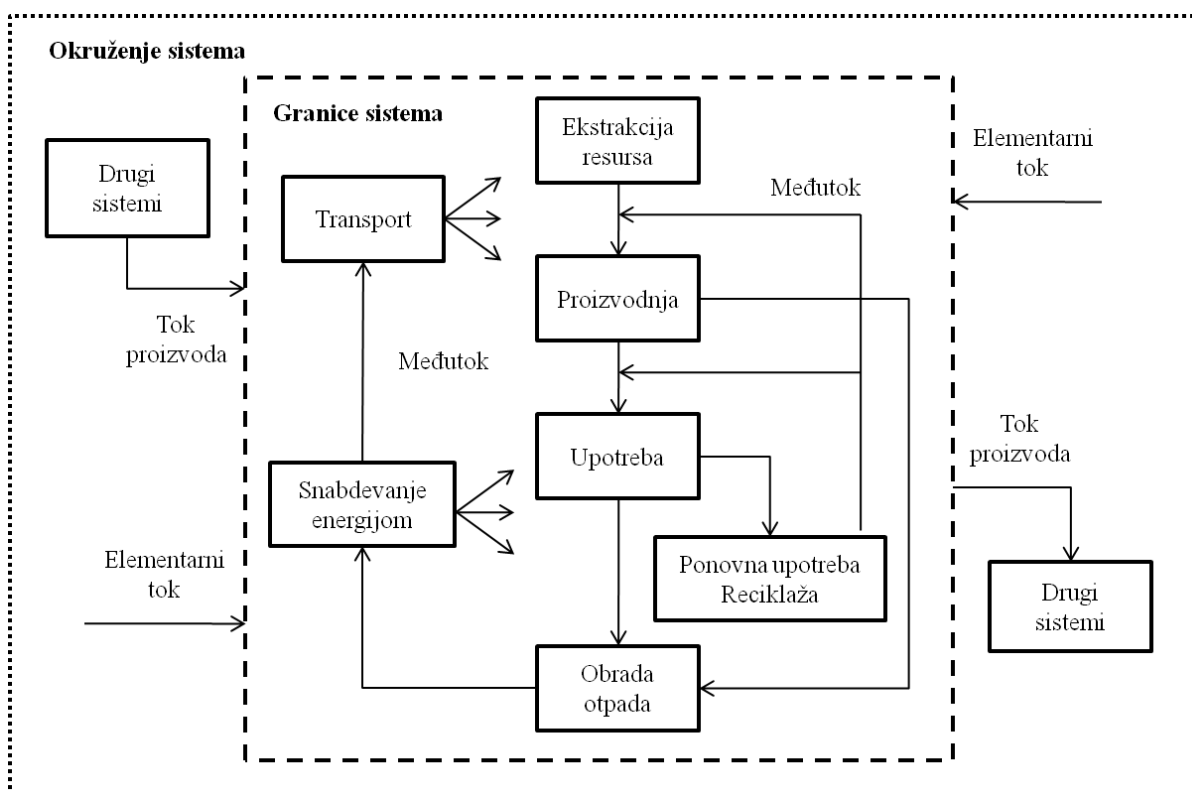
Pre pojave zajedničkih metodskih okvira i standarda, rezultati LCA studija su značajno odstupali u zavisnosti od primenjenog pristupa. Tako, 1989. god. se osniva SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), koji predstavlja prvo međunarodno udruženje koje se bavi harmoničnim razvojem LCA, kroz definisanje naučne osnove kojom se opisuju pojmovi i postavlja prvi metodski okvir. SETAC razvija i prvi pravilnik po kojem treba postupati prilikom sprovođenja LCA studije i nastavlja da održava godišnje skupove koji imaju za cilj unapređenje LCA. Razvoj ovog pravilnika je bio važan korak ka standardizaciji LCA, jer je predstavljao preteču za dokumente koje će objaviti ISO (International Organization for Standardization). ISO je počeo sa razvojem LCA standarda 1994. god. i do 1997. god. izdaje prvi standard (iz serije) ISO 14040 (Environmental management – Life cycle assessment) koji je postavio proceduru za sprovođenje LCA studije. Nakon toga se razvijaju još i ISO 14041, 14042 i 14043. Ovi standardi su zamenjeni 2006. god. sa novom serijom standarda ISO 14040 i 14044. U Srbiji se ovi standardi prevode i usvajaju 2008. god. i nazivaju SRPS ISO 14040 i 14044 (Guinée, 2002; Ditsele, 2010). LCA je jedna tehnika za ispitivanje i ocenu negativnog uticaja na životnu sredinu. Ono što LCA čini jedinstvenom je koncept "od kolenke do groba", odnosno praćenje uticaja tokom celokupnog životnog ciklusa proizvoda (slika 1.1).



Slika 1.1 Životni ciklus proizvoda (Milanović, 2009)

Sam koncept praćenja proizvoda tokom celokupnog životnog ciklusa nije novijeg datuma. Međutim, interesovanje za LCA metod se širi tek krajem devedesetih godina prošlog veka nakon harmonizacije i standardizacije ovog postupka. Devedesetih godina se usvaja prvi priručnik za izvođenje LCA analize (Consoli i dr., 1993), a zatim se publikuju i poboljšana uputstva za njegovo korišćenje (Guinée i dr., 2002; European Commission, 2009). Danas, LCA je metod koji je uređen međunarodnim standardom (ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006) i neophodna je alatka mnogih kako u industriji tako i u državnim institucijama prilikom procene uticaja proizvoda, tehnoloških procesa i razvoja propisa i zakona od značaja za životnu sredinu.

LCA modeluje životni ciklus proizvoda kao sistem proizvoda, koji sprovodi jednu ili više definisanih funkcija. Sistem proizvoda predstavlja skup jediničnih procesa koji se sastoji od jedne ili više aktivnosti, kao što je proizvodnja ili distribucija. Slika 1.2 prikazuje primer sistema proizvoda sa jediničnim procesima, kao što su ekstrakcija sirovina, transport materijala i proizvodnja. Za svaki jedinični proces se prikupljaju podaci o ulazima prirodnih resursa, o emisijama, tokovima otpada i drugim materijalnim i energetskim razmenama između jediničnog procesa i životne sredine. Svi jedinični procesi su međusobno povezani tokovima međuproizvoda što čini sistem proizvoda linearnim u odnosu na funkciju koju sprovodi. Pri uporednim analizama proizvoda, funkcionalna jedinica se iskazuje preko referentnog toka, koji predstavlja količinu proizvoda, koja se zahteva radi ispunjenja funkcije sistema izražene preko funkcionalne jedinice. Referentni tok predstavlja polaznu tačku prilikom analize životnog ciklusa proizvoda (SRPS ISO 14040:2008; Kiš, 2011).

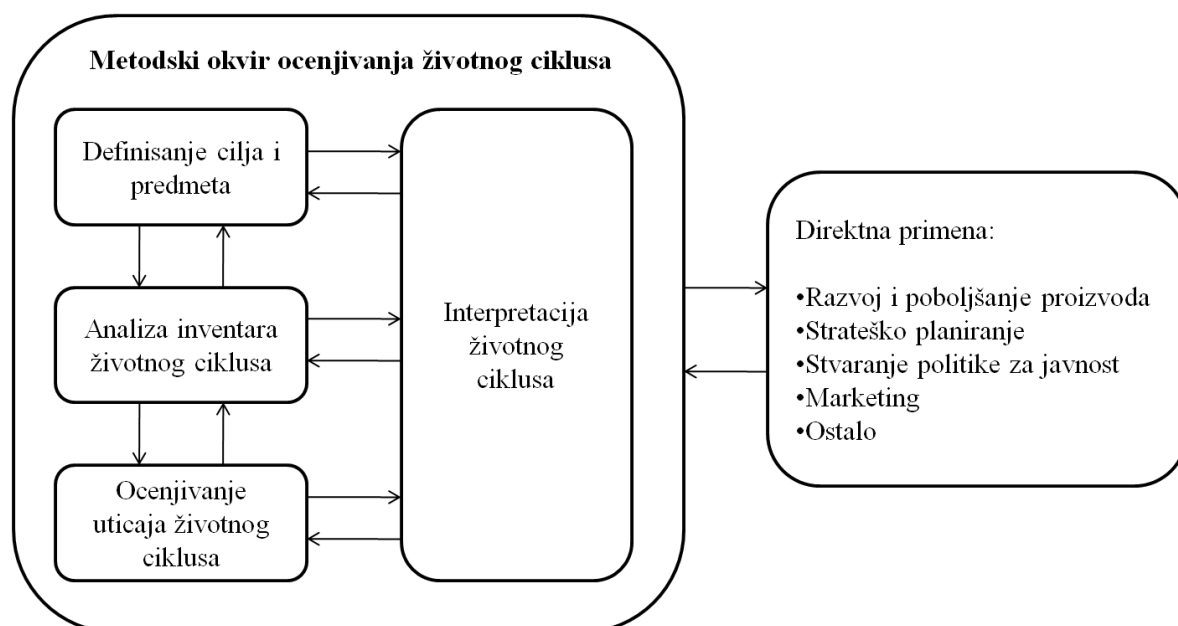


Slika 1.2 Primer sistema proizvodnje u LCA (SRPS ISO 14040:2008)

Prilikom sprovođenja LCA najpre se određuju faze životnog ciklusa ispitivanog proizvoda. Faze životnog ciklusa se zatim dele na procese koji predstavljaju elemente faze. U daljem postupku procesi se rasčlanjuju na ulazne i izlazne tokove koji mogu biti tokovi proizvoda i/ili elementarni tokovi. Ukoliko se u sistemu proizvodnje na strani ulaza i izlaza pored elementarnih tokova javljaju i proizvodi, odnosno materijal ili energija koji nisu elementarni tokovi, analiza se nastavlja njihovim rasčlanjavanjem na jedinične procese i konačno na njihove elementarne tokove. U idealnom slučaju deljenje procesa na elemente prestaje kada su svi tokovi u sistemu proizvodnje elementarni (SRPS ISO 14040:2008).

Prema SRPS ISO 14044:2008 ocenjivanje životnog ciklusa se izvodi u četiri uzastopne i međusobno zavisne faze (slika 1.3):

1. **Faza definisanje cilja i predmeta** u kojoj se vrši izbor metoda i postupaka analize, te određuje dubina i širina kao i nameravane upotrebe rezultata istraživanja.
2. **Faza analize inventara životnog ciklusa (LCI)** se odnosi na prikupljanje ulaznih i izlaznih materijalnih i energetske tokova sistema proizvodnje koji se posmatra.
3. **Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (LCIA)** obezbeđuje ocenjivanje potencijalnih negativnih uticaja tokom životnog ciklusa na osnovu rezultata LCI kako bi se bolje razumeo njihov značaj sa aspekta zaštite životne sredine. Uticaji potrošnje resursa i nastalih emisija se grupišu i kvantifikuju preko određenog broja kategorija uticaja koje se onda mogu odmeravati po značaju.
4. **Interpretacija životnog ciklusa** je završna faza procedure LCA, u kojoj se rezultati LCI i LCIA, sumiraju i razmatraju kao osnova za zaključke, preporuke i donošenje odluka u skladu sa definicijom cilja i predmeta.



Slika 1.3 Faze LCA (SRPS ISO 14040:2008)

1.2.2 Eksergetska analiza

Svakodnevni život je baziran na uverenju da se energija troši. Paradoksalno, prvi zakon termodinamike, koji je u suštini verzija zakona o očuvanju energije, kaže da se energija ne može stvoriti niti uništiti (Clausius, 1867). Očigledna kontradikcija dolazi zbog pogrešne upotrebe termina, jer energija se ne može potrošiti, ona može samo prelaziti iz jednog (dostupnog) oblika u drugi (nedostupni), što je direktno opisuje drugi zakon termodinamike. Ono na šta se misli kad se kaže „potrošnja energije“ je u stvari entropija, koja se može tumačiti kao mera potrošnje dostupne energije u univerzumu (Rifkin, 2003).

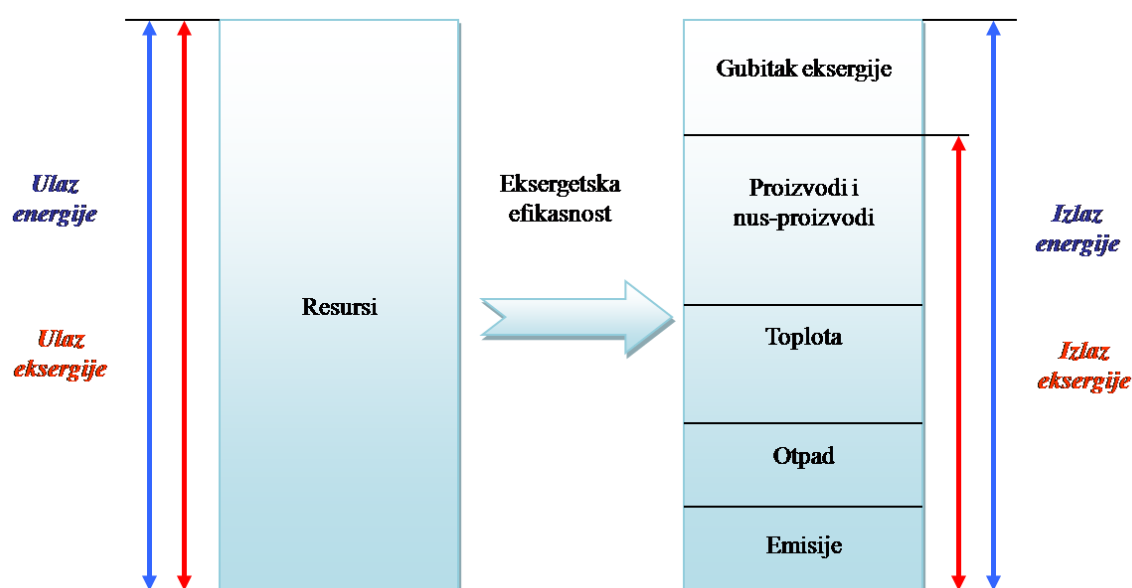
Tabela 1.1 Energija i eksergija (Dincer i Rosen, 2007)

Energija	Eksergija
Prvi zakon termodinamike	Drugi zakon termodinamike
Energija predstavlja kretanje ili sposobnost da se kretanje proizvede	Eksergija predstavlja rad ili sposobnost da se rad proizvede
Energija i materija su isto	Eksergija i informacija su isto
Energija je uvek očuvana u bilansima, tj. ne može se proizvesti niti potrošiti	Eksergija je uvek očuvana u povratnim procesima, ali se smanjuje u nepovratnim procesima, tj. realnim procesima
Energija je mera kvantiteta	Eksergija je mera kvantiteta i kvaliteta
Zavisi samo od osobina materijalnog ili energetskog toka	Zavisi od osobina materijalnog i energetskog toka ali i od osobina okoline

Eksergija je termodinamički koncept izveden iz prvog i drugog zakona termodinamike. Dok prvi zakon opisuje princip očuvanja energije, drugi zakon se bavi principima generisanja entropije ukazivajući na pravac odvijanja reakcija i njihovu nepovratnost. Iz ovoga, može se izvesti koncept „korisnosti“ ili kvaliteta energije i materijala, tj. koncept

eksergije. Termin „eksergija“ je uveo Rant² 1953. godine. Još od prvih istraživanja Carnot-a³ 1824. god., eksergija se razvila preko teorijske primene u očuvanju energije i unapređenja efikasnosti i postala indikator materijalne i energetske upotrebe i kvaliteta (Szargut i dr., 1988).

Eksergija, za razliku od energije, može biti dobijena, izgubljena, akumulirana ili čak skladištena. Eksergija supstance predstavlja rad koji se može dobiti menjajući prirodno stanje supstance. Otuda, sadržaj eksergije ulaznih prirodnih resursa predstavlja meru njihovog kvaliteta ili potencijalne korisnosti, kao i sposobnosti da obavljaju „koristan rad“. Koristeći eksergiju, može se napraviti razlika između visoko i nisko kvalitetnih energija. Slika 1.4 prikazuje realan proces, gde se eksergetski ulaz resursa koristi za dobijanje eksergetskog izlaza u obliku proizvoda i nus-proizvoda, toplote, otpada i gubitaka. Gubitak eksergije iz sistema predstavlja razliku između ulaza/izlaza i okoline. Odnosno, energija je sačuvana u okviru sistema ali je njen kvalitet degradiran.

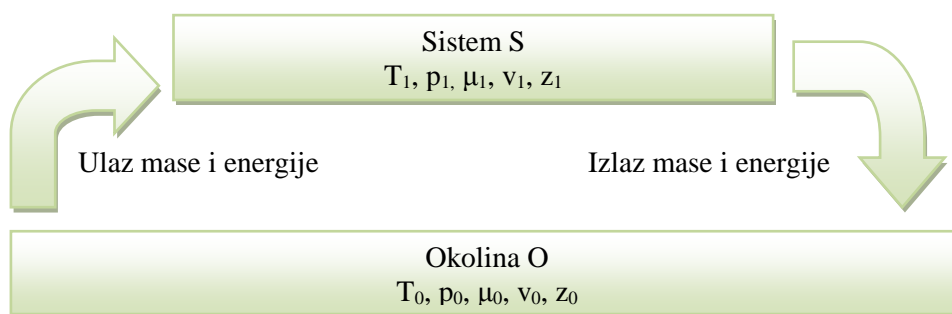


Slika 1.4 Analiza toka energije i eksergije kroz sistem (Dewulf i dr., 2008)

Eksergija se definiše kao maksimalna količina korisnog rada dobijenog kada se sistem dovodi u ravnotežno stanje u odnosu na svoju okolinu kroz niz povratnih procesa. Koncept eksergije je prikazan na slici 1.5, koja predstavlja otvoren sistem (S) sa osobinama stanja (T, p, μ, v i z) koji je u interakciji sa svojom referentnom okolinom (O). Ako se uslovi postave tako da S razmenjuje masu i energiju samo sa O, posle nekog vremena S će doći u stanje ravnoteže sa O, pri čemu neće doći do promene u neto sadržaju mase i energije ovih sistema. Eksergija se definiše kao maksimalan rad dobijen u okviru ovog idealnog procesa.

² Zoran Rant (1904-1972) – Slovenački mašinski inženjer, istraživač i profesor. Uvodi termine eksergija i anergija.

³ Nicolas Carnot (1769 – 1832) - Francuski fizičar i inženjer, jedan od utemeljivača oblasti termodinamike. Godine 1824. izdao je delo "Razmišljanja o pokretačkoj snazi vatre i mašinama sposobnim da razviju tu snagu". Tu objašnjava nemogućnost izrade večitog motora (perpetuum mobile), kao i da toplota prelazi uvek u spontanin procesima, sa toplijeg na hladnije telo (drugi princip termodinamike).



T_0 temperatura okoline,
 T_1 temperatura sistema,
 p_0 pritisak okoline,
 p_1 pritisak sistema,
 μ_0 hemijski potencijal okoline,
 μ_1 hemijski potencijal sistema,
 v_0 brzina okoline,
 v_1 brzina sistema,
 z_0 visina okoline i
 z_1 visina sistema.

Slika 1.5 Sistem (S) u interakciji sa okolinom (O) (Sciubba, 2003)

1.3 Cilj i hipoteze istraživanja

Osnovni cilj istraživanja je da se kroz kombinovanje ova dva prethodno predstavljena alata, ocenjivanja životnog ciklusa i eksergetske analize, razvije novi pristup koji će omogućiti iskorišćenje njihovih pojedinačnih prednosti. Pri tome, akcenat je stavljen na unapređenje postojećeg metodološkog okvira ocenjivanja životnog ciklusa integracijom odgovarajućih aspekata eksergetske analize. Uzimajući u obzir prethodno, može se reći da je cilj ovog istraživanja analiza mogućnosti za unapređenje LCA metoda kroz integraciju eksergetske analize na strukturnom nivou. Unapređenje okvira LCA metoda, integracijom aspekata eksergetske analize, bi omogućilo dobijanje svojevrsnog hibridnog modela, koji bi karakterisale prednosti pojedinačnih metoda, uz istovremeno smanjivanje njihovih nedostataka. Detaljnija analiza prednosti i mana oba metoda je data u potpoglavljima 2.2.1 i 2.3.1.

Do sada nije postavljen okvir za ovakav hibridni model, pre svega jer ne postoji opšte prihvaćeni jedinstveni pristup, koji bi podržao integraciju eksergije u okvire LCA. Evidentiran je i nedostatak opšte analize dosadašnjih pokušaja integracije eksergije u okvire LCA. Takođe, uočeno je da LCA baze podataka, kao što je pre svih *ecoinvent*⁴, nemaju integrisane podatke o potrošnji eksergije ili sadržaju eksergije materijalnih tokova. Takođe, u pomenutim bazama podataka je dostupan mali broj energetskih tokova, koji uključuju podatke o sadržaju eksergije i koji su uključeni u bazu na strukturnom nivou.

⁴ *ecoinvent* je proizvod istoimene neprofitne organizacije, sa sedištem u Cirihu u Švajcarskoj. U *ecoinvent* je ugrađeno više od 20 godina iskustva u oblasti razvoja metodologije LCA i kompilacije LCI podataka za različite industrijske sektore. Sa više od 11,500 LCI setova podataka u različitim oblastima - od energetike, preko poljoprivrede i biomaterijala, do tretmana otpada - *ecoinvent*-ova verzija 3 predstavlja najsveobuhvatniju i transparentnu LCI bazu podataka.

Postavljeni cilj, nameće proveru sledećih hipoteza:

- Integracijom eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa moguće je razviti hibridni pristup koji bi karakterisao sinergetski efekat u pogledu isticanja pojedinačnih pozitivnih osobina ova dva alata.
- Strukturna integracija eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa je praktično izvodljiva kroz razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa.
- Razvijeni hibridni model će karakterisati funkcionalnost i praktična primenljivost na realnim industrijskim primerima.

1.4 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija se sastoji iz sedam poglavlja:

- U prvom poglavlju, nakon kratkog uvoda, definisan je problem istraživanja, dat je pregled stanja u oblasti istraživanja, definisani su ciljevi istraživanja i postavljene hipoteze koje će biti ispitane u okviru ovog istraživanja.
- U drugom poglavlju sprovedena je analiza mogućnosti integracije eksergetske analize u okvir LCA. Analizirana je opravdanost integracije LCA i eksergetske analize, pri čemu je značajna pažnja posvećena dosadašnjim pristupima integrisanja LCA i eksergetske analize, kao i mogućnosti za integraciju eksergije u LCA baze podataka.
- Treće poglavlju prikazuje razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa. Razvoj hibridnog modela je obuhvatio definisanje cilja i predmeta, inventar životnog ciklusa, ocenjivanje uticaja životnog ciklusa i interpretaciju rezultata. Inventar životnog ciklusa je uključio izračunavanje sadržaja eksergije materijalnih i energetskih tokova, kao i prilagođavanje eksergetskog proračuna hibridnom modelu. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa je uključilo razvoj i uvođenje nove kategorije uticaja, kao i razvoj karakterizacionog modela.
- Četvrto poglavlje daje odgovore na pitanja funkcionalnosti i praktične primenljivosti razvijenog hibridnog modela u realnim industrijskim uslovima. Primeri iz prakse su obuhvatili ocenjivanje životnog ciklusa laminatnog parketa i komparativno ocenjivanje hibridnih baznih predajničkih stanica i konvencionalnih baznih predajničkih stanica mobilne telefonije. Dobijeni rezultati ocenjivanja životnog ciklusa su detaljno diskutovani, na osnovu čega su izvedeni zaključci i donesene preporuke za unapređenje posmatranih sistema.
- U petom poglavlju je izvršena opšta diskusija sprovedenog istraživanja, sa adresiranjem na postavljene hipoteze i cilj istraživanja.
- U šestom poglavlju su izvedeni zaključci sa posebnim osvrtom na doprinose istraživanja i pravce daljih istraživanja.
- U sedmom poglavlju su navedeni izvori korišćene literature.
- Prilozi u vidu podataka i dijagrama, potrebnih za praćenje sprovedenih istraživanja, su dati u poslednjem poglavlju.

2. ANALIZA MOGUĆNOSTI INTEGRACIJE EKSERGETSKE ANALIZE U OKVIR OCENJIVANJA ŽIVOTNOG CIKLUSA

2.1 Materijal i metodi

Analiza mogućnosti integracije eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa je sprovedena na bazi dostupnih literaturnih izvora koji su obuhvatili:

- publikacije u međunarodnim naučnim časopisima, prevashodno sa SCI liste, iz oblasti ocenjivanja životnog ciklusa i eksergetske analize;
- monografske publikacije iz oblasti ocenjivanja životnog ciklusa i eksergetske analize;
- međunarodne standarde, pre svega iz oblasti LCA, kao što su ISO 14040:2006 i ISO 14044:2006, pri čemu su korišćeni i prevodi ovih standarda na srpski jezik SRPS ISO 14040:2008 i SRPS ISO 14044:2009 koji istovremeno predstavljaju i nacionalne standarde R. Srbije;
- stručne studije i izveštaje - prvenstveno LCA studije koje su sprovedene na različitim realnim procesima i proizvodima, studije eksergetske analize sprovedene na različitim realnim industrijskim sistemima, stručne izveštaje regulatornih tela koja se bave uređenjem oblasti LCA i eksergetske analize, kao i stručni izveštaji koji prate *ecoinvent* bazu podataka.

Analiza je sprovedena na osnovama metoda naučnog rada, pre svega metoda analize i sinteze.

2.2 Analiza LCA sa aspekta mogućnosti integracije sa eksergetskom analizom

Analiza LCA sa aspekta mogućnosti integracije sa eksergetskom analizom, je obuhvatila dva dela. Najpre je sprovedena analiza prednosti i nedostataka LCA metoda, a zatim analiza oblasti primene LCA metoda. Sprovođenje ovih analiza predstavlja osnovni korak ka istraživanju mogućnosti za integraciju eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa.

2.2.1 Analiza prednosti i nedostataka LCA metoda

LCA kao jedinstveni i revolucionarni alat ima svoje prednosti, koje su sledeće:

- omogućava jedinstveni pristup „od kolenke do groba”. Posедуje sistematičan pristup ispitivanju nastanka negativnih uticaja tokom životnog ciklusa posmatranog proizvodnog sistema od ekstrakcije sirovina do konačnog odlaganja;
- sveobuhvatan alat u pogledu analize pitanja i problema u vezi sa zaštitom životne sredine;
- pomaže u izbegavanju prelaska problema iz jedne faze životnog ciklusa u drugu, od jedne vrste problema zaštite životne sredine u drugi i sa jedne lokacije na drugu;
- LCA je fleksibilan alat i može se kombinovati sa drugim alatima;

- pažljiva definicija cilja u okviru LCA studije je dobra osnova za krajnju ocenu;
- odluke donete na osnovu LCA rezultata omogućavaju minizaciju upotrebe materijala i energije u postojećim procesima; minimizaciju/izbegavanje otpadnih voda, emisija u vazduh i (opasnog) otpada; smanjenje emisija i uticaja na zdravlje zaposlenih;
- LCA pruža jasnu informaciju i pokazuje nameru da iskaže ekološku istinu;
- LCA se može iskoristiti kao indikator uspeha ili poboljšanja u okviru kompanije. LCA podiže svest o životnoj sredini u kompanijama i pomaže u identifikovanju prioriteta zaštite životne sredine;
- LCA pristup ima za cilj integraciju koncepta razmišljanja o životnom ciklusu u okviru donošenja odluka na nivou kompanije. LCA podržava sistem upravljanja životnom sredinom (EMS);
- LCA može biti koristan alat za marketing i promociju ciljeva zaštite životne sredine i proizvoda (eko-označavanje). LCA može da podstakne uvođenje i razvoj novih tehnologija za zaštitu životne sredine i na taj način obezbeđuje prednost na tržištu;
- LCA omogućava poređenje različitih proizvoda ili procesa u slučaju istih uslova proizvodnje ili na bazi istih kriterijuma (PCR kod EPD);
- LCA je korisna u slučaju postojećih proizvoda, jer kako su ovi proizvodi već optimizovani u prošlosti, podaci su često dostupni;
- nakon svake sprovedene LCA analize povećava se dostupnost i kvalitet podataka.

Iako je LCA veoma koristan alat, što se može zaključiti na osnovu prethodno iznetih prednosti, on ima i svojih nedostataka, koji su sledeći:

- nivo detaljnosti i vremenskog okvira može se značajno razlikovati u zavisnosti od definisanog cilja i predmeta LCA studije;
- mogućnost odabira različitih vidova alokacije, granica sistema i mogućnosti reciklaže, vodi do nedoslednosti u podacima, kao i do višestrukog kalkulisanja istih stavki i zanemarivanja pojedinih stavki;
- ne postoji naučna osnova za svođenje rezultata LCA na jedan sveobuhvatni rezultat ili broj, usled postojanja kompleksnosti i kompromisa u različitim fazama životnog ciklusa posmatranog sistema;
- LCA je kompleksan alat i stoga je zahtevan u pogledu podataka;
- što se tiče pokrivenosti podacima u okviru inventara, svi relevantni tokovi materijala i energije moraju biti uključeni, što trenutno nije slučaj. U tom smislu, trenutne LCA studije nisu sveobuhvatne;
- posmatraju se samo poznati i merljivi uticaji na životnu sredinu;
- ne postoji (još uvek) jedinstven metod za sprovođenje LCA studije;
- dostupnost i kvalitet podataka je značajan problem, koji još uvek zahteva dosta metodološkog i naučnog rada. Nejasno je šta raditi u slučaju nedostatka podataka i kako se nositi sa (značajnim) razlikama između postojećih LCA baza podataka;
- svaka LCA studija neminovno uključuje pretpostavke i subjektivne procedure ocenjivanja. Stoga, mora se veoma oprezno pristupiti donošenju tvrdnji o životnoj sredini na osnovu LCA;
- LCA posmatra samo potencijalne uticaje. Ne otkriva nepoznate uticaje na stanje životne sredine;
- kompleksnost LCA je teška za predstavljanje;
- LCA zahteva visoku stručnost;
- LCA studija može biti obimna i detaljna i samim time predstavlja dugotrajan i skup proces.

2.2.2 Analiza oblasti primene LCA

LCA, kako je već spomenuto, predstavlja metod za identifikaciju i kvantifikaciju potencijalnog negativnog uticaja proizvoda, procesa i usluga na životnu sredinu. Ovo ukazuje na to da se LCA može primeniti u bilo kom sektoru i na bilo koju vrstu proizvoda, procesa i usluga. Takođe, LCA se može uključiti u donošenje bilo koje odluke koja se tiče smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu od strane dela ili celokupnog životnog ciklusa posmatranog proizvoda, procesa ili usluge. Uzimajući prethodno navedeno u obzir ne može se detaljno razraditi svaka moguća primena LCA metoda. Ipak, može se navesti nekoliko osnovnih primera LCA primene, da bi se ukazalo na razmere mogućnosti primene.

Opšte uzevši, LCA se može primeniti kod unapređenja i razvoja proizvoda, kako postojećih tako i budućih. Ova primena LCA je široko korišćena u okviru eko-dizajna, koji ukratko predstavlja inicijativu u okviru kompanije ili drugih istraživačkih institucija za razvoj ekološki prihvatljivijih proizvoda (Guinée, 2002). Na primer, nemačka auto-industrija koristi LCA za dizajn novih automobila (Finkbeiner i dr., 2006). LCA se, zatim, može primeniti kod donošenja odluka u vezi sa strateškim planiranjem, bilo interno u okviru kompanija, sektorski u okviru industrije (Rebitzer i Buxmann, 2005), ili u okviru institucija na nacionalnom ili regionalnom nivou (Baumann i Tillman, 2004). LCA rezultati se mogu koristiti za određivanje prioriteta i donošenje odluka prilikom strateškog planiranja u vezi sa dizajniranjem ili redizajniranjem proizvoda ili procesa. Kod ovakve upotrebe, LCA rezultati mogu da pruže informacije koje služe kao osnova za sprovođenje strategija koje se tiču smanjivanja zagađenja, očuvanja resursa i smanjivanja otpada u okviru kompanije, industrije ili vladinog sektora. Vodeće multinacionalne kompanije su prihvatile LCA metod i uključile je u svoje procese donošenja odluka i procese donošenja internih politika i strategija (Hunkeler i Rebitzer, 2005). LCA omogućava uvid u problematične oblasti zaštite životne sredine i predlaže mogućnosti za unapređenje koje služe kao vodilja u kreiranju strategije životne sredine u okviru kompanija. Takođe, kompanije koriste LCA za kreiranje svog sistema upravljanja životnom sredinom. LCA može da služi i za kreiranje javnih strategija i politika, npr. Ministarstvo Energije SAD-a je upotrebilo LCA metod da podrži kredibilitnost pretpostavljenih benefita prilikom istraživanja upotrebe biogoriva (DOE, 2009). Primer vladinih strategija i politika u Evropi uključuje razvoj „zelene“ građevinske industrije u Holandiji, koja zahteva da se građevinski materijali moraju birati na osnovu LCA rezultata (Guinée, 2002). Bitna primena LCA metoda je u oblasti marketinga, što je možda i bila najveći pokretač opšteg razvoja LCA, i doprinela značajno njegovoj standardizaciji (Baumann i Tillman, 2004). LCA se može koristiti kao podrška za marketinške izjave i sertifikate o proizvodima. Ekološka izjava o proizvodu (EPD)⁵ se koristi da bi pomogla ekološki svesnom kupcu da odabere između više proizvoda, i taj izbor se zasniva na negativnim uticajima određenog proizvoda na životnu sredinu (Weidema, 2001). Tako, informacija o manjim negativnim uticajima na životnu sredinu nekog proizvoda utiče na izbor određenog broja kupaca koji su spremni da i to uzmu u obzir prilikom njihove kupovine. Takve informacije su se pokazale najefikasnijima ako su predstavljene u kratkoj formi eko-oznaka (Larson, 2009). Jedan od značajnijih marketinških programa koji koristi LCA u svoje svrhe je eko-oznaka Evropske unije, tj. „EU cvet“, koji promovise ekološki prihvatljive proizvode i usluge. Proizvodi koji se nađu u ovom programu podvrgnuti su rigoroznom ispitivanju tokom

⁵ Eko-oznaka tipa III prema SRPS ISO 14025:2007, koja je zasnovana na LCA i koja sadrži transparentne i uporedive podatke o negativnom uticaju proizvoda i procesa na životnu sredinu tokom njihovog životnog ciklusa.

celokupnog životnog ciklusa. Nakon završene provjere, proizvodima koji zadovolje kriterijume se dodjeljuje karakteristični simbol koji opisuje ekološki kvalitet posmatranog proizvoda ili usluge (SRPS ISO 14020:2012). Ostali primeri upotrebe eko-oznaka na osnovu LCA uključuju nemački program „Plavi anđeo“ („Der Blaue Engel“), skandinavski program „Zeleni labud“ („Green Swan“), itd.

LCA se primenjuje u okviru vladinih i nevladinih institucija i organizacija, kao i u širokom spektru industrijskih sektora, i to kako od strane nezavisnih konsultanata, tako i uz pomoć različitih istraživačkih instituta. Oblasti primene u okviru industrije uključuju ocenjivanje pakovanja proizvoda (Levy, 2000); ocenjivanje proizvodnje energije (Cherubini i dr., 2009) i mogućnosti iskorišćenja otpada za dobijanje energije u industrijskom postrojenju (Budak i dr., 2011); ocenjivanje materijala u građevinarstvu (Zabalza Bribian i dr., 2009); ocenjivanje deterdženata i ostalih sredstava za čišćenje (Eide i dr., 2003); ocenjivanje kućnih i elektronskih uređaja kao što su televizori i kompjuteri (Deng i dr., 2011); ocenjivanje proizvodnje hrane (Roy i dr., 2009); ocenjivanje podnih obloga (Vjestica i dr., 2014; Milanovic i dr., 2014; Nebel, 2006); ocenjivanje mogućnosti reciklaže vozila na kraju životnog veka (Milanovic i Milankovic, 2011; Vujic i dr., 2010); kao i ocenjivanje baznih prijemničkih stanica (Milanovic i Asurdzic, 2014; Bondesson, 2010). U okviru vladinog sektora, naponi su učinjeni uglavnom prema promociji i razvoju metodologije putem finansiranja istraživačkih programa, razvojnih studija slučaja i finansiranja razvoja alata i baza podataka za podršku LCA metode. Ovo je uglavnom dalo rezultate u razvoju nacionalnih LCA baza podataka, razvoju više metoda i koncepata, kao i više LCIA metoda (Pennington i dr. 2004).

Iz prethodnog se može zaključiti da LCA metod postaje ključan alat u mnogim kompanijama i organizacijama koji služi kao podrška za istraživanje i razvoj novih strategija u cilju kretanja ka održivom razvoju. LCA je moćan alat za kvantifikaciju, evaluaciju, poređenje i poboljšanje proizvoda i usluga sa aspekta njihovog potencijalnog uticaja na životnu sredinu i samim time pomaže u identifikovanju mogućnosti za njihovo smanjenje.

2.3 Analiza eksergetske analize sa aspekta mogućnosti integracije u okvir LCA

Analiza eksergetske analize sa aspekta mogućnosti integracije sa LCA metodom, je obuhvatila dva dela. Najpre je sprovedena analiza prednosti i nedostataka eksergetske analize, a zatim analiza oblasti primene eksergetske analize. Sprovođenje ovih analiza predstavlja osnovni korak ka istraživanju mogućnosti za integraciju eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa.

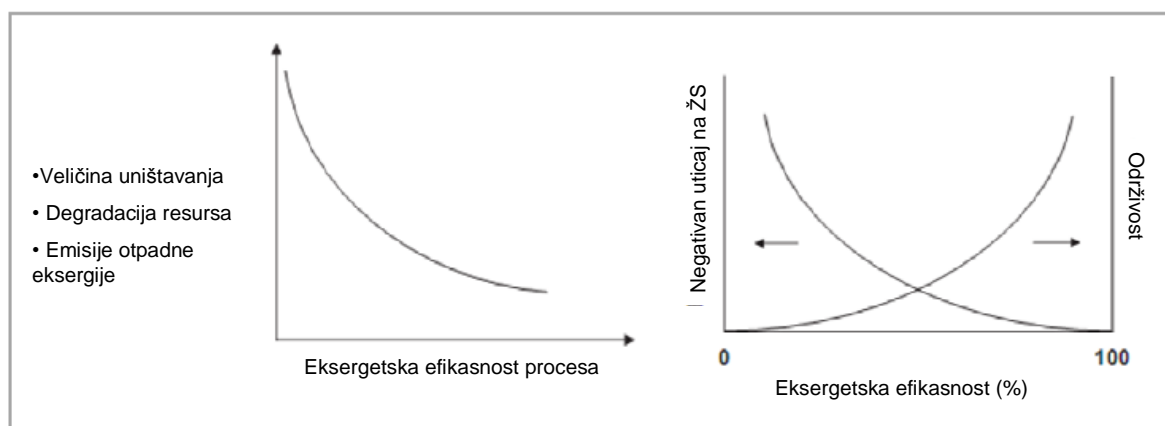
2.3.1 Analiza prednosti i nedostataka eksergetske analize

Kao što je pokazano, eksergetski bilans može da se koristi za ocenjivanje energetske efikasnosti pojedinačnog procesa. Nakon sprovedene analize dobijaju se informacije o tome kako se trenutno stanje posmatranog procesa može unaprediti uz upotrebu iste opreme. Pored toga, eksergetska analiza se može koristiti i za dobijanje nove ideje prilikom projektovanja i izmene posmatranog procesa i opreme. Uštede u gubicima eksergije tokom rada posmatranog procesa, koje se ogledaju u smanjenim energetskim troškovima, mogu da opravdaju visoke (početne) investicione troškove rekonstrukcije posmatranog procesa. Eksergija, kao mera, ne poznaje ograničenja u vidu obima, troškova,

prostora ili vremenskog okvira. Stoga, eksergija se može iskoristiti da se određenom prirodnom resursu dodeli određena vrednost. Ova karakteristika eksergije predstavlja prvi ključni motiv interesovanja za istraživanje sprovedeno u okviru ove disertacije. Najveći značaj eksergetske analize leži u mogućnosti unapređenja pojedinačnog procesa, kao i poređenja i ocenjivanje različitih procesa. Za ove potrebe su veoma korisni indikatori zasnovani na eksergiji, kao što su: eksergetska efikasnost η (veoma bitna u okviru industrijskog sektora), obnovljivost eksergije α i ekološka kompatibilnost ε (mogu biti od važnosti javnom sektoru) (Dincer i Rosen, 2007; Cornelissen, 1997).

Pojedini istraživači (Connelly i Koshland, 2001; Bakshi i Fiksel, 2003; Rosen i dr., 2008) ističu prednosti eksergije kao jednostavnog pokazatelja koji obezbeđuje uniformnu meru koja omogućava poređenje i ocenjivanje različitih procesa. U poređenju sa energetsom analizom, eksergetska analiza identifikuje neefikasnosti uzimajući u obzir kvalitet energije i time daje ideje i predloge za pronalaženje ne tako očiglednih unapređenja sistema. Pored toga, teoretski potencijal za buduća unapređenja procesa može se izmeriti preko eksergetske efikasnosti deljenjem izlaza eksergije sa ukupnim ulazom eksergije. S obzirom na njenu kvantitativnu uniformnu prirodu, eksergetska analiza je pogodna za uporednu analizu i u toku dužeg vremenskog perioda. Kako je ekonomski aspekt uvek važan u procesu donošenja odluka, još jedna prednost je i činjenica da je eksergetska efikasnost blisko povezana sa troškovima funkcionisanja sistema.

U kontekstu održivosti i industrijske ekologije, eksergetska analiza se koristi za kvantifikaciju koristi prilikom zatvaranja tokova resursa u fizičkom i novčanom smislu i primenjuje se kao pokazatelj održivosti procesa i sistema. Pored toga, dokazuje se da se eksergija emisija može koristiti kao pokazatelj negativnog uticaja na životnu sredinu (Bakshi i Fiksel, 2003). Evidentirani su i pokušaji predstavljanja degradacije eksergije kao mere degradacije životne sredine na osnovu činjenice da izvori sa visokim sadržajem eksergije (kao što su fosilna goriva), imaju veći potencijal da pokreću procese koji utiču na potrošnju resursa i nastanak negativnih uticaja na životnu sredinu (Connelly i Koshland, 2001). Takođe, smatra se da se eksergija otpada i emisija treba smanjiti na najmanju moguću meru, jer je njen potencijal rada opšta mera mogućeg narušavanja životne sredine (Ayres, 1998).



Slika 2.1 Odnos između eksergije i održivosti (Rosen i dr. 2008)

Rosen i dr. (2008) su kvalitativno opisali odnos između eksergije i negativnih uticaja na životnu sredinu putem grafika, koji pokazuje da je povećanje eksergetske efikasnosti obrnuto proporcionalno veličini njenog uništenja, degradacije resursa i otpadnim

eksergetskim emisijama, a time i negativnom uticaju na životnu sredinu. Sa druge strane, direktno je proporcionalno postizanju održivosti (slika 2.1).

Valero i dr., (2010) koriste eksergetsku analizu za kvantifikaciju koristi industrijske ekologije koje se inače teško mogu oceniti, ali takođe navode da je eksergetska analiza nedovoljna za određivanje porekla gubitaka i potencijala za uštedu. Oni tvrde da svrha sistema takođe mora biti uzeta u obzir i zato koriste termoeekonomski pristup u kojem je definisan cilj proizvodnje i koji se razlikuje među tokovima resursa i otpada. Ekonomska vrednost materijala i energije se menja tokom vremena u zavisnosti od mnogih faktora. Na primer, cena električne energije zavisi od toga da li je proizvedena pomoću solarnih ćelija, vetrogeneratora ili sagorevanjem prirodnog gasa (Valero i dr., 2010). Međutim, činjenica da eksergija nije opterećena cenom električne energije ili ostale robe i dobara se u određenim okvirima može posmatrati kao prednost. Tehnologije se mogu međusobno porediti bez obzira na ekonomsku situaciju u sadašnjosti. Kod poređenja bitno je sagledati da li su tehnologije povoljne sa stanovišta zaštite životne sredine.

Uprkos ovim primerima upotrebe eksergije kao mere održivosti, postoje mišljenja protiv „veličanja“ eksergije koja treba prodiskutovati. Isti istraživači koji predstavljaju eksergiju kao pokazatelja negativnog uticaja na životnu sredinu, pozivaju na oprez u vezi sa preuranjenim zaključcima. Connelly i Koshland (2001), tako tvrde da je suviše jednostavno pretpostaviti da postojanje visokog sadržaja eksergije i time velike pokretačke snage izaziva negativan uticaj na životnu sredinu. Osim toga, Ayres (1998), tvrdi da eksergija nije pouzdana mera ljudske i eko-toksičnosti, jer ne postoji jasan princip po kome se ovo može izračunati i vrednovati. Osnovni razlog toga je ne postojanje sagledavanja šire slike nastanka ovih uticaja, jer je cilj eksergetske analize sagledavanje eksergetske efikasnosti koja je kao pokazatelj nezavisna od uticaja na ljudsku i eko-toksičnost (Graedel i Allenby, 1995). Eksergetska analiza se ne može koristiti za ocenjivanje potencijalne štete nastale u okviru životne sredine koju izazivaju generisan otpad i nastale emisije u vazduh, vodu i zemljište. Ovo ograničenje proizilazi iz načina koji se koristi za proračun hemijske eksergije posmatranih jedinjenja (Cornelissen i Hirs, 2002). Takođe, Dewulf i Van Langenhove (2002), podržavaju ideju da se sadržaj eksergije emisija teško može povezati sa njihovim negativnim uticajem na životnu sredinu, jer je eksergetska analiza, ipak samo odličan alat za održivo upravljanje resursima u okviru industrijskih sistema. Dok, zajedno u kombinaciji sa drugim alatima, kojima je cilj ocenjivanje negativnog uticaja na životnu sredinu i uticaja na ekonomska i socijalna pitanja, može doprineti kvantitativnom pristupu za ocenjivanje održivosti industrijskih sistema.

Wang i Feng (2000) kritikuju dva glavna problema koja se moraju uzeti u obzir ako se eksergetska analiza koristi za ocenjivanje uticaja sistema na životnu sredinu. Prvo, interni gubici eksergije u okviru procesa, a time i degradacija od visokog do niskog kvaliteta eksergije kroz proces se može videti kao otpad u vidu resursa, što ne izaziva direktan uticaj na životnu sredinu, sem indirektnog uticaja na osiromašenje resursa. Na drugoj strani, eksterni gubici eksergije usled odlaganja otpada mogu biti mali usled niskog sadržaja eksergije, ali mogu izazvati značajan i direktan negativan uticaj na životnu sredinu. Drugo, različit sastav otpada alternativnih sistema implicira različit uticaj na životnu sredinu.

Ipak, autori potenciraju konstruktivan pristup ovim kritikama uvodeći koncept negativnog uticaja na životnu sredinu i negativnog uticaja na sistem. Kako je već predstavljeno, vrednosti eksergije tokova otpada i emisija mogu da se mere preko koeficijenta štete i ukupnih gubitaka eksergije preko (ekonomskog) koeficijenta uticaja. Argumetni i

primedbe citiranih istraživača su uzete u obzir prilikom razvoja hibridnog modela i konačne ocene u okviru ove disertacije. Priličan posao još uvek ostaje da se uradi u oblasti eksergetske analize. Ograničenje eksergetske analize da sagleda širu sliku, izvan pojedinačnog procesa, je samo jedna od stavki koja treba da se dalje istraži i unapredi. Međutim, ovo ograničenje eksergetske analize predstavlja drugi ključni motiv istraživanja sprovedenog u okviru ove disertacije.

2.3.2 Analiza oblasti primene eksergetske analize

Eksergetska analiza predstavlja alat koji koristi koncept eksergije za određivanje mogućnosti za unapređenje posmatranog sistema (Rosen i dr., 2008). Gubici eksergije, i samim tim neefikasnosti u sistemima, se mogu odrediti i kasnije upotrebiti za povećanje eksergetske efikasnosti i optimizaciju energetske efikasnosti sistema. Glavi cilj je upotreba energije na ekonomičniji i fizički efikasniji način (Wang i Feng, 2000). Tradicionalno, eksergetska analiza se uglavnom koristila za pojedinačne procese ili za poređenje dve mogućnosti kod izbora, a analizirala se podela obuhvaćene eksergije iz ulaza sirovine između proizvoda, otpada i unutrašnjih nepovratnosti (Dewulf i Van Langenhove, 2006). Upotreba eksergetske analize u vezi sa iscpeljivanjem prirodnih resursa je bila predložena od strane „Međunarodne federacije instituta za napredna istraživanja“ (IFIAS)⁶ na radionici energetske analize 1974. godine (Slesser, 1974). Ovo se može smatrati prvim istraživanjem urađenim u ovoj oblasti. Od 1986-te, eksergija se koristi za analizu negativnog uticaja prilikom nastanka otpada i emisija, kao i za potrošnju resursa. Pri ocenjivanju negativnog uticaja emisija i otpada, eksergija obezbeđuje holističko vrednovanje kada se nađe u kombinaciji sa LCA.

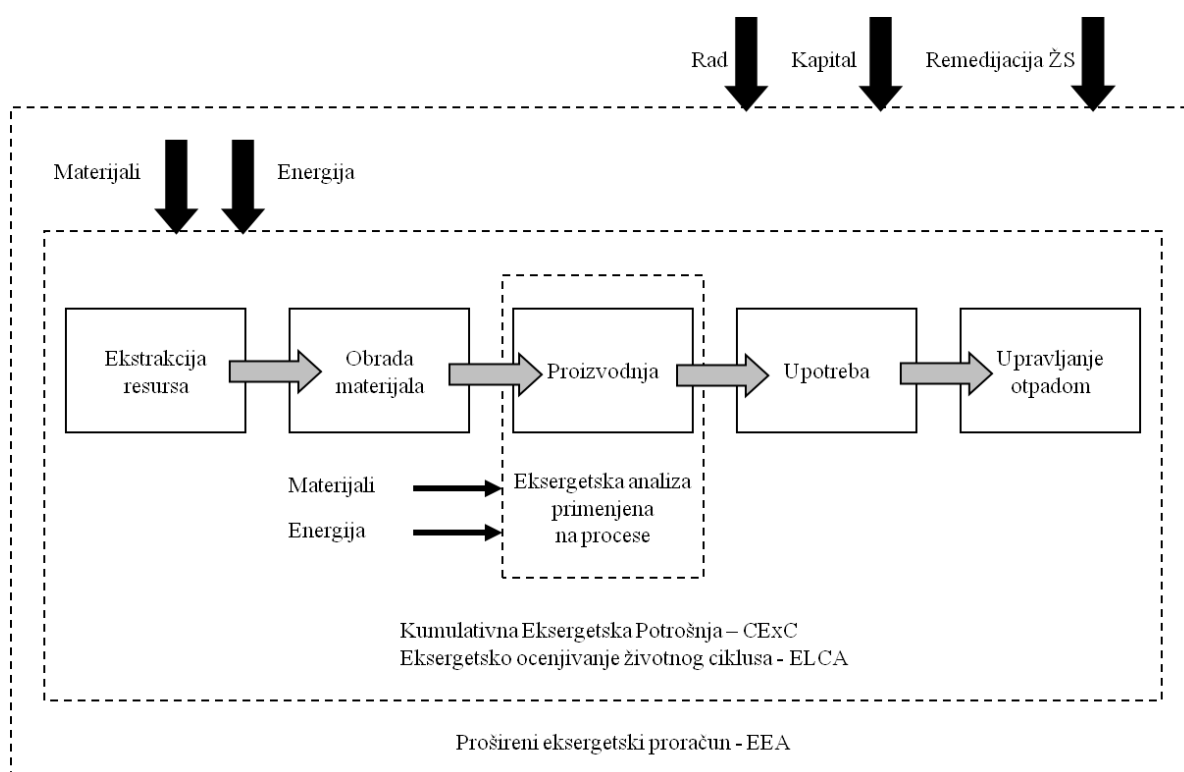
Kako se analiza razvijala i postajala sve rasprostranjenija, tako se razvio i horizont primene prema celokupnom lancu proizvodnje. U okviru analize proizvodnog lanca, koristi se perspektiva životnog ciklusa od prirodnih sirovina do finalnog proizvoda, što omogućava analizu ukupne potrošnje eksergije, odnosno ukupne količine eksergije koja se mora ekstrahovati iz prirodnog ekosistema da bi se dobio željeni proizvod (Dewulf i Van Langenhove, 2006).

Kako eksergija predstavlja relativno objektivnu i unificiranu meru, koristila se i kao veza sa ekonomijom. Analiza zasnovana na fizičkim aspektima je dodata pristupu zasnovanom na monetarnom aspektu, čime se ekonomski značaj drugog zakona termodinamike počeo istraživati (Gong i Wall, 1997; Ayres, 1998; Kåberger i Månsson, 2001; Chen i dr., 2006). Ova veza se koristila za istraživanje industrijskih društava ne samo sa gledišta ekonomskih, već i fizičkih tokova, takođe. Time je pokazano da se eksergetska analiza može kombinovati sa ulazno-izlaznom analizom kako je to predstavio Ukidwe (2005), koji je primenio termodinamički ulazno-izlazni model za istraživanje tokova prirodnog kapitala kroz mrežu ekonomskih sektora i za poređenje njihovih potrošnji eksergije.

Eksergetska analiza je predlagana da se vodi pod imenom eksergo-ekonomija i termo-ekonomija. Ovakve studije primenjuju uobičajene inženjerske procedure, povezujući cene komponenti sa njihovim tehnološkim parametrima i njihovom eksergetskom efikasnošću, dajući tako cenu ne po jedinici mase, već po specifičnom sadržaju eksergije u toku (Lozano i Valero, 1993; Bejan i dr., 1996; Valero, 2006). Termoekonomija daje uvid u

⁶ IFIAS - International Federation of Institutes for Advanced Study – međunarodna mreža istraživačkih instituta iz razvijenih zemalja i zemalja u razvoju, koji saraduju na projektima u vezi sa globalnim strateškim problemima.

troškove procesa, dajući monetarnu vrednost količini eksergije svakog izlaznog toka (Dewulf i dr., 2008). Na osnovu ekonomske teorije da je cena proizvoda suma resursa (materijala i energije), kapitala, rada i cene saniranja uticaja otpada i emisija u životnoj sredini, Sciubba (2001) razvija pristup pod nazivom „Prošireni eksergetski proračun“ (eng. Extended Exergy Accounting – EEA). EEA je holistički pristup koji ima za cilj proračun svih resursa potrošenih da bi se dobio proizvod. Materijali i energija su proračunati na osnovu koncepta „Kumulativne eksergetske potrošnje“ (eng. Cumulative Exergy Consumption – CExC) koji je razvio Szargut (Szargut i dr., 1988). Rad, kapital i remedijacija životne sredine su uključeni na osnovu eksergetski ekvivalentnih vrednosti izračunatih pomoću nacionalnih statističkih podataka za geografsku oblast obuhvaćenu istraživanjem (Sciubba, 2001).



Slika 2.2 Eksergetske metode primenjene na industrijski sistem i životni ciklus proizvoda (Peiró, 2009)

Do sada, eksergetska analiza je primenjena na različitim nivoima: industrijskom (Wall, 1988; Van Gool, 1992; Ozdogan i Arikol, 1995; Ayres i dr., 2001; Dewulf i Van Langenhove, 2002), životnom ciklusu proizvoda (Finnveden, 1996; Cornelissen i Hirs, 2002) i nacionalnom (Wall, 1987; Wall, 1990; Wall i dr., 1994; Ertesvåg i Mielnik, 2000; Gasparatos i dr., 2009). Slika 2.2 sumira pristupe razvijene na osnovu eksergije. Granice sistema, predstavljene isprekidanom linijom, definisane su na osnovu predmeta i ulaza za svaki alat.

U suštini, kao glavni ciljevi eksergetske analize se mogu navesti:

- Određivanje mogućnosti projektovanja novog procesa ili novog sistema (bilo kog nivoa kompleksnosti) bez određivanja distribucije internih eksergetskih gubitaka. Ovakvo određivanje je moguće samo kroz izvođenje eksergetskog bilansa u okviru granica procesa ili sistema i naknadnih analiza ukupnih eksergetskih gubitaka i eksergetske efikanosti.

- Određivanje gubitaka eksergije i eksergetske efikasnosti svih jediničnih procesa u okviru sistema koji se posmatra.
- Određivanje mogućnosti za povećanje eksergetske efikasnosti sistema u celini preko povećanja eksergetske efikasnosti svakog jediničnog procesa u okviru sistema.
- Određivanje najuticajnijih jediničnih procesa u okviru sistema na njegovu eksergetsku efikasnost u celini.

2.4 Opravdanost integracije LCA i eksergetske analize

Iz analize primene LCA i eksergetske analize, tematska preklapanja se mogu zapaziti u različitim oblastima (Udo de Haes i Heijungs, 2007):

- Negativni uticaji na životnu sredinu različitih tokova, istraživanih u okviru LCA, često se odnose na energetske tokove i degradaciju eksergije kroz industrijski proces. Međutim, oni se ne prikazuju kao posebni rezultati kod analize inventara ili ocenjivanja uticaja, već kao integrativni deo u okviru kategorija uticaja kao što su siromašenje resursa i klimatske promene.
- LCA studije se mogu sprovesti za energetske sisteme u kojima eksergija igra važnu ulogu, npr. pri poređenju proizvodnje električne energije iz različitih proizvodnih sistema ili pri poređenju fosilnih goriva sa biogorivom.

Energetske ili eksergetske performanse, kao i potrošnja resursa tokom životnog ciklusa proizvoda mogu biti predmet istraživanja LCA, a ovo je i ujedno najmanje istraženo tematsko preklapanje od prethodno pomenutih i biće glavna veza koja će se koristiti u okviru ove disertacije.

Međutim, do sada je zabeleženo samo nekoliko pokušaja da se ostvari ovakva kombinacija LCA i eksergetske analize, i ti pristupi se značajno razlikuju. Dodatni problem je što nije dostupan jasan pregled ovih pristupa, niti su analizirane njihove prednosti i mane. Zbog toga se ni za jedan od istraživanih pravaca ne može se reći da je priznat i prihvaćen metod. Obzirom na pionirsku prirodu ovakvog hibridnog sjedinjavanja metoda, dosadašnji strukturni okviri LCA nisu u značajnoj meri prošireni u polje eksergetske analize i obratno. U prilog tome govori i to da postojeće baze podataka, kao što su *ecoinvent*, *ILCD*, itd., ne uključuju podatke u vezi sa sadržajem eksergije ili eksergetskom efikasnosti. Takođe, oblast primene eksergetske analize je još uvek fokusirana na tradicionalni nivo procesa. Koncentrisanje na samo jedan deo sistema nosi sa sobom rizik da taj specifičan deo bude optimizovan dok je sistem u celini postao lošiji. Zbog toga, postoji potreba za jasnijim i efikasnijim proširenjem strukturnog okvira LCA sa principima eksergetske analize, radi dobijanja jedinstvenog hibridnog modela koji će postati opšte prihvaćen i usvojen, što je i predstavljeno u okviru ove disertacije. Pored toga, prvi pokušaji kombinacije LCA i eksergetske analize i razvoj hibridnog modela, moraju se najpre proceniti i na kraju potvrditi u praksi.

Mogu se navesti najmanje tri prednosti upotrebe LCA u kombinaciji sa eksergetskom analizom:

1. Prva prednost je što eksergija dozvoljava proračun eksergetske efikasnosti, što ukazuje na to do kojih granica se proces može unaprediti. Unapređenje će imati momentalni uticaj na količinu potrošenih resursa, potrošene energije i stvorenog otpada i ostalih emisija.

2. Druga prednost eksergijom poboljšane LCA metode predstavlja mnogo lakše poređenje različitih proizvoda (kao što su hemijski proizvodi), javnih servisa (kao što su električna energija i toplota) i otpada.
3. Treća prednost je mogućnost realizacije i praćenja godišnjeg audita u okviru velikih kompanija, industrija ili čak država.

2.5 Dosadašnji pristupi u oblasti integrisanja LCA i eksergetske analize

Ideja o integraciji LCA i eksergetske analize nije nova i do sada je zabeleženo više pokušaja, koje karakterišu specifični pristupi. U nastavku je dat pregled sedam pokušaja integracije, identifikovanih na bazi dostupnih literaturnih izvora, u okviru kojih su analizirani ključni aspekti ovih pristupa.

Cornelissen (1997) koristi eksergiju u okviru LCA za ocenjivanje efikasnosti upotrebe prirodnih resursa i za kvantifikaciju siromašenja prirodnih resursa, i naziva svoj pristup "Eksergetsko ocenjivanje životnog ciklusa" (Exergetic Life Cycle Assessment – ELCA). Izračunava nepovratnosti tokom životnog ciklusa kao zbir gubitaka eksergije svih jediničnih procesa u okviru sistema i uzima to za meru neefikasne upotrebe i siromašenja neobnovljivih prirodnih resursa.

Ovaj pristup modifikuje već utvrđeni okvir LCA metode u fazi analize inventara i ocenjivanja uticaja. Analiza inventara je proširena uključivanjem podataka potrebnih za proračun eksergije kao što su pritisak i temperatura. Na osnovu prethodno urađenog masenog i energetskog bilansa, izračunava se i eksergetski bilans po jediničnom procesu. Na drugoj strani, faza ocenjivanja uticaja je dosta ograničena jer je gubitak eksergije tokom životnog ciklusa jedini kriterijum (izračunavaju se samo eksergije tokova i gubici eksergije procesa). Na osnovu ukupnih gubitaka eksergije tokom celokupnog životnog ciklusa proizvoda, sprovodi se analiza potencijalnih poboljšanja.

U okviru istog pristupa, daju se mogućnosti proširenja ELCA na „Zero-ELCA“, što podrazumeva uključivanje smanjenja ili potpunog uklanjanja eksergije emisija, tj. uključivanje eksergije koja je potrebna da se smanje, ponovo upotrebe ili uklone emisije na održivi i ekološki način.

Finnveden i Östlund (1997) takođe koriste eksergiju kao meru siromašenja prirodnih resursa ali koriste ograničeniji pristup u odnosu na *Cornelissen-a (1997)*. Oni koriste eksergiju za izradu karakterizacionog metoda u LCA, ali se sadržaji eksergije izračunavaju samo za pojedine elementarne ulazne tokove, tj. za pojedine minerale i goriva dobijene direktno iz životne sredine. Štaviše, oni ograničavaju svoje istraživanje samo na hemijsku eksergiju ovih prirodnih resursa. Njihov indeks ukupne potrošnje eksergije predstavlja zbir sadržaja hemijske eksergije prirodnih resursa potrebnih za proizvodnju posmatranog proizvoda.

Gong i Wall (1997) razrađuju pristup na osnovu značajnosti koncepta životnog ciklusa u održivom inženjerstvu i eksergetskoj analizi radi boljeg razumevanja učinka celokupnog sistema i sprečavanja prebacivanja problema.

Pristup životnog ciklusa je koncipiran formiranjem tri različite faze: izgradnja, funkcionisanje i čišćenje. U fazi izgradnje eksergija se koristi za podizanje postrojenja i

početak rada. Deo ove ulazne eksergije je akumuliran u okviru potrošenih materijala. U fazi funkcionisanja posmatra se eksergija materijala, a u fazi čišćenja uzima se u obzir eksergija potrebna za uklanjanje čitavog sistema. Ulaz eksergije u fazi funkcionisanja se naziva direktna eksergija, dok se eksergija ostale dve faze zove indirektna eksergija. Uz to, eksergija se uzima kao utvrđena osnova za dodeljivanje troškova.

Valero (1998) cilja na integraciju koncepta životnog ciklusa u okviru eksergetske analize, da bi istraživao nepovratnosti životnog ciklusa posmatranih sistema. Za razliku od *Cornelissen-a (1997)* i *Finnveden-a i Ostlund-a (1997)*, koji koriste klasičnu LCA kao osnovu, on razvija nov matematički model za eksergetsku analizu pod nazivom „od klevke do prirode“. Za kompletiranje životnog ciklusa, Valero dodaje „eksergetsku cenu zamene materijala“, tj. eksergiju potrebnu da se korišćeni materijali dovedu u svoje prvobitno stanje u prirodi.

Definisane su četiri faze modela:

1. proračun eksergije prirodnih resursa počevši od razmatrane referentne okoline;
2. proračun eksergije tokom celokupnog životnog ciklusa proizvoda, uključujući eksergiju svih materijala i usluga potrebnih za proizvodnju, transport, distribuciju, upotrebu, održavanje i konačno odlaganje proizvoda;
3. proračun eksergije potrebne za izjednačavanje svih emisija nastalih tokom celokupnog životnog ciklusa;
4. proračun eksergetskih troškova potrebnih za zamenu svih iskorišćenih materijala.

Ovo predstavlja nastavak *Cornelissen-ove* ideje o "Zero-ELCA" koja uzima u obzir samo prva tri koraka. Osim toga, Valero stavlja potrošenu eksergiju u novčani aspekt i bira termodinamički pristup.

Bösch i dr. (2007) razvijaju CExD metod (eng. Cumulative Exergy Demand), odnosno ukupna potražnja eksergije. Oni integrišu eksergetske vrednosti u LCA okvir i razvijaju dodatnu metodu za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa na bazi eksergije da bi izmerili potrošnju resursa i uklanjanje eksergije iz prirode, potrebne za proizvodnju posmatranog proizvoda. *Ecoinvent* baza podataka se koristi kao baza integracije, u okviru koje se izračunavaju karakterizacioni faktori eksergije za energetske tokove.

Za proračun ukupne potrošnje eksergije se koristi pristup „od klevke do groba“ koji je sličan *Finnveden-ovom* i *Ostlund-ovom (1997)*. Veoma širok proračun eksergije se sprovodi, a koji uključuje hemijsku, kinetičku, hidro-potencijalnu, nuklearnu, solarno-radioaktivnu i toplotnu eksergiju.

Contreras Moya i dr. (2007) takođe biraju već usvojeni metodski LCA okvir kao osnovu i uključuju eksergiju kao dodatnu metodu za ocenjivanje uticaja. U istraživanju se sprovodi, i tradicionalna LCA i eksergetska LCA. Kao pokazatelj, koristi se ukupna potrošnja eksergije, a koji se izračunava na osnovu ukupne količine određenog materijala pomnoženog sa svojim eksergetskim faktorom dobijenim preko eksergetske LCA.

Grubb i Bakshi (2011) koncentrišu svoje istraživanje na analizu unapređenja u okviru LCA i upotrebu eksergije za identifikovanje mogućnosti za unapređenje proizvoda. Slično kao i kod *Cornelissen-a*, LCA okvir se uzima kao osnova i izračunava se eksergetski bilans za svaki jedinični proces u okviru sistema. Sadržaj eksergije ulaznih i izlaznih tokova se

dobija kao zbir hemijske i fizičke eksergije. Osim toga, proširuje se i oblast rada tako što se koristi nivo jediničnog procesa i okvir „od koevke do groba“.

Kao indikator koristi se ukupna ekološka potrošnja eksergije koji je konceptualno jednaka Finnveden-ovom i Ostlund-ovom indikatoru ukupne potrošnje eksergije. Sjedinjeni su sadržaji eksergije svih prirodnih resursa potrebnih za proizvodnju proizvoda. Za razliku od Finnvedena i Ostlunda (1997), Grubb i Bakshi ne uzimaju u obzir samo hemijsku eksergiju već i fizičku eksergiju takođe.

Tabela 2.1 Pregled pristupa integracije LCA i eksergije u literaturi

Istraživači i godine	Cilj	Okvir	Nivo detaljnosti	Granice sistema
Cornelissen 1997	Ocenjivanje efikasnost upotrebe prirodnih resursa i kvantifikovanje njihove potrošnje	Eksergija kao kategorija uticaja	Nivo jediničnog procesa	Od koevke do groba uključujući smanjenje eksergije emisija
Finnveden i Ostlund 1997	Upotreba eksergije kao mere potrošnje resursa, proračun sadržaja eksergije nekih prirodnih resursa	Eksergija kao karakterizacioni faktor u okviru LCA	Nivo od koevke do groba	Od koevke do groba
Gong i Wall 1997	Razumevanje performansi sistema na nivou životnog ciklusa i sprečavanje premeštanja problema	Nema jasnog okvira, samo predstavljena LCA ideja	Nije jasno naznačeno	Od koevke do groba
Valero 1998	Upotreba eksergije za istraživanje nepovratnosti životnog ciklusa	Proračunski okvir „od koevke do koevke“ uz termoekonomske pristup	Nivo jediničnog procesa	Od koevke do prirode uključujući smanjenje eksergije emisija i zamenu materijala
Bosch i dr. 2007	Merenje potrošnje resursa i uklanjanje eksergije iz prirode	Eksergija kao dodatna dodatna kategorija uticaja	Nivo od koevke do groba	Od koevke do groba
Moya i dr. 2007	Nije jasno naznačen	Eksergija kao dodatna dodatna kategorija uticaja	Nivo od koevke do groba	Od koevke do groba
Grubb i Bakshi 2011	Upotreba eksergije radi identifikacije potencijalnih poboljšanja procesa	Postojeći LCA okvir, pretpostavka eksergije kao kategorije uticaja	Nivo jediničnog procesa i nivo od koevke do groba	Od koevke do groba

2.6 Integracija eksergije u LCA baze podataka

Trenutno dostupni podaci u okviru *ecoinvent* baze podataka predstavljaju dobru polaznu tačku za integraciju eksergije u LCA studije. Međutim, to je ograničeno na najosnovnija fosilna i obnovljiva goriva i minerale u njihovom prirodnom stanju pri izdvajanju iz prirode. U teoriji, ukupna potrošnja eksergije, kao zbir eksergija koje se moraju izdvojiti iz prirodnog ekosistema da bi se dobio željeni proizvod, može se proračunati na osnovu ovih podataka (Dewulf i Van Langenhove, 2006). Međutim, u praksi, mnoštvo tokova u proizvodnom lancu se ne uzima u obzir i ne prati do elementarnih tokova. Ovo znači da

nisu svih ulazi eksergije uzeti u obzir i da je proračun ukupne eksergije nepotpun. Dalje, neki od ulaza eksergije mogu biti eksergije sačuvane u materijalima, i oni predstavljaju eksergiju u tranziciji kroz celokupan životni ciklus. Ovi ulazi eksergije su u određenom trenutku izdvojeni iz prirode, ali nisu izgubljeni, i mogu se opet izdvojiti iz industrijskog sistema na kraju životnog veka proizvoda. Ukoliko se posmatra samo strana ulaza, a ne i potpun eksergetski bilans, ovo se može prevideti.

Međutim, nije moguće raščlaniti ukupnu potrošnju eksergije između pojedinačnih faza proizvodnje u okviru industrijskog sistema. Da bi se izračunala i ocenila veličina i izvor neefikasnosti u okviru tokova proizvodnje, eksergetski bilans se mora sprovesti za svaki jedinični proces a ne samo za celokupan životni ciklus.

Ulaz eksergije prirodnih resursa, kako je trenutno integrisano u *ecoinvent* bazi podataka, ima ograničenu primenu. Cilj ovog istraživanja jeste integracija eksergetskih podataka o procesima u okviru industrijskih sistema koji nisu nužno vezani za prirodne resurse, i time mogu da posluže kao osnova za analizu potencijalnih poboljšanja. Trenutno, vrednosti eksergije su dostupne u okviru LCA baza podataka (kao što je *ecoinvent*) za odabir prirodnih resursa, npr. za prirodni gas ili sirovu naftu na mestu ekstrakcije. U okviru baze je izračunat veliki broj eksergetskih podataka uključujući hemijsku, kinetičku, hidro-potencijalnu, nuklearnu, solarno-radioaktivnu i toplotnu eksergiju, a koji su vezani samo za energetske tokove. (Bösch i dr. 2007). Nepostojanje stukturalnih eksergetskih podataka za materijalne tokove u bazi podataka i dostupnost ograničenog broja istraživačkih projekata i studija kombinovanja eksergije i LCA, dovodi do nedovoljne dostupnosti podataka, što predstavlja značajan problem. Ishod istraživanja u okviru ove disertacije predstavlja obogaćivanje LCA baze podataka preko uključivanja eksergetskih vrednosti izračunatim za materijalne i energetske tokove.

3. RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA OCENJIVANJE ŽIVOTNOG CIKLUSA PROIZVODA I PROCESA

3.1 Materijal i metodi

Materijali korišćeni za potrebe razvoja hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa obuhvataju:

- publikacije u međunarodnim naučnim časopisima (sa SCI liste) iz oblasti LCA i eksergetske analize;
- uputstva za izradu inventara životnog ciklusa (iz standarda ISO 14044:2006 i ILCD priručnika);
- stručni izveštaji, prvenstveno LCA izveštaji i izveštaji eksergetske analize publikovani nakon sprovedenih studija na različitim realnim industrijskim sistemima; kao i stručni izveštaji dostupni uz *ecoinvent* bazu podataka;
- *ecoinvent* baza podataka;
- kvantitativne vrednosti sadržaja eksergije za materijalne i energetske tokove (Szargut, 1988; Szargut, 2007);

U metode korišćene za potrebe razvoja hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa, spadaju:

- LCIA metodi, pre svih CML metod (Guinée i dr., 2002) i
- metod eksergetskog proračuna (Szargut, 1988).

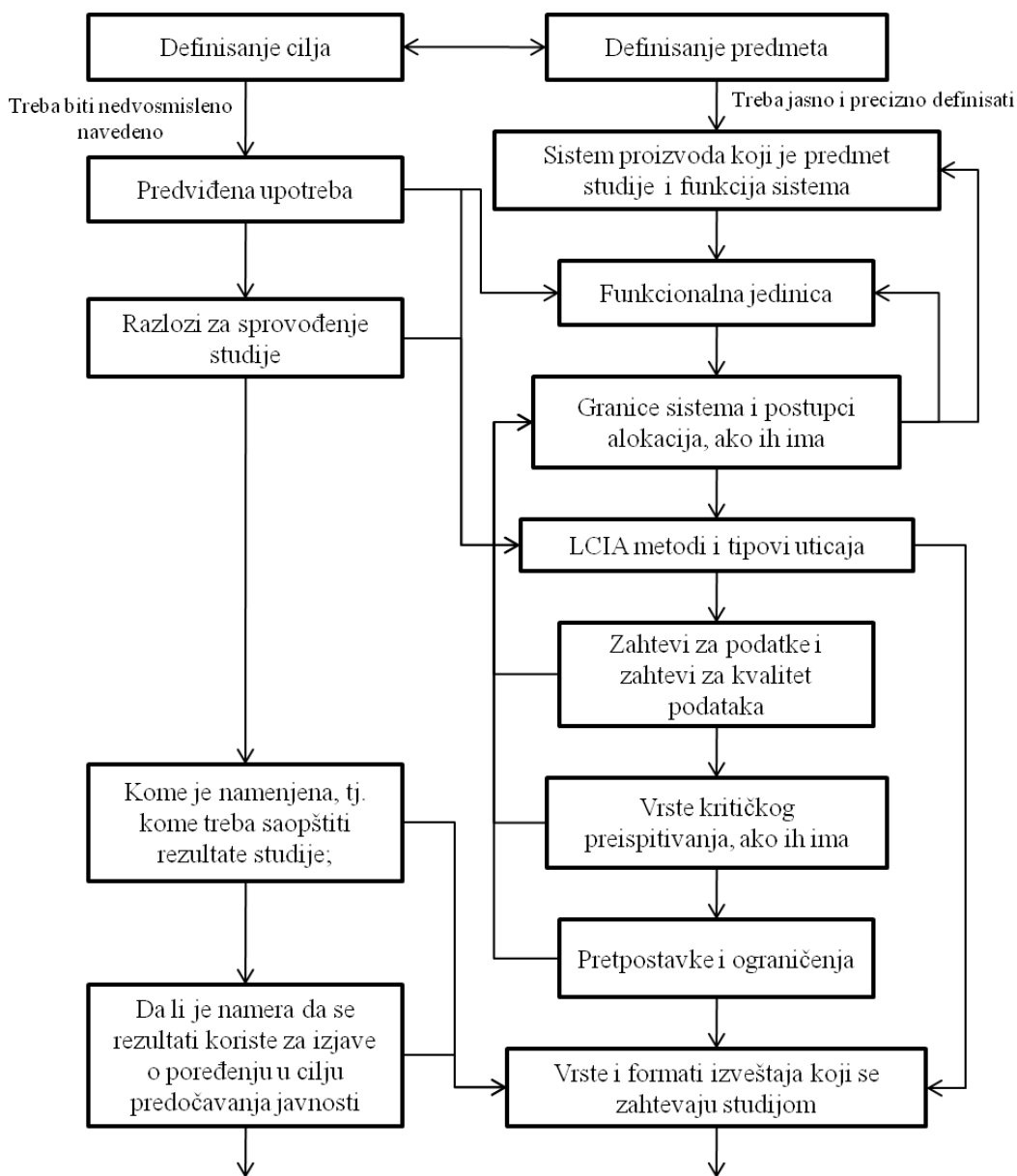
Polazeći od cilja istraživanja, postavljen je hibridni metodski okvir, koji je zasnovan na postojećem LCA metodskom okviru, ali sa određenim modifikacijama uslovljenih integracijom aspekata eksergetske analize. Modifikacije su sprovedene u sve četiri faze LCA, a naročito fazama analize inventara i ocenjivanja uticaja životnog ciklusa. Najznačajnije izmene se odnose na način prikupljanja podataka, zbog uključivanja parametara potrebnih za izračunavanje vrednosti sadržaja eksergije tokova, a potom je razvijen originalni pristup za izračunavanje ukupne potrošnje eksergije, kroz uključivanje dodatne kategorije uticaja, razvijanje indikatora kategorije uticaja i razvijanje pristupa za izračunavanje karakterizacionih faktora. Postavljeni hibridni metodski okvir posmatra kompletan životni ciklus, ali i svaki od jediničnih procesa koji uključuju elementarne tokove, odnosno tokove uzete iz prirodnog sistema bez dodatne obrade, kao i tokove proizvoda, odnosno tokove koji su na neki način izmenjeni od strane pojedinih antropogenih sistema. Izračunavanje sadržaja eksergije i karakterizacionih faktora je sprovedeno kako za elementarne tokove tako i za tokove proizvoda.

3.2 Definisanje cilja i predmeta hibridnog modela

Definisanje cilja i predmeta u okviru hibridnog modela za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa je koncipirano kao i kod tradicionalnog LCA metoda. Osnovne modifikacije i prilagođavanja uključuju poseban pristup prilikom definisanja granica sistema. Precizno i jasno definisanje cilja je u bliskoj vezi sa odabirom granica sistema, kao i odabira nivoa

detaljnosti posmatranja životnog ciklusa (nivo od koevke do groba ili nivo jediničnih procesa). Jasno i precizno postavljene granice sistema u okviru postavljenog hibridnog modela prevazilaze prostorno, geografsko i vremensko ograničenje.

Definisanje cilja i predmeta analize životnog ciklusa predstavlja prvu fazu analize životnog ciklusa. Na slici 3.1 predstavljen je šematski prikaz procedure i obaveznih elemenata definisanja cilja i predmeta.



Slika 3.1 Šematski prikaz procedure i obaveznih elemenata definisanja cilja i predmeta hibridnog modela

Predmet određuje širinu, dubinu i detaljnost studije, kao i osnovne metode i postupke koji se preduzimaju radi ostvarenja ciljeva analize. Definisanje cilja predstavlja uputstvo koje pomaže da se osigura doslednost LCA studije, ali je neophodno da se razume da modeli koji se koriste u LCA često stvaraju iskrivljenu sliku realnosti, koja predstavlja posledicu pokušaja da se stvarnost pojednostavi. Pojednostavljenje stvarnosti dolazi zbog vremenskog okvira i kompleksnosti sprovođenja LCA studije, a što je u direktnoj vezi sa

ekonomskim troškovima izrade iste. Za LCA korisnika pravi je izazov da stvori model čiji rezultati neće previše odstupati od realnosti, a sa druge strane vreme izrade i kompleksnost LCA studije treba da su u balansu radi ekonomske opravdanosti izrade LCA studije. Najbolji način da se reši ovaj problem, je da se pre početka pažljivo definiše cilj LCA studije.

Treba imati u vidu da je studija LCA iterativan postupak i kada se podaci i informacije sakupe, različiti aspekti predmeta studije mogu zahtevati modifikaciju kako bi se ispunio cilj studije. U nekim slučajevima, cilj same studije se može menjati zbog nepredviđenih ograničenja, nedostupnosti ili naknadnih informacija. Takve promene i opravdanje za njih treba pravovremeno dokumentovati. Faza određivanja cilja i predmeta predstavlja ključnu fazu LCA analize jer izbor odgovarajućih pristupa LCI analizi a samim tim i rezultat LCI analize zavise od cilja i namene studija (European Commission, 2009).

Prilikom definisanja predmeta LCA studije moraju se razmotriti i jasno opisati funkcije sistema proizvoda, funkcionalnu jedinicu, granice sistema proizvoda, postupke alociranja, vrste uticaja i metode ocenjivanja uticaja životnog ciklusa, način interpretacije koji će se koristiti, zahteve za kvalitetom podataka, pretpostavke i ograničenja, predstavljanje rezultata i vrstu finalnog izveštaja (European Commission, 2009).

Funkcija sistema se odnosi na namenu i karakteristike određenog proizvoda ili procesa. Sistem može imati veći broj funkcija, a one koje su izabrane za studiju zavise od cilja i predmeta LCA. Funkcionalna jedinica (FJ) omogućava kvantitativno izražavanje funkcije sistema. Svi materijalni i energetske tokovi, kao i svi efekti koji potiču od ovih tokova se iskazuju u odnosu na funkcionalnu jedinicu. Prvenstvena svrha funkcionalne jedinice je da obezbedi referencu u odnosu na koju će se podaci o ulazu i izlazu normalizovati (u matematičkom smislu). Zbog toga funkcionalna jedinica mora biti jasno definisana i merljiva. (SRPS ISO 14040:2008).

Određivanje granice sistema predstavlja usvajanje kriterijuma kojima se utvrđuje koji od jediničnih procesa predstavlja deo sistema proizvoda. Evidentiraju se materijalni i energetske tokovi prethodnih procesa (procesu koji su neophodni za stvaranje i upotrebu ispitivanog proizvoda) i naknadnih procesa (procesu i aktivnosti koji se preduzimaju nakon životnog veka ispitivanog proizvoda). U idealnom slučaju sistem proizvoda treba modelirati na takav način da su ulazi i izlazi na svojim granicama elementarni tokovi. Elementarni tok je materijal ili energija koji ulaze u sistem koji se posmatra i koji potiču iz životne sredine bez prethodne prerade od strane čoveka, ili materijal ili energija koji izlaze iz sistema koji se posmatra i koji se odstranjuju u životnu sredinu bez čovekove naknadne prerade. Ipak, nije potrebno da se resursi utroše na kvantifikaciju takvih ulaza i izlaza koji neće značajno izmeniti sveukupne zaključke studije. Izbor elemenata fizičkog sistema koji će se modelirati zavisi od definisanog cilja i predmeta, nameravane upotrebe i auditorijuma, pretpostavki koje su postavljene, podataka i ograničenja troškova, kao i kriterijuma za isključenje („cut-off“ kriterijumi). Modeli koji se koriste treba da budu opisani, a pretpostavke koje podupiru ove izbore treba da budu identifikovane. „Cut-off“ kriterijumi koji se koriste u okviru studije treba da su razumljivi i opisani. Kriterijumi koji se koriste u postavljanju granica sistema veoma su važni za stepen poverenja u rezultate studije i mogućnost postizanja cilja (SRPS ISO 14040:2008).

U ovom odeljku će biti razmatran pristup u postavljanju granica sistema u okviru razvoja hibridnog modela za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa. Predmet posmatranja LCA je

zasnovan na uključivanju fizičkih tokova koji ulaze i izlaze iz svakog koraka proizvodnog lanca i to kroz faze ekstrakcije, proizvodnje, potrošnje/upotrebe i konačnog odlaganja. Što se tiče pitanja na kom nivou će procesi biti uključeni i gde postaviti granice indirektnih uticaja proizvodnog lanca, potrebno je naći ravnotežu između visokog nivoa detaljnosti i oprečnog zahteva za postojanjem široko definisanog sistema da bi se mogao uključiti celokupan životni ciklus proizvoda (Udo de Haes i Heijungs, 2007). U ovom istraživanju, sistem je definisan sa dovoljno širokim granicama da bi mogao da se posmatra celokupan životni ciklus, ali i dovoljno uskim da bi se obezbedio zadovoljavajući nivo detaljnosti za svaki od posmatranih proizvodnih koraka, tj. jediničnih procesa. Postavljene granice sistema direktno utiču na sakupljanje podataka o ulaznim i izlaznim tokovima, tj. na kreiranje inventara životnog ciklusa. Pored toga, sadržaj eksergije tokova iz inventara, a time i ukupna potrošnja eksergije, se u tom slučaju može izračunati u okviru postavljenih granica sistema.

Što se tiče prostornih granica sistema, tu se javlja pitanje šta definisati kao potrošnju eksergije materijalnog toka. Odluke bi trebalo donositi isključivo na osnovu toga da li potrošena eksergija predstavlja, npr. samo sadržaj eksergije ulaznog goriva ili potrošena eksergija uključuje ukupnu potrošnju eksergije, odnosno eksergiju iskorišćenu za ekstrakciju, preradu i isporuku goriva (Connelly i Koshland, 2001). Razlika između užih i širih granica sistema, je u tome što se kod užih granica sistema posmatra samo sadržaj eksergije određenog toka, dok kod se kod širih granica sistema izračunava ukupna potrošnja eksergije određenog toka, tj. uzimaju se u obzir vrednosti eksergije svih tokova koji su potrebni da bi se dobio posmatrani tok. Tokom postavljanja i razvoja hibridnog modela, ključno je bilo naći balans između ova dva pristupa koji bi ih uskladio i na adekvatan način unapredio. Shodno tome, za potrebe ovog istraživanja, postavljene su granice sistema koje uključuju direktan sadržaj eksergije materijalnih tokova ekstrahovanih iz prirode i ukupnu potrošnju eksergije materijalnih tokova dobijenih iz antropogenih sistema.

U mnogim slučajevima, početno definisana granica sistema mora se redefinisati (SRPS ISO 14040:2008). Prilikom postavljanja granica sistema treba uzeti u obzir nekoliko faza životnog ciklusa, jedinične procese i tokove, na primer sledeće:

- dobijanje sirovina;
- ulaze i izlaze u glavnom proizvodnom/procesnom nizu;
- distribuciju/transport;
- proizvodnju i upotrebu goriva, električne energije i toplote;
- korišćenje i održavanje proizvoda;
- odlaganje procesnog otpada i proizvoda;
- regeneraciju korišćenih proizvoda (uključujući ponovnu upotrebu, reciklažu i regeneraciju energije);
- proizvodnju pomoćnih materijala;
- proizvodnju, održavanje i prestanak rada glavne opreme;
- dopunske operacije, kao što su osvetljavanje i grejanje.

Problem alokacije u studiji LCA se javlja ukoliko kao rezultat industrijskog procesa nastaje više od jednog proizvoda (glavni proizvod i nus-proizvodi). Problem alokacije se odnosi na raspodeljivanje, odnosno dodeljivanje rezultata inventarisanja životnog ciklusa pojedinim rezultatima proizvodnog procesa, odnosno izlaznim proizvodima sistema. Izabrani postupak alokacije određuje koji deo utvrđenog ukupnog opterećenja životne sredine za

jedan sistem proizvoda će se pripisati pojedinim izlaznim proizvodima sistema. (European Commission, 2009).

Kad god je to moguće, alokaciju treba izbegavati:

1. deljenjem jediničnih procesa koje treba alocirati u dva ili više potprocesa i prikupljanjem ulaznih i izlaznih podataka koji se odnose na ove potprocese, ili
2. širenjem sistema proizvoda tako da obuhvati dodatne funkcije koje se odnose na ko-proizvod

Ako nije moguće izbeći alokaciju, ulaze i izlaze sistema treba podeliti među njegovim različitim proizvodima ili funkcijama na takav način da se odražavaju osnovne fizičke veze između njih; tj., one treba da odražavaju način na koji se menjaju ulazi i izlazi kvantitativnim promenama u proizvodima ili funkcijama koje se dobijaju sistemom (SRPS ISO 14044:2009).

Ako nije moguće utvrditi samo fizičku vezu ili se ne mogu koristiti kao osnova za alokaciju, ulaze treba alocirati među proizvodima i funkcijama na takav način da odražavaju druge veze između njih. Na primer, ulazni i izlazni podaci mogu biti alocirani između koproizvoda proporcionalno ekonomskoj vrednosti proizvoda (SRPS ISO 14044:2009).

3.3 Inventar životnog ciklusa hibridnog modela

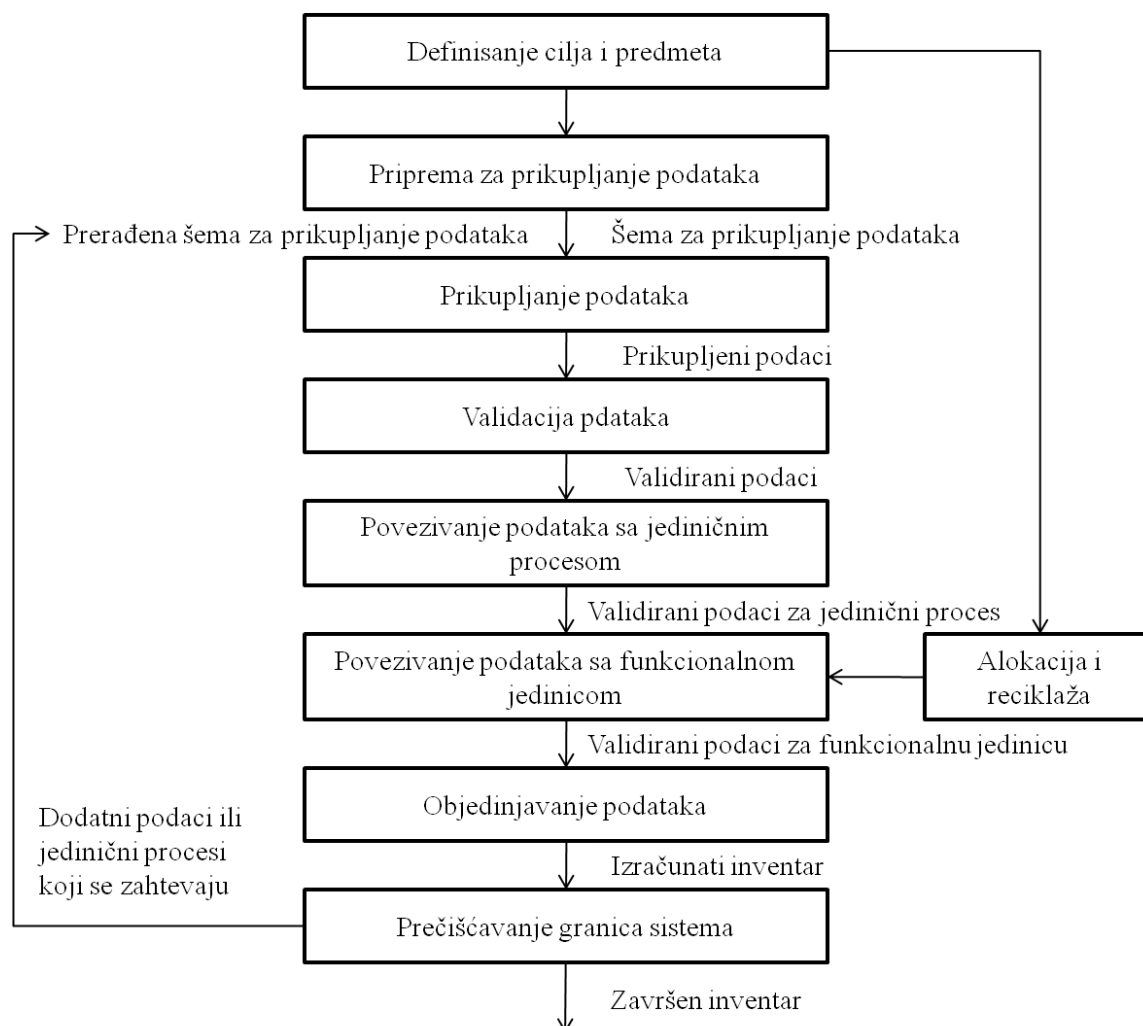
U okviru inventarisanja životnog ciklusa, odnosno LCI faze (*eng. Life Cycle Inventory*), prikupljaju se podaci o relevantnim ulazima i izlazima svakog pojedinačnog procesa, a koji zajedno čine životni ciklus proizvoda koji se analizira. Podaci koji se prikupljaju u okviru ove faze na strani ulaza uključuju: ulaz energije, ulaze sirovina i ostalih (pomoćnih) materijala potrebnih za proizvodnju, a na strani izlaza podatke o proizvodima, otpadu, kao i podatke o emisijama u vazduh, vodu i zemljište. Analiza inventara je iterativan proces. Kako se podaci prikupljaju rastu i saznanja o sistemu. Novi zahtevi za podacima ili ograničenja, koja zahtevaju izmenu procedure prikupljanja podataka mogu se identifikovati u toku rada, tako da se ostvare ciljevi studije.

Da bi se osiguralo kvalitetno ocenjivanje životnog ciklusa posmatranog proizvoda ili procesa, podaci koji se sakupljaju moraju biti kvalitetni. Zahtevi za kvalitet podataka treba da obuhvate sledeće (SRPS ISO 14044:2009):

- vremensku pokrivenost: starost podataka i minimalni vremenski period za koji treba prikupiti podatke;
- geografsku pokrivenost: geografsku oblast sa koje treba prikupljati podatke za jedinične procese da bi se zadovoljio cilj studije;
- tehnološku pokrivenost: specifična tehnologija ili skup tehnologija;
- preciznost: mera promenljivosti vrednosti podataka za svaki izraženi podatak (npr. varijansa);
- potpunost: procenat toka koji se meri ili procenjuje;
- reprezentativnost: kvalitativna procena stepena do kog skup podataka odražava stvarni interes populacije (npr. geografska pokrivenost, vremenski period i tehnološka pokrivenost);
- doslednost: kvalitativna procena o tome da li je metodologija studije primenjena ujednačeno na različite komponente analize;

- reproduktivnost: kvalitativna procena stepena o tome koliko informacija o metodologiji i vrednostima podataka dozvoljava nezavisnom stručnjaku da reprodukuje rezultate date u izveštaju studije;
- izvore podataka;
- nepouzdanost informacija (npr. podataka, modela i pretpostavki).

Svako prikupljanje podataka za inventar životnog ciklusa mora da prati određenu proceduru, koja je prikazana na slici 3.2. Rezultat faze inventarisanja je lista sa nazivima i količinama elementarnih tokova životnog ciklusa proizvoda. Po pravilu elementarni tokovi su organizovani u dve kolone. Jedna kolona sadrži ulazne elementarne tokove (npr. energija i materijali koji se koriste u životnom ciklusu proizvoda), a druga kolona sadrži izlazne elementarne tokove (npr. emisije u vazduh, ispuštanja u vodu i zemljište). U zavisnosti od postavljenog cilja i potrebe izveštavanja rezultati se mogu iskazati po pojedinim fazama životnog ciklusa, po medijima životne sredine (vazduh, voda, zemljište), ili na nivou specifičnih procesa (World Energy Council, 2004).



Slika 3.2 Postupak analize inventara životnog ciklusa (SRPS ISO 14044:2009)

U ovom odeljku će se razmotriti modifikacije i prilagođavanje faze inventarisanja životnog ciklusa radi postavljanja metodskog okvira za razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa. Slično kao i kod tradicionalnog LCA metodskog okvira, svi relevantni materijalni i energetske ulazni i izlazni podaci se sakupljaju za svaki

jedinični proces definisanog sistema, a koji se nalazi u okviru postavljenih granica sistema. Tabela 3.1 prikazuje razvijeni LCI modul za adekvatno prikupljanje podataka neophodnih za kompletiranje inventara životnog ciklusa i potom za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa. Osim masenih i energetske tokova, za hibridni model potreban je detaljan opis temperature, pritiska i sastava tih tokova, radi izračunavanja eksergetskih vrednosti koje su u njima sadržane. Energetski tokovi su obično izmereni preko energetske jedinice, dok su ostali materijalni tokovi izmereni preko različitih jedinica (masenih ili zapremiskih). Jedan način izbegavanja problema promena vrednosti tokova jeste izražavanje preko fizičke jedinice, kao što je eksergija.

Tabela 3.1 LCI modul razvijen za potrebe hibridnog modela

		Opšti podaci			Detaljan opis				Komentar
Vrsta toka		Naziv toka	Količina	Jedinica	^a Agregatno stanje	^b Temperatura	^c Pritisak	^d Hemijski sastav	^f Koncentracija
Ulazi	Materijali								
	Energija								
	Hemikalije i aditivi								
	Dobra/Proizvodi								
	Transport								
	Gorivo								
	Voda								
Izlazi	Materijali								
	Energija								
	Hemikalije i aditivi								
	Dobra/Proizvodi								
	Transport								
	Gorivo								
	Voda								
	Otpad								
	Emisije u vazduh								
	Emisije u vodu								
Emisije u zemljište									

Napomena:

^a Agregatno stanje: tečno, čvrsto ili gasovito.

^b Temperatura toka: ambijentalna ili neka druga zavisno od posmatranog procesa

^c Pritisak toka: ambijentalni ili neki drugi zavisno od posmatranog procesa

^d Hemijski sastav: hemijska formula elementa ili jedinjenja

^f Koncentracija: koncentracija hemijskih elemenata ili jedinjenja (pojedinačno ili u smeši)

Kako je već objašnjeno, trenutna integracija eksergije u okviru LCA baze podataka *ecoinvent* ne dozvoljava ocenjivanje potencijalnih unapređenja, jer su za to potrebni eksergetski podaci na nivou jediničnih procesa. Ovo istraživanje omogućava izračunavanje sadržaja eksergije svakog toka u okviru definisanih granica sistema i njihovo integrisanje u okviru LCA baza podataka.

3.3.1 Izračunavanje sadržaja eksergije za potrebe inventara životnog ciklusa hibridnog modela

Nakon prikupljanja podataka o ulaznim i izlaznim tokovima pomoću razvijenog LCI modula, pristupa se izračunavanju eksergetskih vrednosti identifikovanih tokova.

Baš kao i energija, i eksergija može imati različite oblike: kinetička, potencijalna, unutrašnja, hemijska, toplotna i eksergija rada. Ukupna količina eksergije se može izračunati preko sumiranja svih tokova u okviru sistema, materijalnih, toplotnih i tokova rada:

$$B_{tot} = B_{mat} + B_q + B_{rad} \quad (3.1)$$

gde je:

B_{tot} ukupna eksergija,

B_{mat} eksergija materije,

B_q toplotna eksergija,

B_{rad} eksergija rada.

Eksergija toka materije (B_{mat}) predstavlja sumu eksergija njenih komponenti (Tsartsaronis, 2007).

$$B_{mat} = B_u + B_h + B_k + B_p \quad (3.2)$$

gde je:

B_u unutrašnja eksergija,

B_h hemijska eksergija,

B_k kinetička eksergija,

B_p potencijalna eksergija.

Kinetička eksergija se izračunava preko brzine, potencijalna se određuje pozicijom datog tela o odnosu na polje sile (gravitacione, magnetne, itd.), a unutrašnja je rad dobijen promenom inicijalnog stanja supstance od temperature T_1 i pritiska p_1 , do stanja definisanog temperaturom T_0 i p_0 , odnosno referentnog stanja. Hemijska eksergija izražava sadržaj eksergije supstance na referentnoj temperaturi i pritisku okoline, T_0 i p_0 . Hemijska eksergija se izračunava kao razlika u sastavu date supstance u odnosu na uobičajene komponente u okolini. Toplotna eksergija se izračunava preko Karnoovog koeficijenta⁷, dok je eksergija rada jednaka količini rada koji se može dobiti iz posmatranog sistema. Pošto okolina nije ravnotežni sistem, neophodno je definisati referentnu okolinu za proračun eksergetskih vrednosti.

U praksi, eksergija može biti izračunata pomoću „referentne okoline“ koju je objavio Szargut (Sciubba i Wall 2007). Prateći proceduru Szargut-a, referentno stanje supstance se procenjuje odabirom odgovarajućeg „ponora“ u koji će element verovatno da „se slije“ kada prođe kroz sve reakcije. Odgovarajući ponori su klasifikovani prema isparljivosti supstance (atmosferski ponor), rastvorljivosti supstance (okenaski ponor) i nerastvorljivosti supstance (ponor zemljine kore) (Szargut i dr. 1988). Odabirom odgovarajućeg ponora za svaku supstancu, bira se stabilna forma date supstance koja potom predstavlja referentnu vrstu. Potom, za svaku referentnu vrstu se određuje referentne reakcija. Referentna jednačina za bilo koje hemijsko jedinjenje se može napisati kao suma referentnih reakcija

⁷ Karnoov koeficijent (stepen korisnog dejstva) je mera kvaliteta pretvaranja toplote u rad između dva temperaturna nivoa.

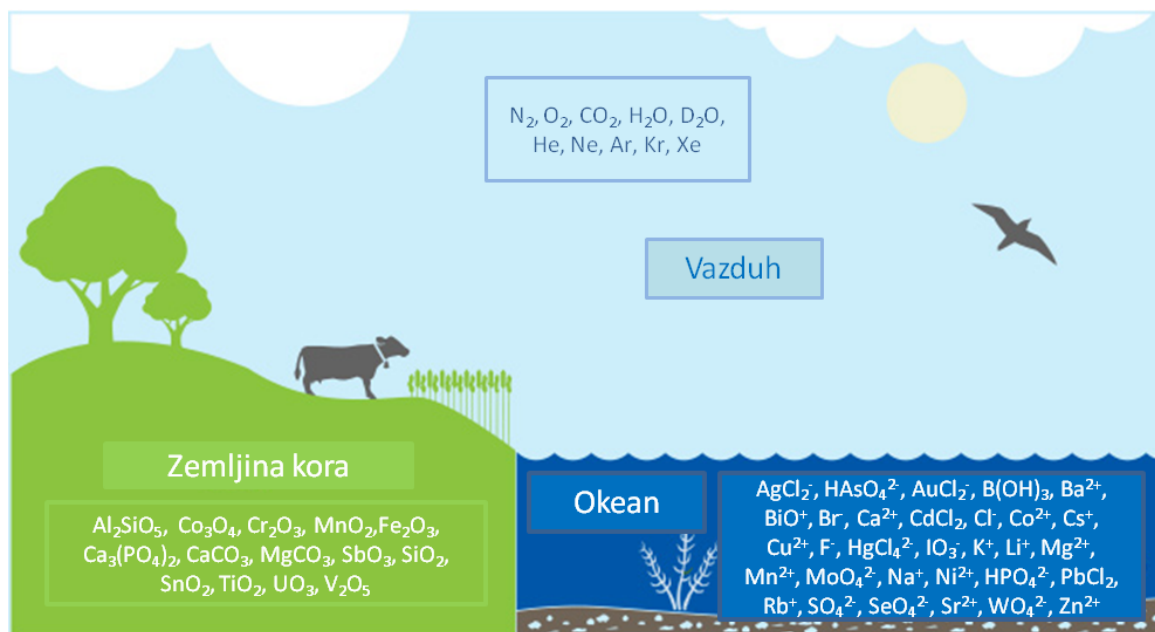
elemenata koji sačinjavaju dato jedinjenje. Kada se definišu referentno stanje i referentna jednačina, može se izračunati standardna hemijska eksergija (B_h^0) za svaku komponentu. U suštini, eksergija je potencijalni rad između stanja 1 i 0. Funkcija stanja je data kao suma svake njene komponente: kinetičke, potencijalne, unutrašnje, hemijske, toplotne i eksergije rada, a koje su date u Tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Različiti energetske tokovi i njihov sadržaj eksergije (Sciubba i Wall, 2007)

Tip energije	Sadržaj eksergije	Komponente
Kinetička	$B_k = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2}$	B_k - kinetička eksergija v - brzina
Potencijalna	$B_p = g(z_0 - z_1)$	B_p - potencijalna eksergija g - gravitaciono ubrzanje z_0, z_1 - visina
Unutrašnja	$B_u = \Delta H_u - T_0 \Delta S_u$	B_u - unutrašnja eksergija H_u - entalpija T_0 - temperatura S_u - entropija
Hemijska	$B_h = (\mu_0 - \mu_1) + RT_0 \ln \left(\frac{c_1}{c_{1,0}} \right)$ $\mu_1 - \mu_0 = \Delta g_G = g_G - g_{G,0}$	B_h - hemijska eksergija μ - hemijski potencijal R - gasna konstanta c - koncentracija g - Gibsova energija
Toplotna	$B_q = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q$	B_q - eksergija toplote T_0 - temperatura Q - toplota
Rad	$B_{rad} = W$	B_{rad} - eksergija rada W - rad

Zbog praktičnih razloga, referentna okolina mora biti definisana kao okolina u kojoj se javljaju materije ili oblici energije. Kada se uzima u obzir veličina referentne okoline, ona mora biti dovoljno velika da njeni parametri ne zavise od interakcije sa posmatranim sistemom. Najčešća referentna okolina koja se uzima je ona koju je definisao Szargut, sa referentnom temperetuirom (T_0) od 298,15 K i referentnim pristiskom (p_0) od 1 atm.

Definišu se tri standardne referentne okoline: jedna za vazduh, druga za okean i treća za zemljinu koru (Szargut i dr. 1988). Broj referentnih supstanci u ovim okolinama je stalan i iznosi 10, 31 i 14, respektivno. Standardne referentne okoline su sastavljene od najstabilnijih dostupnih supstanci, tj. onih koje se u njima nalaze u najvećem izobilju (slika 3.3). Standardna eksergija se zatim izračunava na osnovu standardne temperature, pritiska i sastava okoline.



Slika 3.3 Tri standardne referentne okoline sa svojim referentnim supstancama (Rosen i dr. 2008)

3.3.2 Prilagodavanje eksergetskog proračuna hibridnom modelu

Kako je već opisano, eksergija materije (B_{mat}), predstavlja zbir njenih komponenti: unutrašnje, hemijske, kinetičke i potencijalne eksergije. Na nivou životnog ciklusa a posebno u ovoj studiji slučaja, brzina sistema i njegova visina u odnosu na okolinu nisu od velikog značaja pa su time potencijalna i kinetička eksergija izostavljene iz proračuna. Eksergija materije se u tom slučaju izračunava kao zbir unutrašnje i hemijske eksergije (Cornelissen, 1997; Arons i dr., 2004; Grubb i Bakshi, 2011).

$$B_{mat} = B_u + B_h \quad (3.3)$$

Izračunavanje eksergije tokova rada i toplote je standardizovana procedura: količina rada je jednaka sadržaju eksergije, a eksergija toplote se može odrediti preko Karnoovog koeficijenta. Određivanje sadržaja eksergije materije predstavlja komplikovaniju proceduru, koja zahteva postavljanje jasnih pretpostavki. Unutrašnja eksergija materije zavisi od temperature i pritiska posmatranog toka i izračunava se, kako je prethodno opisano, na osnovu razlike u entalpiji i entropiji. Međutim, ove vrednosti nisu dostupne za sve tokove. Radi doslednosti, a obzirom na to da razlike pritisaka tokova u odnosu na okolinu (u većini slučajeva) nisu značajne, Karnoov koeficijent se množi sa sadržajem unutrašnje energije (E_u) da bi se odredio sadržaj unutrašnje eksergije (B_u). Na taj način, Karnoov koeficijent se uzima kao „koeficijent kvaliteta“ koji određuje kvalitet toka (Arons i dr., 2004).

$$B_u = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times E_u \quad (3.4)$$

Izračunavanje hemijske eksergije se sprovodi po već opisanoj proceduri u tabeli 3.2. Međutim, standardni sadržaj hemijske eksergije za većinu supstanci je dostupan u literaturi

(Szargut, 1988), preko javnih portala na internetu⁸, ili se može naći u drugim istraživanjima iz oblasti eksergetske analize.

3.3.3 Vrste gubitaka eksergije

Pored razlikovanja različitih delova eksergije, korisno je razlikovati i različite gubitke eksergije da bi se moglo odrediti gde nastaju nepovratnosti u procesu. Razlikuju se dve vrste gubitaka eksergije: interni i eksterni (Szargut i dr., 1988). Eksterni gubici eksergije predstavljaju ostatak eksergetskog sadržaja u obliku otpada i emisija koje se ispuštaju ili uklanjaju iz proizvodnje i obuhvataju neiskorišćenu eksergiju. Interni gubici eksergije odgovaraju gubicima kvaliteta usled internih neefikasnosti samog procesa (Valero, 1998). Ove interne neefikasnosti mogu biti tehničke prirode, tj. posledica tehničkih neefikasnosti u okviru postrojenja (npr. trenje ili nedostatak izolacije) ili mogu biti strukturne prirode. Strukturni gubici eksergije su oni gubici koji su određeni principom rada i konstrukcijom sistema (npr. upotreba toplote za proizvodnju električne energije je strukturno ograničena Karnoovim faktorom). Dok se tehnički gubici mogu smanjiti optimizacijom, strukturni gubici se mogu smanjiti samo rekonstrukcijom sistema.

Interni i eksterni gubici zavise jedni od drugih, jer promene u konstrukciji procesa ili optimizaciji utiče na sadržaj eksergije u otpadnim materijalima i emisijama, a samim time i na eksterne gubitke eksergije (Szargut i dr., 1988). Ovde je neophodno definisati granice sistema koje su dovoljno široke za razumevanje potencijalnih prilika za upotrebu neiskorišćene eksergije. Da li će prevagnuti eksterni ili interni gubici eksergije zavisi od posmatranog sistema i njegovih granica. Prema Szargut i dr., (1988) eksterni gubici eksergije predstavljaju glavnu neefikasnost sistema, dok Ayres (1998) tvrdi suprotno. Eksergetska analiza je razvijena da bi se odredili gubici eksergije i potencijalna mesta za smanjenje tih gubitaka u okviru analiziranih sistema. Ukupan gubitak eksergije (B_{gub}) može se izračunati veoma jednostavno, tako što se od sume svih eksergetskih tokova koji ulaze u sistem (B_{ul}), oduzme suma svih eksergetskih tokova koji izlaze iz sistema (B_{iz}). Izračunavanje vrednosti B_{ul} , B_{iz} i B_{gub} se odnosi na eksergetsku analizu, koja izražava eksergetski balans preko jednačine:

$$B_{gub} = B_{ul} - B_{iz} \quad (3.5)$$

gde je:

B_{ul} ukupan sadržaj eksergije svih ulaznih tokova,
 B_{iz} ukupan sadržaj eksergije svih izlaznih tokova,
 B_{gub} ukupni gubici eksergije.

Jedan od načina za opisivanje učinka sistema za transformaciju resursa jeste eksergetska efikasnost. Ključna uloga u određivanju eksergetske efikasnosti pripada eksergetskim gubicima koji se javljaju u svakom jediničnom procesu. Eksergetska efikasnost se definiše kao:

$$\eta = \frac{B_{iz}}{B_{ul}} = 1 - \frac{B_{gub}}{B_{ul}} \quad (3.6)$$

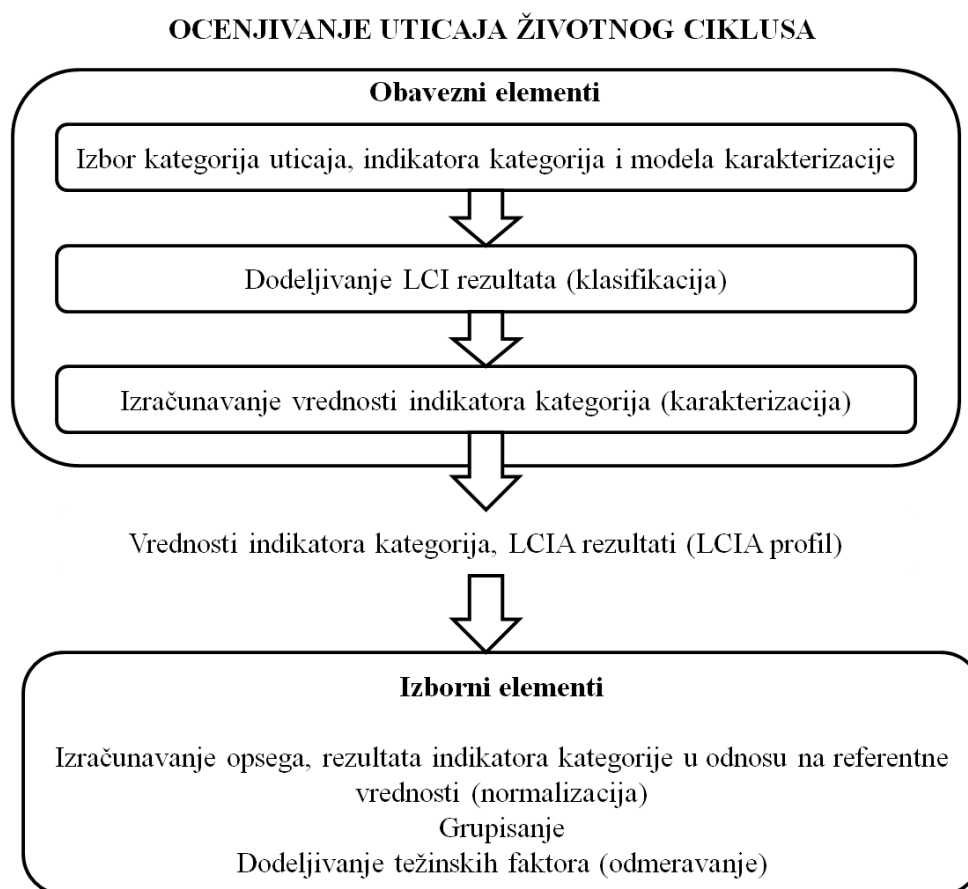
gde je:

η koeficijent eksergetske efikasnosti,

⁸ "Easy exergy calculator": <http://www.exergoecology.com/excalc>

3.4 Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa hibridnog modela

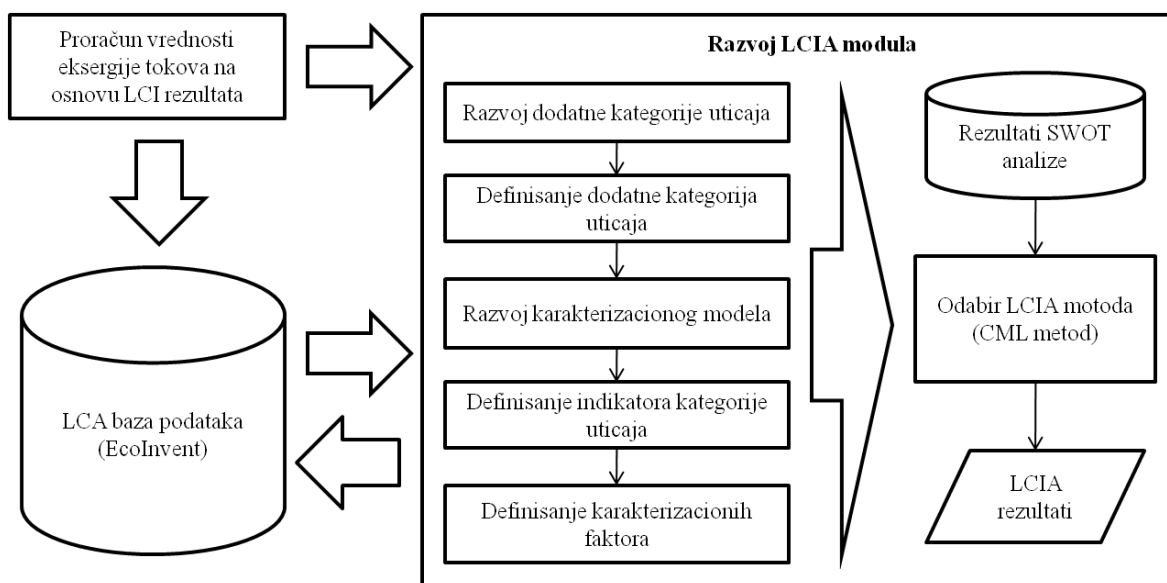
U okviru ove faze LCA sprovedene su i ključne promene, odnosno uključene su novine i modifikacije koje razvijaju postojeći LCIA metod i omogućavaju da razvijeni hibridni model pokaže prednosti u odnosu na postojeće modele za ocenjivanje negativnih uticaja tokom životnog ciklusa proizvoda i procesa. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa razvijenog hibridnog modela je manje ograničeno nego kod tradicionalne LCA, jer je ukupna potrošnja eksergije ubačena kao dodatni kriterijum ocenjivanja, tj. kao nova kategorija uticaja. LCIA faza hibridnog metodološkog okvira eksergetske LCA prati sve obavezne korake kao i kod tradicionalne LCA.



Slika 3.4 Obavezni i izborni elementi u okviru LCIA faze (SRPS ISO 14040:2008)

Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa proizvoda, odnosno LCIA (*eng. Life Cycle Impact Assessment*), se izvodi u nekoliko uzastopnih koraka (slika 3.4). Koji se mogu podeliti na obavezne i izborne. Prvi korak obaveznog dela LCIA predstavlja izbor kategorija uticaja, indikatora kategorija uticaja i modela karakterizacije. Kategorija uticaja predstavlja problem zaštite životne sredine od interesa za LCA analizu, npr. Globalno zagrevanje, uništavanje ozonskog omotača ili potrošnja fosilnih goriva. U drugom koraku LCIA, rezultati inventara životnog ciklusa proizvoda se dodeljuju pojedinim kategorijama uticaja. Ovaj korak se naziva klasifikacija i predstavlja obavezni element LCIA. Treći korak obaveznog dela je izračunavanje vrednosti indikatora kategorija uticaja, odnosno karakterizacija. Pri karakterizaciji svakom elementu unutar neke od kategorija uticaja pripisuje se težina u zavisnosti od značaja njegovog doprinosa problemu životne sredine koji je pokriven kategorijom. Težina pojedinih elemenata inventara životnog ciklusa

održava vrednost faktora karakterizacije koji se usvaja za svaki element posebno. Prvi korak izbornog dela LCIA je izračunavanje značaja rezultata indikatora kategorije u odnosu na referentnu vrednost i naziva se normalizacija. Referentna vrednost se po pravilu bira korišćenjem ukupnih rezultata indikatora za određeni region, npr. državu, i za određeni vremenski period. Glavni cilj normalizacije je da uticaj pojedinih sistema proizvoda izraženih kroz opterećenje životne sredine, dovede u vezu sa ukupnim opterećenjem u okruženju. Drugi korak izbornog dela LCIA je grupisanje i/ili odmeravanje u okviru koga se vrši rangiranje ili merenje pojedinih indikatora kategorija po njihovom značaju, gledajući sa stanovišta problema zaštite životne sredine. Odmeravanje predstavlja pridodavanje kvantitativnih vrednosti (težina) pojedinim indikatorima kategorija uticaja na osnovu percepcije njihovog značaja ili relevantnosti od strane ljudi. Na slici 3.5 predstavljen je šematski LCIA modul razvijen za potrebe hibridnog modela.



Slika 3.5 Šematski prikaz strukture LCIA modula hibridnog modela

3.4.1 Osnove za razvoj LCIA modula hibridnog modela

Prvi razvoji u okviru LCIA metoda datiraju iz ranih 90-tih i počinju sa čuvenim CML metodom. Nakon toga, razvijaju se još mnogi metodi. Mnogi pokušaji su učinjeni u pravcu harmonizacije ovih pristupa, jer postojanje više različitih metoda stvara konfuziju prilikom izbora istih i generiše kritike na upotrebu samog LCA metoda, jer se dobijaju potencijalno različiti rezultati u zavisnosti od izbora LCIA metoda. I pored toga, ciljevi svih LCIA metoda su da povežu, koliko je to moguće, svaki tok u okviru inventara životnog ciklusa sa potencijalnim negativnim uticajem na životnu sredinu.

CML metoda⁹ za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa je razvijena da bude orjentisana na određeni problem. Svaki od problema koji može da se javi u životnoj sredini predstavlja jednu od kategorija uticaja. CML metoda završava kvantitativno modelovanje u relativno ranoj fazi tokom uzročno-posledičnog lanca, odnosno sumira uticaje u okviru kategorija središnjeg nivoa (*eng. mid-point categories*) (Tabela 3.3). Ovo doprinosi značajnom smanjenju nesigurnosti u okviru mehanizma ocenjivanja negativnog uticaja na životnu

⁹ CML metod je jedan od postojećih LCIA metoda koji je razvio Institut za environmentalne nauke koji se nalazi u sklopu Fakulteta nauka o životnoj sredini na Univerzitetu u Lajdenu (Holandija).

sredinu. U prilogu je predstavljen mehanizam ocenjivanja uticaja životnog ciklusa u okviru CML metode (slika P1).

Tabela 3.3 Pokrivene kategorije uticaja u okviru CML metoda

Kategorija uticaja	Jedinica
Potrošnja resursa	kg Sb-eq
Klimatske promene	kg CO ₂ -eq
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11-eq
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DCB-eq
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DCB-eq
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DCB-eq
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DCB-eq
Fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄ -eq
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ -eq
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ -eq

Radi olakšavanja odabira CML metoda kao osnove za razvoj LCIA modula u okviru postavljenog hibridnog modela, sprovedena je i SWOT analiza¹⁰.

Prednosti:

- Obezbeđuje najbolji pristup ka modelovanju uticaja preko kategorija središnjeg nivoa, koji je usklađen sa ISO standardom i sačinjen na jasnim naučnim osnovama.
- Svaka od kategorija uticaja je jasno opisana i široko primenljiva.
- Pruža kako regionalnu tako i globalnu validnost za primenu metode.

Slabosti (ograničenja):

- Obezbeđuje samo indikatore središnjeg nivoa, dok veza sa krajnjim nivom nije modelovana niti na drugi način kvantifikovana.
- Ne postoji metod za određivanje težina.
- Prepoznaje nesigurnost podataka ali je ne kvantifikuje.

Mogućnosti:

- Pokriva preko 800 supstanci sa karakterizacionim faktorima za svaku kategoriju uticaja.
- Prisutna u svim vodećim LCA softverima (GaBi, SimaPro, itd.).
- Opisuje i pokriva indikatore koji se zahtevaju u okviru EPD-a tipa III.

Pretnje:

- Nema.

¹⁰ SWOT analiza (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) je tehnika strategijskog menadžmenta putem koje se uočavaju strategijski izbori dovođenjem u vezu snaga i slabosti preduzeća sa šansama i pretnjama u eksternom okruženju. Autor ove metode je Albert Hamfri sa Stanford Univerziteta

3.4.2 Razvoj i uvođenje nove kategorije uticaja

Za svaku kategoriju uticaja izvodi se karakterizacioni metod, koji čine karakterizacioni model, indikator kategorije uticaja i karakterizacioni faktori. Prilikom izbora kategorije uticaja u okviru ovog istraživanja poštovani su određeni kriterijumi:

- Indikator kategorije uticaja treba da je zasnovan na validnom naučnom i tehničkom načinu izbora, i da je u vezi sa problemom životne sredine koji opisuje.
- Indikator kategorije uticaja treba da je internacionalno prihvaćen. Subjektivni izbori i pretpostavke treba da su svedene na minimum.
- Indikator kategorije uticaja treba da je u skladu sa mehanizmom životne sredine, tj. da povezuje rezultate inventara životnog ciklusa sa kategorijom uticaja.
- Indikator kategorije uticaja treba da bude linearno dobijen, što znači da treba da se omogući direktno množenje karakterizacionih faktora sa vrednošću rezultata inventara da bi se sprovela karakterizacija.
- Indikator kategorije uticaja i karakterizacioni faktori treba da su vremenski i lokacijski nezavisni.
- Kategorija uticaja, indikator kategorije uticaja i karakterizacioni faktori treba da podrže i uključe što više rezultata inventara životnog ciklusa. Indikator treba da predstavlja sve rezultate inventara koji su povezani i koji doprinose negativnim uticajima u okviru posmatrane kategorije uticaja.
- Nesigurnosti u okviru mehanizma ocenjivanja uticaja životnog ciklusa treba svesti na minimum. Najbolji način da se ovo postigne je primena kategorija uticaja središnjeg nivoa.

Prvi ključan korak, u razvoju LCIA modula postavljenog hibridnog modela, predstavlja uključivanje nove kategorije uticaja i indikatora preko kojeg je izražena, među već postojeće kategorije uticaja u okviru CML metoda. Nova kategorija uticaja treba da opiše tokove, potrošnju i gubitke eksergije kroz celokupan životni ciklus određenog proizvoda ili procesa. Shodno tome, ova kategorija uticaja nazvana je *Ukupna potrošnja eksergije - UPE* i izražava se preko indikatora kategorije uticaja (IKU) koji je definisan kao *MJex* potrošene eksergije tokom celokupnog životnog ciklusa proizvoda ili procesa. Kao što je logično, nova kategorija uticaja je kategorija uticaja središnjeg nivoa.

3.4.3 Razvoj karakterizacionog modela

Karakterizacija predstavlja treći korak obaveznog dela LCIA, u okviru kojeg se svakom elementu unutar neke od kategorije uticaja pripisuje težina u zavisnosti od značaja njegovog doprinosa problemu životne sredine koji je pokriven kategorijom. Težina pojedinih elemenata inventara životnog ciklusa održava vrednost karakterizacionog faktora (KF) koji se usvaja za svaki element posebno. Karakterizacioni faktor se primenjuje u cilju pretvaranja odgovarajućih rezultata analize inventara životnog ciklusa u uobičajeni oblik indikatora kategorije (SRPS ISO 14040:2008). Karakterizacioni faktor predstavlja sadržaj eksergije elementarnog toka iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa po masenoj, zapreminskoj ili energetske jedinici (kg, m³ ili MJ). Ono što je specifično za ovo istraživanje je razvoj karakterizacionih faktora za tokove proizvoda, koji se mogu izvesti u slučaju da su poznati svi karakterizacioni faktori za elementarne tokove. Ovakav pristup nije do sad predstavljen i može poslužiti za brzi proračun sadržaja eksergije proizvoda i procesa, što olakšava izračunavanje ukupne potrošnje eksergije u životnom ciklusu posmatranog proizvoda.

Izračunati karakterizacioni faktori se koriste dalje u karakterizacionom koraku LCIA faze za izračunavanje rezultata indikatora kategorije uticaja:

$$IKU = \sum_{i=1}^n KF_i \times RI_i \quad (3.7)$$

gde je:

IKU – rezultat indikatora kategorije uticaja

KF_i – karakterizacioni faktor i -tog elementarnog toka iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa

RI_i – količina i -tog elementarnog toka iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa

Na primer, u slučaju izračunavanja rezultata indikatora kategorije uticaja Promena klime:

$$CC = \sum_{i=1}^n GWP_i \times RI_i \quad (3.8)$$

gde je:

CC – Rezultat indikatora kategorije uticaja Promena klime (*eng. Climate change*),

GWP_i – Potencijal globalnog zagrevanja (*eng. Global warming potential*) i -tog toka iz inventara životnog ciklusa.

IPCC model iz koga su razvijeni GWP faktori je veoma kompleksan model. Većina LCA korisnika, pa čak i LCA eksperata, ga nikad nije videla niti detaljno proučavala. Dobijeni GWP faktori se mogu tumačiti kao karakterizacioni faktori i dodavati u obrazac za karakterizaciju. Međutim, ovakvi gotovi karakterizacioni faktori, dobijeni od strane ovlašćenih tela ili institucija su dostupni za veoma mali broj kategorija uticaja. Za većinu kategorija uticaja, karakterizacioni faktori nisu dostupni i u ovim slučajevima oni se moraju dobiti iz karakterizacionog modela, bilo postojećeg bilo samostalno razvijenog. Prilikom izračunavanja karakterizacionih faktora neophodno je objasniti način na koji su oni dobijeni (Guinée i dr., 2002).

Drugi ključan korak u razvoju LCIA modula u okviru postavljenog hibridnog modela, leži u razvoju karakterizacionih faktora. Da bi LCIA metodi postali operativniji u okviru LCA, neophodno je da se elementarnim tokovima, koji se nalaze u inventaru životnog ciklusa, dodeli vrednost koja opisuje stepen njihovog uticaja na životnu sredinu, tj. karakterizacioni faktor. Karakterizacioni faktori prirodnih resursa iz prirodnih sistema se mogu izvesti iz sadržaja eksergije ekstrahovane iz prirode. Posmatra se sadržaj hemijske eksergije (B_h) prirodnih resursa koji se može izračunati na nekoliko načina (Szargut i dr. 1988). U okviru LCI baza podataka (kao što je i *ecoinvent*) određene karakteristike prirodnih resursa su izražene preko njihove količine (kg ili m³) ili preko njihovog sadržaja energije, tj. preko donje toplotne moći (H_d). U skladu s tim, karakterizacioni faktori će biti izračunati preko sadržaja hemijske eksergije određenog resursa i njegove donje toplotne moći, odnosno mase ili zapremine, u zavisnosti da li se posmatra energetski ili materijalni tok iz inventara životnog ciklusa.

Proračun karakterizacionih faktora za energetske ulaze (npr. fosilna goriva), potrebne za dobijanje nekog proizvoda, može se izvršiti primenom obrasca (3.9). Karakterizacioni faktor se dobija preko odnosa sadržaja hemijske eksergije određenog elementarnog ulaza energenta i njegove donje toplotne moći. U prilogu se nalazi pregled vrednosti donjih toplotnih moći goriva (Tabela P1). Sadržaj hemijske eksergije se određuje primenom

obrasca datog u tabeli 3.2. Pored toga, vrednosti hemijske eksergije supstanci i elemenata su već izračunate i mogu se pronaći u tabelama pojedininih istraživača (Szargut, 2007; Bakshi, 2014). Tabele sa hemijskom eksergijom elementa i supstanci su date u prilogu (Tabela P2). Drugi način za izračunavanje sadržaja hemijske eksergije predstavljaju portali i kalkulatori eksergije koji su dostupni na internetu. Jedan od takvih kalkulatora je i “Easy exergy calculator”, koji je korišćen za potrebe izračunavanja sadržaja hemijske eksergije određenih elemenata i supstanci u okviru ovog istraživanja. Ovakav način proračuna karakterizacionih faktora se sprovodi za energetske ulaze jer se oni posmatraju samo kroz potencijalnu hemijsku energiju koju nose sa sobom i zbog koje se i ulažu u proizvodni sistem. Kao što je rečeno, karakterizacioni faktor dobijen ovakvim proračunom predstavlja sadžaj eksergije elementarnog toka po energetskej jedinici.

$$KF_i = \frac{B_{h,i}}{H_{d,i}} \quad (3.9)$$

gde je:

KF_i – karakterizacioni faktor i -tog elementarnog toka [MJ_{ex}/MJ]

$B_{h,i}$ – sadržaj hemijske eksergije i -tog elementarnog toka [MJ_{ex}/kg]

$H_{d,i}$ – donja toplotna moć i -tog elementarnog toka [MJ/kg]

Primer proračuna karakterizacionog faktora za elementarne ulaze iskazane preko energetske jedinice:

Primer je dat za elementarni tok: 1 kg sirove nafte. Donja toplotna moć sirove nafte je 42,69 MJ/kg. Hemijska eksergija sirove nafte je 1984,65 MJ_{ex}/kg . Da bi se odredila hemijska eksergija sirove nafte, neophodno je prvo utvrditi njen sastav, koji je promenljiv. Međutim, usvojiće se pretpostavka da sastav nafte (u proseku) čine: parafini 40%, cikloalkani (nafteni) 40% i aromatični ugljovodonici 20% (McCain, 1990). Pošto u svaku od ove tri grupe ugljovodonika spada veliki broj jedinjenja, uzima se srednja vrednost sadržaja hemijske eksergije za svaku grupu. Takođe, pretpostavka je da se ovi ugljovodonici nalaze pod standardnim ambijentalnim uslovima ($T_0=298,15$ K i $p_0=1$ bar). Tako, srednja vrednost hemijske eksergije parafina je 57,35 MJ_{ex}/kg , naftena 51,05 MJ_{ex}/kg i aromatika 47,01 MJ_{ex}/kg (Szargut i dr., 1988). Tek sada se može izračunati srednja vrednost sadržaj hemijske eksergije sirove nafte preko:

$$\begin{aligned} B_{h,nafta} &= B_{h,parafini} \times 40\% + B_{h,nafteni} \times 40\% + B_{h,aromatici} \times 20\% = \\ &= (57,35 \times 0,4 + 51,05 \times 0,4 + 47,01 \times 0,2) MJ_{ex}/kg = \\ &= 52,76 \frac{MJ_{ex}}{kg} \end{aligned}$$

Unošenjem ovih vrednosti u obrazac (3.9) izračunava se karakterizacioni faktor za elementarni tok sirove nafte:

$$KF_i = \frac{B_{h,nafta}}{H_{d,nafta}} = \frac{52,76 \frac{MJ_{ex}}{kg}}{42,69 \frac{MJ}{kg}} = 1,24 \frac{MJ_{ex}}{MJ}$$

Pomoću obrazca (3.10) se mogu izračunati karakterizacioni faktori za elementarne ulaze materijala potrebne da se dobije određeni proizvod. Određeni karakterizacioni faktor predstavlja sadržaj hemijske eksergije određenog elementarnog materijalnog toka.

$$KF_i = B_{h,i} = \frac{B_{h,mol,i}}{M_i} \quad (3.10)$$

gde je:

KF_i – karakterizacioni faktor i -tog elementarnog toka [MJ_{ex}/kg]

$B_{h,i}$ – sadržaj hemijske eksergije i -tog elementarnog toka [MJ_{ex}/kg]

$B_{h,mol,i}$ – sadržaj standardne hemijske eksergije i -tog elementarnog toka [MJ_{ex}/mol]

M_i – molarna masa i tog elementarnog toka [kg/mol]

Primer proračuna karakterizacionog faktora za elementarne ulaze iskazane preko masene ili zapreminske jedinice:

Primer je dat za elementarni tok: 1 kg rude gvožđa. Ruda gvožđa u proseku sadrži oko 60% (masenih) gvožđa i to najčešće u obliku magnetita (Fe_3O_4). Standardna hemijska eksergija magnetita je 116,3 kJ_{ex}/mol . Molarna masa magnetita je 231,5 g/mol . Vrednosti standardne hemijske eksergije jedinjenja mogu se naći u prilogima (Tabela P2). Unošenjem ovih vrednosti u obrazac (3.10) izračunava se karakterizacioni faktor za elementarni tok rude gvožđa:

$$KF_i = B_{h,ruda\ gvožđa} = \frac{B_{h,mol,ruda\ gvožđa}}{M_{ruda\ gvožđa}} = \frac{116,3\ kJ_{ex}/mol}{231,5\ g/mol} = 0,51\ \frac{MJ_{ex}}{kg}$$

Pored izračunavanja karakterizacionih faktora elementarnih tokova, moguće je i izračunati karakterizacione faktore proizvoda i procesa, što predstavlja veliku prednost u odnosu na ostale metode i predstavlja jedinstven pristup. Kao što je već napomenuto, ukoliko su poznati karakterizacioni faktori pojedinih elementarnih tokova u rezultatu inventarisanja moguće je izračunati količinu utrošene eksergije na nivou tokova proizvoda u životnom ciklusu ispitivanog proizvoda preko obrasca 3.11.

$$IKU_y = \sum_{i=1}^n KF_i \times RI_i = \sum_{i=1}^l \frac{B_{h,i}}{H_{d,i}} \times RI_i + \sum_{i=1}^k B_{h,i} \times RI_i \quad (3.11)$$

Gde IKU_y označava ukupnu potrošnju eksergije u životnom ciklusu toka proizvoda y , tj. ukupni sadržaj eksergije ulaznih elementarnih tokova u životnom ciklusu proizvoda y koji su potrebni za njegovo dobijanje. Brojači l i k opisuju energetske i materijalne elementarne tokove, respektivno. Detaljan primer proračuna karakterizacionog faktora za tok proizvoda dat je u prilogu (Tabela P3).

Razvoj obrazaca za izračunavanje karakterizacionih faktora u okviru ovog istraživanja predstavlja veliku prednost u odnosu na već postojeće pristupe za njihovo izračunavanje u okviru ostalih LCIA metoda. Prednost se ogleda u tome što karakterizacioni faktori, izračunati na ovaj način, nisu vremenski i geografski zavisni, kao što je slučaj kod većine karakterizacionih faktora u okviru postojećih LCIA metoda. Gubljenje geografske zavisnosti, dovodi do olakšanog izračunavanja karakterizacionih faktora i do smanjenja nesigurnosti usled upotrebe različitih varijabli koje se koriste pri definisanju heterogenih lokacijskih jedinica (Perveen i James, 2009).

Karakterizacija predstavlja obavezni korak u okviru LCIA faze i samim tim predloženi proračun karakterizacionih faktora je od vitalnog značaja za dobijanje kvalitetnih rezultata LCA analize, odnosno za stvaranje realne slike koja opisuje potencijalne negativne uticaje na životnu sredinu. Uključivanje izračunatih karakterizacionih faktora u već postojeće LCA baze podataka (kao što je *ecoinvent*), predstavlja bitan aspekt za ostvarivanje cilja istraživanja. Još jedan bitan aspekt u sprovođenju cilja ovog istraživanja je uključivanje izračunatih karakterizacionih faktora i predložene nove kategorije uticaja u okviru postojeće LCIA metode. Njihovo uključivanje u okviru CML metode je značajno jer potpomaže bolju verifikaciju rezultata i njihovo poređenje sa rezultatima u okviru ostalih, već postojećih, kategorija uticaja. Kompletiranjem ova dva koraka ostvaruje se osnova za konačnu realizaciju postavljenog cilja istraživanja.

Ovakav razvijeni LCIA modul, koji uključuje karakterizacioni model (sa razvijenim obrascima za izračunavanje KF-a), zajedno sa razvijenom kategorijom uticaja i indikatorom koji je opisuje, se može integrisati i u okviru ostalih LCIA metoda koji koriste mehanizam za ocenjivanje uticaja prikazan preko kategorija uticaja središnjeg nivoa. Uključivanje razvijenog LCIA modula u okviru LCIA metoda koje koriste mehanizam za ocenjivanje uticaja, koji je prikazan (pored kategorija uticaja središnjeg nivoa) i preko kategorija uticaja krajnjeg nivoa (*eng. end-point categories*), nije obuhvaćeno u okviru ovog istraživanja, i zahteva dodatno istraživanje.

3.5 Interpretacija rezultata hibridnog modela

Poslednji korak je posvećen interpretaciji rezultata ocenjivanja životnog ciklusa koja je koncipirana na sličan način kao i kod tradicionalne LCA metode. Interpretacija uključuje jasnu i preciznu analizu rezultata, donošenje kvalitetnih zaključaka na osnovu rezultata i pružanje preporuka za olakšavanje procesa donošenja odluka. U ovom istraživanju akcentat je stavljen na tumačenje uporednih rezultata nove kategorije uticaja sa već postojećim u okviru CML metode. Takođe, sprovedeno je i raščlanjivanje rezultata između jediničnih procesa, radi ocenjivanja i pronalaženja izvora i veličine potrošnje eksergije u svakom proizvodnom koraku.

Cilj interpretacije životnog ciklusa je analiza dobijenih rezultata, izvedenih zaključaka, objašnjenje ograničenja i pružanje preporuka zasnovanih na utvrđenim činjenicama iz prethodnih faza LCA i izveštavanje o rezultatima interpretacije životnog ciklusa. Zadatak interpretacije životnog ciklusa je da pruži jasnu i prihvatljivu ponudu i jedinstvenu prezentaciju rezultata studije LCA, u skladu sa definisanim ciljem i predmetom studije. Faza interpretacije može da obuhvati iterativni proces preispitivanja i revidiranja predmeta LCA, kao i prirode i kvaliteta podataka prikupljenih na način koji je konzistentan sa definisanim ciljem. (European Commission, 2009).

Intrpretaciona faza životnog ciklusa se sastoji iz sledećih elemenata:

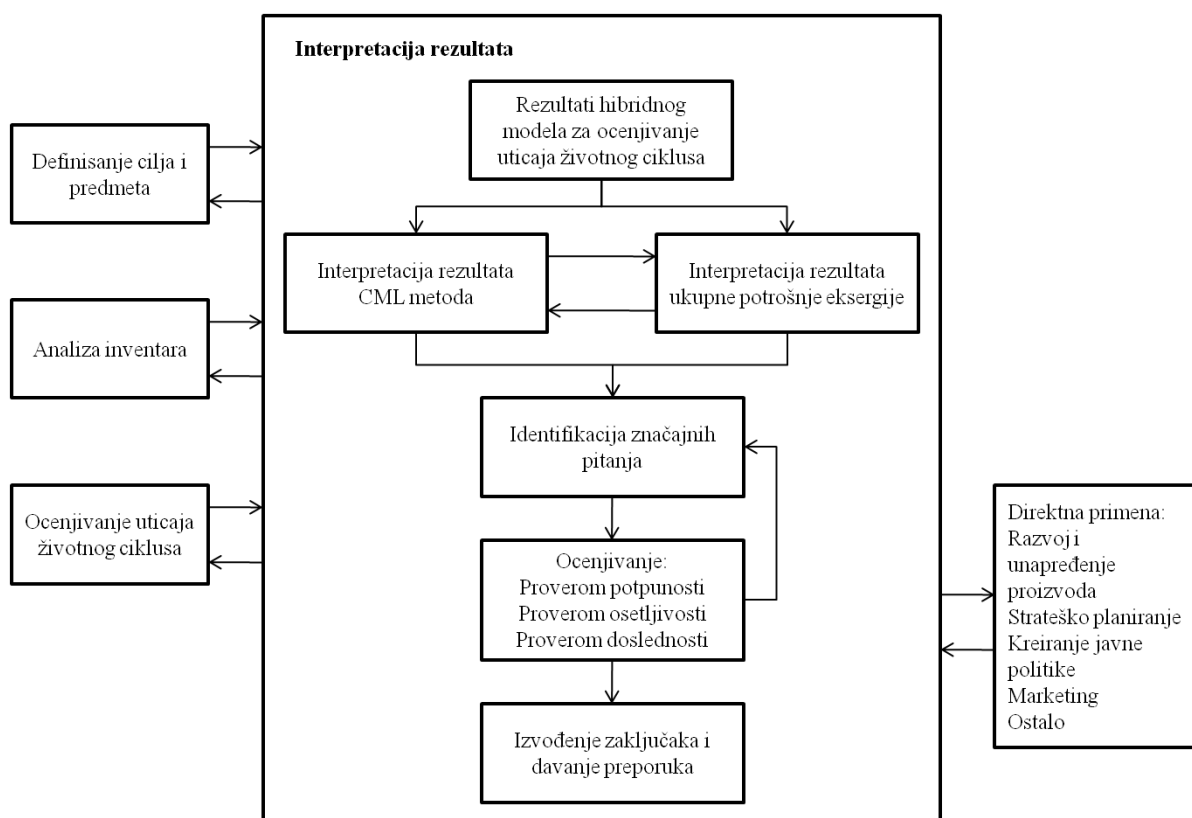
- Identifikacija značajnih problema zasnovana na rezultatima faza LCI i LCIA.
- Vrednovanje, koje podrazumeva kontrolu potpunosti, osetljivosti i doslednosti.
- Zaključci, preporuke i davanje izveštaja o značajnim problemima.

Predmet provere potpunosti je da osigura da sve bitne informacije i podaci potrebni za tumačenje budu dostupni i potpuni. Ako nedostaje bilo koja bitna informacija ili je nepotpuna, mora se razmotriti potreba za takvom informacijom da bi se zadovoljili cilj,

predmet i područje primene LCA. O nalazima i njihovoj opravdanosti mora se podneti izveštaj. Ukoliko se nedostajuće informacije ne smatraju neophodnim, o razlozima za to treba podneti izveštaj.

Cilj provere osjetljivosti je ocena pouzdanosti konačnih rezultata i zaključaka određivanjem kako na njih utiče nesigurnost podataka, metode alokacija ili proračun rezultata indikatora kategorije itd. Predmet provere doslednosti je da odredi da li su pretpostavke, metode i podaci dosledni cilju i predmetu.

Struktura interpretacije rezultata hibridnog modela i odnos interpretacione faze u odnosu na druge faze LCA je prikazan na slici 3.6.



Slika 3.6 Šematski prikaz strukture interpretacije rezultata hibridnog modela

4. VERIFIKACIJA FUNKCIONALNOSTI I PRAKTIČNE PRIMENLJIVOSTI RAZVIJENOG HIBRIDNOG MODELA NA REALNIM INDUSTRIJSKIM PRIMERIMA

4.1 Materijal i metodi

Verifikacija funkcionalnosti i praktične primenljivosti razvijenog hibridnog modela zahtevala je primenu sledećih materijala:

- detaljne podatke o analiziranim industrijskim sistemima: šeme pogona, podaci o ulazima i izlazima (energije, sirovine, emisije, otpad) iz delova sistema, liste sa specifikacijama proizvoda;
- LCI podaci iz *ecoinvent* baze podataka;
- podaci iz dostupnih naučnih i stručnih literaturnih izvora (publikacije u međunarodnim časopisima i sa konferencija, monografske publikacije, stručni izveštaji i studije), koji su korišćeni u slučajevima nedostupnosti izvornih podataka.

Metodi korišćeni za potrebe verifikacije funkcionalnosti i praktične primenljivosti razvijenog hibridnog modela su obuhvatili:

- LCIA metod - CML je korišćen za potrebe implementacije razvijenog LCIA modula, a potom za izračunavanje potencijalnog opterećenja životne sredine nastalog tokom životnog ciklusa postranih industrijskih;
- SimaPro 7 LCA softver je korišćen za potrebe modelovanja posmatranih industrijskih sistema;
- *ecoinvent* baza podataka je korišćena kao izvor LCI podataka neophodnih za modelovanje posmatranih industrijskih sistema;
- Razvijeni hibridni model.

4.2 Studija slučaja ocenjivanja životnog ciklusa laminatnog parketa

Parket se kao podna obloga pokazao najboljim i najdugotrajnijim rešenjem za različite vrste objekata. Osim u domovima, koristi se i u drugim javnim objektima, školama, sportskim halama i dvoranama, jer drvo kao prirodni materijal, osim dobrih mehaničkih i izolacionih svojstava, ima i niz drugih svojstava koja nekad prostor zahteva kao što su akustičnost, boja, prirodan izgled, itd. Tako, i laminatni parket, kao moderan proizvod pokazuje manje opterećenje na životnu sredinu nego neke druge vrste podnih obloga. Neke od prednosti (između ostalih) koje ga čine boljim u odnosu na druge podne obloge su da podržava ekonomičniju upotrebu drveta, ima duži vek upotrebe i otporniji je na mehanička oštećenja.

Do sada je sproveden određen broj LCA studija u oblasti proizvodnje drvenih podnih obloga i njihovog poređenja sa drugim podnim oblogama. Tako, Werner i Richter (1997) i Nebel i dr. (2006) u svojim studijama vrše sveobuhvatno i detaljno poređenje drvenih podnih obloga u cilju dobijanja osnovnih podataka koji treba da obezbede dalje poređenje

drvenih sa ostalim podnim oblogama. Jönsson i dr. (1997) daju detaljnu i sveobuhvatnu studiju kojom se ocenjuje uticaj linoleuma, vinila i drvenih podnih obloga na životnu sredinu pomoću tri različite metode. Rezultati su pokazali da je drvo najbolja opcija sa aspekta zaštite životne sredine, dok se linoleum pokazao boljim u odnosu na vinil iako ne toliko evidentno kao u poređenju sa drvetom. Althaus i Richter (2001) sprovode studiju gde porede analizu životnog ciklusa različitih podnih obloga od plute, koja pokazuje da podovi od plute sa PVC premazom daju veće opterećenje životne sredine od lakiranih podova od plute, uprkos činjenici da im nije potrebno renoviranje. Petersen i Solberg (2003) upoređuju dve alternativne podne obloge, drvo i prirodni kamen, za novi aerodrom u Oslu i samo razmatraju energetske aspekte i umanjeni potencijal gasova sa efektom staklene bašte, dok kasnije upoređuju environmentalne i ekonomske uticaje usled zamene drveta drugim, alternativnim materijalima (Petersen i Solberg, 2005). Bowyer i dr. (2009) u svom izveštaju razmatraju i ispituju dostupne podatke o ocenjivanju životnog ciklusa za veliki broj podnih obloga, i izveštavaju i sumiraju istraživačke nalaze i procene podataka iz celog sveta. Podaci su uzeti iz BEES¹¹ programa koji vodi Nacionalni institut za standardizaciju i tehnologiju (NIST)¹², i koji predstavlja najsveobuhvatniju bazu podataka građevinskih proizvoda, do danas dostupnu. Rezultati uporednih LCA studija jasno ukazuju na to da proizvodi od drveta i njihovi proizvodni sistemi pokazuju prednosti u većini uticajnih kategorija životne sredine. Vjestica i dr. (2014) u svom istraživanju predstavljaju opšti model za ocenjivanje uticaja na životnu sredinu procesa proizvodnje podnih obloga zasnovan na LCA. Razvijeni model predstavlja doprinos unapređenju stanja u oblasti podnih obloga i dodatni korak ka standardizaciji LCA u oblasti proizvodnje podnih obloga.

Vlasnici domaćinstva, poslovnih zgrada, dizajneri i graditelji imaju veliki broj opcija podnih obloga koje mogu izabrati, te stoga postoje i značajne razlike u uticajima na životnu sredinu među ovim opcijama. Za buduću korist ekoloških performansi drvenih podnih obloga, u okviru održivog razvoja, opšta slika korisnosti upotrebe "zelenih" podnih obloga mora da se poveća na različitim nivoima donošenja odluka. Ključni zahtevi za postizanje ovog cilja su pouzdani tehnički kvalitet, ekonomska konkurentnost i superiorne ekološke performanse. Takođe, moraju se definisati neophodne buduće aktivnosti prilikom integracije koncepta "razmišljanja o životnom ciklusu" u okviru integrisane politike proizvoda i da se konačno preusmeri tok materijala i energije na održiviji put.

4.2.1 Definisane cilja i predmeta

Definisane cilja: Osnovni cilj sprovođenja ove studije slučaja, u okviru ovog istraživanja, je verifikacija funkcionalnosti razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa. Ova studija slučaja treba da potvrdi prednosti primene razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje uticaja u odnosu na tradicionalnu LCA i eksergetsku analizu, i da pokaže da će se njegovom primenom dobiti bolji i kvalitetniji rezultati, koji će pokazati širu sliku nastalih negativnih uticaja tokom životnog ciklusa laminatnog parketa. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata će biti lakše doneti kvalitetnije odluke u cilju unapređenja procesa proizvodnje laminatnog parketa. Da bi se obezbedio cilj, neophodno je da se predstavi, kako opšti pregled, tako i detaljna analiza rezultata ukupnog opterećenja životne

¹¹ Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) – softver za ocenjivanje environmentalno pogodnih i ekonomsko efikasnih građevinskih proizvoda.

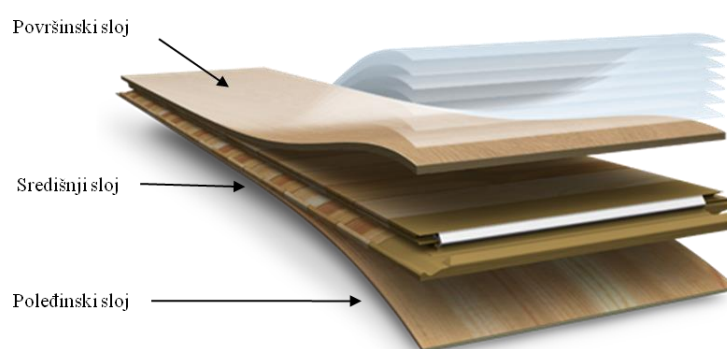
¹² The National Institute of Standards and Technology (NIST) – osnovan 1901. god. i predstavlja nezavisnu nacionalnu agenciju u sklopu Ministarstva trgovine SAD-a. Misija NIST-a je promovisanje inovacija u okviru industrije razvijanjem metrologije, standarda i tehnologije na način koji poboljšava ekonomsku stabilnost i unapređuje kvalitet života.

sredine laminatnog parketa. Za te potrebe, posmatran je celokupni životni ciklus, tj. urađena je studija "od kolenke do groba". Na osnovu dobijenih rezultata mogu se dobiti odgovori na pitanje koje faze u životnom ciklusu laminatnog parketa su odgovorne za nastanak najvećih uticaja na životnu sredinu. Pored toga, mogu se dobiti odgovori i na pitanje koji jedinični procesi u proizvodnom lancu laminatnog parketa imaju najveći negativni uticaj na životnu sredinu. Na kraju, mogu se dobiti odgovori na pitanje kako se ovo saznanje može iskoristiti za unapređenje životnog ciklusa laminatnog parketa na održivi način.

U okviru ove studije je sprovedena detaljna analiza i evaluacija proizvodnog lanca laminatnog parketa, sa posebnim akcentom na jedinične procese i njihovo opterećenje na životnu sredinu. Nedostatak ranije urađenih studija sa ovakvim detaljnim uvidom u proces proizvodnje je još jedan od razloga sprovođenja ovakvog istraživanja. Ipak, glavni razlog predstavlja pronalaženje većeg broja mogućnosti za unapređenje samog proizvoda i proizvodnog sistema u celini, ali i svakog jediničnog procesa pojedinačno, posebno sa aspekta korišćenih sirovina, potrošnje energije i uticaja na zdravlje zaposlenih i krajnjih korisnika.

Definisanje predmeta: Predmet urađene studije pokriva, analizu uticaja na životnu sredinu proizvodnje laminatnog parketa i prati tokove (ulaze) od ekstrakcije sirovina, preko njihove obrade i transporta do mesta proizvodnje finalnog proizvoda, ali i tokove (izlaze) proizvodnje, instalacije i upotrebe do konačnog odlaganja. Svi navedeni tokovi uključuju potrošnju sirovina i energije, nastale emisije i otpad, itd.

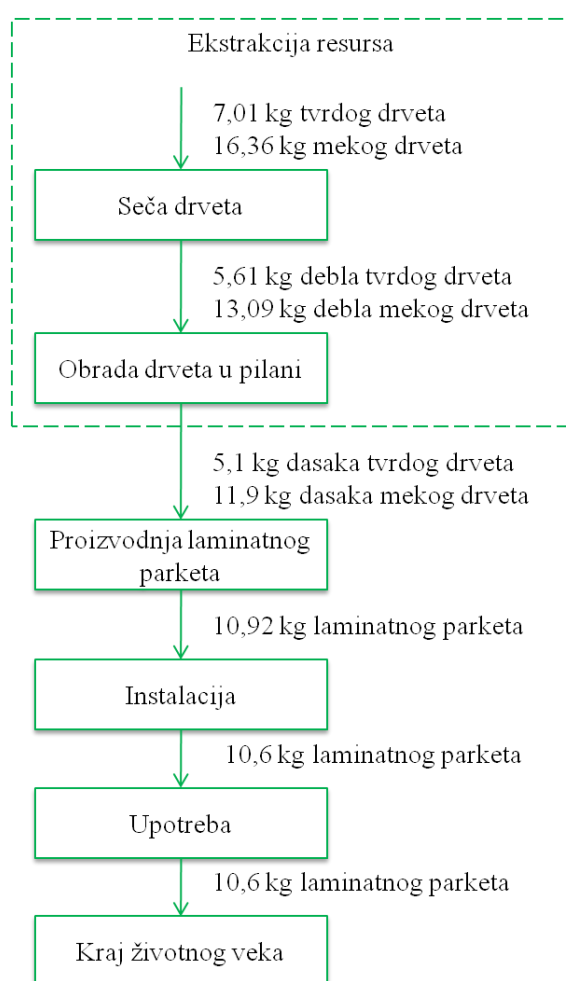
Finalni proizvod koji se posmatra je laminatni parket koji se sastoji od tri sloja drveta koji su spojeni lepkom (slika 4.1). Površinski (gornji) sloj je napravljen od tvrdog drveta, najčešće hrasta ili bukve, i poseduje površinski sloj od laka koji služi kao mehanička zaštita. Središnji sloj koji je napravljen od mekog drveta, najčešće smrče, i daje stabilnost laminatnom parketu. Poleđinski sloj je napravljen od furnira i šperploče i služi kao potpora laminatnom parketu. Laminatni parket je već lakiran u okviru postrojenja za proizvodnju i spreman je za instalaciju i upotrebu odmah po dostavi klijentu.



Slika 4.1 Šematski prikaz laminatnog parketa

Granice sistema: Postavljanje granica sistema delom zavisi i od pitanja na koje se želi dati odgovor, odnosno cilja studije koja se sprovodi, ali i od mogućnosti nalaženja i prikupljanja podataka koji će se koristiti prilikom ocenjivanja. Osnovne faze životnog ciklusa koje se posmatraju su ekstrakcija resursa, proizvodnja, instalacija, upotreba i konačno odlaganje. Izvor podataka je obično mnogo veći kada je u pitanju proizvodna faza nego za ostale tri, što je i uslovalo veću detaljnost podataka u okviru prve faze i veći broj

pretpostavki u okviru ostalih. Granice postavljene između sistema životne sredine (prirode) i posmatranog proizvodnog sistema (tehnosfere) uključuju procese koji opisuju ekstrakciju sirovina i njihovu obradu, odnosno proizvodnju ulaznih materijala i njihov transport, proizvodnju i upotrebu energetske ulaze, proizvodnju posmatranog finalnog proizvoda sa svim svojim podprocesima, kao i nastale emisije i otpad prilikom proizvodnje. Takođe, uključena je i instalacija laminatnog parketa kao i transport do mesta instalacije, zatim svi procesi vezani za fazu upotrebe i na kraju rešenje za konačno odlaganje proizvoda nakon završenog životnog veka. Ovako postavljene granice sistema omogućavaju dobijanje detaljne slike opterećenja životne sredine od strane svake faze životnog ciklusa ali i od svakog jediničnog procesa. Takođe, smanjuje se nesigurnost usled zanemarenih tokova ili procesa i daje bolji uvid i identifikaciju mogućih poboljšanja proizvoda i proizvodnog sistema u celini sa aspekta smanjenja negativnog opterećenja na životnu sredinu. Prethodno opisan pristup postupku modelovanja ilustriran je na slici 4.2, gde je u opštem obliku prikazan dijagram toka sa osnovnim fazama životnog ciklusa laminatnog parketa.



Slika 4.2 Dijagram toka laminatnog parketa

Funkcionalna jedinica: Funkcionalna jedinica se definiše tako da opiše ključne karakteristike proizvodnog sistema i da omogući poređenje proizvoda koji obavljaju istu ili sličnu funkciju. Ovo istraživanje uključuje funkciju posmatranog proizvoda i njegov životni vek kao osnovne funkcije koje se uzimaju u obzir pri definisanju funkcionalne jedinice. Shodno tome, funkcionalna jedinica je u ovom slučaju definisana kao 1 m² instalisanog laminatnog parketa u okviru stambenih objekata sa pretpostavljenim životnim

vekom od 25 godina. Referentni tok je 10,6 kg laminatnog parketa što je masa 1 m² laminatnog parketa.

Ograničenja, pretpostavke i nedostatak podataka: Ograničenja identifikovana u okviru sprovedene studije odnose se uglavnom na ljudsku aktivnost i kapitalnu infrastrukturu i opremu. Ovakvi podaci su isključeni iz granica sistema jer je njihovo sakupljanje veoma komplikovano, posebno podataka koji se tiču ljudske aktivnosti, tj. ljudskog rada. Pored toga, negativni uticaji na životnu sredinu proizvodnje i instalacije kapitalne infrastrukture i opreme su procenjeni kao zanemarljivi u odnosu na protok proizvoda tokom njihovog upotrebnog veka. Nedostatak podataka u vezi sa ulaznim sirovinama odnosi se na neke od hemijskih aditiva i pigmentata korišćenih prilikom proizvodnje. Jedan od ključnih uzroka ovog nedostatka predstavlja mogućnost kompanije da zaštiti svoju recepturu pomoću akta o tajnosti i vlasništvu podataka svojih proizvoda. U fazi instalacije usvojene su pretpostavke da se laminatni parket ne lepi za podlogu nego se samo postavlja spajanjem ploča pomoću sistema koji obezbeđuje jake i nevidljive spojeve, i da otpad nastao prilikom postavljanja čini 3% od ukupne količine laminatnog parketa. Usvojene pretpostavke u vezi sa fazom upotrebe, odnosno za održavanje, negu i čišćenje podnih obloga, su neizbežne zbog nedostatka podataka o načinu i frekvenciji čišćenja parketa u stambenim objektima, što i uglavnom zavisi od subjektivnih navika potrošača. Ipak usvojena je pretpostavka da se laminatni parket u stambenim objektima održava jednom nedeljno, tako što se prvo usisava, a potom se briše vlažnom krpom koja se potapa u vodu kojoj se dodaje neko od preporučenih sredstava za održavanje laminatnog parketa. U okviru ovog istraživanja pretpostavljen je uobičajen životni vek laminatnog parketa od 25 godina. Zbog nedostatka podataka za fazu odlaganja otpada kraju životnog ciklusa uzima se pretpostavka da se celokupna količina laminatnog parketa nakon upotrebe transportuje i odlaže na deponiju.

Svi procesi koji ne zadovoljavaju postavljene kriterijume isključenja su zanemareni u okviru ocenjivanja uticaja. Kriterijumi isključenja su:

- Maseni – ako tok učestvuje sa manje od 1% u ukupnoj masi postavljenog modela, taj tok se može isključiti, pod uslovom da je njegov uticaj na životnu sredinu zanemarljiv (manji od 1% u ukupnom opterećenju).
- Energetski - ako tok učestvuje sa manje od 1% u ukupnoj energiji postavljenog modela, taj tok se može isključiti pod uslovom da je njegov uticaj na životnu sredinu zanemarljiv (manji od 1% u ukupnom opterećenju).

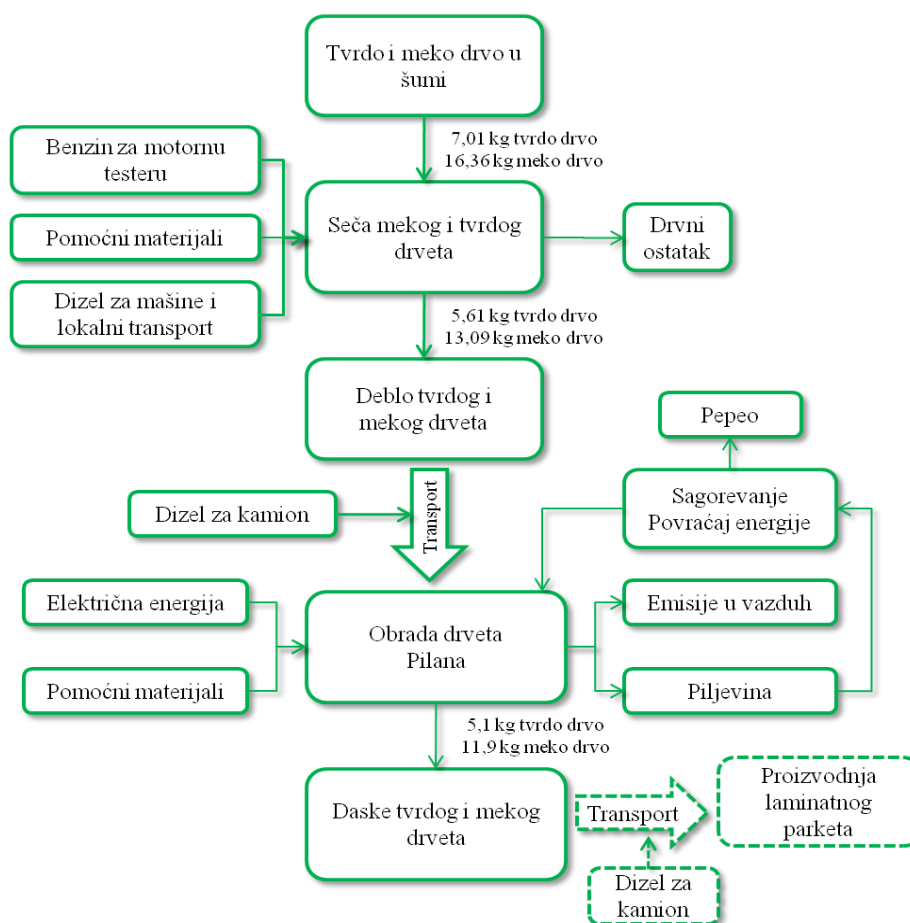
4.2.2 Analiza inventara životnog ciklusa

Izvori podataka: Za detaljnu analizu neophodno je prikupiti što relevantnije i kompletnije podatke, u cilju dobijanja što realnije slike stvarnog stanja posmatranog sistema. Podaci o sistemu proizvodnje laminatnog parketa su dobijeni od strane relevantnih predstavnika menadžmenta kompanije, zatim kroz popunjavanje tabela i upitnika na licu mesta (u pogonu) od strane zaposlenih. Ovakvim pristupom dobijeni su tzv. primarni podaci i oni su od ključnog značaja za sprovođenje analize. Takođe, korišćeni su i drugi, veoma značajni izvori podataka, pre svega *ecoinvent* v2.2 baza podataka, stručna literatura, objavljeni naučni članci, kao i prethodno urađene studije iz oblasti podnih obloga. Detaljan pregled svih ulaznih i izlaznih tokova u okviru životnog ciklusa laminatnog parketa (sa naznačenim izvorima podataka, odabranim i primenjenim *ecoinvent* procesima i određenim napomenama) dat je u okviru Priloga 3.

Za uspešnu primenu razvijenog hibridnog modela neophodno je sakupiti dodatne podatke o tokovima koji su neophodni za proračun njihovog sadržaja eksergije (npr. temperatura, pritisak, koncentracija, itd.). Primer šablona za sakupljanje ovih podataka dat je prethodno u poglavlju 3.3. Nakon sakupljenih podataka o vrsti, količini i karakteristikama ulaznih i izlaznih tokova u pojedinim fazama životnog ciklusa ispitivanog proizvoda može se pristupiti modelovanju proizvodnog sistema koji se posmatra.

4.2.2.1 Modelovanje

Ekstrakcija resursa: Ovu fazu čine seča drveta u šumi i obrada drveta u pilani. Drvo raste u šumi, gde koristi sunčevu energiju, vodu i minerale iz zemljišta i ugljen-dioksid iz vazduha za svoj rast, a odaje kiseonik. Posle određenog perioda, drvo se seče, a zatim se posečena stabla u obliku debala skladište privremeno pored puta. Nakon određenog perioda, debla se pomoću mašinerije utovaraju na kamion za transport. Drvo se seče upotrebom teške mašinerije i ručnih motornih testera. Glavni ulazi energije u okviru faze ekstrakcije drveta su dizel i benzin, a ulazi pomoćnih materijala su hidraulična tečnost, fluid za podmazivanje i motorno ulje. Svi ovi ulazi su potrebni za mašineriju i ručne motorne testere. Potrošnja hidraulične tečnosti, fluida za podmazivanje i motornog ulja je zanemarljiva, te je stoga izuzeta iz analize. Drvni ostatak (oko 25% od posečenog drveta) se obično ostavlja u šumi da se razgrađuje prirodnim putem (slika 4.3). Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova faze seče drveta iz šume sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.1. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.



Slika 4.3 Tokovi u okviru faza seče drveta u šumi i obrade drveta u pilani

Tabela 4.1 Tokovi u okviru faze seča drveta iz šume i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 5,61 kg dobijenog debla tvrdog drveta i 13,09 kg dobijenog debla mekog drveta)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
Ulazi				
Stablo tvrdog drveta (elementarni tok)	kg	7,01	17,58	123,27
Stablo mekog drveta (elementarni tok)	kg	16,36	21,40	350,10
Dizel	kg	0,07	88,03	6,16
Benzin	kg	0,011	98,72	1,09
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex	-	-	480,62
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex	-	-	480,62
Izlazi				
Proizvod				
Deblo tvrdog drveta	kg	5,61	17,58	98,62
Deblo mekog drveta	kg	13,09	21,40	280,13
Otpad				
Drvni ostatak tvrdog drveta	kg	1,4	17,58	24,61
Drvni ostatak mekog drveta	kg	3,27	21,40	69,98
Ukupan sadržaj eksergije u proizvodima	MJex			378,75
Indikatori				
B_{ul}				480,62
B_{iz}				378,75
B_{gub}				101,87
η				0,79

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P4)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Indikatori su proračunati metodom opisanim u poglavlju 3.3.3.

Ukupan sadržaj eksergije u proizvodima ne uzima u obzir eksergiju otpada i emisija

Nakon obaranja, posečena debla se iz šume kamionima transportuju do pilane koja je udaljena 300 km. U pilani se debla obrađuju tako što im se prvo skida kora, a potom se seku, pomoću testere, na daske određenih dimenzija. Daske se zatim dodatno obrađuju kroz operacije trimovanja i skidanja ivica. Nakon toga, daske se sortiraju na osnovu dužine, širine i klase. U okviru pilane koristi se mašinerija za pomeranje debala. Za pilanu glavni izvor energije je električna energija koja služi za napajanje testera, Pomoćni materijali koji se koriste za mašineriju su hidraulična tečnost, fluid za podmazivanje i motorno ulje. Potrošnja hidraulične tečnosti, fluida za podmazivanje i motornog ulja je zanemarljiva, te je stoga izuzeta iz analize. Glavni energetski izvor za mašineriju je dizel gorivo. Rezanje stvara otpad, tj. nusproizvode kao što su strugotina, piljevina i kora. U okviru pilane vrše se merenja emisija u vazduh. Finalni proizvod (daske) se pakuje i transportuje do mesta proizvodnje laminatnog parketa. Materijal potreban za pakovanje dasaka na palete se doprema od dobavljača koji je udaljen 600 km. Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova faze obrade drveta u pilani sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.2. Iz pilane se obrađeno drvo u vidu dasaka pakuje, a zatim transportuje do mesta proizvodnje laminatnog parketa (slika 4.3).

Tabela 4.2 Tokovi u okviru faze obrade drveta u pilani i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po 5,1 kg dobijenih dasaka tvrdog i 11,9 kg dobijenih dasaka mekog drveta)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>				
Deblo tvrdog drveta (međutok)	kg	5,61	17,58	98,62
Deblo mekog drveta (međutok)	kg	13,09	21,40	280,13
Električna energija	MJ	3,08	175,81	541,13
Dizel	kg	0,03	88,03	3,03
Benzin	kg	0,0025	98,72	0,25
Piljevina	kg	2,51	19,01	47,72
Čelične trake za pakovanje	kg	0,13	125,33	16,30
PE ambalaža	kg	0,012	230,72	2,77
Voda	m ³	2,21	49,97	110,43
Transport debbla iz šume	tkm	5,61	12,83	71,98
Transport ambalažnih materijala	tkm	0,10	306,15	30,62
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex	-	-	1202,98
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex			824,23
<i>Izlazi</i>				
<i>Proizvod</i>				
Daske tvrdog drveta	kg	5,1	17,58	89,66
Daske mekog drveta	kg	11,9	21,40	254,66
<i>Emisije u vazduh</i>				
NO _x	kg	3,80*10 ⁻²	2,09	0,08
SO _x	kg	2,30*10 ⁻²	4,01	0,09
CO ₂	kg	5,50*10 ⁻⁶	0,44	2,42*10 ⁻⁶
CO	kg	0,14	9,81	9,95
<i>Otpad</i>				
Piljevina	kg	2,51	19,01	47,72
Pepeo	kg	0,19	2,27	0,43
Ukupan sadržaj eksergije proizvoda	MJex			344,32
<i>Indikatori</i>				
B _{ul}	-	-	-	1202,98
B _{iz}	-	-	-	344,32
B _{gub}	-	-	-	858,66
η	-	-	-	0,29

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P5)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Indikatori su proračunati metodom opisanim u poglavlju 3.3.3.

Ukupan sadržaj eksergije proizvoda ne uzima u obzir eksergiju otpada i emisija

Proizvodnja laminatnog parketa: Kada obrađeno drvo (daske) stigne iz pilane do mesta proizvodnje ono mora prvo da se osuši jer sadrži veliku količinu vlage (do 70%). Drvo se suši prvo prirodnim strujanjem vazduha, a zatim u veštačkim sušarama sve dok ne dostigne željenu količinu vlage (6-9%). Nakon sušenja, drvo se šalje na dalju (finu) obradu koja uključuje ravnjanje, porubljanje i sečenje na daske manjih dimenzija radi pripreme za proizvodnju. Posle obrade, daske koje će biti upotrebljene za proizvodnju se klasifikuju. U zavisnosti od vrste drveta, upotrebom tako obrađenih dasaka, dobiće se različiti slojevi laminatnog parketa. Osnovni slojevi koji čine laminatni parket su gornji, središnji i poledinski (potporni) sloj. Gornji sloj se izrađuje od tvrdog drveta, najčešće hrasta ili bukve, dok se središnji sloj izrađuje od mekog drveta, najčešće smrče. Usvojena gustina tvrdog drveta je 760 kg/m^3 , a mekog drveta je 450 kg/m^3 . Poledinski sloj se izrađuje od šperploče. Nakon dobijanja ova tri sloja, sledi proces presovanja tokom kojeg se slojevi sjedinjuju uz pomoć lepka i očvršćivača. Poslednji korak u proizvodnji laminatnog parketa je lakiranje radi njegove dugotrajnosti i bolje zaštite drveta od mehaničkih oštećenja i spoljašnjih uslova. Ovo uključuje sledeće operacije: fino šmirglanje, prajmiranje, bojenje, ispunjavanje pora i nanošenje sjaja. Prajmiranje uključuje nanaošenje osnovnog premaza na drvo i omogućava vezivanje ostalih slojeva za podlogu. Svaki od slojeva se nakon nanošenja izlaže UV zračenju da bi se izvršila aktivacija određenih aditiva i na taj način sloj učinio jačim i tvrdim. Svaki od slojeva koji se nanose ima svoj sastav kojeg čine određene hemikalije u specifičnom odnosu i ima svoju ulogu u dobijanju kvalitetnog proizvoda. Slojeve obično nanose roleri koji se posle peru specifičnim rastvaračima za svaki sloj. Proces proizvodnje se završava profilisanjem i pakovanjem finalnog proizvoda. Profilisanje uključuje završnu obradu laminatnog parketa na određene dimenzije. Nakon profilisanja sledi proces klasiranja laminatnog parketa na određene klase kvaliteta. Na samom kraju sledi proces pakovanja, u kom se koristi tanka providna PE folija (polietilen), tanki ukrasni karton za obeležavanje i PVC trake.

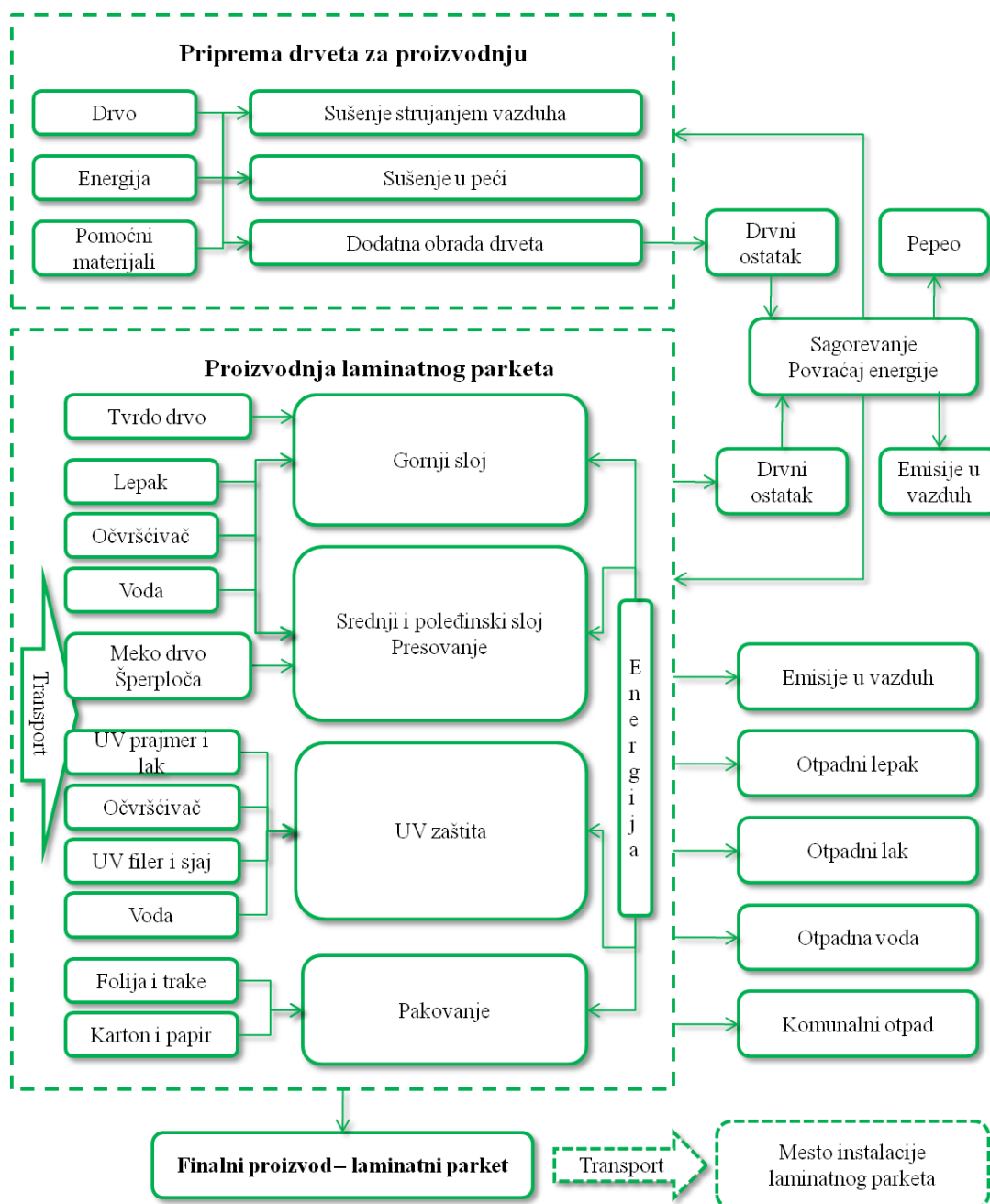
Energija koja se koristi može se podeliti na električnu energiju, prirodni gas, tečno gorivo (lož ulje) i bio-gorivo (piljevina). Električna energija i prirodni gas se dobijaju direktno sa distributivne mreže. Prirodni gas se sagoreva u kotlu radi dobijanja korisne toplote potrebne za procese proizvodnje. Piljevina, koja nastaje kao otpad iz proizvodnje, sagoreva se u okviru instalisanog insineratora i dobija se određena količina povraćene energije. Tako, piljevina, koje je bila tretirana kao otpad, sada nakon izgradnje insineratora, postaje bitan energetski ulaz. U okviru ovog modela ulaz toplote dobijene sagorevanjem piljevine supstituiše toplotu dobijenu sagorevanjem prirodnog gasa, odnosno količina potrebnog ulaza prirodnog gasa je smanjena zbog uvedenog ulaza piljevine kao energenta. Ovo je veoma bitno za modelovanje jer utiče na smanjenje opterećenja životne sredine kao i na smanjenje troškova, jer dolazi do uštede u potrošnji prirodnog gasa kao jednog od osnovnih ulaza energije.

Emisije koje su posmatrane i merene prilikom proizvodnje su CO_2 , CO , NO_x ¹³ i SO_x ¹⁴. Otpad koji nastaje prilikom proizvodnje laminatnog parketa može se podeliti na opasan i neopasan. Opasan otpad predstavljaju ostaci lepka i očvršćivača koji se koriste u procesu presovanja, kao i ostaci laka u procesu lakiranja. Oni se moraju odvojiti od otpadne vode koja nastaje njihovim pranjem i naknadno tretirati. Tretman ovog otpada vrše eksterne kompanije koje su za to specijalizovane. U neopasan otpad spada komunalni otpad, kao i otpad koji nastaje prilikom obrade slojeva parketa kao i završne obrade (piljevina) i pakovanja proizvoda. Pojedini otpad koji nastaje ima određenu ekonomsku vrednost, te se

¹³ NO_x označava opšti izraz za azotove okside NO (azot oksid) i NO_2 (azot dioksid)

¹⁴ SO_x označava opšti izraz za sumporove okside SO_2 (sumpor dioksid) i SO_3 (sumpor trioksid)

stoga može prodavati na tržištu. Međutim, radi pojednostavljenja modela uzima se pretpostavka da se sav otpad odlaže na deponiju. Transport se može podeliti na interni, u okviru samog postrojenja, i eksterni, kojim se dopremaju ulazne sirovine od ostalih proizvođača. Interni transport uglavnom obavljaju viljuškari, a eksterni se obavlja kamionima. Sirovine za proizvodnju laminatnog parketa se dopremaju iz raličitih izvora širom Srbije i drugih zemalja Evrope u kamionima koji troše dizel gorivo. Razdaljine od dobavljača sirovina do mesta proizvodnje laminatnog parketa date su u Tabeli 4.3. Opisani postupak proizvodnje je šematski prikazan na slici 4.4.



Slika 4.4 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa (gate-to-gate)

Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova faze proizvodnje laminatnog parketa sa izračunatim ukupnim sadržajem eksurgije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 1 m² proizvedenog laminatnog parketa)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>				
Električna energija	MJ	10,24	175,81	1800,29
Bio-gorivo (piljevina)	MJ	19,44	4,10	79,70
Prirodni gas	MJ	9,36	2,51	23,49
Daske tvrdog drveta (međutok)	kg	5,1	17,58	89,66
Daske mekog drveta (međutok)	kg	11,9	21,40	254,66
Šperploča	kg	0,18	19,01	3,42
Lepak	kg	0,30	261,07	78,32
Očvršćivač lepka	kg	0,058	1357,18	78,71
Ispunjivač pora	kg	0,002	554,63	1,11
UV lak	kg	0,049	1541,76	75,55
Očvršćivač laka	kg	0,002	991,25	1,98
Prajmer	kg	0,074	1128,19	83,49
Ispunjivač pora kod lakiranja	kg	0,02	452,77	9,06
Sjaj za lak	kg	0,003	1012,02	3,31
Sredstvo za čišćenje laka	kg	0,022	256,34	5,64
Voda	m ³	0,005	49,97	0,25
PE folija za pakovanje	kg	0,028	230,72	6,46
PVC trake za pakovanje	kg	0,015	301,83	4,53
Papir i karton	kg	0,056	91,57	5,13
<i>Transport - kamion</i>				
Daske – tvrdo i meko drvo	tkm (km)	0,85 (583)	12,83	10,91
Šperploča	tkm (km)	1,46 (2426)	12,83	18,73
Lepak	tkm (km)	0,14 (491)	12,83	1,80
Očvršćivač lepka	tkm (km)	0,12 (2068)	12,83	1,54
Ispunjivač pora	tkm (km)	0,34 (1723)	12,83	4,36
Sirovine za lakiranje	tkm (km)	1,50 (1453)	12,83	19,25
Papir i karton	tkm (km)	0,13 (227)	12,83	1,67
PE folija	tkm (km)	0,013 (45)	12,83	0,17
PVC trake	tkm (km)	0,01 (238)	12,83	0,13
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex	-	-	2663,52
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex			2319,00

Tabela 4.3 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 1 m² proizvedenog laminatnog parketa) (nastavak)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Izlazi</i>				
<i>Proizvod</i>				
Laminatni parket (glavni proizvod)	kg	10,92	63,16	689,71
<i>Emisije u vazduh</i>				
NO _x	kg	4,10*10 ⁻³	2,09	0,008
SO _x	kg	2,30*10 ⁻³	4,01	0,009
CO ₂	kg	5,50*10 ⁻⁶	0,44	2,42*10 ⁻⁶
CO	kg	5,10*10 ⁻³	9,81	0,05
<i>Otpad</i>		<i>Prosek</i>		
Piljevina	kg	1,50	19,01	28,52
Komunalni otpad	kg	1,00	266,28	266,28
Otpadni lepak i lak	kg	0,02	912,36	18,25
Otpadna voda	m ³	0,005	49,97	0,25
Ukupan sadržaj eksergije u proizvodima	MJex			689,71
<i>Indikatori</i>				
B _{ul}	-	-	-	2663,52
B _{iz}	-	-	-	689,71
B _{gub}	-	-	-	1973,61
η	-	-	-	0,26

Napomena:

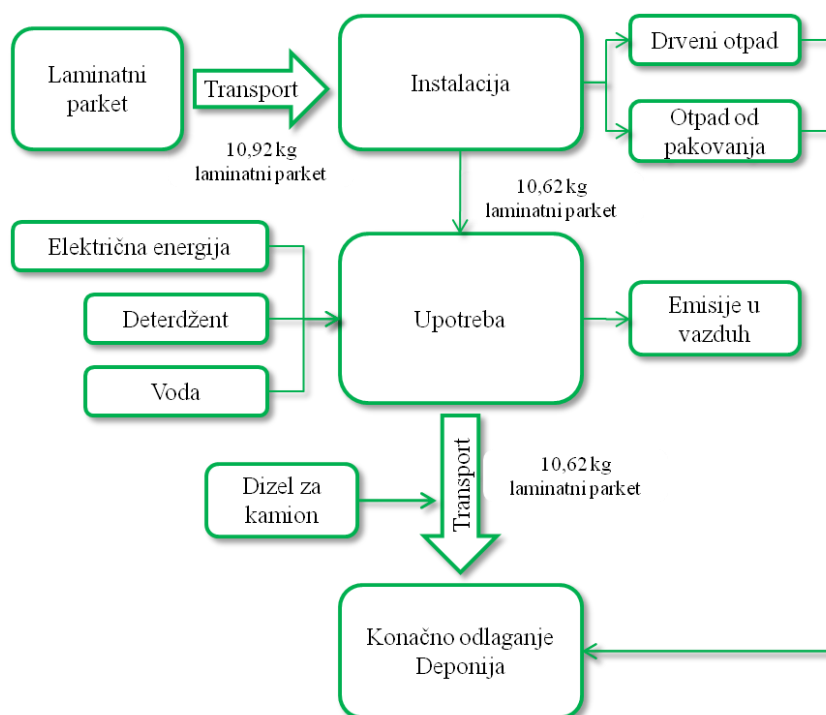
ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P6)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Indikatori su proračunati metodom opisanim u poglavlju 3.3.3.

Ukupan sadržaj eksergije proizvoda ne uzima u obzir eksergiju otpada i emisija

Instalacija, upotreba i kraj životnog veka: Nakon proizvodnje, laminatni parket se transportuje kamionom do prodajnih centara, a odatle do potrošača (do mesta njegove instalacije). Laminatni parket se ne lepi za podlogu nego se postavlja spajanjem ploča pomoću patenta koji obezbeđuje jake i nevidljive spojeve. Otpad nastao prilikom postavljanja uključuje škart parketa koji čini 3% od ukupne količine postavljenog laminatnog parketa, kao i otpad od pakovanja. Laminatni parket u stambenim objektima se održava jednom nedeljno, tako što se prvo usisava, a potom se briše vlažnom krpom koja se ispira vodom. Neko od preporučenih sredstava za održavanje laminatnog parketa se prethodno dodaje u vodu za čišćenje. Tokom upotrebe pretpostavljaju se emisije u vazduh, uglavnom VOC emisije (Jones, 1999; Wang i dr., 2007). Nakon kraja životnog veka, sva količina laminatnog parketa se transportuje i odlaže na deponiju (slika 4.5). Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova faza instalacije, upotrebe i kraja životnog veka sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabelama 4.4-4.6. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.



Slika 4.5 Tokovi u okviru faza instalacije, upotrebe i konačnog odlaganja

Tabela 4.4 Tokovi u okviru faze instalacije i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 1 m² proizvedenog laminatnog parketa)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>				
Laminatni parket (međutok)	kg	10,92	63,16	689,71
<i>Transport</i>				
Do mesta instalacije	tkm (km)	0,1 (10)	306,15	30,62
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex	-	-	720,33
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex			30,62
<i>Izlazi</i>				
Instalisan laminatni parket	kg	10,62	63,16	670,76
<i>Otpad</i>				
Škart - parket	kg	0,3	63,16	18,95

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P7)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Tabela 4.5 Tokovi u okviru faze upotrebe i i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 1 m² instalisanog laminatnog parketa tokom 25 godina)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>				
Instalisan laminatni parket (međutok)	kg	10,62	63,16	670,76
Električna energija	MJ/god	14,00	175,81	2461,25
Sredstvo za čišćenje	m ³ /god	0,030	231,95	7,00
Voda	m ³ /god	0,390	49,97	195,00
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex/god	-	-	3334,01
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex			2663,25
<i>Izlazi</i>				
Instalisan laminatni parket	kg	10,62	63,16	670,76
<i>Otpad</i>				
Voda sa deterdžentom	m ³ /god	0,42	140,96	59,25
<i>Emisije u vazduh</i>				
VOC	kg/god	0,63	26,37	16,50

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P8)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Tabela 4.6 Tokovi u okviru faze kraja životnog veka i i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; odnosno po 1 m² otpadnog laminatnog parketa)

Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>				
Laminatni parket koji se odlaže na deponiju	kg	10,62	63,16	670,76
<i>Transport</i>				
Transport laminatnog parketa na deponiju	tkm (km)	0,11 (10)	12,83	1,41
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima	MJex	-	-	672,17
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima (bez međutokova)	MJex			1,41
<i>Izlazi</i>				
Laminatni parket odložen na deponiju	kg	10,62	63,16	670,76

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P9)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

4.2.3 Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa

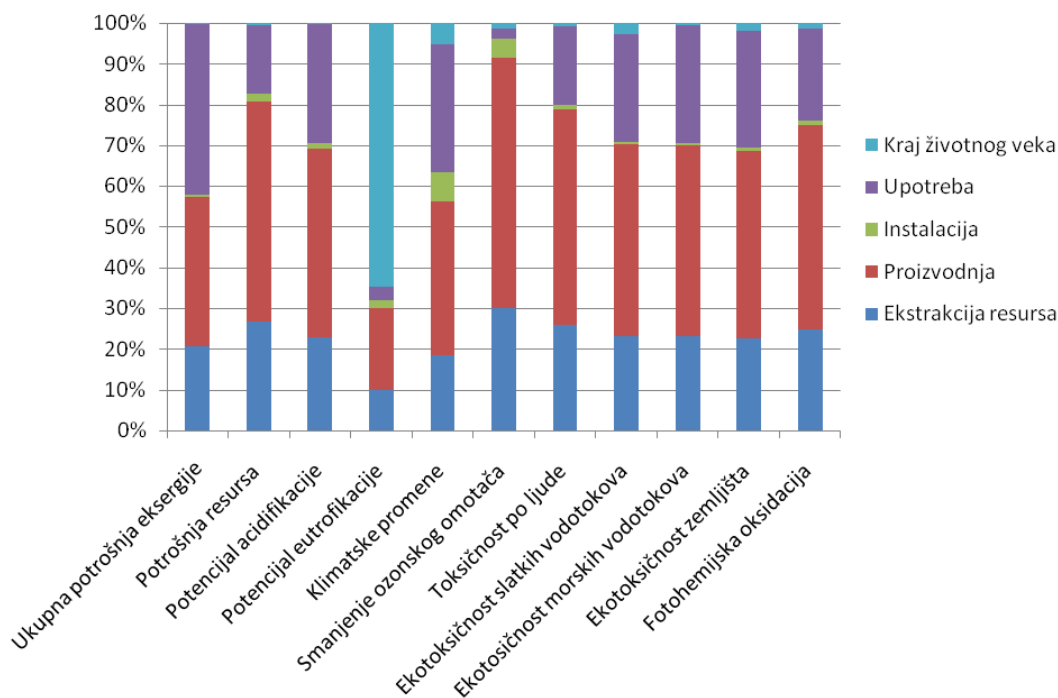
Nakon modelovanja inventara životnog ciklusa, zatim prikupljanja svih podataka o ulaznim i izlaznim tokovima, kao i izračunavanja eksergetskih vrednosti svih tokova, može se pristupiti ocenjivanju uticaja životnog ciklusa laminatnog parketa. U ovom delu se primenjuje razvijeni LCIA modul u okviru hibridnog modela, koji je prethodno detaljno opisan u okviru poglavlja 3.4. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa se vrši pomoću CML metoda kojem je dodata kategorija uticaja *ukupna potrošnje eksergije - UPE.*, koja se računa kao zbir ukupnog sadržaja eksergije u svim elementarnim ulaznim tokovima laminatnog parketa. Primenjuje se i razvijeni karakterizacioni model, koji uključuje izračunavanje karakterizacionih faktora radi dobijanja rezultata indikatora dodatne kategorije uticaja. Karakterizacioni faktori predstavljaju saržaj eksergije posmatranog elementarnog toka po jedinici. Rezultat indikatora kategorije uticaja predstavlja ukupan sadržaj eksergije posmatranog toka u životnom ciklusu laminatnog parketa, i dobija se množenjem karakterizacionog faktora sa količinom toka iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa (detaljno predstavljeno u poglavlju 3.4).

4.2.4 Rezultati i diskusija

Dobijeni rezultati predstavljaju potencijalne negativne uticaje nastale tokom životnog ciklusa laminatnog parketa, a uključuju potrošnju prirodnih resursa, emisiju štetnih materija, generisanje otpada, uticaj na ljude i ekosistem, itd. Rezultati opterećenja po kategorijama uticaja CML metode su dobijeni proračunom uz korišćenje postojećeg LCA računarskog softvera SimaPro 7. Rezultati ocenjivanja životnog ciklusa se prikazuju na nivou indikatora kategorija uticaja na središnjim pozicijama mehanizma životne sredine (mid-point nivo). U tabeli 4.7 dati su rezultati karakterizacije i udeo svake faze životnog ciklusa laminatnog parketa, po svim kategorijama uticaja središnjeg nivoa. Na slici 4.6 su prikazani rezultati karakterizacije i udeo svake faze životnog ciklusa laminatnog parketa, po svim kategorijama uticaja središnjeg nivoa.

Tabela 4.7 Rezultat indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa laminatnog parketa (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	Ekstrakcija resursa	Proizvodnja	Instalacija	Upotreba	Kraj životnog veka	Ukupno
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	1304,85	2319,00	30,62	2663,25	1,41	6319,1
Potrošnja resursa	kg Sb eq	0,059	0,12	0,005	0,037	0,001	0,222
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	0,053	0,11	0,003	0,067	0,001	0,234
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ --- eq	0,004	0,01	0,001	0,001	0,026	0,042
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	2,846	5,78	1,099	4,805	0,811	15,34
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	6,22*10 ⁻⁷	12,6*10 ⁻⁷	1,01*10 ⁻⁷	0,47*10 ⁻⁷	0,31*10 ⁻⁷	20,6*10 ⁻⁷
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	2,606	5,29	0,120	1,919	0,093	10,03
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	0,878	1,78	0,025	0,998	0,105	3,78
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	1948,34	3955,73	51,08	2442,93	51,66	4391,27
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	0,041	0,08	0,001	0,052	0,003	0,093
Fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄ eq	0,003	0,01	0,0001	0,003	0,0002	0,006



Slika 4.6 Rezultat indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa laminatnog parketa (po FJ)

Iz prikazanih rezultata može se videti da najveće opterećenje životne sredine dolazi od faza upotrebe, proizvodnje i ekstrakcije resursa, a potom slede faze kraja životnog ciklusa i instalacije. Najveće opterećenje u okviru kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* dolazi od faza proizvodnje i upotrebe, a zatim slede faze ekstrakcije resursa, kraja životnog veka i instalacije. U okviru faze proizvodnje najveći uticaj dolazi zbog potrošnje energije neophodne za dobijanje proizvoda (primarno električne energije), ali i od sirovina koje se koriste za proizvodnju, na prvom mestu drveta, a potom i ostalih materijala, kao što su lepak, lak i dr. Potrošnja električne energije takođe ima dominantan uticaj na fazu upotrebe usled pretpostavljenog životnog veka proizvoda od 25 godina. Posmatrajući ostale kategorije uticaja, može se uvideti da faza proizvodnje ima najveći uticaj na životnu sredinu, a slede je faze ekstrakcije resursa i upotrebe. Negativni uticaj nastaje usled potrošnje fosilnih goriva, na prvom mestu uglja, radi dobijanja električne energije, usled čega dolazi do emisija ugljen-dioksida, sumpor-dioksida, azotovih oksida i amonijaka. Pored toga, sagorevanjem uglja dolazi do stvaranja pepela i kasnije do negativnih uticaja nastalih nakon njegovog odlaganja usled emisija teških metala u zemljište i vodotokove. Faza kraja životnog veka dominira u okviru kategorije uticaja *potencijal eutrofikacije* (što je i jedini izuzetak), a negativni uticaj nastaje kao posledica procesa odlaganja drveta na deponiju. Negativan uticaj u fazi proizvodnje nastaje i zbog emisija bromohlorodifluorometana u vazduh i to u procesima dobijanja hlora, ekstrakcije nafte i transporta prirodnog gasa. Osim toga, negativni uticaji nastaju usled distribucije električne energije u fazi upotrebe i usled procesa dobijanja amonijaka i distribucije električne energije u fazi proizvodnje, jer dolazi do emisija hroma i ostalih teških metala u zemljište. Na kraju, potrebno je istaći i VOC emisije koje nastaju zbog upotrebe rastvarača u procesima dobijanja lepka i laka.

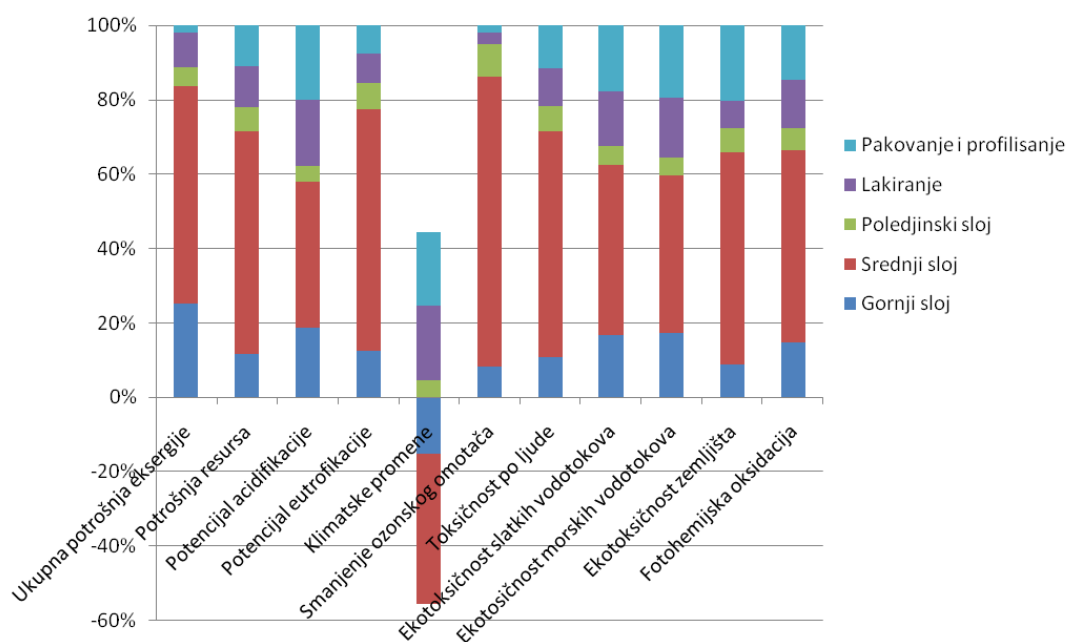
Rezultati dobijeni u okviru dodatne kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* su pokazali da faze proizvodnje i upotrebe imaju skoro podjednako opterećenje u ukupno uticaju (odnosno upotreba ima i malo veći uticaj u odnosu na proizvodnju), za razliku od rezultata dobijenih u okviru ostalih kategorija uticaja pokrivenim CML metodom, koji pokazuju da faza proizvodnje ima najveće opterećenje u ukupnom negativnom uticaju. Pored toga, uporedni rezultati pokazuju da faze instalacije i kraja životnog veka učestvuju sa većim udelom u ukupnom opterećenju u kategoriji uticaja *ukupna potrošnja eksergije* nego u ostalim kategorijama uticaja (sa izuzetkom kategorije uticaja *potencijal eutrofikacije*), što ukazuje na određeni nedostatak prilikom izbora tretmana laminatnog parketa na kraju njegovog upotrebnog veka. Usled ovih različitosti uočenih u okviru raspodele opterećenja u okviru faza proizvodnje i upotrebe, i da bi se ovakvi rezultati do detalja istražili, korisno je prikazati uporedni prikaz rezultata kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* i ostalih kategorija uticaja kada se posmatra samo faza proizvodnje bez ostalih faza životnog ciklusa (tabela 4.8).

Tabela 4.8 Rezultat indikatora kategorija uticaja faze proizvodnje (sa jediničnim procesima) laminatnog parketa po kategorijama uticaja (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	Gornji sloj	Srednji sloj	Poledinski sloj	Lakiranje	Pakovanje i profilisanje
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	582,3	1358,7	115,2	217,11	45,81
Potrošnja resursa	kg Sb eq	0,021	0,107	0,012	0,0199	0,0196
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	0,030	0,063	0,007	0,028	0,032
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq	0,002	0,0079	0,0009	0,001	0,0009
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	-1,87	-5,01	0,556	2,496	2,437
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	$1,54 \cdot 10^{-7}$	$14,71 \cdot 10^{-7}$	$1,64 \cdot 10^{-7}$	$0,57 \cdot 10^{-7}$	$0,39 \cdot 10^{-7}$
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	0.865	4.784	0.532	0.811	0.905
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	0.447	1.213	0.135	0.393	0.472
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	1025.50	2503.55	278.17	954.58	1142.27
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	0.011	0.071	0.008	0.009	0.025
Fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄	0.0013	0.004	0.0005	0.0011	0.0013

Na slici 4.7 prikazani su rezultati uticaja jediničnih procesa u okviru faze proizvodnje na odabrane kategorije uticaja. Na osnovu prikazanih rezultata može se videti da je najveća potrošnja eksergije u okviru jediničnog procesa *srednji sloj*, što se može pripisati potrošnji električne energije u okviru procesa koji se koriste za obradu i pripremu drveta ali i njegovim visokim sadržajem eksergije. Kada se posmatraju ostale kategorije uticaja, obuhvaćene CML metodom, takođe se može videti da najveće opterećenje dolazi od jediničnog procesa *srednji sloj*. Negativan uticaj na ostale kategorije glavnom dolazi usled potrošnje fosilnih goriva prilikom proizvodnje drveta, kao i odlaganjem nastalog pepela prilikom sagorevanja ovih fosilnih goriva. Kada se uporede rezultati među kategorijama uticaja, dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* je potvrdila dominaciju uticaja *srednjeg sloja* i zanemarljiv uticaj *poledinskog sloja*, što je slučaj i kod ostalih kategorija uticaja. Međutim, sa druge strane, *ukupna potrošnja eksergije* je istakla uticaj *gornjeg sloja*, a smanjila uticaj *pakovanja i profilisanja* u ukupnom opterećenju, za razliku

od ostalih kategorija uticaja. Povećan udeo u ukupnom opterećenju *gornjeg sloja* se objašnjava na isti način kao i kod analize nastanka uticaja *srednjeg sloja*, tj. potrošnjom električne energije i sadržajem eksergije samog drveta kao sirovine. Smanjeni udeo jediničnog procesa *pakovanja i profilisanja* u ukupnom opterećenju se objašnjava niskim sadržajem eksergije ulaznih sirovina u okviru ovog procesa, kao i manjom potrošnjom električne energije. Negativan uticaj jediničnih procesa *gornji srednji sloj* na kategoriju uticaja *klimatske promene* nastaje zbog drveta koje je apsorbovalo CO₂ iz vazduha tokom svog rasta u šumi i tako doprinelo smanjenju negativnog uticaja.



Slika 4.7 Rezultat indikatora kategorija uticaja faze proizvodnje (sa jediničnim procesima) laminatnog parketa po kategorijama uticaja (po FJ)

4.2.5 Zaključak

Na osnovu iznetih i diskutovanih rezultata može se zaključiti, pre svega, da je dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* doprinela dobijanju šire i kvalitetnije slike o ukupnom opterećenju životne sredine laminatnog parketa. Pored toga, dobijeni rezultati su kvalitetniji i tačniji, što povećava kompletnost i transparentnost studije i dovodi do lakšeg izvođenja zaključaka i preporuka na osnovu boljeg razumevanja dobijenih rezultata. U ovom slučaju, rezultati kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* su pokazali da faze proizvodnje i upotrebe imaju podjednak udeo u ukupnom negativnom uticaju životnog ciklusa, što ostale kategorije uticaja nisu pokazale. Da bi se ovaj slučaj detaljnije ispitaio, sprovedeno je ocenjivanje samo faze proizvodnje sa svojim jediničnim procesima. Rezultati u okviru kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* su pokazali i potvrdili da jedinični proces *srednji sloj* ima najveći udeo u ukupnom opterećenju životne sredine, kao što su i rezultati ostalih kategorija uticaja pokazali. Međutim, rezultati su takođe pokazali da je jedinični proces *gornji sloj* dobio veći udeo u ukupnom opterećenju, dok se udeo jediničnog procesa *pakovanje i profilisanje* smanjio, u odnosu na rezultate koji su dobijeni iz ostalih kategorija uticaja. Ovakav razvoj situacije pokazuje da je dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* omogućila sagledavanje nastalih uticaja tokom životnog ciklusa laminatnog parketa iz novog ugla i doprinela stvaranju kvalitetnije slike nastanka

negativnog uticaja. Time je i razvijeni hibridni model potvrdio svoj cilj kroz njegovu verifikaciju putem ove studije slučaja. Primenom razvijenog hibridnog modela korisnik može da identifikuje nove mogućnosti za unapređenje ekoloških performansi laminatnog parketa u različitim fazama njegovog životnog ciklusa. Takođe, dobijeni rezultati mogu da na nov način informišu donosiocima odluka u okviru kompanije za potrebe strateškog planiranja, postavljanja prioriteta sa aspekata životne sredine, razvijanja novog proizvoda ili redizajna postojećeg.

Preporuke za unapređenje ekoloških performansi laminatnog parketa odnose se, prvenstveno na uštedu električne energije u proizvodnji i upotrebi. Najveći uticaj iz faze proizvodnje dolazi od procesa sušenja drveta jer se tu i troši najveći deo energije. Ušteta u potrošnji energije može se postići upotrebom biogoriva (piljevine), koje nastaje kao nusproizvod u procesu proizvodnje parketa. Njegovim spaljivanjem vraća se određeni deo energije (u vidu toplotne energije) nazad u proces proizvodnje. Faza odlaganja predstavlja oblast sa mnogo većim potencijalom za moguća unapređenja. Razvoj alternativnog scenarija tretmana laminatnog parketa na kraju životnog veka predstavlja dodatno unapređenje u okviru životnog ciklusa laminatnog parketa. Sakupljanjem laminatnog parketa bi se omogućilo, umesto odlaganja na deponiju, njegovo spaljivanje u insineratoru, što bi omogućilo direktan povratak energije. Shodno tome, preporučuje se sprovođenje analize scenarija u kojoj bi se međusobno uporedili rezultati faze kraja životnog ciklusa, gde bi osnovni scenario bio odlaganje na deponiju laminatnog parketa, a alternativni scenario bi uključio insineraciju kao vid tretmana laminatnog parketa na kraju životnog veka.

Bez obzira na određena ograničenja koji se tiču nedostataka podataka i usvajanja pretpostavki, rezultati dobijeni na osnovu urađene analize i primene razvijenog hibridnog modela u okviru ove studije slučaja predstavljaju odličnu osnovu za dalji istraživački rad. Na kraju ovog istraživanja je dobijena zaista detaljna slika opterećenja životne sredine nastalog tokom celokupnog životnog ciklusa laminatnog parketa, na osnovu koje se lakše mogu izdvojiti ključni problemi i fokusirati napor za njihovo rešavanje.

4.3 Studija slučaja komparativnog ocenjivanja baznih predajničkih stanica

Veliki broj baznih radio predajničkih stanica širom sveta (oko 5 miliona), sa tendencijom porasta njihovog broja svake godine, podigao je interesovanje za alternativne opcije njihovog napajanja manjeg obima, a zbog sve prisutnijeg problema klimatskih promena. Operatori, članice GSMA (eng. Groupe Speciale Mobile Association) grupe, su istraživali potencijalne alternativne opcije za napajanje, prvenstveno one zasnovane na obnovljivim izvorima energije. Ove opcije uglavnom uključuju fotonaponske (PV) panele i vetrogeneratore, ali postoje i rešenja sa hidrogenatorima manjeg obima, biogorivom, kao i vodonikovim i gorivim ćelijama. Kombinacija ovih alternativnih opcija za napajanje sa baterijama i dizel generatorom kao zaštitnom podrškom, čini tzv. hibridni samostalni sistem. Ipak, ovi hibridni sistemi su uglavnom povezani na lokalnu električnu mrežu, gde god je to moguće (Bondesson, 2010).

Bazna predajnička stanica (BPS) predstavlja deo mobilne telekomunikacione mreže koja služi da obezbedi komunikaciju između krajnjeg korisnika, tj. njegove opreme (npr. mobilnog telefona) i mreže. Ekonomski i tehnički razlozi za uključivanje alternativnih opcija snabdevanja električnom energijom za lokacije koje nemaju dostupnu električnu mrežu ili gde obnovljivih izvora energije ima u izobilju, su opravdani zbog činjenice da su njihovom primenom BPS lokacije postale manji energetske potrošači. Međutim, lokalni uslovi diktiraju izbor alternativnih opcija za snabdevanje električnom energijom. BPS lokacije koje koriste bilo koje alternativne opcije napajanja se nazivaju hibridne bazne predajničke stanice (HBPS) (Ericsson – White Paper, 2007). Ovo istraživanje posmatra HBPS koje se napajaju energijom dobijenom od sunca i vetra, ali su i dalje priključene na električnu mrežu koja služi kao rezervna podrška. Izbor je sproveden pod pretpostavkom da se energija vetra i sunca danas najviše primenjuju i da su najinteresantniji alternativni izvor energije koji se koristi za napajanje BPS lokacija. (Bondesson, 2010; GSMA Developing Fund, 2010). Pošto BPS predstavljaju deo telekomunikacione opreme koja je odgovorna za potrošnju oko 60% od ukupne energije u sektoru mobilnih komunikacija (Han, 2011), postoji interes da se smanji potrošnja energije i time smanji emisija CO₂ kroz:

- smanjenje potrošnje energije BPS;
- smanjenje broja BPS;
- upotrebu obnovljivih energetske rešenja.

Ovo istraživanje je usmereno ka obnovljivoj energiji koja se može definisati kao neprekidni tok energije u prirodnoj sredini. Glavni izvor obnovljive energije je sunčevo zračenje koje se može direktno iskoristiti. Pored toga, sunčevo zračenje stvara vetar, talase i hidrološke cikluse i pospešuje porast bioenergije. Mobilni operateri u razvijenim zemljama će se usmeriti na upotrebu alternativnih opcija za napajanje BPS lokacija, na mestima koja su toliko udaljena, da u njihovoj blizini nema dostupne električne mreže. Pored toga, alternativni izvori napajanja će se koristiti na BPS lokacijama gde postoji električna mreža, ali i gde postoji izobilje obnovljivih izvora energije, npr. u primorskim oblastima gde ima dosta vetra, kao i u oblastima sa visokim sunčevim zračenjem. Dalje, mobilni operateri će povećati interes za proizvodnju “zelene energije”, jer BPS lokacije mogu da proizvode zelenu energiju, te da potencijalno uskladište višak proizvedene energije i eventualno ga vrata nazad u električnu mrežu. Sa tako velikim brojem BPS lokacija u svetu ovo bi moglo biti veoma interesantno sa ekonomskog gledišta, jer mobilne mreže mogu da predstavljaju jednu ogromnu elektranu zelene energije (Fitchard, 2009).

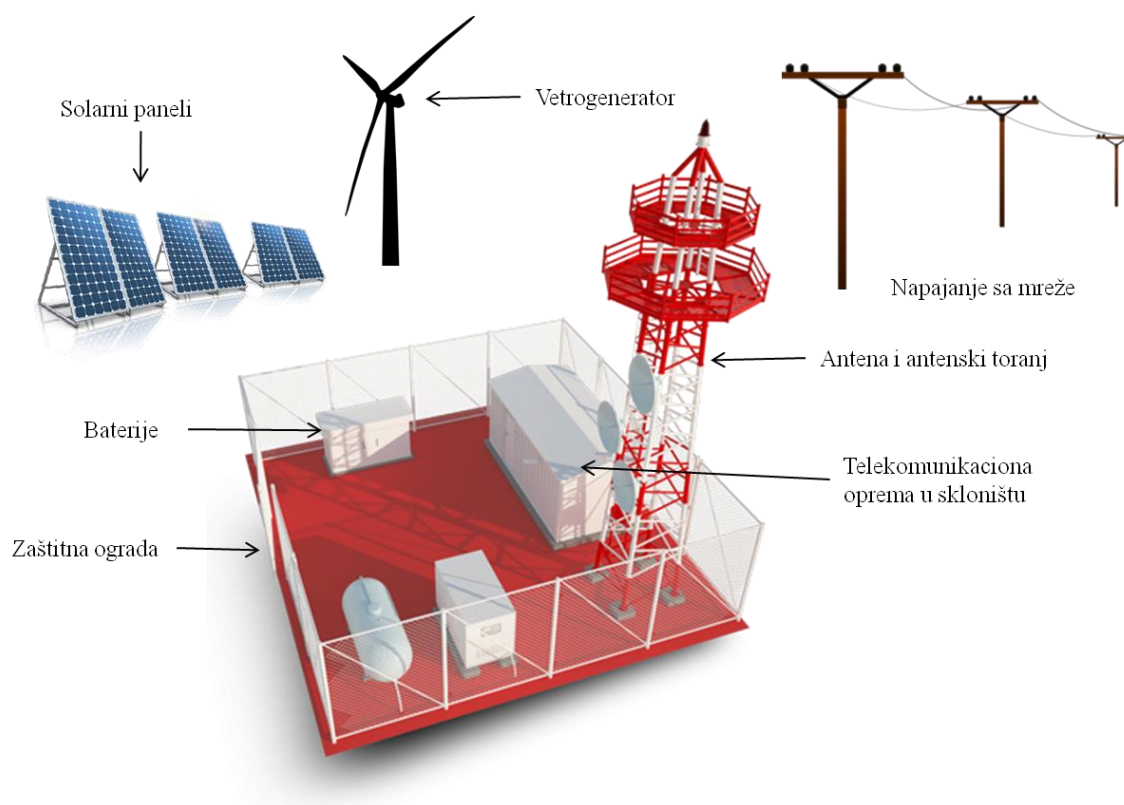
4.3.1 Definisane cilja i predmeta

Definisane cilja: Osnovni cilj sprovođenja ove studije slučaja, u okviru ovog istraživanja, je verifikacija funkcionalnosti razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa. Ova studija slučaja treba da potvrdi prednosti primene razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje uticaja u odnosu na tradionalnu LCA i eksergetsku analizu, i da pokaže da će se njegovom primenom dobiti bolji i kvalitetniji rezultati, koji će pokazati širu sliku nastalih negativnih uticaja tokom životnog ciklusa baznih predajničkih stanica. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata će biti lakše doneti kvalitetnije odluke u cilju unapređenja životnog ciklusa baznih predajničkih stanica. Da bi se obezbedio cilj, neophodno je da se predstavi, kako opšti pregled, tako i detaljna analiza rezultata ukupnog opterećenja životne sredine baznih predajničkih stanica. Na osnovu dobijenih komparativnih rezultata mogu se dobiti odgovori na pitanje koji sistem je bolji sa aspekta životne sredine, BPS ili HBPS sistem. Potom, mogu se dobiti odgovori na pitanje koje faze u životnom ciklusu baznih predajničkih stanica su odgovorne za nastanak najvećih uticaja na životnu sredinu. Pored toga, mogu se dobiti odgovori i na pitanje koji jedinični procesi u proizvodnom lancu baznih predajničkih stanica imaju najveći negativni uticaj na životnu sredinu. Na kraju, mogu se dobiti odgovori na pitanje kako se ovo saznanje može iskoristiti za unapređenje životnog ciklusa baznih predajničkih stanica na održivi način.

Da bi se ispunio cilj, neophodno je sprovesti razvoj dva sistema BPS, hibridnog i konvencionalnog, i izvršiti komparaciju njihovog uticaja na životnu sredinu. Ovo se može postići primenom razvijenog hibridnog modela na dva razvijena HBPS i BPS sistema, koji su pretpostavljeni da budu instalisani na reprezentativnom mestu u kontinentalnom delu Evrope. Oba sistema treba da budu određena, tako što će njihova oprema biti specificirana i granice sistema postavljene kako bi se mogli uključiti svi relevantni tokovi. Potom, potrebno je izvršiti sakupljanje podataka za inventar životnog ciklusa, da bi se moglo sprovesti ocenjivanje uticaja životnog ciklusa prethodno definisanih sistema. Na kraju, sprovodi se interpretacija rezultata i poređenje uticaja na životnu sredinu dva modela.

Ova studija slučaja daje opšti pregled uticaja na životnu sredinu, koji se može očekivati i stoga se ovo poređenje dva modela može posmatrati kao poređenje opšteg tipa. Određeni uticaj može biti veći ili manji, što zavisi od uslova na odabranoj lokaciji na kojoj je instalisan BPS sistem. Ipak, ovakva "uopštena" poređenja se smatraju veoma korisnim u procesu donošenja odluka, jer mogu da podrže zakonodavne odluke o obnovljivim energetske rešenjima. Ovo istraživanje se bavi problemima upotrebe kombinovanih obnovljivih i konvencionalnih energetske rešenja za napajanje BPS lokacija. Osim toga, uzeta je u obzir, koliko je to moguće, pouzdanost obnovljivih energetske rešenja.

Definisane predmeta: Za potrebe ovog istraživanja kreirana su dva hipotetička sistema BPS, hibridni (koji se napaja hibridnom kombinacijom obnovljivih izvora energije i lokalne elektro-mreže) i konvencionalni (koji se napaja samo iz elektro-mreže), a koji uključuju svu opremu potrebnu za nesmetano obavljanje njihove funkcije, instalaciju opreme i pratećih delova na odabranoj lokaciji i upotrebu BPS sistema tokom propisanog upotrebnoog veka. Od opreme i delova i procesa potrebnih za BPS i HBPS sisteme izdvaja se telekomunikaciona oprema, oprema za napajanje i ostali pomoćni delovi i oprema. Uopšteni prikaz delova BPS i HBPS sistema može se videti na slici 4.8. Procesi demontaže i konačnog odlaganja opreme i ostalih delova su izuzeti iz analize zbog nedostatka podataka.



Slika 4.8 Šematski prikaz osnovnih delova BPS i HBPS sistema

Izabrana lokacija za instalaciju BPS sistema je na severnoj obali jezera Neusiedl, koje se nalazi na Austrijsko-Mađarskoj granici. Približne koordinate izabrane lokacije su 47°57' SGŠ i 16°52' IGD. Opis i karakteristike lokacije su sledeće:

- plato pored jezera je okružen poljima (nema visokih prepreka);
- prosečna ukupna godišnja suma za horizontalno sunčevo zračenje na ovoj lokaciji je oko 1250 kWh/m² (izvor: GeoModel Solar¹⁵);
- prema austrijskoj asocijaciji za energiju vetra prosečna godišnja suma energije vetra za pretpostavljenu lokaciju iznosi > 1.499 kW (izvor: IG Windkraft - Austrian Wind Energy Association¹⁶).

Granice sistema: Posmatrani BPS i HBPS sistemi uključuju fazu proizvodnje, instalacije i fazu upotrebe tokom predviđenog životnog veka. Proizvodna faza uključuje ekstrakciju resursa i njihovu obradu radi dobijanja potrebnih delova koji se konačno sklapaju u finalni proizvod odnosno sistem. Osim potrošnje resursa u proizvodnoj fazi dolazi i do potrošnje energije kao i do nastanka emisija i otpada. U fazi proizvodnje se dobijaju svi elektronski delovi kao i njihovi prateći delovi, koji su potrebni kao podrška. Svi ti proizvedeni delovi se transportuju do mesta instalacije gde se vrši konačno sklapanje sistema. Nakon toga nastupa faza upotrebe sistema koja uključuje procese održavanja i popravke tokom celokupnog životnog veka posmatranog sistema. Upotrebnu fazu odlikuje velika potrošnja energije, uglavnom električne.

¹⁵ GeoModel Solar predstavlja tehničkog konsultanta iz oblasti solarne energije i SolarGIS sistema. Cilj ove organizacije je razvijanje visoko pouzdane baze podataka o solarnoj energiji i pratećih softverskih usluga. Oni razvijaju simulacione i upravljačke alate, mape i internet usluge za brzi pristup solarnim podacima o specifičnoj lokaciji (<http://geomodelsolar.eu>).

¹⁶ IG Windkraft je austrijska asocijacija za energiju vetra (<https://www.igwindkraft.at>).

U ovoj studiji slučaja, usvojena je kategorizacija po kojoj se sva oprema i pomoćni materijali i procesi na BPS lokaciji mogu podeliti na sledeće glavne podkategorije: telekomunikaciona oprema, pomoćni delovi, radovi na samoj lokaciji, kao i oprema za napajanje i ostala oprema. Detalji o ovoj kategorizaciji dati su u Tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Specifikacija opreme i ostalih materijala i procesa za HBPS i BPS sistem

Podkategorije opreme i procesa	Napomena
Telekomunikaciona oprema	
Elektronske komponente	Zajedničko za oba sistema
Kućište	Zajedničko za oba sistema
Antena	Zajedničko za oba sistema
Antenski kabel	Zajedničko za oba sistema
Pomoćni delovi	
Beton za temelje skloništa, toranja za antenu i ogradu	Zajedničko za oba sistema
Sklonište za telekomunikacionu opremu i baterije	Sklonište za HBPS je identično po konstrukciji kao i kod BPS ali je veće zbog većih baterija i PV panela koji se montiraju na njegov krov
Toranj antene od čelika	Zajedničko za oba sistema
Zaštitna žičana ograda koja okružuje BPS lokaciju	Zajedničko za oba sistema
Čelični okvir za PV panele	Prisutno samo kod HBPS sistema
Radovi na licu mesta	
Iskopavanje zemlje za temelje	Temelj tornja i stubova je isti za oba sistema Temelj skloništa je veći kod HBPS nego kod BPS
Oprema za napajanje	
Baterije	Baterije za HBPS sistem imaju 50% veći kapacitet nego za BPS sistem
Transformator	Zajedničko za oba sistema
Kabel za napajanje	Zajedničko za oba sistema
Vetrogenerator	Prisutno samo kod HBPS sistema
PV paneli	Prisutno samo kod HBPS sistema
Kabel za napajanje vetrogeneratora	Prisutno samo kod HBPS sistema
Kabel za napajanje PV panela	Prisutno samo kod HBPS sistema

Definicija funkcionalne jedinice: Kod većine LCA studija u vezi sa proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora, količina proizvedene energije (kWh) je izabrana kao funkcionalna jedinica (Gagnon i dr., 2002). Međutim, to nije moguće primeniti u ovoj studiji slučaja, pošto je svrha ovog istraživanja, između ostalog, da se uporedi uticaj HBPS sistema, sa konvencionalnim BPS sistemom. Zbog toga, odlučeno je da se za funkcionalnu jedinicu izabere propusni opseg izražen u TB (terabajt) za period od 20 godina. Ovaj period je postavljen jer većina studija i specifikacija opreme (PV ćelije, vetrogeneratori, antena i postolje) uzima ovaj period kao relevantan za životni vek (Doi i dr., 2001; Bergei

n.d.a.; Shervani i dr., 2009.; Alsema, 2000). Izabrana funkcionalna jedinica se tada definiše kao 1314 TB razmenjenih podataka za period od 20 godina. Detaljan proračun funkcionalne jedinice se može videti u Tabeli 4.10.

Tabela 4.10 Proračun funkcionalne jedinice

Protok podataka	Izvor
<ul style="list-style-type: none"> • 300 korisnika prosečno po satu po BPS lokaciji 	VIP mobile Srbija, član Mobilkom Austrija grupe
<ul style="list-style-type: none"> • 5 min prosečna konekcija po korisniku 	
<ul style="list-style-type: none"> • Svi tipovi konekcije (podaci ili glas) mogu se pretpostaviti da su u proseku do 5 MB po korisniku po konekciji u toku jednog sata 	
Proračun:	
$FJ = 300 \text{ (korisnika/h)} * 5 \text{ (min/korisniku)} * 5 \text{ (MB/h)} * 24 \text{ (h)} * 365 \text{ (dana)} * 20 \text{ (godina)}$ $= 1314000000 \text{ MB} = \mathbf{1314 \text{ TB}}$	

Ograničenja, pretpostavke i nedostatak podataka: Procesi koji nisu obuhvaćeni granicama sistema uključuju proizvodnju, održavanje i rasklapanje kapitalne opreme, aktivnosti i procesi koji uključuju ljudski rad (npr. rad zaposlenih), osvetljenje i grejanje proizvodnih pogona, itd. Ovi procesi nisu uzeti u obzir usled nedostatka podataka i zbog komplikovane procedure njihovog sakupljanja. Sistem hlađenja baterija nije uključen jer se pretpostavlja da je baterija zakopana u zemlju u cilju održavanja operativne temperature (najnovija praksa u mobilnoj telekomunikacionoj industriji). Neočekivani problemi na lokacijama i dodatno održavanje izazvano krađom i vandalizmom su takođe isključeni jer je teško proceniti njihov uticaj. Procesi koji se smatraju zanemarljivim, uključuju bilo kakvu vrstu održavanja telekomunikacione opreme, skloništa, PV ćelija ili vetrogeneratora (Firak, 2005; Fleck i Huot, 2009). Procesi pakovanja, ambalaža i drugi transportni materijal se takođe smatraju zanemarljivim, kao i procesi tokom instalacije, osim iskopavanja zemlje za temelje (Bondesson, 2010). Zbog nedostatka kvalitetnih i kompletnih podataka, faza kraja životnog veka tj. konačnog odlaganja je izuzeta iz analize. Procesi demontaže su takođe isključeni zbog nedostatka podataka.

Svi procesi koji ne zadovoljavaju postavljene kriterijume isključenja su zanemareni u okviru ocenjivanja uticaja. Kriterijumi isključenja su:

- Maseni – ako tok učestvuje sa manje od 1% u ukupnoj masi postavljenog modela, taj tok se može isključiti pod uslovom da je njegov uticaj na životnu sredinu zanemarljiv (manji od 1% u ukupnom opterećenju).
- Energetski - ako tok učestvuje sa manje od 1% u ukupnoj energiji postavljenog modela, taj tok se može isključiti pod uslovom da je njegov uticaj na životnu sredinu zanemarljiv (manji od 1% u ukupnom opterećenju).
- Uticaj na životnu sredinu – ako tok učestvuje sa manje od 1% u ukupnom opterećenju životne sredine postavljenog modela.

Najvažnija usvojena pretpostavka tiče se izbora hipotetičke lokacije za instalaciju BTS i HBTS sistema. Sve ostale usvojenje pretpostavke zavise od prethodne, a tiču se proračuna solarne energije i energije vetra. To direktno utiče na rezultate studije, jer klimatski uslovi na izabranoj lokaciji određuju količinu sunčevog zračenja i prisustvo vetra tokom godine. Tako su i proračuni potrošnje električne energije dobijene iz ovi izvora direktno zavisni od ovih uslova, a samim tim i potrošnja električne energije sa distributivne mreže kao

osnovnog izvora napajanja koji treba da bude zamenjen obnovljivim izvorima energije. Pored toga, lokacija diktira i izbor proizvodnje električne energije koji zavisi od zemlje u kojoj se izabrana lokacija nalazi, kao i odabir alternativnih izvora napajanja (u ovom slučaju solarne energije i energije vetra).

Iz Tabele 4.11 se može zaključiti da ukupna energija dobijena iz obnovljivih izvora iznosi 90 MWh što predstavlja oko 40% od ukupne količine potrošene električne energije. Stoga, potrošnja električne energije HBPS za period od 20 godina iznosi oko 120 MWh.

Tabela 4.11 Proračun potrošnje električne energije u fazi upotrebe na osnovu pretpostavki

BPS sistem	Izvor
Pretpostavka: prosečna potrošnja električne energije BPS pri normalnom opterećenju je oko 1,2 kWh	Kusakana i Vermaak, 2013; Lubritto i dr., 2008
El. energija: $1,2 \text{ kWh} * 24 \text{ h} * 365 \text{ dana} * 20 \text{ god (životni vek)} = 210240 \text{ kWh} = \mathbf{210,24 \text{ MWh}}$	
HBPS sistem	Izvor
Prosečna godišnja količina horizontalnog sunčevog zračenja je 1200 kWh/m^2 ;	GeoModel Solar
Izabrani solarni paneli imaju efikasnost od 15%	First Solar® FS Series 3™ Black PV Module
Solarna energija: $1200 \text{ kWh/m}^2 * 0,15 \text{ (efikasnost)} * 20 \text{ m}^2 \text{ (površina krova)} * 20 \text{ god (životni vek)} = 72000 \text{ kWh} = \mathbf{72 \text{ MWh}}$	
Prosečna godišnja količina energije vetra je u opsegu $>1,499 \text{ kWh}$	Austrian Wind Energy Association
Izabrani vetrogenerator ima efikasnost od 60%	ANTARIS 2,5 kW
Energija vetra: $1500 \text{ kWh} * 0,6 \text{ (efikasnost)} * 20 \text{ god (životni vek)} = 18000 \text{ kWh} = \mathbf{18 \text{ MWh}}$	

Potrošnja električne energije dobijene sa mreže BPS i HBPS sistema je izračunata na osnovu podataka dostupnih iz literature, dok je potrošnja električne energije dobije iz obnovljivih izvora HBPS sistema izračunata na osnovu pretpostavki koje su usvojene na osnovu odabrane lokacije instalacije.

4.3.2 Analiza inventara životnog ciklusa

Izvor podataka: Prvenstveno, podaci su se sakupljali iz prethodnih LCI i LCIA izveštaja kao i iz naučnih radova. Zbog veoma ograničenog broja članaka o LCA studijama za sektor mobilne telefonije, naročito za BPS sisteme (Scharnhorst, 2008;. Scharnhorst i dr., 2006), fokus je stavljen na pregled LCA i LCIA izveštaja i članaka iz oblasti PV ćelija i vetrogeneratora (Shervani i dr., 2010; Martinez i dr., 2009;. Gagnon i dr., 2002;. Baharvani i dr., 2014; Tremeac i Meunier 2009; Ghenai, 2012). Veoma važan izvor podataka je i *ecoinvent* baza podataka. Detaljno su istražene razlike u podacima i između prethodnih studija i izabranog modela na pretpostavljenoj BPS lokaciji. Određene modifikacije BPS sistema su uvedene, uglavnom kroz podatke sakupljene iz specifikacija opreme koje dobavljač obezbeđuje za svoje proizvode i putem ličnog kontaktiranja (putem telefona ili e-maila) zaposlenih u kompanijama za proizvodnju delova za BPS sistem. Ovim putem su sakupljeni primarni podaci za BPS sistem. Sve izmene koje su uvede tokom modelovanja su objašnjene u okviru ograničenja i pretpostavki, a koje su prethodno opisane. Dodatne stručne konsultacije su korišćene gde je to bilo potrebno, npr. za dobijanje informacija o

prenosu podataka kroz BPS sistem u fazi upotrebe radi izračunavanja funkcionalne jedinice. Detaljan pregled svih ulaznih i izlaznih tokova u okviru inventara životnog ciklusa BPS i HBPS sistema (sa naznačenim izvorima podataka, odabranim i primenjenim *ecoinvent* procesima i određenim napomenama) dat je u okviru priloga (Tabele P10-P15).

Za uspešnu primenu razvijenog hibridnog modela neophodno je dodatno sakupiti određene podatke o tokovima koji su neophodni za proračun njihovog sadržaja eksergije. Primer šablona za sakupljanje ovih podataka dat je prethodno u poglavlju 3.3. Nakon sakupljenih ulaznih i izlaznih tokova za inventar može se pristupiti modelovanju proizvodnog sistema koji se posmatra.

4.3.2.1 Modelovanje

Za obavljanje osnovne funkcije BPS i HBPS sistema neophodna je telekomunikaciona oprema koja se sastoji od elektroničkih komponenti za obradu signala u koje spadaju predajnik, pojačivač, kombiner i duplekser (koje se nalaze u skloništu), zatim antene za prijem i slanje signala i antenski kablovi za napajanje i komunikaciju sa elektronskim delovima. Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova telekomunikacione opreme sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.12. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanom u poglavlju 3.4.

Tabela 4.12 Tokovi potrebni za dobijanje telekomunikacionu opremu i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po jednoj kompletnoj telekomunikacionoj jedinici)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>					
BPS HBPS	Elektronski delovi: Predajnik Pojačivač Kombiner Duplekser	kg	25	43849,43	1096235,75
	Antena	kg	250	2915,22	728805,01
	Kućište opreme	kg	20	5451,79	109035,80
	Antenski kabl	kg (m)	25 (50)	133,62	3340,50
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima BPS		MJex	-	-	1937417,06
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima HBPS		MJex	-	-	1937417,06

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P10)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanom u poglavlju 3.4.

Za deo telekomunikacione opreme, koju čine elektronski delovi, potrebno je izgraditi i sklonište za smeštaj opreme. Primarna funkcija skloništa je da sačuva elektronske delove telekomunikacione preme od atmosferskih uslova i omogući njihov nesmetan rad. Za sklonište je potrebno obezbediti betonski temelj, cevi za konstrukciju i aluminijumske panele za pokrivanje koji se pričvršćuju šrafovim za cevnu konstrukciju. Sledeći bitan deo predstavlja antenski toranj, koji služi, kako mu i ime sugeriše, da se na njega postavi antena na visini koja obezbeđuje zadovoljavajući prijem i slanje signala. Antenski toranj, takođe zahteva betonski temelj. Pored toga, od ostalih delova se mogu izdvojiti žičana

ograda i stubovi za ogradu sa odgovarajućim betonskim temeljima. Ograda se postavlja radi zaštite i bezbednosti BPS i HBPS sistema. Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova pomoćnih delova i opreme sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.13. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Tabela 4.13 Tokovi potrebni za dobijanje pomoćnih delova i opreme i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po kompletu pomoćnih delova i opreme)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>					
BPS HBPS	Temelji za antenski toranj	m ³	50	29010,16	1450508
	Temelji za ogradu	m ³	3,74	29010,16	108498
BPS	Temelj za sklonište	m ³	2,16	29010,16	62661,95
HBPS	Temelj za sklonište	m ³	4,32	29010,16	125323,89
BPS	Cevi za sklonište	kg	121,05	164,86	19956,31
HBPS	Cevi za sklonište	kg	158,71	164,86	26164,93
BPS	Aluminijumski paneli	kg	134,75	5451,79	734628,71
HBPS	Aluminijumski paneli	kg	154	5451,79	839575,65
BPS HBPS	Žičana ograda	kg	500	432,38	216190
	Stubovi za žičanu ogradu	kg	225,96	164,86	37251,77
	Armaturna ojačanja za temelje	kg	172	162,24	27905,28
	Antenski toranj	kg	7800	432,38	3372564
	Šrafovi za antenski toranj	kg	360	164,86	59349,6
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima BPS		MJex	-	-	6089513,62
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima HBPS		MJex	-	-	6263331,12

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P11)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Osnovni izvor napajanja BPS sistema je električna energija koja se dobija sa lokalne elektrodistributivne mreže. Međutim, rad BPS i HBPS sistema ne može se zamisliti bez dodatne opreme za napajanje. U standardnu opremu spadaju baterije koje su postavljene u skloništu i služe kao rezervni izvor napajanja u slučaju prekida primarnog izvora napajanja, tj. električne energije. Pored baterija, neophodno je instalirati i transformator za korekciju napona, kao i kablove za napajanje. Pored ove osnovne opreme za napajanje, kod HBPS sistema ugrađuju se vetrogenerator, koji se obično instalira na vrhu antenskog tornja, i PV moduli koji se instaliraju na krovu skloništa. Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova napajanja sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.14. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Tabela 4.14 Tokovi potrebni za dobijanje opreme za napajanje i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po kompletnoj opremi za napajanje)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>					
BPS	Baterije za BPS	kg	134	18856,45	2526764,3
	Transformator	kg (kom)	10 (1)	1438,72	14387,2
	Kabel za napajanje	kg (m)	75 (150)	3495,49	262161,75
HBPS	Baterije za BPS	kg	200	18856,45	3771290
	Transformator	kg (kom)	10 (1)	1438,72	14387,2
	Kabel za napajanje	kg (m)	105 (210)	3495,49	367026,45
HBPS	Vetrogenerator	kg (kom)	75 (1)	1096,24	Σ= 82217,99
	Menjač	kg	20	432,38	8647,6
	Generator	kg	20	450,98	9019,6
	Transformator	kg	5	2282,79	11413,95
	Lopatice	kg	12	284,58	3414,96
	Kućište	kg	10	284,58	2845,8
	Spiner	kg	7	432,38	3026,65
	Kontroler	kg	1	43849,43	43849,43
	PV paneli	kg (kom)	336 (28)	1099,03	369275,4
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima BPS		MJex	-	-	2803313,25
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima HBPS		MJex	-	-	4604197,04

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P12)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Pomenuti delovi BPS i HBPS sistema moraju se dopremiti na mesto izgradnje od mesta njihove proizvodnje. Transport se vrši kamionima ili kombijima. Što se tiče radova na mestu izgradnje izdvojeno je iskopavanje zemlje radi izlivanja temelja za antenski toranj, sklonište i stubove za ogradu. Iskopavanje se vrši mašinerijom za kopanje (bagerima). Vrsta i količina ulaznih i izlaznih tokova faze instalacije sa izračunatim ukupnim sadržajem eksergije po jedinici toka su dati u Tabeli 4.15. Ukupni sadržaj eksergije tokova je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Tabela 4.15 Tokovi potrebni za fazu instalacije i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po sprovedenoj instalaciji sve opreme i delova sa pratećim procesima)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
<i>Ulazi</i>					
BPS	Iskopavanje za temelje antenskog tornja	m ³	50	18,87	943,5
HBPS	Iskopavanje rupa za stubove ograde	m ³	3,74	18,87	70,57
BPS	Iskopavanje za temelje skloništa	m ³	2,16	18,87	40,76
HBPS	Iskopavanje za temelje skloništa	m ³	4,32	18,87	79,25

Tabela 4.15 Tokovi potrebni za fazu instalacije i njihov ukupan sadržaj eksergije (po 1 FJ; po sprovedenoj instalaciji sve opreme i delova sa pratećim procesima) (nastavak)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
BPS HBPS	Transport telekomunikacione opreme	tkm/km	320/1000	306,15	97968
BPS	Transport betona za temelje	tkm/km	13440/100	12,83	172435,2
HBPS	Transport betona za temelje	tkm/km	13920/100	12,83	178593,6
BPS	Transport delova kućišta i pomoćnih delovi	tkm/km	40001,2/400	12,83	513215,39
HBPS	Transport delova kućišta i pomoćnih delovi	tkm/km	41281,8/400	12,83	529645,49
BPS	Transport baterija, transformatora i kabela za napajanje	tkm/km	219/1000	306,15	67046,85
HBPS	Transport baterija, transformatora i kabela za napajanje	tkm/km	315/1000	306,15	96437,25
HBPS	Transport vetrogeneratora	tkm/km	24,75/330	306,15	7577,21
HBPS	Transport PV panela	tkm/km	134,4/400	306,15	41146,56
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima BPS		MJex	-	-	851720,27
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima HBPS		MJex	-	-	952461,43

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P13)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

Nakon instaliranog BPS i HBPS sistema, dolazi faza upotrebe u kojoj će BPS i HBPS sistem obavljati svoju osnovnu funkciju tokom sledećih 20 god, koliko je projektovan njegov upotrebnik vek. Tokom tog perioda BPS i HBPS sistem će potrošiti određenu količinu električne energije, koja je predstavljena u Tabeli 4.16.

Tabela 4.16 Pregled potrošnje električne energije u fazi upotrebe (po 1 FJ)

Sistem	Tokovi	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica]	Ukupan sadržaj eksergije [MJex]
BPS	Električna energija	MJ	756864	240,58	182086341,12
HBPS	Električna energija	MJ	432864	240,58	104138421,12
	Solarna energija	MJ	259200	0,93	241056
	Energija vetra	MJ	64800	1	64800
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima BPS		MJex	-	-	182086341,12
Ukupan sadržaj eksergije u ulazima HBPS		MJex	-	-	104444277,12

Napomena:

ecoinvent procesi korišćeni za modelovanje pojedinih ulaza su dati u prilogu (Tabela P14)

Sadržaj eksergije toka je proračunat metodom opisanim u poglavlju 3.4.

4.3.3 Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa

Nakon modelovanja inventara životnog ciklusa, zatim prikupljanja svih podataka o ulaznim i izlaznim tokovima, kao i izračunavanja eksergetskih vrednosti svih tokova, može se pristupiti ocenjivanju uticaja životnog ciklusa BPS i HBPS sistema. U ovom delu se primenjuje razvijeni LCIA modul u okviru hibridnog modela, koji je prethodno detaljno opisan u okviru poglavlja 3.4. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa se vrši pomoću CML metoda kojem je dodata kategorija uticaja *ukupna potrošnje eksergije - UPE*, koja se računa kao zbir ukupnog sadržaja eksergije u svim elementarnim ulaznim tokovima BPS i HBPS sistema. Primenjuje se i razvijeni karakterizacioni model, koji uključuje izračunavanje karakterizacionih faktora radi dobijanja rezultata indikatora dodatne kategorije uticaja. Karakterizacioni faktori predstavljaju sadržaj eksergije posmatranog elementarnog toka po jedinici. Rezultat indikatora kategorije uticaja predstavlja ukupan sadržaj eksergije posmatranog toka u životnom ciklusu BPS i HBPS sistema, i dobija se množenjem karakterizacionog faktora sa količinom toka iz rezultata inventarisanja životnog ciklusa (detaljno predstavljeno u poglavlju 3.4).

4.3.4 Rezultati i diskusija

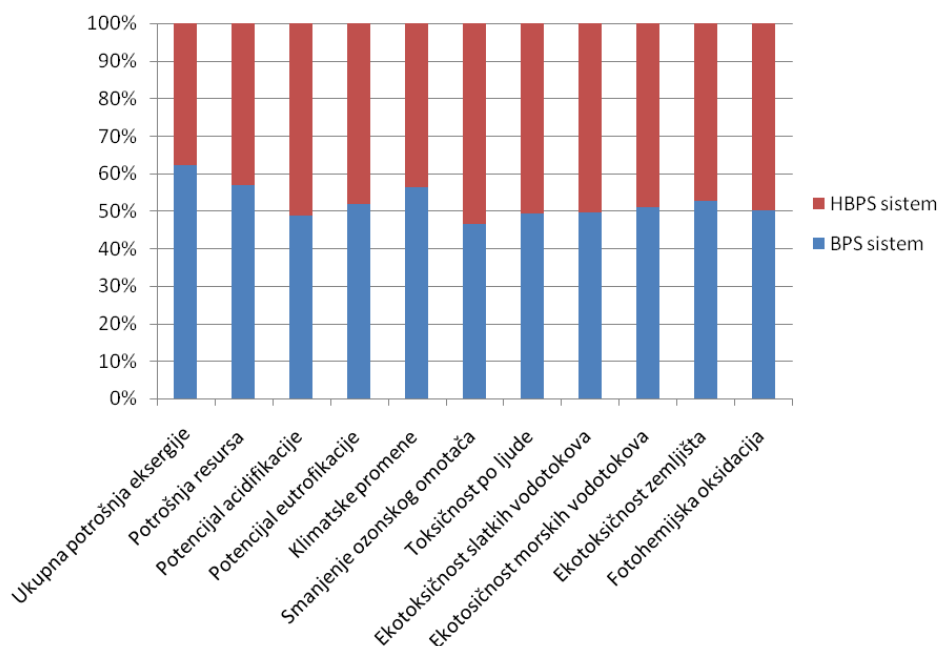
U Tabeli 4.17 mogu se videti rezultati nakon urađene komparativne analize BPS i HBPS sistema po svim kategorijama uticaja središnjeg nivoa mehanizma životne sredine, a koji su dobijeni primenom razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa. Dobijeni rezultati predstavljaju potencijalne negativne uticaje nastale tokom životnog ciklusa laminatnog parketa, a uključuju potrošnju prirodnih resursa, emisiju štetnih materija, generisanje otpada, uticaj na ljude i ekosistem, itd. Rezultati opterećenja po kategorijama uticaja CML metode su dobijeni proračunom uz korišćenje postojećeg LCA računarskog softvera SimaPro 7. Radi lakšeg pregleda, dobijeni rezultati su predstavljeni i preko dijagrama (slika 4.9).

Tabela 4.17 Rezultat indikatora kategorija uticaja BPS i HBPS sistema (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	BPS sistem	HBPS sistem
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	1,94*10 ⁸	1,18*10 ⁸
Potrošnja resursa	kg Sb eq	930,84	704,36
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	449,69	473,87
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ --- eq	42,47	39,71
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	131768,82	102044,72
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	0,0215	0,0248
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	68319,22	70477,31
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	24996,34	25348,68
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	2,89*10 ⁷	2,79*10 ⁷
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	796,27	712,74
Fotohemijaska oksidacija	kg C ₂ H ₄	26,95	26,86

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da BPS sistem ima veći negativni uticaj od HBPS sistema na životnu sredinu po većini kategorija uticaja središnjeg nivoa. Ovakav ishod je očekivan obzirom da BPS sistem troši mnogo više konvencionalne električne

energije u fazi upotrebe od HBPS sistema što i dovodi do većeg negativnog uticaja. Radi obrazloženja, pod konvencionalnom električnom energijom se smatra električna energija proizvedena iz konvencionalni energetskih izvora (npr. fosilnih goriva.), i dobijena sa distributivne mreže. Što se tiče HBPS sistema veliki deo konvencionalne električne energije je zamenjen električnom energijom dobijenom iz obnovljivih izvora energije (energija vetra i solarna energija), čime se smanjuje njena potrošnja u fazi upotrebe. Dakle, razlika u potrošnji konvencionalne električne energije u fazi upotrebe je glavni razlog dobijanja ovakvih rezultata. Razlog što BPS sistem ima manji uticaj od HBPS sistema, u pojedinim kategorijama uticaja, leži u tome što je za potrebe proizvodnje HBPS sistema potrošeno više materijala (npr. vetrogenerator, solarni paneli, itd.)



Slika 4.9 Rezultati komparativne analize BPS i HBPS sistema po kategorijama uticaja

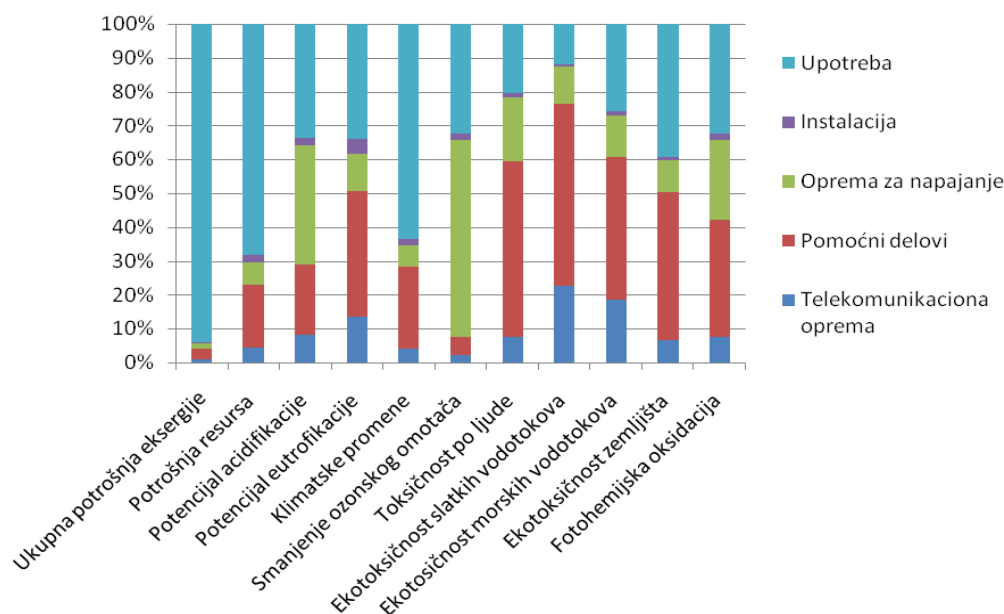
Kada se posmatraju rezultati dobijeni u okviru dodatne kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksurgije*, potvrđuje se činjenica da BPS sistem ima veći negativni uticaj od HBPS sistema u ukupnom opterećenju životne sredine. Kao što je već spomenuto, najveći deo uticaja dolazi usled veće potrošnje konvencionalne električne energije u fazi upotrebe. Zbog dominantne uloge potrošnje električne energije u ukupnom opterećenju, korisno je prikazati rezultate ocenjivanja uticaja svakog od sistema ponaosob, da bi se dobila detaljnija slika nastanka negativnog uticaja.

4.3.4.1 Rezultati ocenjivanja uticaja BPS sistema

Da bi otkrili koja od kategorija BPS sistema, odnosno faza životnog ciklusa BPS sistema ima najveći negativni uticaj na životnu sredinu, svaki od posmatranih sistema biće pojedinačno ocenjen pomoću razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa. Rezultati su prikazani po fazama proizvodnje, instalacije i upotrebe. Faza proizvodnje je podeljena na proizvodnju telekomunikacione opreme, pomoćnih delova i opreme za napajanje. U Tabeli 4.18 su predstavljeni rezultati analize BPS sistema sa svim posmatranim fazama životnog ciklusa i njihovim negativnim uticajima po svim kategorijama uticaja središnjeg nivoa. Radi lakšeg pregleda, dobijeni rezultati su predstavljeni i preko dijagrama (slika 4.10).

Tabela 4.18 Rezultati indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa BPS sistema (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	Telekomuni- kaciona oprema	Pomoćni delovi	Oprema za napajanje	Instalacij a	Upotreb a
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	0,19*10 ⁷	0,608*10 ⁷	0,28*10 ⁷	0,085*10 ⁷	18,2*10 ⁷
Potrošnja resursa	kg Sb eq	39,68	175,43	59,65	20,01	636,24
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	36,29	93,15	158,64	10,55	151,04
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ --- eq	5,71	15,85	4,62	1,92	14,38
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	5474,06	31825,99	8224,83	2661,65	83599,82
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	0,0005	0,0012	0,0125	0,0004	0,0071
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	5211,49	35387,47	12826,09	788,22	14047,61
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	5668,32	13460,54	2702,39	182,95	2974,38
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	5,38*10 ⁶	12,19*10 ⁶	3,57*10 ⁶	0,28*10 ⁶	7,49*10 ⁶
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	52,76	347,42	74,98	8,87	312,11
Fotohemijaska oksidacija	kg C ₂ H ₄	2,06	9,32	6,31	0,57	8,69



Slika 4.10 Rezultati analize BPS sistema po fazama životnog ciklusa

Iz iznetih rezultata može se videti da su faze upotrebe i proizvodnje pomoćnih delova dominantne faze u životnom ciklusu BPS sistema i to po svim kategorijama uticaja. Faza upotrebe ima dominantno izražen uticaj na kategoriju uticaja *ukupna potrošnja eksergije* što potiče od potrošnje električne energije. Udeo ostalih faza u opterećenju ove kategorije uticaja je zanemarljiv. Time je dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* pokazala drugačiji raspored udela faza životnog ciklusa BPS sistema u ukupnom opterećenju životne sredine u odnosu na ostale kategorije uticaja koje su posmatrane. Ovakav rezultat je razumljiv obzirom na pretpostavljeni životni vek BPS sistema od 20 godina.

Upoređujući dodatnu kategoriju uticaja *ukupna potrošnja eksergije* i rezultate u okviru nje sa rezultatima u ostalim kategorijama uticaja, zapaža se nepoklapanje u njima, koje se može tumačiti i objasniti različitim pristupom u njihovom proračunu. Ovde se ne može govoriti o netačnosti ili nedoslednosti dobijenih rezultata, već se oni prihvataju kao korisni za dobijanje šire slike i novog pristupa u tumačenju i razumevanju tokova nastanka negativnog uticaja tokom životnog ciklusa BPS sistema.

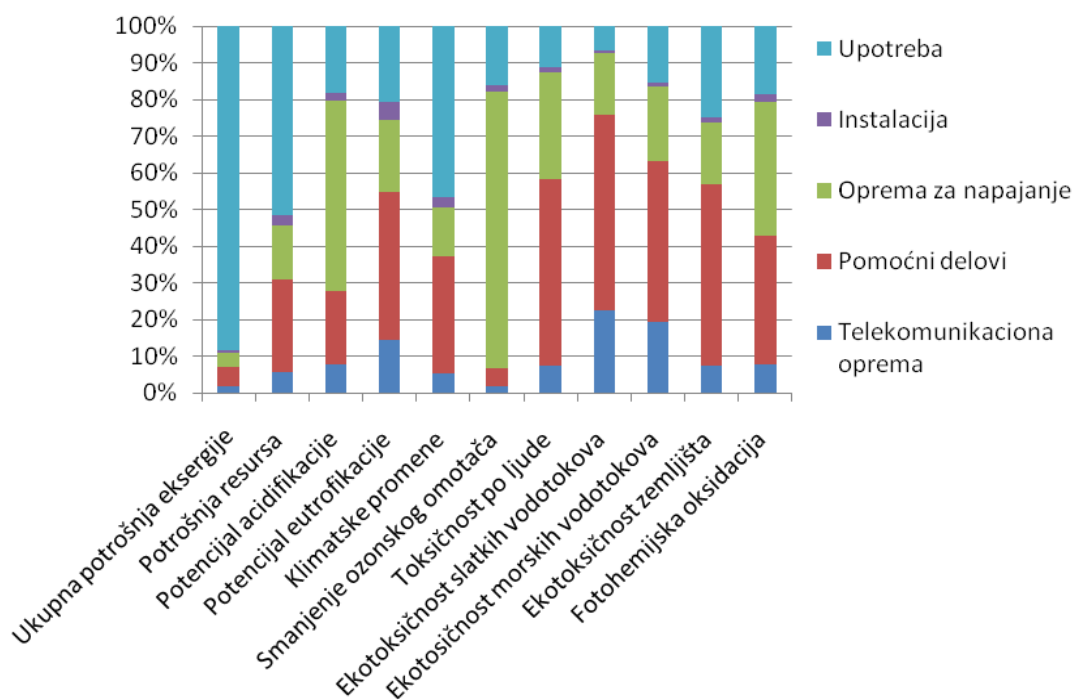
Negativan uticaj na ostale kategorije uticaja uglavnom potiče od potrošnje fosilnih goriva, naročito prirodnog gasa i uglja, a potom i procesa proizvodnje čelika, livenog gvožđa i ostalih legura potrebnih za proizvodnju pomoćnih delova i opreme za napajanje. Pored toga, negativan uticaj nastaje usled procesa transporta prilikom kojih dolazi do emisija sumpornih i azotnih oksida. I ostale emisije imaju svoj udeo u ukupnom opterećenju, npr. emisije fosfata i amonijaka u vodu, kao i emisije gasova staklene bašte u vazduh, u prvom redu CO₂. U okviru *smanjenja ozonskog omotača* može se zapaziti jedini izuzetak, jer tu, uz fazu upotrebe, dominira i faza proizvodnje opreme za napajanje. Negativan uticaj, u najvećem delu, dolazi iz procesa dobijanja tetrafluoroetilena i trihlormetana koji se koriste u proizvodnji baterija. Posmatrajući dominantne izvore negativnog uticaja može se zaključiti da oni nastaju u procesima potrošnje fosilnih goriva radi dobijanja električne energije, ili nekog drugog oblika energije, npr. toplotne, i u procesima obrade metala, posebno čelika, livenog gvožđa, aluminijuma, bakra i drugih legura. Ovakav zaključak je i logičan obzirom da faze upotrebe i proizvodnje pomoćnih delova imaju najveći negativni uticaj tokom životnog ciklusa BPS sistema.

4.3.4.2 Rezultati ocenjivanja uticaja HBPS sistema

U tabeli 4.19 prikazani su rezultati ocenjivanja HBPS sistema po svim uticajnim kategorijama središnjeg nivoa. Radi lakšeg pregleda, dobijeni rezultati su predstavljeni i preko dijagrama (slika 4.11).

Tabela 4.19 Rezultati indikatora kategorija uticaja po pojedinim fazama životnog ciklusa HBPS sistema (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	Telekomuni- kaciona oprema	Pomoćni delovi	Oprema za napajanje	Instalacij a	Upotreba
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	0,19*10 ⁷	0,62*10 ⁷	0,46*10 ⁷	0,095*10 ⁷	10,44*10 ⁷
Potrošnja resursa	kg Sb eq	39,68	177,61	103,38	20,41	363,19
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	36,29	94,59	245,89	10,77	86,24
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ --- eq	5,71	16,04	7,77	1,96	8,21
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	5474,07	32527,81	13593,01	2713,41	47723,26
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	0,00047	0,00118	0,01875	0,00042	0,00401
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	5211,49	35705,28	20680,42	803,25	8031,31
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	5668,32	13526,86	4266,45	186,59	1699,59
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	5,38*10 ⁶	12,2*10 ⁶	5,65*10 ⁶	0,29*10 ⁶	4,28*10 ⁶
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	52,75	351,65	120,88	9,04	178,21
Fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄	2,06	9,42	9,84	0,58	4,96



Slika 4.11 Rezultati analize HBPS sistema po fazama životnog ciklusa

Na osnovu prikazanih rezultata može se izvesti paralela između HBPS i BPS sistema, odnosno kao i slučaju BPS sistema, tako i kod HBPS sistema dominiraju faze upotrebe, proizvodnje pomoćnih delova i proizvodnje opreme za napajanje. Jedina razlika je u tome što kod HBPS sistema faze proizvodnje pomoćnih delova i proizvodnje opreme za napajanje imaju veći udeo u ukupnom opterećenju nego kod BPS sistema, što je i očekivano i razumljivo obzirom na razlike u okviru ovih faza. Radi pojašnjenja, razlike su u veličini skloništa za opremu i u temelju za sklonište koje je veće kod HBPS sistema, potom u većem broju baterija kod HBPS sistema i što je najvažnije HBPS sistem ima instalisan vetrogenerator i PV panele radi obezbeđivanja alternativnog izvora napajanja (tabela 4.9). Sve to iziskuje povećanu potrošnju ulaznih resursa i energije da bi se dobili svi potrebni delovi. Usled ovih navedenih razlika stvoren je i veći negativni uticaj u okviru faza proizvodnje pomoćnih delova i opreme za napajanje. Da se ne bi ponavljala diskusija dobijenih rezultata, može se kratko reći da nastali negativni uticaji tokom životnog ciklusa HBPS sistema imaju iste izvore kao i kod BPS sistema u slučaju svih kategorija uticaja (videti prethodno poglavlje 4.3.4.1).

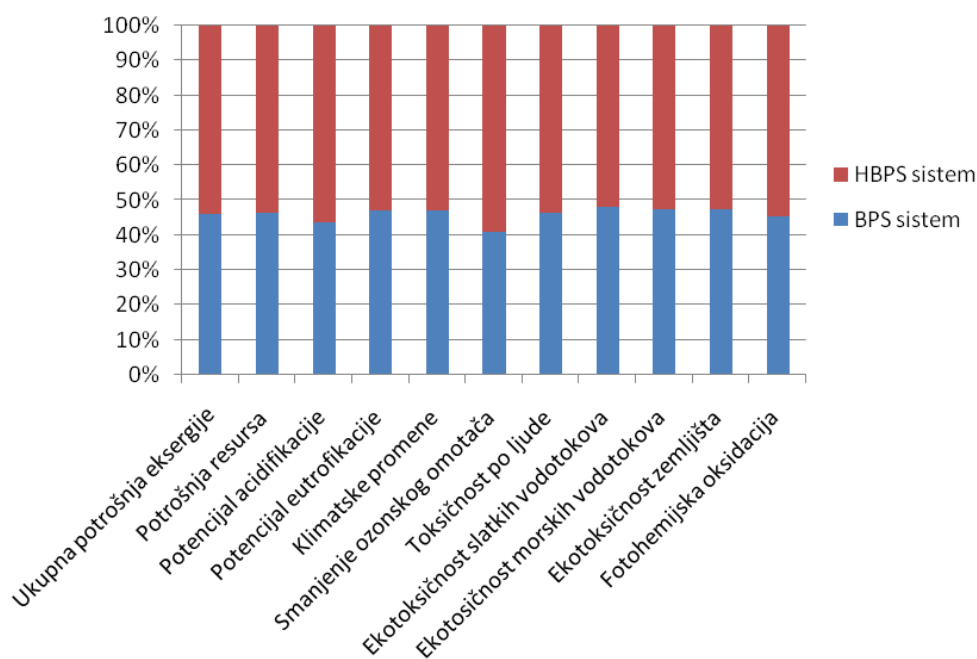
Kada se uporede rezultati dobijeni u okviru dodatne kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* sa rezultatima dobijenim u okviru ostalih kategorija uticaja, može se zapaziti da faza upotrebe ima najizraženiji udeo u ukupno nastalom uticaju. U odnosu na fazu upotrebe, uticaj ostalih faza životnog ciklusa HBPS sistema je zanemarljiv. Ovakav uticaj se objašnjava usled činjenice da u fazi upotrebe dolazi do velike potrošnje eksergije zbog velike potrošnje električne energije tokom upotrebnog veka HBPS sistema. Razlika između raspodele uticaja po fazama životnog ciklusa HBPS sistema između kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* i ostalih kategorija uticaja je značajna, što se može analogno povezati i sa situacijom ocenjivanja uticaja BPS sistema. Kao što je već diskutovano, ovde se ne govori o netačnosti dobijenih rezultata, nego se oni prihvataju kao korisni za razumevanje nastanka negativnog uticaja životnog ciklusa HBPS sistema iz jednog drugačijeg ugla.

4.3.4.3 Analiza scenarija

Pošto se iz prethodno iznetih rezultata može zaključiti da faza upotrebe ima veoma značajan udeo u ukupnom opterećenju na sve kategorije uticaja, izvršeno je komparativno ocenjivanje BPS i HBPS sistema sa isključenom fazom upotrebe, da bi se detaljnije prikazale eventualne promene u dobijenim rezultatima. U tabeli 4.20 mogu se videti rezultati nakon urađene komparativne analize BPS i HBPS sistema po svim kategorijama uticaja središnjeg nivoa mehanizma životne sredine. Rezultati su dobijeni primenom razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa. Radi lakšeg pregleda, dobijeni rezultati su predstavljeni preko dijagrama (slika 4.12).

Tabela 4.20 Rezultat indikatora kategorija uticaja BPS i HBPS sistema bez faze upotrebe (po FJ)

Kategorija uticaja	Jedinica	BPS sistem	HBPS sistem
Ukupna potrošnja eksergije	MJex	1.17*10 ⁷	1.38*10 ⁷
Potrošnja resursa	kg Sb eq	294.77	341.07
Potencijal acidifikacije	kg SO ₂ eq	298.64	387.55
Potencijal eutrofikacije	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq	28.09	31.48
Klimatske promene	kg CO ₂ eq	48186.54	54308.28
Smanjenje ozonskog omotača	kg CFC-11 eq	0.015	0.021
Toksičnost po ljude	kg 1,4-DB eq	54213.28	62400.44
Ekotoksičnost slatkih vodotokova	kg 1,4-DB eq	22014.22	23648.23
Ekotoksičnost morskih vodotokova	kg 1,4-DB eq	2,14*10 ⁷	2,36*10 ⁷
Ekotoksičnost zemljišta	kg 1,4-DB eq	484.03	534.32
Fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄	18.26	21.89



Slika 4.12 Rezultati komparativne analize BPS i HBPS sistema bez faze upotrebe

Kada se faza upotrebe izbacila iz ocenjivanja dobija se potpuno obrnuta slika, odnosno sada HBPS sistem ima veći negativni uticaj u odnosu na BPS sistem i to po svim kategorijama uticaja. Ovakvi rezultati su i očekivani jer postoje razlike između HBPS i BPS sistema u njihovim delovima i opremi (Tabela 4.9).

Kada se uporede rezultati dobijeni u okviru dodatne kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* sa rezultatima dobijenim u okviru ostalih kategorija uticaja, potvrđuje se činjenica da HBPS sistem ima veći negativni uticaj od BPS sistema u ukupnom opterećenju životne sredine. Kao što je već spomenuto, ovakva situacija nastaje usled veće potrošnje eksergije kod proizvodnje HBPS sistema, nego kod BPS sistema, zbog razlike u njihovim komponentama od kojih su sastavljeni.

4.3.4.4 Analiza osetljivosti

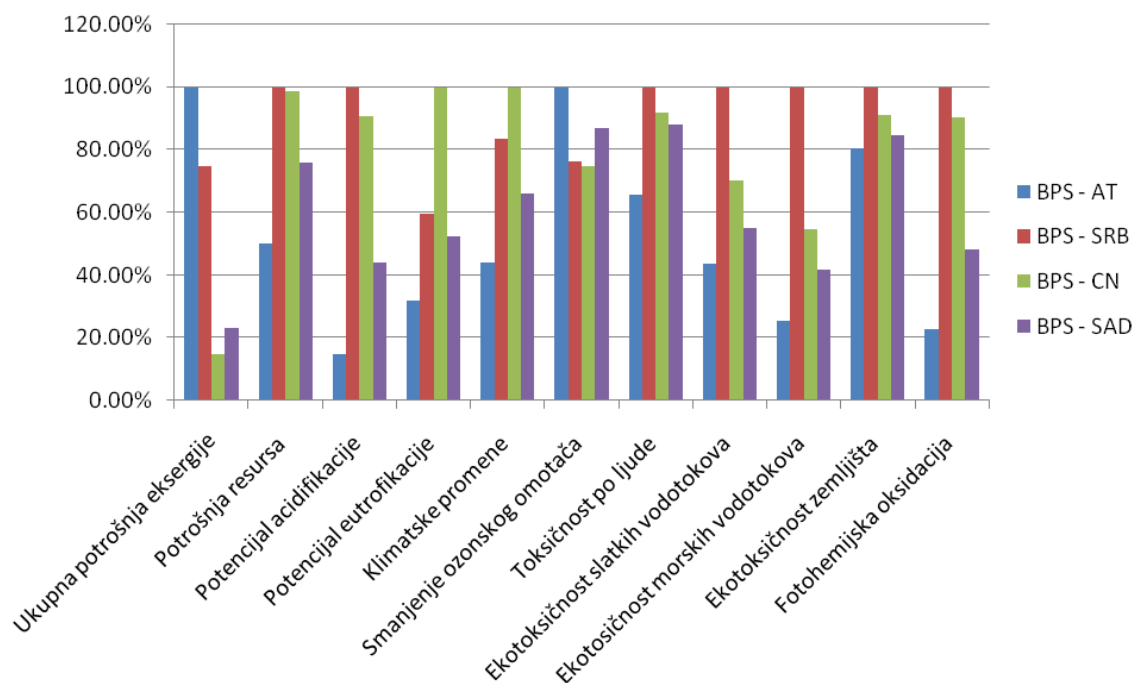
Obzirom da faza upotrebe, odnosno potrošnja električne energije dobijene sa distributivne mreže, ima značajan uticaj na nastanak negativnog uticaja tokom životnog ciklusa BPS i HBPS sistema, korisno je sprovesti analizu osetljivosti različitih scenarija. Proračun različitih scenarija je neophodan radi analiziranja uticaja nastalih prilikom proizvodnje električne energije, koja je specifična za svaku državu. Suština analize scenarija je poređenje električne energije proizvedena u različitim državama, odnosno da se za svaki scenario, BPS i HBPS sistem hipotetički postavi u drugoj državi.

Pretpostavljena su i upoređena četiri scenarija za BPS i HBPS sistem:

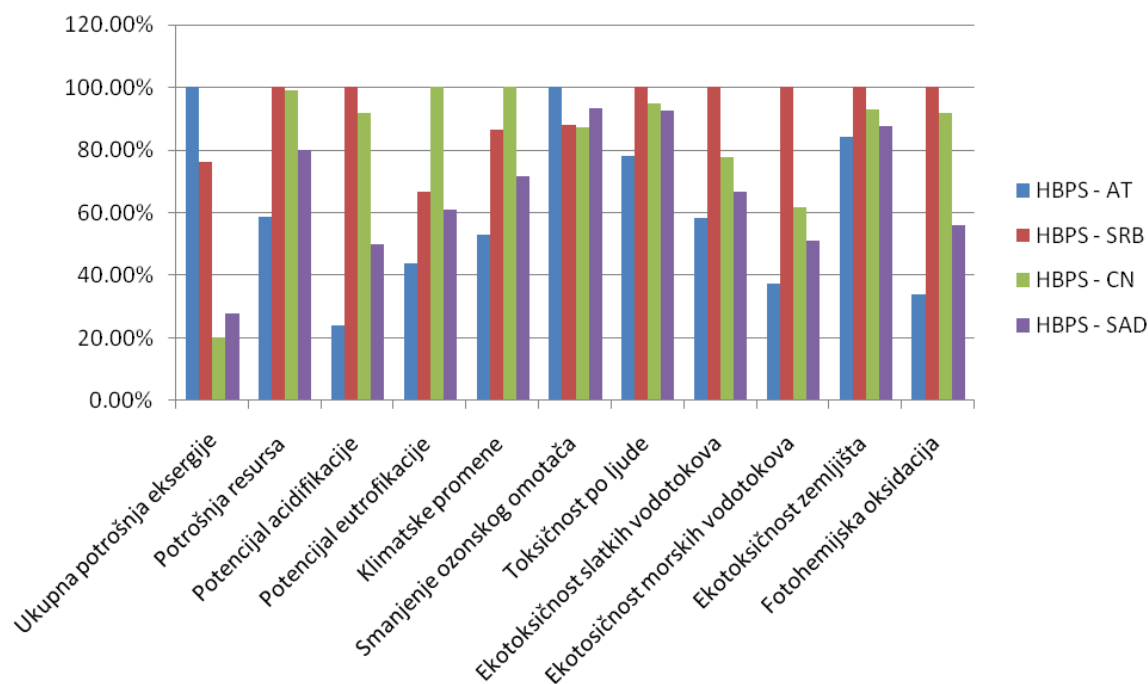
1. Osnovni scenario - AT: Električna energija je proizvedena u Austriji
2. Alternativni scenario 1 - SRB: Električna energija je proizvedena u Srbiji
3. Alternativni scenario 2 - CN: Električna energija je proizvedena u Kini
4. Alternativni scenario 3 - SAD: Električna energija je proizvedena u SAD-u

Rezultati analize osetljivosti, tj. poređenja scenarija su prikazani na slici 4.13 i 4.14. Iz sprovedene komparacije scenarija može se zaključiti da rezultati značajno variraju u zavisnosti od odabira države i njene proizvodnje električne energije. Takođe, negativni uticaji BPS i HBPS sistema variraju i po kategorijama uticaja. Na osnovu prikazanih rezultata, može se zapaziti da BPS i HBPS sistemi postavljeni u Austriji (koriste u fazi upotrebe električnu energiju proizvedenu u Austriji), imaju najmanji negativni uticaj po većinu kategorija uticaja, sem u okviru *ukupna potrošnja eksergije* i *smanjenje ozonskog omotača* gde imaju najveći uticaj. Uticaj na *ukupnu potrošnja eksergije* nastaje usled potrošnje vode za proizvodnju električne energije iz hidrocentrala, a uticaj na *smanjenje ozonskog omotača* nastaje zbog transporta prirodnog gasa koji se uvozi iz Rusije. I pored toga, BPS i HBPS sistemi postavljeni u Austriji, uopšteno gledano, imaju najmanji uticaj u odnosu na ostale zemlje koje se posmatraju. Električna energija proizvedena u Srbiji ima najveći negativni uticaj na većinu kategorija uticaja zbog potrošnje uglja (lignita) za njenu proizvodnju i odlaganja pepela nakon sagorevanja uglja, te stoga postavljanje BPS i HBPS sistema u Srbiji ima najgori scenario od posmatranih. Neposredno nakon scenarija za Srbiju, dolazi scenario za Kinu, koja kao i Srbija, troši ugalj za dobijanje svoje električne energije što je i izvor visokog negativnog uticaja. Dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* je pokazala obrnutu sliku od ostalih kategorija uticaja, na osnovu čega se može zaključiti da je potrošnja eksergije značajno veća kada se električna energija proizvodi iz hidrocentrala nego iz termoelektrana na ugalj. Sa druge strane, hidroenergije spada u obnovljive izvore energije i sugurno ima prednost u odnosu na fosilna goriva, te je sigurno bolje, u ovom slučaju, staviti akcenat na uticaje nastale u okviru ostalih kategorija uticaja.

Sumirajući diskutovane rezultate, može se zaključiti da negativni uticaj između izabaranih scenarija varira usled različitih izvora i tehnologija proizvodnje električne energije u zavisnosti od posmatrane države (npr. da li je električna energija proizvedena iz fosilnih goriva, hidroenergije, itd.).



Slika 4.13 Analiza osetljivosti poređenja različitih scenarija po kategorijama uticaja središnjeg nivoa za BPS sistem



Slika 4.14 Analiza osetljivosti poređenja različitih scenarija po kategorijama uticaja središnjeg nivoa za HBPS sistem

4.3.5 Zaključak

Ovo istraživanje stavlja akcenat na poređenje negativnog uticaja na životnu sredinu nastalog od strane životnih ciklusa BPS i HBPS sistema. Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da BPS sistem ima veći negativni uticaj od HBPS sistema po većini kategorija uticaja središnjeg nivoa, što je posledica veće potrošnje električne energije u fazi upotrebe. Pored faze upotrebe, faza proizvodnje pomoćnih delova se takođe može izdvojiti kao faza sa relativno velikim udelom u ukupnom nastalom negativnom uticaju. Najveći izvor negativnog uticaja nastaje usled potrošnje određenih količina sirovina potrebnih za proizvodnju delova BPS i HBPS sistema, od kojih se ističu liveno gvožđe, čelik, aluminijum i ostale legure metala. Emisije i otpad nastali prilikom ekstrakcije i dobijanja ovih sirovina su dodatni izvor nastanka negativnog uticaja. Obzirom da faza upotrebe ima značajan uticaj na rezultate komparativne analize, sprovedena je i analiza scenarija u kojoj su ocenjeni BPS i HBPS sistemi sa isključenom fazom upotrebe iz granica sistema. Nakon izbacivanja faze upotrebe, može se zaključiti da se situacija prokrenula i da sada BPS sistem ima manji uticaj od HBPS sistema i to po svim kategorijama uticaja. Ovo je takođe očekivano i razumljivo, obzirom da je za proizvodnju HBPS sistema potrebno više materijala i energije radi proizvodnje dodatnih delova kojih nema kod BPS sistema, što se prvenstveno odnosi na opremu na napajanje (PV panele i vetrogenerator), a potom i na konstrukciju skloništa, veće temelje i dodatne baterije. Obzirom da je faza upotrebe, odnosno potrošnja električne energije pokazala zaista bitnu ulogu u ukupnom negativnom uticaju, sprovedena je analiza osetljivosti, kojom će se porediti rezultati upotrebe električne energije proizvedene u okviru različitih država. Rezultati analize osetljivosti su pokazali značajana odstupanja u zavisnosti od odabira električne energije proizvedene u određenoj državi, što ukazuje da je lokacija instalisanja BPS i HBPS sistema veoma bitan parametar koji utiče na konačne rezultate ocenjivanja negativnog uticaja životnog ciklusa. Uzevši sve u obzir, najveće preporuke za unapređenje u okviru životnog ciklusa BPS i HBPS sistema uključuju smanjenje potrošnje konvencionalne električne energije, što je ujedno i jedan od ciljeva sprovođenja studije slučaja, jer je suština HBPS sistema uvođenje alternativnih izvora električne energije, koji bi supstitali konvencionalnu električnu energiju kao primarni izvor napajanja. Ova studija slučaja treba da podrži nastavak istraživanja u pravcu uvođenja obnovljivih izvora energije, kao što su energija vetra i sunca, sve dok HBPS sistem ne postane potpuno autonoman, tj. da više ne zavisi od električne mreže kao primarnog izvora napajanja, već da se potpuno osloni na obnovljive izvore napajanja. Kako je prikazano u ovom istraživanju, to se može potencijalno dostići ili inteziviranjem upotrebe PV panela i vetrogeneratora, ili uvođenjem nekih drugih obnovljivih izvora energije, koji bi imali ulogu podrške postojećim, sve dok se ne postigne potpuna autonomnost napajanja HBPS sistema.

Primena razvijenog hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa je obezbedila bolji uvid i razumevanje potencijalnih uticaja prilikom razmatranja alternativnih opcija za napajanje BPS sistema. Na osnovu iznetih i diskutovanih rezultata može se zaključiti, pre svega, da je dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* doprinela dobijanju šire i kvalitetnije slike o ukupnom opterećenju životne sredine BPS i HBPS sistema. Pored toga, dobijeni rezultati su kvalitetniji i tačniji, što povećeva kompletost i transparentnost studije i dovodi do lakšeg i boljeg izvođenja zaključaka i preporuka na osnovu jasnog razumevanja iznesenih rezultata. Na osnovu rezultata, može se zaključiti da su potvrđene ekološke prednosti upotrebe obnovljivih izvora električne energije na BPS lokacijama. Pored toga, rezultati kategorije uticaja *ukupna potrošnja eksergije* su pokazali i potvrdili da je faza upotrebe najdominantnija faza u ukupnom negativnom uticaju životnog ciklusa, kao

što su i ostale kategorije uticaja pokazale. Sprovedena diskusija i izvučeni zaključci pokazuju da je dodatna kategorija uticaja *ukupna potrošnja eksergije* omogućila sagledavanje nastalih uticaja tokom životnog ciklusa laminatnog parketa iz novog ugla i doprinela boljem razumevanju nastanka negativnog uticaja. Time je i razvijeni hibridni model potvrdio svoj cilj kroz njegovu verifikaciju putem ove studije slučaja. Zaključci ove studije slučaja mogu poslužiti kao osnova za povećanje znanja odeljenja za istraživanje i razvoj u okviru telekomunikacionih kompanija i da im pomognu da steknu više razumevanja pri odabiru raspoloživih alternativnih opcija za snabdevanje električnom energijom BPS lokacija.

Radi obezbeđivanja preciznosti i kompletnosti rezultata ocenjivanja oba sistema, neophodno je sprovesti uključivanje faze kraja životnog ciklusa u analizu, pošto ova faza nije uzeta u obzir u ovoj studiji slučaja. Postoji potencijalna mogućnost da će uključivanje ove faze u analizu otvoriti nova polja za potencijalna unapređenja životnog ciklusa BPS i HBPS sistema, posebno sa aspekta reciklaže upotrebljenih materijala. Takođe, potrebno je sprovesti detaljnije istraživanje u proizvodnoj fazi, posebno u vezi sirovina potrebnih za proizvodnju BPS i HBPS sistema i njihovog transporta. Smanjenje uticaja proizvodnje može se postići smanjenjem transporta pojedinih delova i opreme, što se postiže boljim mapiranjem podataka o dostupnim dobavljačima opreme i njihovih lokacija. Određeni uticaji na životnu sredinu koji bi trebali biti pokriveni budućim istraživanjem, a nisu predmet ovog istraživanja su buka, vizuelni uticaj i zauzimanje zemljišta. Zauzimanje zemljišta može dobiti posebnu važnost u budućnosti, kada opcije za snabdevanje energijom vetra, sunca ili biomase budu zahtevale velike površine zemlje. Uticaj buke i vizuelni uticaj je značajan iz razloga jer se BPS i HBPS sistemi nalaze u blizini naseljenih mesta.

Uzimajući sve u obzir, ovo istraživanje kao jedan pionirski projekat, treba da služi kao odlična osnova za dalja istraživanja u ovoj oblasti i da pomogne u daljem razvoju i praktičnoj primeni alternativnih izvora električne energije na globalnom nivou, koji bi potencijalno mogao dovesti do znatno boljih performansi BPS i HBPS sistema, sa aspekta zaštite životne sredine u budućnosti.

5. DISKUSIJA

Provera prve hipoteze je zahtevala sprovođenje analize opštih aspekata LCA i eksergetske analize, kao i analizu njihovih prednosti i mana, a u cilju provere mogućnosti za efikasno kombinovanje ova dva alata. Analiza je pokazala da ovi alati pristupaju problemu zaštite životne sredine iz specifičnog ugla. Dok se LCA fokusira na ocenjivanje negativnih uticaja na životnu sredinu sa aspekta životnog ciklusa, eksergetska analiza je koncentrisana na neefikasnosti u okviru procesa ili sistema sa aspekta njegove energetske optimizacije. Prva hipoteza je nametnula i sprovođenje analize postojećih pristupa u literaturi, baziranih na kombinovanju LCA i eksergije, kao i istraživanje mogućnosti za unapređenje postojećih baza podataka za ocenjivanje životnog ciklusa integracijom informacije o eksergiji energetskih i materijalnih tokova. Dominantni pristup u literaturi za kombinaciju eksergetske analize i LCA jeste integracija potrošnje eksergije kao dodatne kategorije uticaja u okviru LCA. Međutim, istraživači potrošnju eksergije u perspektivi životnog ciklusa tumače i računaju na različite načine. Tako se mogu identifikovati dva osnovna pravca istraživanja. Prvi promovise upotrebu potrošnje eksergije kao mere za siromašenje resursa i proračunava ukupnu potrošnju eksergije kao zbir sadržaja eksergije svih prirodnih resursa (elementarnih tokova), potrebnih za dobijanje određenog proizvoda (Finnveden i Östlund 1997, Bösch, i dr. 2007, Contreras Moya i dr. 2007). U okviru drugog pravca se proširuje područje primene i koristi eksergija za istraživanje nepovratnosti i potencijalnih unapređenja u okviru životnog ciklusa proizvoda sprovođenjem eksergetskih bilansa na nivou jediničnih procesa. Ovaj pravac karakteriše unapređenje istraživanja i proširenje granica sistema, što rezultira konceptom „od kolevke do prirode“. Istraživanja drugog pravca omogućava dublju analizu poboljšanja, pošto se nepovratnosti tokom životnog ciklusa mogu raščlaniti na pojedinačne jedinične procese i tako dati bolji uvid u izvore i veličinu neefikasnosti. U ovom pristupu podaci moraju biti detaljnije određeni, tj. potrebno je obezbediti fizičko-hemijske parametre, u fazi analize inventara životnog ciklusa i moraju se sprovesti eksergetski bilansi za svaki od jediničnih procesa (Cornelissen 1997, Valero 1998, Grubb i Bakshi 2011). Bösch i dr. (2007) su značajno doprineli unapređenju postojećih baza podataka integrišući eksergetske karakterizacione faktore u okviru *ecoinvent* baze podataka, ali posmatrajući samo ulaz elementarnih tokova energije, minerala i ruda.

Druga postavljena hipoteza je podrazumevala realizaciju provere mogućnosti za unapređenje LCI faze kroz unapređenje procesa prikupljanja podataka i analizu mogućnosti za unapređenje LCIA faze, odnosno postojećih LCIA metoda. Poslednje je zahtevalo integraciju informacije o potrošnji eksergije kao dodatne kategorije uticaja, uz razvoj indikatora kategorije uticaja i karakterizacionog modela. Analiza je pokazala da je za osiguranje proračuna eksergije tokova neophodna adaptacija procedure prikupljanja podataka u fazi inventarisanja, koja uključuje parametre toka neophodne pri ovom proračunu (temperatura, pritisak, koncentracija, itd). To je uslovalo razvoj LCI modula čija je namena prikupljanje podataka neophodnih za funkcionisanje hibridnog modela, odnosno koji omogućava izračunavanje sadržaja eksergije svakog jediničnog procesa. Shodno tome, može se izračunati i sadržaj eksergije svakog energetskog i materijalnog toka u okviru posmatranog jediničnog procesa, a zatim i ukupna potrošnja eksergije određene faze ili celokupnog životnog ciklusa posmatranog proizvodnog sistema. Prethodno opisano je

omogućilo i izvođenje proračuna sadržaja eksergije tokova proizvoda, što do sada nije bilo urađeno. Sa ciljem predstavljanja rezultata proračuna eksergije tokova u fazi inventarisanja životnog ciklusa, može se koristiti usvojena struktura LCA baza podataka. Sadržaj eksergije određenog jediničnog procesa (tok proizvoda) ili određenog elementarnog toka (energetskog ili materijalnog), izračunat pomoću razvijenog LCI modula, je podesan za integraciju u *ecoinvent* bazu podataka na strukturnom nivou, tako što se usvaja kao karakterizacioni faktor. Sadržaj eksergije elementarnih tokova i tokova proizvoda je dat u prilogu (tabele P15 i P16).

Iako je analizom dosadašnjih pokušaja integracije eksergije i LCA utvrđeno da je dominantan pristup uključivanje potrošnje eksergije kao dodatne kategorije uticaja, ne postoji ni jedan postojeći i priznat LCIA metod u kojem je to i integrisano do sada. Jedini LCIA metod koja posmatra potrošnju eksergije je CExD metod (Bösch i dr. 2007), koji međutim, posmatra samo potrošnju eksergije tokom životnog ciklusa bez uzimanja u obzir njenog odnosa sa ostalim problemima životne sredine, a koji su uključeni u obliku kategorija uticaja u ostale LCIA metode. Polazeći od prethodnih činjenica, razvijen je pristup koji omogućava da se u okviru postojećih LCIA metoda (ovde je to potvrđeno na primeru CML metoda) integriše dodatna kategorija uticaja nazvana *ukupna potrošnja eksergije*, koja opisuje tokove eksergije kako kroz celokupni životni ciklus, tako i na nivou jediničnih procesa. Pre odabira CML metoda, sprovedena je njegova SWOT analiza, sa ciljem provere opravdanosti izbora. CML metod je odabran, između ostalog, zato što sumira uticaje u okviru kategorija središnjeg nivoa, što doprinosi značajnom smanjenju nesigurnosti u okviru mehanizma ocenjivanja negativnog uticaja na životnu sredinu. Uvođenje nove kategorije uticaja mora da prati razvoj indikatora uticaja koji na dovoljno dobar način opisuje negativne uticaje nastale u okviru te kategorije uticaja. Na osnovu toga, odabrani indikator kategorije uticaja se iskazuje preko MJ_{ex} potrošene eksergije tokom životnog ciklusa. Pored indikatora kategorije uticaja, neophodno je bilo razviti i proceduru za proračun karakterizacionih faktora za sve tokove identifikovane u fazi inventarisanja. Kao karakterizacioni faktor usvojen je sadržaj eksergije određenog elementarnog toka ili toka proizvoda po jedinici (masenoj, zapreminskoj ili energetskoj). Odabir dodatne kategorije uticaja, definisanje indikatora kategorije uticaja i procedura za proračun karakterizacionih faktora, predstavljaju ključne elemente razvijenog LCIA modula u okviru hibridnog modela.

Za potrebe provere treće hipoteze odabrane su dve studije slučaja - ocenjivanje životnog ciklusa laminatnog parketa i komparativno ocenjivanje baznih predajničkih stanica. Podaci dobijeni kroz primenu hibridnog modela u pomenutim studijama slučaja mogu biti značajni za korisnike, budući da pomažu boljem razumevanju i sagledavanju izvora negativnih uticaja tokom životnog ciklusa posmatranog proizvodnog sistema. Na osnovu toga se mogu preciznije identifikovati slabe tačke životnog ciklusa proizvodnih sistema i definisati kvalitetnije preporuke za unapređenje. Rezultate dobijene u okviru dodatne kategorije uticaja i rezultate dobijene u okviru ostalih kategorija uticaja, ne treba posmatrati nezavisno niti kao suprotstavljene, već ih treba sagledati kao komplementarne.

U okviru prve studije slučaja, rezultati primene hibridnog modela su pokazali da faza upotrebe ima veći udeo u ukupnom opterećenju životne sredine, što nije bilo moguće saznati na osnovu rezultata klasične LCA analize. Sa druge strane, rezultati hibridnog modela su potvrdili rezultate klasične LCA i pokazali da faze proizvodnje i ekstrakcije resursa imaju značajan udeo u ukupnom opterećenju. Analiza faze upotrebe je pokazala da najveći uticaj ima potrošnja električne energije. Hibridni model je pokazao da uticaj

nastaje usled potrošnje električne energije proizvedene u hidroelektranama, zbog velike potrošnje potencijalne eksergije vode. Shodno tome, istraživanje mogućnosti za unapređenje životnog ciklusa laminatnog parketa treba da uključi i analizu izvora nastanka električne energije. Detaljnija analiza faze proizvodnje laminatnog parketa je pokazala da nastalo opterećenje potiče od visokog sadržaja eksergije osnovne sirovine, tj. drveta, u recepturi laminatnog parketa. Ovaj podatak baca novo svetlo na moguća unapređenja, pogotovo u okviru faze kraja životnog veka. Sakupljanjem laminatnog parketa, na kraju životnog veka, umesto direktnog odlaganja na deponiju, otvara se mogućnost njegovog spaljivanja u insineratoru, što omogućava direktan povraćaj energije. Ovakav uvid ne bi bio moguć samo na osnovu rezultata klasične LCA analize. Drugim rečima, hibridni model je omogućio bolju analizu nastanka negativnog uticaja, čime su stvorene bolje osnove za unapređenje celokupnog životnog ciklusa laminatnog parketa.

U okviru druge studije slučaja, koja je obuhvatila komparativno ocenjivanje baznih predajničkih stanica, dobijeni rezultati primene hibridnog modela su pokazali da BPS sistem ima veći negativni uticaj u odnosu na HBPS sistem. Sa druge strane, rezultati klasične LCA su pokazali da BPS sistem, u zavisnosti od posmatrane kategorije uticaja, varira u negativnom uticaju u odnosu na HBPS sistem. Iako po većini kategorija uticaja BPS sistem ima veći negativan uticaj, postoje kategorije uticaja prema kojima BPS sistem ima manji negativni uticaj u odnosu na HBPS sistem. Nastale razlike između dobijenih rezultata hibridnog modela i rezultata klasične LCA mogu se objasniti detaljnijom analizom, koja pokazuje da je faza upotrebe glavni razlog nastanka ovakvih rezultata. U fazi upotrebe dolazi do značajne potrošnje električne energije, te je objašnjenje rezultata hibridnog modela analogno objašnjenju kod prve studije slučaja. Pored toga, rezultati hibridnog modela su pokazali da je faza upotrebe daleko najuticajnije faza, što se značajno razlikuje u odnosu na rezultate klasične LCA. Na osnovu toga, faza upotrebe treba da dobije na značaju prilikom istraživanja mogućnosti za potencijalna unapređenja. Isključivanjem faze upotrebe iz analize, BPS sistem pokazuje manji negativni uticaj u odnosu na HBPS sistem, što pokazuju i rezultati hibridnog modela, ali i klasične LCA. Da bi se ovakvi rezultati detaljnije istražili, sprovedena je analiza osetljivosti u kojoj se pored različiti izvori proizvodnje električne energije. Rezultati analize osetljivosti pokazuju značajna odstupanja u nastalim uticajima u zavisnosti od izabrane države u kojoj se proizvodi električna energija. Tako, rezultati hibridnog modela pokazuju da električna energija proizvedena iz hidroelektrana ima mnogo veću potrošnju eksergije nego električna energija proizvedena iz fosilnih goriva, dok su rezultati klasične LCA pokazali suprotno. U ovom slučaju se najbolje može zaključiti zašto rezultate hibridnog modela i rezultate klasične LCA ne treba posmatrati nezavisno, već kao komplementarne. Kao i kod prve studije slučaja, analiza navedenog ne bi bila moguća samo na osnovu rezultata klasične LCA, odnosno hibridni model je doprineo boljem sagledavanju nastanka negativnog uticaja, a time i većim mogućnostima za potencijalno unapređenje.

6. ZAKLJUČCI

Ocenjivanje životnog ciklusa i eksergetska analiza predstavljaju potvrđene alate za identifikaciju specifičnih problema zagađenja životne sredine izazvanih dejstvom proizvodnih sistema. Pri tome, oba alata ispoljavaju bolje i lošije karakteristike, u zavisnosti od predmeta i cilja analize. Eksergija, kao inače koristan i nepristrasan pokazatelj koji se koristi za ocenjivanje degradacije kvaliteta energije i materijala, siromašenja resursa, generisanih emisija i otpada u životnoj sredini, sama po sebi ne može da objasni sve neodrživosti određenog proizvodnog sistema. Drugim rečima, koncentrisanje samo na njenu potrošnju ne može da prikaže celokupnu sliku, jer toksičnost, acidifikacija, zauzimanje zemljišta, biološki uticaj emisija u vazduh, vodu i zemljište nisu uključeni. To znači da analiza zasnovana samo na eksergiji može dovesti do pozitivnog učinka u vezi sa jednim problemom životne sredine, a da sveobuhvatnija analiza zatim pokaže da je fokusiranje na drugi problem bolje rešenje. Ova sveobuhvatnija analiza je upravo koncept na kojem je zasnovan LCA metod.

6.1 Doprinosi realizovanih istraživanja

Prema prvoj hipotezi ovog istraživanja, integracijom eksergetske analize u okvir ocenjivanja životnog ciklusa bi se realizovao hibridni pristup koji bi karakterisao sinergijski efekat kada je reč o dobrim stranama ova dva pojedinačna alata. Sledeća pretpostavka je da je strukturna integracija ova dva alata moguća, a poslednja da će istu karakterisati funkcionalna primenljivost integrisanog rešenja. Na osnovu pozitivnih rezultata analize literature, na bazi koje je potvrđena ideja osnovne pretpostavke, integracija ocenjivanja životnog ciklusa i eksergetske analize je realizovana kroz razvoj hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa. Praktična funkcionalnost razvijenog hibridnog modela, odnosno primenljivost u realnim industrijskim uslovima, je potvrđena kroz dve studije slučaja.

Rezultati istraživanja realizovani u okviru doktorske disertacije, u opštem smislu, daju doprinos stvaranju osnove za izradnju puta ka razvoju i proizvodnji održivijih proizvoda i procesa. Razvijeni hibridni model za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa pruža dodatne informacije, koje mogu biti korisne u procesu donošenja odluka na svim nivoima, kako u industriji tako i u državnim institucijama.

U specifičnijem smislu, sprovedeno istraživanje predstavlja doprinos razvoju LCA metoda, kako iz perspektive inventarisanja životnog ciklusa tako i sa aspekta ocenjivanja uticaja životnog ciklusa. Doprinos LCI oblasti je ostvaren preko unapređenja LCA baza podataka, dok je doprinos LCIA oblasti značajniji imajući u vidu razvijeni koncept za unapređenje metoda za ocenjivanje uticaja životnog ciklusa, kroz integrisanje kategorije uticaja zasnovane na rezultatima eksergetskog proračuna i karakterizacionog modela.

Razvijeni hibridni model je koncipiran i razvijen na osnovu obimnije analize dostupnih literaturnih izvora o dosadašnjim pristupima u oblasti istraživanja, pri čemu je posebna pažnja posvećena aspektima praktične primene. To obuhvata aplikativne i korisničke karakteristike modela, ali i njegovu svrsishodnost koja se ogleda u mogućnosti

identifikovanja mesta za potencijalna unapređenja u životnom ciklusu proizvodnih sistema. Rezultati primene razvijenog hibridnog modela u okviru dve studije slučaja, potvrđuju njegovu funkcionalnost i praktičnu vrednost.

Doprinos razvoju postojećeg metodskog okvira LCA se ogleda u tome što razvijeni hibridni model omogućava detaljnu analizu potrošnje eksergije u životnom ciklusu, uz istovremeno praćenje ostalih opterećenja životne sredine, što ovaj pristup čini jedinstvenim. Pored toga, model pomaže u prevazilaženju izazova s kojima se LCA metoda sreće prilikom poređenja i vrednovanja rezultata različitih negativnih uticaja na životnu sredinu. Ekološki uvidi dobijeni praktičnom primenom hibridnog modela ne bi bili mogući realizacijom tradicionalne LCA studije. Kako je pokazano u okviru verifikacije, ovi uvidi omogućavaju detaljno razumevanje izvora i veličine negativnih uticaja i mogu da služe kao osnova za dizajniranje održivijih sistema. Sa druge strane, u poređenju sa tradicionalnom eksergetskom analizom, hibridni model omogućava uspostavljanje veze između potrošnje eksergije jediničnog procesa sa potrošnjom eksergije definisanog životnog ciklusa, što ga opet izdvaja u odnosu na ostale pristupe. I konačno, posebnost razvijenog modela se ogleda i u mogućnosti integrisanja potrošnje eksergije sa drugim problemima životne sredine.

Kada je reč o doprinosu razvoju i unapređenju postojećih LCA baza podataka, kao što je pre svih *ecoinvent*, on se ogleda u potencijalnoj integraciji izračunatih sadržaja eksergije u okviru baza podataka. Sadržaji eksergije su izračunati za veliki broj materijalnih i energetskih tokova i jediničnih procesa. Izračunavanje sadržaja eksergije tokova proizvoda je ono što ovaj hibridni model čini jedinstvenim. Sadržaj eksergije tokova se usvaja kao karakterizacioni faktor i može se integrisati u postojeće LCA baze podataka. Usvajanje pristupa za izračunavanje sadržaja eksergije elementarnih tokova i sadržaja eksergije jediničnih procesa, izdvaja razvijeni hibridni model od ostalih. Na taj način se sadržaj eksergije može izračunati i za ukupne ulaze potrebne za dobijanje posmatranog proizvodnog sistema, ali i za svaki jedinični proces pojedinačno, što vodi određivanju potrošnje eksergije pojedinih faza životnog ciklusa, a time i životnog ciklusa u celini.

Doprinos u okviru LCIA se ogleda u uključivanju dodatne kategorije uticaja u okviru postojećeg LCIA metoda (CML metoda), pored već pokrivenih kategorija uticaja. Dodatna kategorija uticaja opisuje ukupnu potrošnje eksergije tokom životnog ciklusa posmatranog proizvodnog sistema, odakle i potiče naziv *ukupna potrošnje eksergije*. Da bi se ovo uključivanje sprovedo na strukturnom nivou, neophodno je bilo razviti indikator kategorije uticaja i karakterizacione faktore. Polazeći od uloge indikatora kategorije uticaja da opiše uticaj nastao u okviru posmatrane kategorije uticaja, ovde je izabrana jedinica *MJex*. Karakterizacioni faktori, neophodni u okviru procesa karakterizacije, inače obaveznog koraka u okviru LCIA faze, služe da se rezultati LCI povežu težinskim faktorom preko indikatora kategorije uticaja sa određenim aspektom životne sredine koji je pokriven određenom kategorijom uticaja. Za potrebe hibridnog modela razvijen je poseban proračun karakterizacionih faktora materijalnih i energetskih elementarnih tokova i tokova proizvoda. Karakterizacioni faktori su izračunati za veći broj materijalnih i energetskih tokova i jediničnih procesa (tokova proizvoda) u okviru dve posmatrane studije slučaja. Ovako razvijeni LCIA modul je moguće integrisati i u ostale LCIA metoda koji koriste mehanizam za ocenjivanje uticaja na bazi kategorija uticaja središnjeg nivoa.

Prethodno upućuje na zaključak da je razvojem hibridnog modela za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa ispunjen postavljeni cilj istraživanja ove doktorske disertacije,

u vezi sa unapređenjem postojećeg okvira LCA metoda kroz integraciju sa eksergetskom analizom i praktične primenljivosti. Intenzivnija primena hibridnog modela na većem broju praktičnih primera u budućnosti će dati konačnu potvrdu kvaliteta i jedinstvenosti.

6.2 Pravci daljih istraživanja

Razvijeni hibridni model za ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa predstavlja osnovu za dalja istraživanja, koja se mogu podeliti u dva pravca. Prvi se odnosi na dalji razvoj metodskog okvira postavljenog hibridnog modela, dok se drugi tiče proširenja modela prema drugim disciplinama.

Osnovne preporuke, za sve pristupe koji počivaju na integraciji LCA i drugih metoda pa tako i eksergetske analize, jesu njihova formalizacija i standardizacija, po ugledu na tradicionalnu LCA. Ovo predstavlja obiman posao, ali se očekuje da bi u slučaju hibridnog modela razvijenog u okviru ove disertacije taj proces podstakao širu praktičnu primenu, a kroz to i proširenje i dalji razvoj metodskog okvira za eksergetsko ocenjivanje životnog ciklusa i eksergetske baze podataka. Zahvaljujući kvantitativnoj i unificiranoj prirodnoj eksergije, moguće je sprovoditi poređenja između širokog spektra životnih ciklusa. Kao deo ovog procesa formalizacije, moraju se postaviti jasna pravila proračuna i jasna nomenklatura. Za unapređenje i razvoj baza podataka je neophodno postaviti osnovu za izmene strukture opisivanja materijalnih i energetskih tokova, da bi ista bila sposobna da integriše podatke o sadržaju eksergije svakog posmatranog toka, kao i da integriše karakteristike o samom toku, koje se odnose na stanje, temperaturu, pritisak, sastav i koncentraciju.

Uključivanje razvijenog LCIA modula u okvir LCIA metoda koje koriste mehanizam za ocenjivanje uticaja i preko kategorija uticaja krajnjeg nivoa (tj. kategorija oštećenja), nije obuhvaćeno ovim istraživanjem, i zahteva dodatno istraživanje.

Prostor za dalje unapređenje razvijenog modela leži i u delu razvoja normalizacionih faktora, neophodnih za sprovođenje procesa normalizacije. Normalizacija predstavlja izborni korak u okviru LCIA faze i predstavlja iskazivanje izmerenih vrednosti indikatora različitih kategorija uticaja u zajedničkoj dimenziji, odnosno postavljanje indikatora kategorije uticaja u kontekst sa širim značenjem. Normalizacija bi omogućila bolju uporedivost dodatne kategorije uticaja (*ukupna potrošnja eksergije*) sa ostalim kategorijama uticaja, s obzirom da bi u tom slučaju sve kategorije uticaja bile iskazane kroz istu dimenziju, što bi omogućilo bolje sagledavanje i značaj ove dodatne kategorije uticaja.

Drugi pravac daljih istraživanja se odnosi na moguće povezivanje hibridnog modela sa socijalnim i ekonomskim disciplinama. Tehnička ocena potencijalnih unapređenja, nameće istraživanje ekonomske opravdanosti predloženih rešenja. U kombinaciji sa konceptom eksergije, moguće je odrediti nivo potrebnih investicija po jedinici uštede eksergije, kao i u kojoj meri ovaj odnos odstupa u zavisnosti od različitih predloženih rešenja. Sa druge strane, u slučaju analize opravdanosti predloga koji imaju za cilj proširenje ponovne upotrebe tokova eksergije van granica kompanije, bilo bi važno uzeti u obzir i socijalne aspekte.

7. LITERATURA

- Alsema E.A. 2000. Energy Pay-back Time and CO₂ Emissions of PV Systems. *Progress in photovoltaics: Research and Applications* 8(1):17-25.
- Althaus H.J., Richter K. 2001. Life cycle analysis (LCA) of different cork floorings. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Materials and Systems for Civil Engineering (EMPA).
- Arons J.d.S., et al. 2004. *Efficiency and Sustainability in the Energy and Chemical Industries*. New York, Marcel Dekker.
- Ayres R.U. 1995. Life cycle analysis: A critique. *Resources, Conservation and Recycling* 14:199-223.
- Ayres R.U. 1998. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics* 26(2): 189-209.
- Ayres R.U., Masini A., Ayres L.W. 2001. *An Application of Exergy Accounting to Five Basic Metal Industries*. Fontainebleau, France: INSEAD.
- Baharwani V., Meena N., Dubey A., Brighu U., Mathur J. 2014. Life Cycle Analysis of Solar PV System: A Review. *International Journal of Environmental Research and Development*. 4(2):183-190. ISSN 2249-3131
- Bakshi B.R., Fiksel J. 2003. The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. *AIChE Journal* 49(6): 1350-1358.
- Bakshi B.R., Gutowski T. G., Sekulic D. 2014. *Thermodynamics and the Destruction of Resources*. 2nd edition. Cambridge University Press, New York, USA.
- Baumann, H. and Tillman A. 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in Life Cycle Assessment Methodology And Application*, Studentlitteratur, Lund, Sweden.
- Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. 1996. *Thermal design and optimization*. Edited by Wiley-Interscience.
- Bergey, n.d.a. 2014. BWC Excel-R Description. [2014-05-12]. <http://www.bergey.com/Products>
- Bondesson A. 2010. Comparative LCA model on renewable power solutions for off-grid radio base stations. Master of Science Thesis. *Industrial Ecology*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. ISSN 1402-7615.
- Bösch M., et al. 2007. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12(3): 181-190.
- Bowyer J., Bratkovich S., Fernholz K., Lindburg A. 2009 *Life cycle assessment of flooring materials - A guide to intelligent selection*, Dovetail Partners, Inc., Minneapolis
- Brundtland G., et al. 1987. *Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development*, Oxford, Oxford University Press.
- Budak I., Vjestica S., Milanovic B., Milankovic D., Vukelic DJ., Hodolic J., Martinov M. 2011. LCA of an industrial plant after the implementation of waste-to-energy. *International Solid Waste Association, "ISWA BEACON 2011"*, Novembar 2011, Novi Sad, Srbija, Proceedings, page 136-144, ISBN 978-86-7892-361-6.
- Chen B., et al. 2006. Exergy-based resource accounting for China. *Ecological Modelling* 196(3-4): 313-328.
- Cherubini F., et al. 2009. Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 53(8): 434-447.

- Clausius R. 1867. *The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*. London: John van Voorst. Sadrži engleski prevod mnogih njegovih ostalih radova.
- Connelly L.I. and Koshland C. 2001. Exergy and industrial ecology. Part 2: A non-dimensional analysis of means to reduce resource depletion. *Exergy, an International Journal* 1 (4):234-255.
- Consoli F., et al. 1993. *Guidelines for Life- Cycle Assessment: A Code of Practise*". SETAC-Europe, Brussels, Belgium.
- Contreras Moya A M., et al. 2007. Life cycle assessment combined with exergetic analysis in cane sugar production analysis. 3rd International Conference on Life Cycle Management. Zurich, Switzerland.
- Cornelissen R.L. 1997. *Thermodynamics and Sustainable Development*. Doctoral dissertation. Department of Thermal engineering, Twente, Enschede, The Netherlands.
- Cornelissen R.L., Hirs G. 2002. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. *Energy Conversion and Management* 43:1417-1424.
- Curran M.A. 1996. *Environmental Life-Cycle Assessment*", McGraw-Hill, USA, ISBN: 978-0070150638.
- Deng L., et al. 2011. Economic-balance hybrid LCA extended with uncertainty analysis: case study of a laptop computer. *Journal of Cleaner Production* 19(11): 1198-1206. 70
- Dewulf J., Van Langenhove H. 2002. Quantitative Assessment of Solid Waste Treatment systems in the Industrial Ecology Perspective by Exergy Analysis. *Environment Science & Technology* 36 (5):1130-1135.
- Dewulf J., Van Langenhove H. 2006. *Renewables-Based Technology: Sustainability Assessment*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, 384 str, ISBN: 978-0-470-02241-2
- Dewulf J., Van Langenhove H., Muys B., Bruers S., Bakshi B., Grubb G., Paulus D.M., Sciubba E. 2008. Exergy: its potential and limitations in Environmental Science and Technology. *Environment Science & Technology* 42 (7):2221-2232.
- Diamond J. 1995. Easter's End – Easter Island. *Discover* August 1995, 63-69
- Dincer I., Rosen M. A. 2007. *Exergy and industrial ecology. EXERGY*. Amsterdam, Elsevier: 417-423.
- Ditsele O. 2010. Application of life cycle assessment to estimate environmental impacts of surface coal mining. Master thesis. Faculty of the Graduate School of the Missouri University of Science and Technology. Paper 4801.
- DOE. 2009. Financial Assistance Funding Opportunity Announcement: Biomass Research and Development Initiative Funding Opportunity Number DE-PS36-09GO99016, Department of Energy, Golden, Colorado.
- Doi T., Tsuda I., Unagida H., Murata A., Sakuta K., Kurokawa K. 2001. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar energy materials and solar cells* 67(1-4):397-403.
- Eide M.H., et al. 2003. Life cycle assessment (LCA) of cleaning-in-place processes in dairies. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 36(3): 303-314.
- Ericsson – White Paper. 2007. Sustainable energy use in mobile communications. White Paper EAB 07:021801 Ericsson AB 2007. [2014-05-22]. <http://www.howgreenisit.co.uk>
- Ertesvåg I.S., Mielnik M. 2000. Exergy analysis of the Norwegian society. *Energy* 25 (10):957-973.

- European Commission. 2009. International Reference Life Cycle Data System - Background Document: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in LCA. [2015-05-05]. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>.
- Finkbeiner, M., Hoffmann, R., Ruhland, K., Liebhart, D. Stark, B. 2006. Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class. *Int. J. LCA*, Vol. 11, No. 4, Ecomed publishers, Landsberg, Germany, pp. 240 – 246.
- Finnveden G. 1996. Life-cycle assessment as an environmental systems analysis tool - with a focus on system boundaries. Licentiate Degree, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Finnveden G., Östlund P. 1997. Exergies of natural resources in life cycle assessment and other applications. *Energy* 22 (9):923-931.
- Finnveden G., Moberg Å. 2005. "Environmental systems analysis tools - an overview." *Journal of Cleaner Production* 13(12): 1165-1173.
- Firak M. 2005. Comparative analysis of the solar dish electricity production. *Thermal Science* 9(3):69-83.
- Fitchard K. 2009. Alcatel-Lucent: First 'on-grid' alternative-energy cell sites on the horizon. (Alcatel-Lucent's energy conservation technologies). *Telephony* (Online Exclusive), Penton Media, Inc. [2014-05-12]. <http://www3.alcatel-lucent.com>
- Fleck B., Huot M. 2009. Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use. *Renewable Energy* 34(12):2688-2696.
- Gagnon L., Belanger C., Uchiyama Y. 2002. Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy policy* 30(14):1267-1278.
- Gasparatos A., El-Haram M., Horner M. 2009. Assessing the sustainability of the UK society using thermodynamic concepts: Part 2. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (5):956–970.
- Ghenai C. 2012. *Life Cycle Analysis of Wind Turbine. Sustainable Development” - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment*, ISBN: 978-953-51-0165-9
- Gong, M., Wall G. 1997. On exergetics, economics and optimization of technical processes to meet environmental conditions. Published in Ruixian Cai, et al. Eds., “Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems,” pp. 453-460, Beijing World, Chinese Society of Engineering Thermophysics and American Society of Mechanical Engineers. ISBN 7-5062-3264-Z.
- Graedel T.E., Allenby B.R. 1995. *Industrial Ecology*. New Jersey, Prentice Hall.
- Grubb G.F., Bakshi B.R. 2011. Appreciating the Role of Thermodynamics in LCA Improvement Analysis via an Application to Titanium Dioxide Nanoparticles. *Environmental Science & Technology*: null-null.
- GSMA, n.d. 2010. Green Power for Mobile: Top ten Findings. [2014-22-05]. GSMA Developing Fund. <http://www.gsma.com>
- Guinée J.B., et al. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Series: Eco-efficiency in Industry and Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN: 1-4020-0228-9
- Han C., et al. 2011. Green Radio: Radio Techniques to Enable Energy-Efficient Wireless Networks. *Communications Magazine, IEEE* 49 (6), 46-54

- Hodolič J., Badida M., Majernik M., Šebo D. 2003. Mašinstvo u inženjerstvu zaštite životne sredine, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ISBN: 8680249750.
- Hodolič J., Budak I., Hadžistević M., Vukelić Đ., Majernik M., Chovancova J., Pankova-Jurikova J., Čulibrk M. 2013. Sistemi za upravljanje zaštitom životne sredine, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, ISBN: 9788678924699.
- Hunkeler D., Rebitzer G. 2005. The Future of Life Cycle Assessment. *Int. J. LCA*, Vol. 10, No. 5, Ecomed publishers, Landsberg, Germany, pp. 305 – 308.
- J.J.C. van Lier, Woudstra N. 2005. Thermodynamics for energy systems. Delft University Press, Delft.
- Jones A.P. 1999. "Indoor air quality and health". *Atmospheric Environment* 33 (28): 4535–64. doi:10.1016/S1352-2310(99)00272-1
- Jönsson A., Tillman A.M., Svensson T. 1997. Life cycle analysis of flooring materials. *Building and Environment* 32 (3), 245–255
- Jönsson A., 1999. Including the Use Phase in LCA of Floor Coverings. *Int. J. LCA* 4 (6): 321 - 328
- Kåberger T., Månsson B. 2001. Entropy and economic processes -- physics perspectives. *Ecological Economics* 36(1): 165-179.
- Kiš F. 2011. Ekonomsko vrednovane ekoloških efekata primene biodizela. Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija.
- Kusakana K, Vermaak HJ. 2013. Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. *Renewable Energy* 51:419-425.
- Larson J. 2009. Indicating Impact: The Design of an Environmental Impact Labeling System for Consumer Goods. Ph.D. dissertation, University of Washington, United States - Washington. 05/2015 from Dissertations & Theses: A&I.(Publication No. AAT 3393962).
- Levy G.M. 2000. Packaging, policy, and the environment. Gaithersburg, Aspen Publishers, Inc.
- Lozano M.A., Valero A. 1993. Theory of the Exergetic Cost. *Energy* 18 (9):939-960.
- Lubritto C, Petraglia A, Vetromile C, Caterina F, D'Onofrio A, Logorelli M, Marsico G, Curcuruto S, 2008. Telecommunication power systems: energy saving, renewable sources and environmental monitoring. Telecommunications Energy Conference, In: Proceedings INTELEC 2008. IEEE 30th International; (2008 14-18 09); San Diego, CA:IEEE, p 1-4
- Mahalle L., et al. 2011. A Comparative Life Cycle Assessment of Canadian Hardwood Flooring with Alternative Flooring Types. Final report. FPIInnovations, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Martinez E., Sanz F., Pellegrini S., Jimenez E., Blanco J. 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy* 34(3): 667-673.
- McCain W.D. Jr. 1990. The Properties of Petroleum Fluids, second edition. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Company.
- Milanović B. 2009. Ocenjivanje životnog ciklusa proizvoda i procesa primenom LCA programskog sistema GaBi 4. Master rad. Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom sadu, Srbija.
- Milanovic B., Milankovic D. 2011. Identification of possibilities for implementation of ELV (End of life vehicle) system in less developed countries – case study for Serbia. Nordic Life Cycle Association, “3rd NORLCA Symposium 2011”, september 2011, Helsinki, Finland, Symposium Proceedings, page 103-106.

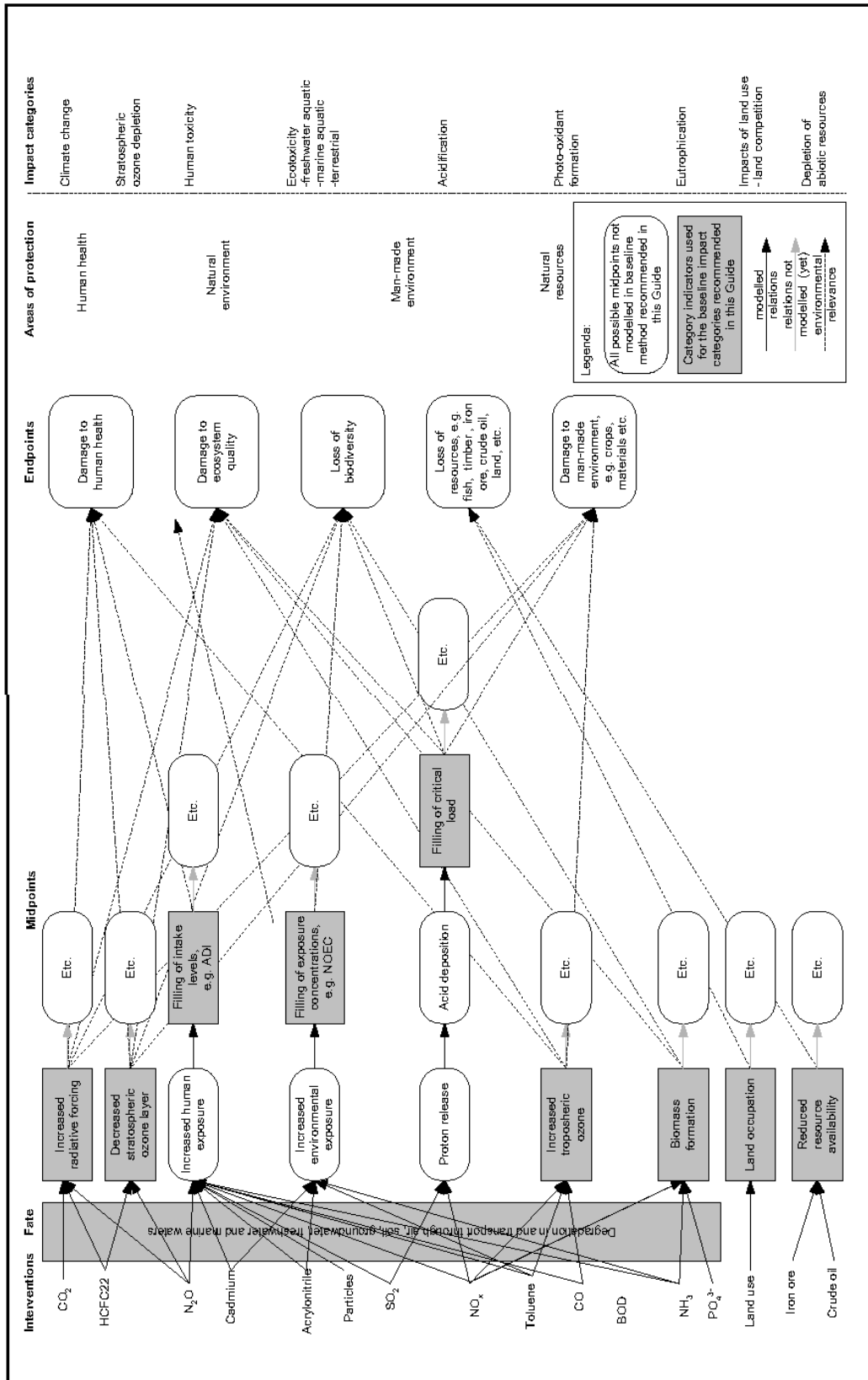
- Milanovic B., Vjestica S., Budak I. 2014. Life Cycle Exergy Assessment - Case study for wood floorings. SETAC 20th LCA Case Study Symposium, Novi Sad, Serbia. Proceedings, page 57.
- Milanovic B., Asurdzic N. 2014. Comparative LCA model for On-grid Hybrid Base Transceiver Stations and conventional Base Transceiver Station. SETAC 20th LCA Case Study Symposium, Novi Sad, Serbia. Proceedings, page 64.
- Nebel B., Zimmer B., Wegener G. 2006. Life cycle assessment of wood floor coverings – A representative study for the German Flooring Industry. *Int J LCA* 11 (3) 172–182
- Ozdogan S., Arikol M. 1995. Energy and exergy analysis of selected Turkish industries. *Energy* 18 (1):73-80.
- Pennington D.W., et al. 2004. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International* 30(5): 721-739.
- Perveen S., James L.A. 2009. Multiscale effects on spatial variability metrics in global water resources data. *Water Resour Manage*. doi: 10.1007/s11269-009-9530-2
- Petersen A.K., Solberg B. 2003. Substitution between floor constructions in wood and natural stone: comparison of energy consumption, GHG emissions, and costs over the life cycle, *Canadian Journal of Forest Research*. 33 (6), 1061– 1075.
- Petersen A.K., Solberg B. 2005. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: A review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics* 7 (3), 249-259.
- Peiró L.T. 2009. Exergy analysis of biofuels: an application to biodiesel production. Doctoral dissertation. Grup de Recerca en Sostenibilitat i Prevenció ambiental (SosteniPrA), Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain.
- Rebitzer G., Buxmann K. 2005. The Role And Implementation Of LCA Within Life Cycle Management At Alcan. *Journal of Cleaner Production* 13 (2005), Elsevier Ltd, pp. 1327-1335.
- Rifkin J. 2003. *The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. Jeremy P. Tarcher/Penguin, New York, 294 pp.
- Rosen M.A., et al. 2008. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy* 36(1): 128-137.
- Roy P., et al. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* 90(1): 1-10.
- Scharnhorst W. 2008. Life Cycle Assessment in the Telecommunication Industry: A Review. *Int J LCA* 13(1):75-86.
- Scharnhorst W., Althaus H.J., Hilty L.M., Jolliet O. 2006. Environmental Assessment of End-of-Life Treatment Options for a GSM 900 Antenna Rack. *Int J LCA* 11(6):425-436.
- Scharnhorst W., Hilty L.M., Jolliet O. 2006. Life cycle assessment of second generation (2G) and third generation (3G) mobile phone networks. *Environment International* 32(5):656-675.
- Sciubba E. 2001. Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy, The International Journal* 1 (2):68-84.
- Sciubba E. 2003. Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling. *Energy* 28:1315-1334.
- Sciubba E. and Wall G. 2007. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *International Journal of Thermodynamics* 10 (1).

- Sherwani A.F., Usmani J.A. 2010. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1):540-544.
- Slessor M. (Ed.). 1974. *Proceedings of the Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions*, International Federation of Institutes for Advanced Study, Stockholm.
- SRPS ISO 14020:2012. Oznake i deklaracije koje se odnose na zaštitu životne sredine — Opšti principi. Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- SRPS ISO 14040:2008. Upravljanje zaštitom životne sredine – Ocenjivanje životnog ciklusa – Principi i okvir. Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- SRPS ISO 14044:2009. Upravljanje zaštitom životne sredine – Ocenjivanje životnog ciklusa – Zahtevi i uputstva za primenu. Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, Srbija.
- Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Szargut J. 1989. Chemical Exergies of the Elements. *Applied Energy* 32 (4):269-286.
- Szargut J. 2005. Exergy Analysis. *Research in Progress Thermodynamics* 3(7): 31-33.
- Szargut J. 2005. *Exergy Method. Technical and Ecological Applications*, WIT Press, Southampton, UK.
- Szargut, J. 2007. *Egzergia. Poradnik obliczania I stosowania*, Wydawnictwo Politechniki Shlaskiej, Gliwice.
- Tremeac B., Meunier F. 2009. Life cycle analysis of 4.5 MW and 250W wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(8):2104-2110.
- Tsatsaronis G. 2007. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy* 32(4): 249-253.
- Udo de Haes H.A, Heijungs R. 2007. Life-cycle assessment for energy analysis and management. *Applied Energy* 84(7-8): 817-827.
- Ukidwe N. U. 2005. *Thermodynamic input-output analysis of economic and ecological systems for sustainable engineering*, Doctoral dissertation. The Ohio State University, USA.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2006. *Life Cycle Assessment: Principles and Practice; Scientific Applications International Corporation (SAIC)*: Reston, VA, USA.
- Valero A. 1998. Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis. *Proceedings of Advances in Energy Studies*, P.Venere, Italy.
- Valero A. 2006. Exergy accounting: Capabilities and drawbacks. *Energy* 31 (1):164-180.
- Valero A., et al. 2010. Application of Thermoeconomics to Industrial Ecology. *Entropy* 12: 591-612.
- Van Gool W. 1992. Exergy analysis of industrial processes. *Energy* 17 (8):791-803.
- Vjestica S., Budak I., Kljajin M., Vukelic Dj., Milanovic B., Milankovic D., Hodolic J. 2014. Model for analysis of environmental impacts of production processes in flooring industry based on LCA. *Tehnički vjesnik* 21, 3(2014): 457-466.
- Vujić G., Pavlović M., Milanović B., Milanković D., Hodolič J., Budak I. 2010. Analysis of motor vehicle recycling in Serbia by the application of LCA. *International Solid Waste Association, "ISWA BEACON 2010"*, Decembar 2010, Proceedings, page 228-236, ISBN 978-86-7892-305-0.
- Wall G. 1987. Exergy conversion in the Swedish society. *Resources and Energy* 9:55-73.
- Wall G. 1988. Exergy Flows in industrial processes. *Energy* 13 (2):197-208.
- Wall G. 1990. Exergy conversion in the Japanese society. *Energy* 15.

- Wang S., Ang H.M., Tade M.O. 2007. Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art. *Environment International* 33 (5): 694–705. doi:10.1016/j.envint.2007.02.011
- Wang Y., Feng X. 2000. Exergy analysis involving resource utilization and environmental influence. *Computers & Chemical Engineering* 24(2-7): 1243-1246.
- Weidema B. 2001. Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 4, No. 1, Massachusetts Institute of Technology and Yale University, pp. 11-33.
- Werner F. 2002. Modelling of Wood Products in Life Cycle Assessment with Special Emphasis on Recycling and End-of-Life. Research and Work Report 115/48. EMPA Laboratory 115, Group Ecology, Dübendorf
- Werner F., Richter K. 1997. Environmental assessment of parquet floorings; consideration of mosaic parquet, 2-layered prefabricated and 3-layered prefabricated parquets (in German). Empa/ISP-Forschungsbericht, Dübendorf, Heimberg.
- World Energy Council. 2004. Comparison of Energy System Using Life Cycle Assessment. A Special Report of the World Energy Council, London, United Kingdom, ISBN 0946121168.
- Yrieix C., Maupetit F., Ramalho O. 2004. Determination of VOC emissions from French wood products. 4th European Wood-Based Panel Symposium, Sep 2004, Hanover, Germany. 10 p.
- Zabalza Bribián I., et al. 2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment* 44(12): 2510-2520.

PRILOZI

Prilog 1



Slika P1 Mehanizam CML metoda

Prilog 2

Tabela P1 Donje toplotne moći goriva

Gorivo	Donja toplotna moć (Ha)^a
Gasovita goriva	MJ/kg
Prirodni gas	47,141
Vodonik	120,21
Tečna goriva	MJ/kg
Sirova nafta	42,686
Benzin	43,448
Dizel	42,791
Ulje za loženje	
lako	42,081
teško	41,782
Metanol	20,094
Etanol	26,952
Butanol	34,366
Aceton	29,589
Tečni naftni gas (TNG)	46,607
Tečni prirodni gas (TPG)	48,632
Metil estar (biodizel, BD)	37,528
Tečni vodonik	120,07
Butan	45,277
Propan	46,296
Čvrsta goriva	MJ/kg
Mrki ugalj	22,732
Drveni ugalj	30,122
Kameni ugalj	32,511
Koks	28,610
Drvo	19,551
Slama	15,402

Napomena:

^a Donja toplotna moć goriva odgovara vrednosti toplotne moći umanjene za onu količinu toplote koja je potrebna da se vlaga prisutna u gorivu i vlaga koja nastaje u procesu sagorevanja prevede u parno stanje.

Izvor: GREET, The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model, <http://greet.es.anl.gov/>

Prilog 3

Tabela P2 Standardna hemijska eksergija ($T_0 = 298,15$ K, $p_0 = 101,325$ kPa)

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D^0 , kJ/mol	$e^0_{x, ch}$, kJ/mol
Al	s	26.9815	930.9	795.7
Al4C3	s	143.959	4694.51	4216.2
AlCl3	s	133.3405	467.18	352.2
Al2O3	s. α corundum	101.9612	185.69	15.0
Al2O3•H2O	s. boermitite	119.9765	128.35	9.4
Al2O3•3H2O	s. gibbsite	156.0072	24.13	24.1
Al2S3	s	150.155	3313.81	2705.3
Al2(SO4)3	s	342.148	596.80	344.3
Al2SiO5	s. andalusite	162.046	28.03	9.2
Al2SiO5	s. kyanite	162.046	25.94	12.9
Al2SiO5	s. sillimanite	162.046	0	15.3
Al2SiO5•(OH)4	s. kaolinite	258.1615	68.25	12.0
3Al2O3 •2SiO2	s. mullite	426.0536	630.11	63.2
Ba	s. II	137.34	747.77	775.1
BaCO3	s. II	197.35	-75.18	53.3
BaCl2	s	208.25	48.69	88.7
BaO	s	153.34	194.15	252.0
BaO2	s	169.34	113.38	196.7
Ba(OH)2	s	171.36	45.93	160.3
BaS	s	169.40	1012.88	929.0
BaSO4	s. barite	233.40	0	30.7
C	s. graphite	12.01115	393.509	409.87
C	s. diamond	12.01115	395.406	412.77
CCl4	l	153.823	578.95	472.7
C2N2	g. cyanogen	52.0357	1096.14	1118.1
CH4	g. methane	16.04303	802.3	831.2
C2H6	g. ethane	30.0701	1427.8	1495.0
C3H8	g. propane	44.172	2045.4	2152.8
C4H10	g. n-butane	58.1243	2658.4	2804.2
C5H12	g. n pentane	72.1514	3274.4	3461.3
C2H4	g. ethylene	28.0542	1323.1	1360.3
C3H6	g. propylene	42.0813	1927.7	2002.7
C2H2	g. acetylene	26.0382	1255.6	1265.0
C6H6	g. benzene	78.1147	3171.6	3301.3
C6H6	l. benzene	78.1147	3137.7	3296.2
C7H8	l. methylbenzene	92.1418	3736.4	3928.3
C8H10	l. ethylbenzene	106.1689	4347.7	4584.8
C10H8	s. naphthalene	128.1753	4984.2	5251.1
C14H10	s. anthracene	178.2358	6850.9	7212.6
CH2O2	l. formic acid	46.0259	213.0	291.3
C2H6O	l. ethylalcohol	46.0695	1235.9	1356.9
C2H4O2	l. acetic acid	60.0529	786.6	907.2

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
C3H6O	l. acetone	58.0807	1659.6	1797.3
C6H6O	s. phenol	94.1141	2925.9	3126.2
C2H2O4	s. oxalic acid	90.0358	202.7	367.9
CH4ON2	s. urea	60.0558	544.7	688.6
CO	g	28.0105	282.984	274.71
CO2	g	44.0095	0	19.48
CS2	l	76.139	2934.09	1694.3
Ca	S. II	40.08	813.57	729.5
CaC2	s	64.10	1541.18	1484.6
CaCO3	s. aragonite	100.09	0	16.3
CaCO3•MgCO3	s. dolomite	184.411	0	32.2
CaCl2	s	110.99	178.21	105.0
CaFe2O4	s	215.77	161.07	121.1
Ca2Fe2O4	s	271.85	321.00	212.2
Ca2Mg5Si8O22(OH)2	s. tremolite	812.41	425.49	79.7
Ca(NO3)2	s	164.0898	-124.90	-1.0
CaO	s	56.08	178.44	127.3
CaO•Al2O3	s	158.04	351.66	123.1
CaO•2Al2O3	s	260.00	541.71	138.8
3CaO•Al2O3	s	270.20	716.72	382.6
12CaO•7Al2O3	s	1386.68	3415.71	1546.7
CaO•Al2O3•SiO2	s. anortite	218.125	273.92	66.0
Ca(OH)2	s	74.09	69.04	70.8
Ca3(PO4)2	s. α	310.18	0	37.3
CaS	s	72.14	1056.57	861.7
CaSO4	s. anhydrite	136.14	104.88	25.3
CaSO4•1/2H2O	s. α	145.15	83.16	29.2
CaSO4•2H2O	s. gypsum	172.17	0	25.7
CaSiO3	s. volastonite	116.16	90.24	40.7
Ca2SiO4	s. β	172.4	232.28	129.9
Ca3SiO5	s	282.2	424.94	271.1
Cd	s. α	112.40	357.10	293.8
Cd	s. v	112.40	356.51	293.2
CdCO3	s	172.41	0	40.2
CdCl2	s	183.31	126.04	73.4
CdO	s	128.40	98.95	67.3
Cd(OH)2	s	146.41	38.26	59.5
CdS	s	144.46	920.60	746.9
CdSO4	s	208.46	149.24	88.6
CdSO4•H2O	s	226.48	84.79	80.6
Cl2	g	70.906	160.44	123.6

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
Cl	g	35.453	201.90	87.1
Cr	s	51.996	569.86	584.7
Cr3C2	s	180.010	2415.85	2492.2
Cr7C3	s	400.005	5007.63	5155.5
CrCl2	s	122.902	361.91	352.2
CrCl3	s	158.355	281.05	301.9
Cr2 O3	s	151.990	0	117.2
Cu	s	63.54	201.59	134.2
CuCO3	s	123.55	0	31.1
CuCl	s	98.99	144.57	76.2
CuCl2	s	134.45	151.95	82.1
CuFe2O4	s	239.23	60.62	36.1
CuO	s	79.54	44.27	6.5
Cu2O	s	143.08	234.56	124.4
Cu(OH)2	s	97.55	- 6.37	15.3
CuS	s	95.00	873.87	690.3
Cu2S	s	159.14	1049.10	791.8
CuSO4	s	159.60	155.65	89.8
Cu2SO4	s	223.14	377.15	253.6
D2	g	4.02946	249.199	263.8
D2O	g	20.02886	0	31.2
D2 O	l	20.02886	- 45.401	22.3
Fe	s. α	55.847	412.12	374.3
Fe3C	s. α cementite	179.552	1654.97	1553.5
FeCO3	s. siderite	115.856	65.06	123.4
FeC12	s	126.753	230.77	195.5
FeC13	s	162.206	253.29	228.1
FeCr2O4	s	223.837	107.10	207.8
Fe0.947O	s. wustite	68.8865	124.01	111.3
FeO	s	71.846	140.16	124.9
Fe2O3	s. hematite	159.692	0	12.4
Fe3O4	s. magnetite	231.539	117.98	116.3
Fe(OH)3	s	106.869	-48.14	37.5
FeS	s	87.911	1037.54	883.5
FeS2	s. pyrite	119.075	1684.72	1426.6
FeSO4	s	151.909	209.11	170.9
FeSi	s	83.933	1249.42	1155.5
FeSiO3	s	131.931	118.07	159.9

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
FeSiO ₄	s. fyalite	203.778	255.30	232.3
FcTiO ₃	s	151.75	118.90	129.6
H ₂	g	2.01594	241.818	236.09
H	g	1.00797	338.874	331.3
HCl	g	36.461	108.82	84.5
HDO	g	19.0213	0.21	18.8
HDO	l	19.0213	-44.38	10.0
HNO ₃	l	63.0129	-53.19	43.5
H ₂ O	g	18.01534	0	9.5
H ₂ O	l	18.01534	-44.012	0.9
H ₃ PO ₄	s	98.0013	-76.26	89.6
H ₂ S	g	34.080	946.61	812.0
H ₂ SO ₄	l	98.077	153.25	163.4
K	s	39.102	356.63	366.6
KAlSi ₃ O ₈	s. adulare	278.337	66.26	7.4
K ₂ CO ₃	s	138.213	-43.58	84.7
KCl	s	75.555	0	19.6
KClO ₄	s	138.553	6.67	136.0
K ₂ Cr ₂ O ₇	s	294.184	-190.4	34.3
KNO ₃	s	101.1069	-135.90	-19.4
K ₂ O	s	94.203	350.04	413.1
KOH	s	56.109	52.72	107.6
K ₂ S	s	110.268	1024.40	943.0
K ₂ SO ₃	s	158.266	300.47	302.6
K ₂ SO ₄	s	174.266	4.62	35.0
K ₂ SiO ₃	s	154.288	75.9	138.2
Mg	s	24.312	725.71	626.1
MgAl ₂ O ₄	s. spinel	142.273	274.17	45.3
MgCO ₃	s	84.321	23.43	29.8
MgCl ₂	s	95.218	244.65	158.2
MgFeO ₄	s	200.004	121.53	68.1
MgO	s	40.311	124.38	59.1
Mg(OH) ₂	s	58.327	42.73	33.2
Mg(NO ₃) ₂	s	148.3218	-64.34	49.7
Mg ₃ (PO ₄) ₂	s	262.879	76.59	78.1
MgS	s	56.376	1105.11	893.9
MgSO ₄	s	120.374	166.22	73.0
MgSiO ₃	s	100.396	87.73	14.8
Mg ₂ SiO ₄	s	140.708	188.35	59.8
Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	s. chrysilite	277.134	117.06	38.8
Mg ₃ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂	s. talc	379.298	140.26	14.8
Mg ₂ TiO ₄	s	160.52	231.48	119.3
Mn	s. α	54.9381	520.03	487.7

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
Mn3C	s	176.82545	1958.20	1878.1
MnCO3	s	114.9475	19.42	86.8
MnCl2	s	124.844	199.18	170.8
MnFe2O4	s	230.630	118.36	122.6
MnO	s	70.9375	134.81	124.8
MnO2	s	86.0369	0	26.5
Mn2O3	s	157.8744	81.09	100.2
Mn3O4	s	228.8119	172.26	187.8
Mn(OH)2	s. amorphous	88.9528	66.47	112.7
MnS	s. green	87.002	1031.23	878.9
MnSO4	s	151.000	180.20	147.8
MnSiO3	s	131.022	110.08	108.0
N2	g	28.0134	0	0.72
N2 atmospheric	g	28.1541	0	0.69
NH3	g	17.0305	316.62	337.9
NH4Cl	s	53.491	249.43	331.3
NH4NO3	s	80.04348	118.08	294.8
(NH4)2SO4	s	132.138	511.84	660.6
NO	g	30.0061	90.25	88.9
NO2	g	46.0055	33.18	55.6
N2O	g	44.0128	82.05	106.9
N2O4	g	92.0110	9.163	106.5
N2O5	g	108.0104	11.30	125.7
Na	s	22.9898	330.90	336.6
NaAlO2	s	81.9701	128.40	67.15
NaAlSi2O6•H2O	s. analcime	220.055	35.41	20.3
NaAlSi3O8	s. low albite	262.2245	72.75	21.9
Na2CO3	s	105.9891	-75.62	41.1
NaCl	s	58.443	0	14.3
NaHCO3	s	84.0071	-101.94	21.6
NaNO3	s	84.9947	-135.62	-22.7
Na2O	s	61.9790	243.82	296.2
NaOH	s	39.9972	23.79	74.9
Na2S	s	78.044	1014.84	921.4
Na2SO3	s	126.042	297.63	287.5
Na2SO4	s	142.041	0	21.4
Na2SiO3	s	122.064	11.31	66.4
Na2Si2O5	s	182.149	13.28	68.2
Na4SiO4	s	184.043	151.45	256.9
Ni	s	58.71	239.74	232.7
Ni3C	s	188.14	1180.09	1142.5
NiCO3	s	118.72	-49.93	36.0
NiCl2	s	129.62	94.85	97.2
NiO	s	74.71	0	23.0
Ni(OH)2	s	92.72	-48.13	25.5
NiS	s	909.77	883.15	762.8

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
Ni3S2	s	240.26	1967.14	1720.2
NiSO4	s	154.77	92.25	90.4
NiSO4•6H2O	s. α , tetragonal. green	262.86	-266.75	53.6
O2	g	31.9988	0	3.97
O	g	15.9994	249.17	233.7
O3	g	47.9982	142.67	168.1
P	s. α , white	30.9738	840.06	861.4
P	s. red, triclinic	30.9738	822.49	849.2
P4O10	s. hexagonal	283.8892	376.21	767.7
Pb	s	207.2	305.64	232.8
PbCO3	s	257.20	0	23.1
PbCl2	s	278.10	106.67	42.3
PbO	s. yellow	223.19	88.32	46.9
PbO	s. red	223.19	86.65	45.9
PbO2	s	239.19	28.24	19.4
Pb3O4	s	685.57	198.53	72.2
Pb(OH)2	s	241.20	32.48	20.6
PbS	s	239.25	930.64	743.7
PbSO4	s	303.25	111.12	37.2
PbSiO3	s	283.27	70.88	31.5
Pb2SiO4	s	506.46	159.07	75.8
S	s. rhombic	32.064	725.42	609.6
SO2	g	64.0628	428.59	313.4
SO3	g	80.0622	329.70	249.1
Si	s	28.086	910.94	854.9
SiC	s. α , hexagonal	40.097	1241.69	1204.5
SiCl4	l	169.898	544.81	482.2
SiO2	s. α . quartz	60.085	0	2.2
SiO2	crystalite	60.085	1.46	3.1
SiO2	s. amorphous	60.085	7.45	8.2
SiS2	s	92.214	2149.23	1866.6
Sn	s. I. white	118.69	580.74	558.7
Sn	s. II. gray	118.69	578.65	558.8
SnCl2	s	189.60	416.08	400.3
SnO	s	134.69	294.97	303.8
SnO2	s	150.69	0	43.0
SnS	s	150.75	1205.74	1070.0
SnS2	s	182.82	1863.8	1618.5
Ti	s	47.90	944.75	907.2
TiC	s	59.91	1154.16	1136.6
TiO	s	63.90	425.14	419.2
TiO2	s. rutile	79.90	0	21.7
TiO3	s	143.80	368.66	386.1
Ti3O5	s	223.70	375.10	414.1
TiS2	s	112.03	2060.45	1876.2

Supstanca	Agregatno stanje	Molarna masa	Entalpija devaluacije	Standardna hemijska eksergija
		M, kg/kmol	D ^o , kJ/mol	e ^o _{x,ch} , kJ/mol
U	s	238.03	1230.10	1196.6
UCl3	s	344.39	577.35	556.0
UCl4	s	379.84	499.39	491.1
UCl5	s	415.30	536.93	519.5
UO2	s	270.03	145.19	168.9
UO3	s	286.03	0	49.8
U3O8	s	842.085	115.49	236.2
W	s	183.85	842.87	827.5
WC	s	195.86	1195.84	1199.1
WO2	s	215.85	253.18	297.5
WO3	s	231.85	0	69.3
WS2	s	249.98	2084.51	1796.6
Zn	s	65.37	419.27	339.2
ZnCO3	s	125.38	0	23.5
ZnCl2	s	136.28	583.93	93.4
ZnFe2O4	s	241.06	74.08	32.2
ZnO	s	81.37	70.99	22.9
Zn(OH)2	s . β	99.38	1918	25.7
ZnS	s. sphalerite	97.43	938.71	747.6
ZnSO4	s	161.43	161.87	82.3
Zn2SiO4	s	222.82	112.74	18.1

Napomena:

Izvor: Szargut, J., Egzergia. Poradnik obliczania I stosowania, Wydawnictwo Politechniki Shlaskej, Gliwice 2007.

Prilog 4

Tabela P3 Primer proračuna karakterizacionog faktora za *ecoinvent* proces: 1kg „Packaging film, LDPE, at plant/RER S“

Elementarni tok ^a	Jedinica	Količina	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinica] ^b	Ukupan sadržaj eksergije ^c
Calcite, in ground	kg	0.014345	0.01	0.000143
Carbon dioxide, in air	kg	0.12046	0	0
Coal, brown, in ground	kg	0.13507	10.3	1.391221
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	0.21624	19.67	4.253441
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	1.72	1.05	1.806
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	0.055712	1	0.055712
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1.304	1	1.304
Gas, natural, in ground	m ³	0.85234	37.88	32.28664
Gravel, in ground	kg	0.076194	0.068	0.005181
Oil, crude, in ground	kg	0.88682	46.49	41.22826
Water, cooling, unspecified natural origin/m ³	kg	0.1021	49.97	5.101937
Water, turbine use, unspecified natural origin	m ³	2.8674	49.97	143.284
Ukupna eksergija toka proizvoda^d:				230.72

Napomena:

^a Elementarni tok dobijen preko rezultata inventarisanja za tok proizvoda biodizela.

^b Sadržaj eksergije toka se izračunava preko obrazca 3.9 ili 3.10, u zavisnosti da li se posmatra energetski ili materijalni elementarni tok.

^c Ukupan sadržaj eksergije materijalnog ili energetskog elementarnog toka se dobija tako što se pomnoži količina elementarnog toka iz rezultata inventarisanja sa njegovim sadržajem eksergije po jedinici (masenoj, zapreminskoj ili energetskoj).

^d Ukupna eksergija toka proizvoda biodizela se dobija tako što se sabere sve eksergije elementarnih tokova potrebnih za njegovo dobijanje.

Elementarni tokovi su odabrani na osnovu kriterijuma odbacivanja od 5%, tj. svi oni elementarni tokovi koji učestvuju sa manje od 5% u ukupnom udelu se ne uzimaju u obzir.

Prilog 5 Detaljan pregled svih ulaznih i izlaznih tokova u okviru inventara životnog ciklusa laminatnog parketa

Tabela P4 Tokovi u okviru faze seča drveta iz šume

Tokovi	<i>ecoinvent proces</i>	Izvor	Napomena
Ulazi			
Stablo tvrdog drveta	Hardwood, standing, under bark, in forest/RER S	Mahalle i dr., 2011	Tokovi su adaptirani da bi odgovarali definisanoj funkcionalnoj jedinici
Stablo mekog drveta	Softwood, standing, under bark, in forest/RER S		
Dizel	Diesel, at regional storage/RER S		
Benzin	Petrol, unleaded, at regional storage/RER S		
Izlazi			
Deblo tvrdog drveta	Round wood, hardwood, under bark, u=70%, at forest road/RER S	Mahalle i dr., 2011	Tokovi su adaptirani da bi odgovarali definisanoj funkcionalnoj jedinici
Deblo mekog drveta	Round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road/RER S		
Drvni ostatak tvrdog drveta	Residual wood, hardwood, under bark, u=80%, at forest road/RER S		
Drvni ostatak mekog drveta	Residual wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road/RER S		

Tabela P5 Tokovi u okviru faze obrade drveta u pilani

Tokovi	<i>ecoinvent proces</i>	Izvor	Napomena
Ulazi			
Deblo tvrdog drveta	Round wood, hardwood, under bark, u=70%, at forest road/RER S	Mahalle i dr., 2011	Tokovi su adaptirani da bi odgovarali definisanoj funkcionalnoj jedinici
Deblo mekog drveta	Round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road/RER S		
Električna energija	Electricity, medium voltage, at grid/CS S		
Dizel	Diesel, at regional storage/RER S		
Benzin	Petrol, unleaded, at regional storage/RER S		
Piljevina	Wood chips, mixed, from industry, u=40%, at plant/RER S		
Čelične trake- pakovanje	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER S		
PE ambalaža	Packaging film, LDPE, at plant/RER S		
Voda	Tap water, at user/RER S		
Transport debbla iz šume	Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER S		
Transport ambalaže	Transport, van <3.5t/RER S	-	Vrsta transporta i razdaljina su pretpostavljeni

Tabela P5 Tokovi u okviru faze obrade drveta u pilani (nastavak)

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Izlazi			
Daske tvrdog drveta	Sawn timber, hardwood, raw, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER	Mahalle i dr., 2011	Tokovi su adaptirani da bi odgovarali definisanoj funkcionalnoj jedinici
Daske mekog drveta	Sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant/RER U		
Piljevina	Wood chips, mixed, from industry, u=40%, at plant/RER S		
Pepeo	Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH	Mahalle i dr., 2011	Tokovi su adaptirani da bi odgovarali definisanoj funkcionalnoj jedinici
NOx	Nitrogen oxides		
SOx	Sulfur oxides		
CO ₂	Carbon dioxide		
CO	Carbon monoxide		

Tabela P6 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena	
Ulazi				
Električna energija	Electricity, medium voltage, at grid/CS S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	Proizvodnja električne energije za Srbiju.	
Piljevina	Heat, mixed chips from industry, at furnace 1000kW/CH S		Odnos piljevine mekog i tvrdog drveta je 50:50.	
Prirodni gas	Heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW/RER		-	
Daske tvrdog drveta	Sawn timber, hardwood, raw, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER S		Dake mekog i tvrdog drveta se suše strujanjem vazduha i u peći u okviru postrojenja za proizvodnju parketa.	
Daske mekog drveta	Sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant/RER U			
Šperploča	Plywood, indoor use, at plant/RER S		-	
Lepak	Urea formaldehyde resin, at plant/RER S			U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali je njihova količina zanemarljiva.
Očvršćivač lepka	Vinyl acetate, at plant/RER S Ethylenediamine, at plant/RER S Ammonium chloride, at plant/GLO S Water, ultrapure, at plant/GLO S			Udeo navedenih jedinjenja je 70:20:5:5. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali je njihova količina zanemarljiva.
Ispunjivač pora	Soya oil, at plant/RER S Silica sand, at plant/DE S		Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija. Data Safety Sheets obezbeđeni od strane kompanije.	Udeo navedenih jedinjenja je 50:50. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali je njihova količina zanemarljiva
UV lak	Methyl methacrylate, at plant/RER S Butyl acrylate, at plant/RER S			Udeo navedenih jedinjenja je 50:50. Ova jedinjenja su usvojena kao zamenska. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali su nepoznata.
Očvršćivač laka	Methylene diphenyl diisocyanate, at plant/RER S		Ovo jedinjenje je usvojeno kao zamensko. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali su nepoznata.	

Tabela P6 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa (nastavak)

Tokovi	ecoinvent proces	Izvor	Napomena
Prajmer	Acrylic acid, at plant/RER S Dipropylene glycol monomethyl ether, at plant/RER S		Udeo navedenih jedinjenja je 50:50. Ova jedinjenja su usvojena kao zamenska. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali su nepoznata.
Ispunjivač pora kod lakiranja	Polyester resin, unsaturated, at plant/RER S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija. Data Safety Sheets obezbeđeni od strane kompanije.	Ovo jedinjenje je usvojeno kao zamensko. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali je njihova količina zanemarljiva.
Sjaj za lak	Butyl acrylate, at plant/RER S Methyl acrylate, at plant/GLO S		Udeo navedenih jedinjenja je 50:50. Ova jedinjenja su usvojena kao zamenska. U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali su nepoznata
Sredstvo za čišćenje laka	Dipropylene glycol monomethyl ether, at plant/RER S		U sastav ulaze i dodatna jedinjenja ali je njihova količina zanemarljiva.
Voda	Tap water, at user/RER S		Voda se uglavnom koristi za pranje rolera za nanošenje premaza
PE folija za pakovanje	Packaging film, LDPE, at plant/RER S		-
PVC trake za pakovanje	Polyvinylchloride, at regional storage/RER S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	-
Papir i karton	Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER S Paper, woodfree, coated, at regional storage/RER S		-
<i>Transport - kamion</i>			
Daske – tvrdo i meko drvo Šperploča Lepak Očvršćivač lepka Ispunjivač pora Sirovine za lakiranje Papir i karton PE folija PVC trake	Transport, lorry 7.5-16t, EURO4/RER S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	Vrsta transporta pretpostavljena da je ista za sve sirovine. Dobavljači sirovina nalaze se širom Evrope, sve razdaljine izmerene putem sajta „viamichelin“
Izlazi			
NO _x SO _x CO ₂ CO	Nitrogen oxides Sulfur oxides Carbon dioxide Carbon monoxide	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	Sve vrednosti emisija izmerene na mestu proizvodnje.
<i>Otpad</i>			
Piljevina	Wood chips, mixed, from industry, u=40%, at plant/RER S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	Odnos piljevine mekog i tvrdog drveta je 50:50.
Komunalni otpad	Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill/CH U		Sav neopasan otpad koji nastane u toku proizvodnje

Tabela P6 Tokovi u okviru faze proizvodnje laminatnog parketa (nastavak)

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Otpadni lepak i lak	Disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit/DE S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija	Otpadni lepak i lak spadaju u opasan otpad koji se dalje predaje kompanijama specijalizovanim za tretman ove vrste otpada
Otpadna voda	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH S		Otpadna voda od pranja rolera za nanošenje premaza, sadrži određene količine otpadnog lepka i laka i mora se dodatno tretirati.

Tabela P7 Tokovi u okviru faze instalacije

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Ulazi			
Transport do mesta instalacije	Transport, van <3.5t/RER S	-	Vrsta transporta i razdaljina su pretpostavljeni
Izlazi			
Škart parketa nakon instalacije	Disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/CH S	-	Pretpostavljeno je odlaganje na deponiju.

Tabela P8 Tokovi u okviru faze upotrebe

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Ulazi			
Električna energija	Electricity, medium voltage, at grid/CS S	Nebel i dr., 2006	Proizvodnja električne energije za Srbiju.
Sredstvo za čišćenje	Esterquat, tallow, at plant/RER S	-	Pretpostavka na osnovu istraživanja koje se jedinjenje koristi najviše za proizvodnju sredstava za čišćenje
Voda	Tap water, at user/RER S	Tarkett d.o.o Bačka Palanka, Srbija Nebel i dr., 2006	
Izlazi			
Voda sa deterdžentom	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH	Nebel i dr., 2006	Sva voda se prosipa u kanalizaciju
VOC		Yrieix i dr., 2004 Jönsson, 1999	Terpeni (Pinen), acetilna kiselina i formaldehid

Tabela P9 Tokovi u okviru faze kraj životnog veka

Tokovi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Ulazi			
Odlaganje laminatnog parketa	Disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/CH S	-	Pretpostavljeno je odlaganje na deponiju.

Prilog 6 Detaljan pregled svih ulaznih i izlaznih tokova u okviru inventara životnog ciklusa BPS i HBPS sistema

Tabela P10 Pregled delova telekomunikacione opreme

Komponente	ecoinvent proces	Izvor	Napomena
Elektronski delovi:			
Predajnik Pojačivač Kombiner Duplekser	Printed wiring board, mixed mounted, unspec., solder mix, at plant/GLO S		Svaki od pojedinih elektronskih delova je objedinjen preko procesa montirane štampane ploče
Antena	Ferronickel, 25% Ni, at plant/GLO S Copper concentrate, at beneficiation/RER S	VIP mobile Serbia Telenor d.o.o. Srbija	Odnos materijala za proizvodnju antene je 50:50. U sastav ulaze i dodatni materijali ali su zanemarljivi.
Kućiče opreme	Aluminium alloy, AlMg3, at plant/RER S		U sastav ulaze i dodatni materijali ali su zanemarljivi.
Antenski kabel	Cable, data cable in infrastructure, at plant/GLO S		1m kabla ima 0,5kg

Tabela P11 Pregled pomoćnih delova i opreme

Komponente	ecoinvent proces	Izvor	Napomena
Temelj za antenski toranj	Concrete, normal, at plant/CH S	Graditelj NS www.graditelj-ns.co.rs	Temelji za antenski toranj i ogradu su isti za BPS i HBPS sistem, a temelj za sklonište je veći kod HBPS sistema zbog većeg i skloništa.
Temelji za ogradu			
Temelj za sklonište			
Cevi za sklonište	Cast iron, at plant/RER S	Utva Silosi a.d. Kovin www.utva.rs/	Cevi su četvrtaste i dužina cevi je izračunata na osnovu konstrukcije koja se određuje prema veličini skloništa. Cevi za BPS sistem: Dimenzije: 35x35x2,5mm težina= 2,69 kg/m i L= 45 m Cevi za HBPS sistem: Dimenzije: 35x35x2,5mm težina= 2,69 kg/m i L= 59 m
Aluminijumski paneli za sklonište	Aluminium alloy, AlMg3, at plant/RER S	Astaco d.o.o., Zemun www.astaco.rs/	Aluminijumski lim se koristi za zatvaranje i pokrivanje skloništa. Koristi se Alu lim debljine 1mm. m ² = 2,75kg BPS - 49 m ² HBPS - 56 m ²
Žičana ograda	Steel, low-alloyed, at plant/RER S	Brako Holding, Skoplje www.brako.com.mk/	Dimenzije: 125x2m, otvor 50x50mm i debljina žice d=2,8mm m ² =1,96kg
Stubovi za žičanu ogradu	Cast iron, at plant/RER S	Utva Silosi a.d. Kovin www.utva.rs/	Cevi su četvrtaste i dužina je izračunata prema dimenzijama žičane ograde. Dimenzije: 35x35x2,5mm m= 2,69 kg/m i L= 84 m

Tabela P11 Pregled pomoćnih delova i opreme (nastavak)

Komponente	<i>ecoinvent proces</i>	Izvor	Napomena
Armaturna ojačanja za temelje	Reinforcing steel, at plant/RER S	Graditelj NS www.graditelj-ns.co.rs	Količina je određena na osnovu površine temelja skloništa i antenskog tornja.
Antenski toranj	Steel, low-alloyed, at plant/RER	Amiga www.amiga.rs	Količina je određena na osnovu potrebne visine i nosivosti.
Šrafovi za antenski toranj	Cast iron, at plant/RER S	Amiga www.amiga.rs	Količina je određena na osnovu konstrukcije i temelja antenskog tornja.

Tabela P12 Pregled delova opreme za napajanje

Komponente	<i>ecoinvent proces</i>	Izvor	Napomena
Baterije	Battery, NiMH, rechargeable, prismatic, at plant/GLO S	VIP mobile Serbia Telenor d.o.o. Srbija Bondesson, 2010	Baterije i kabel za napajanje su veći kod HBPS sistema nego kod BPS sistema, dok je transformator identičan. 1m kabla ima 0,5kg
Transformator	Transformer, high voltage use, at plant/GLO S		
Kabel za napajanje	Cable, three-conductor cable, at plant/GLO S		
Vetrogenerator			
Menjač	Steel, low-alloyed, at plant/RER	ANTARIS 2.5 kW http://www.braun-windturbinen.com/products/antaris-small-wind-turbines/antaris-2-5-kw/	U sastav ulaze i dodatni materijali ali su zanemarljivi.
Generator	Steel, low-alloyed, at plant/RER Copper concentrate, at beneficiation/RER S		Odnos materijala je 75:25
Transformator	Transformer, low voltage use, at plant/GLO S		Proces je adaptiran da koristi stvarnom delu.
Lopatice	Glass fibre, at plant/RER S		Odnos materijala je 50:50 za oba dela.
Kućište	Epoxy resin, liquid, at plant/RER		-
Spiner	Steel, low-alloyed, at plant/RER		-
Kontroler	Printed wiring board, mixed mounted, unspec., solder mix, at plant/GLO S		Predstavlja elektronsku komponentu.
PV paneli	Photovoltaic panel, CdTe, mix, at plant/RER/I S	First Solar FS Series 3 Black PV Module www.firstsolar.com	Količina je određena površinom krova skloništa gde se i montiraju.

Tabela P13 Pregled radova na mestu izgradnje - instalacija

Procesi	<i>ecoinvent proces</i>	Izvor	Napomena
Iskopavanje za temelje antenskog tornja	Excavation, hydraulic digger/RER S	Graditelj NS www.graditelj-ns.co.rs i Amiga www.amiga.rs	Iskopavanje zemlje je veće kod HBPS sistema zbog većeg temelja skloništa.
Iskopavanje rupa za stubove ograde			
Iskopavanje za temelje skloništa			
Transport telekomunikacione opreme	Transport, van <3.5t/RER S	-	Svi dobavljači su pretpostavljeni i nalaze se širom Evrope i razdaljina je izračunata preko „viamichelin“..

Tabela P13 Pregled radova na mestu izgradnje – instalacija (nastavak)

Procesi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Transport betona za temelje	Transport, lorry 7.5-16t, EURO4/RER S		Svi dobavljači su pretpostavljeni i nalaze se širom Evrope i razdaljina je izračunata preko „viamichelin“.
Transport delova kućišta i pomoćnih delova			
Transport baterija, transformatora i kabela za napajanje		-	Vrsta transporta je takođe pretpostavljena.
Transport vetrogeneratora	Transport, van <3.5t/RER S		
Transport PV panela			

Tabela P14 Pregled potrošnje električne energije u fazi upotrebe

Procesi	<i>ecoinvent</i> proces	Izvor	Napomena
Električna energija	Electricity, medium voltage, at grid/AT S		Potrošnja električne energije sa distributivne mreže i električne energije dobijene od sunca i vetra je izračunata u Tabeli 4.11
Solarna energija	-	-	
Energija vetra	-		

Prilog 7 Pregled sadržaja eksergije materijalnih i energetskih elementarnih tokova

Tabela P15 Sadržaj eksergije elementarnih tokova

Elementarni tok	Jedinica	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinici]
Minerals		
Calcite, in ground	kg	0.01
Colemanite, in ground	kg	0.269
Sodium chloride, in ground	kg	0.25
Sulfur, in ground	kg	19.01
Sylvite, 25 % in sylvinit, in ground	kg	0.99
Rocks		
Clay, bentonite, in ground	kg	0.59
Clay, unspecified, in ground	kg	0.57
Gravel, in ground	kg	0.068
Resource in air and water		
Carbon dioxide, in air	kg	0.44
Water, cooling, unspecified natural origin/m ³	m ³	49.97
Water, turbine use, unspecified natural origin	m ³	49.97
Water, unspecified natural origin/m ³	m ³	49.97
Ores		
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	kg	5.73
Barite, 15% in crude ore, in ground	kg	4.2
Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	kg	2.64
Cerium, 24% in bastnasite, 2.4% in crude ore, in ground	kg	210
Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	kg	5.43
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	164.19
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	152.29
Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	75.57
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	33.99
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	kg	2.52
Magnesite, 60% in crude ore, in ground	kg	1.05
Manganese, 35.7% in sedimentary deposit, 14.2% in crude ore, in ground	kg	4.44
Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore, in ground	kg	98.19
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 4.1E-2% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	kg	380.45
Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	kg	63.83
Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground	kg	60.58
Zinc, 9.0% in sulfide, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, In, in ground	kg	7.58

Tabela P15 Sadržaj eksergije elementarnih tokova (nastavak)

Elementarni tok	Jedinica	Sadržaj eksergije toka [MJex/jedinici]
Energy		
Coal, brown, in ground	kg	10.3
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	19.67
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	1.05
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	1.05
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	1
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1
Gas, natural, in ground	m ³	37.88
Oil, crude, in ground	kg	52.76
Peat, in ground	kg	10.35
Wood, hard, standing	m ³	13364.26
Wood, soft, standing	m ³	9629.82
Emissions		
Carbon dioxide	kg	0,44
Carbon monoxide	kg	9,81
Nitrogen oxides	kg	2,09
Sulfur oxides	kg	4,01
VOC	kg	26,37

Napomena:

Izvor: Bösch i dr., 2007 i sopstveni proračuni

Prilog 8 Pregled ukupnog sadržaja eksergije tokova proizvoda

Tabela P16 Ukupan sadržaj eksergije tokova proizvoda

Tok proizvoda (<i>ecoinvent</i> proces)	Jedinica	Ukupan sadržaj eksergije toka [MJex/jedinici]
Agricultural		
Soya oil, at plant/RER S	kg	388,24
Chemicals		
Acrylic acid, at plant/RER S	kg	451,27
Ammonium chloride, at plant/GLO S	kg	67,86
Butyl acrylate, at plant/RER S	kg	616,74
Dipropylene glycol monomethyl ether, at plant/RER S	kg	676,91
Epoxy resin, liquid, at plant/RER S	kg	144,39
Esterquat, tallow, at plant/RER S	kg	231,95
Ethylenediamine, at plant/RER S	kg	271,44
Methyl acrylate, at plant/GLO S	kg	395,28
Methyl methacrylate, at plant/RER S	kg	925,05
Methylene diphenyl diisocyanate, at plant/RER S	kg	991,25
Polyester resin, unsaturated, at plant/RER S	kg	452,77
Silica sand, at plant/DE S	kg	166,39
Urea formaldehyde resin, at plant/RER S	kg	261,07
Vinyl acetate, at plant/RER S	kg	950,03
Construction		
Concrete, normal, at plant/CH S	m ³	29010,16
Electronics		
Battery, NiMH, rechargeable, prismatic, at plant/GLO S	kg	18856,45
Cable, data cable in infrastructure, at plant/GLO S	m	66,81
Cable, three-conductor cable, at plant/GLO S	m	1747,74
Photovoltaic panel, CdTe, mix, at plant/RER/I S	m ²	18463,75
Printed wiring board, mixed mounted, unspec., solder mix, at plant/GLO S	kg	43849,43
Transformer, high voltage use, at plant/GLO S	kg	1438,72
Transformer, low voltage use, at plant/GLO S	kg	2282,79
Fuels		
Diesel, at regional storage/RER S	kg	88,03
Petrol, unleaded, at regional storage/RER S	kg	98,72
Glass		
Glass fibre, at plant/RER S	kg	424,78
Metals		
Aluminium alloy, AlMg3, at plant/RER S	kg	5451,79
Cast iron, at plant/RER S	kg	164,86
Copper concentrate, at beneficiation/RER S	kg	506,79
Ferronickel, 25% Ni, at plant/GLO S	kg	5323,62
Reinforcing steel, at plant/RER S	kg	162,24
Steel, converter, unalloyed, at plant/RER S	kg	125,33

Tabela P16 Ukupan sadržaj eksergije tokova proizvoda (nastavak)

Tok proizvoda (ecoinvent proces)	Jedinica	Ukupan sadržaj eksergije toka [MJex/jedinici]
Steel, low-alloyed, at plant/RER S	kg	432,38
Paper + Board		
Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER S	kg	27,47
Paper, woodfree, coated, at regional storage/RER S	kg	64,09
Plastics		
Packaging film, LDPE, at plant/RER S	kg	230,72
Polyvinylchloride, at regional storage/RER S	kg	301,83
Water		
Tap water, at user/RER S	m ³	49,97
Water, ultrapure, at plant/GLO S	m ³	65,78
Wood		
Hardwood, standing, under bark, in forest/RER S	kg	17,58
Plywood, indoor use, at plant/RER S	kg	19,01
Residual wood, hardwood, under bark, u=80%, at forest road/RER S	kg	17,58
Residual wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road/RER	kg	21,40
Round wood, hardwood, under bark, u=70%, at forest road/RER S	kg	17,58
Round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road/RER S	kg	21,40
Sawn timber, hardwood, raw, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER S	kg	17,58
Sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant/RER U	kg	21,40
Softwood, standing, under bark, in forest/RER S	kg	21,40
Wood chips, mixed, from industry, u=40%, at plant/RER S	kg	19,01
Energy		
Electricity, medium voltage, at grid/AT S	MJ	240,58
Electricity, medium voltage, at grid/CN S	MJ	22,67
Electricity, medium voltage, at grid/CS S	MJ	175,81
Electricity, medium voltage, at grid/US S	MJ	43,61
Heat, mixed chips from industry, at furnace 1000kW/CH S	MJ	4,10
Heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW/RER	MJ	2,51
Transport		
Excavation, hydraulic digger/RER S	m ³	18,87
Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER S	tkm	12,83
Transport, lorry 7.5-16t, EURO4/RER S	tkm	12,83
Transport, van <3.5t/RER S	tkm	306,15
Waste treatment		
Disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit/DE S	kg	912,36
Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill/CH U	kg	266,28
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH S	kg	2,27
Disposal, wood untreated, 20% water, to sanitary landfill/CH S	kg	12,83
Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH S	m ³	49,97

Napomena:

Izvor: sopstveni proračuni