

ANALIZA ŽIVLJENJSKEGA CIKLA IN PRILOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE VPLIVOV LESNE INDUSTRIJE NA OKOLJE

LIFE CYCLE ASSESSMENT AND OPPORTUNITIES TO IMPROVE ENVIRONMENTAL IMPACTS IN THE WOOD SECTOR

Katarina Remic^{1*}, Matej Jošt¹

UDK 674*620.97

Pregledni znanstveni članek/Review scientific article

Prispelo / Received: 14.11.2022

Sprejeto / Accepted: 29.11.2022

Izvleček / Abstract

Izvleček: Analiza življenjskega cikla (LCA) je metoda ocene vplivov na okolje, ki jih ima nek izdelek ali storitev v času celotnega cikla – od pridobivanja surovin do odlaganja na deponijo. LCA sestavljajo štiri faze, ki se med seboj prepletajo in so standardizirane s standardoma ISO 14040:2006 in ISO 14044:2006. Zaradi vsestranske uporabnosti in celostnosti pri sprejemanju strateških odločitev uporaba LCA hitro narašča. Porast uporabe se opaža tudi v lesnopredelovalnem sektorju.

Ključne besede: LCA, trajnost, življenjski cikel, okoljski vplivi, krožno gospodarstvo, lesnopredelovalni sektor

Abstract: Life cycle assessment (LCA) is a method that analyses the environmental impact of products or services throughout their life cycle – from the acquisition of raw materials to the end-of-life scenario in landfill. LCA consists of four phases that interact with each other and is standardized with ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006. Due to its versatility and comprehensive nature with regard to strategic decision making, the use of LCA is growing rapidly, including in the wood sector.

Keywords: LCA, sustainability, life cycle, environmental impacts, circular economy, wood sector

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Analiza življenjskega cikla (Life Cycle Assessment – LCA) je metodološki proces, ki se postopoma razvija že od leta 1960, prvi ISO standard na to temo pa je bil objavljen 1970. LCA obravnava in ocenjuje potencialne regijske in globalne vplive na okolje in na zdravje ljudi med celotno življenjsko dobo nekega izdelka (ali specifične funkcije izdelka) s pomočjo vhodnih in izhodnih parametrov. Zajema vse faze življenjske dobe, od pridobivanja surovin, pridobivanja energetskih virov, proizvodnje in distribucije potrebne energije, proizvodnje polizdelkov, sestavnih delov in dodatkov, proizvodnje končnih izdelkov in soproductov, transporta med posameznimi proizvodnimi sistemi, transporta in distribucije končnih izdelkov, pakiranja, uporabe, vzdrževanja, morebitnega recikliranja ter končne-

ga odlaganja na deponijo. Glavna funkcija analize življenjskega cikla je omogočanje informiranega odločanja npr. v namene strateških odločitev, načrtovanja, postavitve prioritet, dizajna ter redizajna izdelkov in procesov. Uporablja se tako v industriji kot tudi v vladnih in nevladnih organizacijah in postaja ena izmed najbolj popularnih strategij za kontroliranje količin odpadkov (Ellingsen & Vildåsen, 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Quintana-Gallardo et al., 2021; Saadatian et al., 2022; Vilén et al., 2022).

Obravnavanje življenjskega cikla je ključno za podporo trajnostnega razvoja pri postopku sprejemanja zakonov, oblikovanju krožnega gospodarstva, pri standardizaciji, določanju označb, izdaji znanstvenih napotkov, pri odgovornosti korporacij in doseganju političnih ciljev. LCA omogoča identifikacijo priložnosti za izboljšanje trajnostnega vidika posameznih izdelkov ali storitev v različnih obdobjih.

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

* e-mail: katarina.remic@bf.uni-lj.si

jih njihove življenjske dobe. Hkrati je sledenje in kontroliranje izdelkov (storitev), njihovega življenjskega cikla in različnih vidikov trajnostnega razvoja glavno izhodišče za boljše razumevanje treh glavnih stebrov trajnosti (3P) v celotni verigi ponudbe-povpraševanja. Ti stebri so prebivalstvo, planet in profit oziroma uspeh. Ker analiza življenjskega cikla nudi vpogled v celotni cikel izdelka, se z njo izognemo problematiki, kjer zavestno zmanjšamo vplive na okolje v eni fazi življenjskega cikla, pri tem pa (nezavedno) povečamo negativne vplive na okolje v neki drugi fazi cikla. Posledično lahko takšna analiza poveča učinkovitost upravljanja s surovinami in energetskimi viri. Kljub čedalje bolj razširjeni uporabi in konstantni optimizaciji programske opreme, ki se uporablja za izvedbo LCA, nekatere slabosti te metode še vedno ostajajo. Glavna pomanjkljivost je ogromna količina podatkov, ki jih moramo pridobiti iz baz. Podatki pa so običajno tudi nepopolni ali pa celo neobstoječi za specifično področje in jih moramo kombinirati s podatki iz drugih področij. Za izvedbo analize življenjskega cikla potrebujemo veliko časa, poglobljeno znanje o izdelku in proizvodnih tehnikah ter poglobljeno znanje in izkušnje o vrednotenju raziskave. Kljub temu, da se LCA celostno ukvarja z okoljsko problematiko, pa ne preučuje tehničnih sposobnosti sistema, ekonomskih posledic ter socialnih in političnih vidikov sprememb v preučevanih sistemih (de Carvalho Araújo et al., 2022; Fuchsl et al., 2022; Rey-Álvarez et al., 2022; Vance et al., 2022).

2 METODOLOGIJA LCA

2 LCA METHODOLOGY

LCA je strukturirana, obširna in mednarodno standardizirana metoda, ki zajema štiri faze: fazo definiranja ciljev in obsega raziskave, fazo analize inventarja, fazo analize vplivov na okolje in fazo interpretacije rezultatov. SAIC (Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006) in (ILCD European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2010) vsako fazo tudi razdelita in definirata kot sosledje korakov, ki jih mora raziskovalec sprejeti med obravnavanjem posamezne faze.

Faza definiranja ciljev in obsega raziskave opredeljuje podatke, ki narekujejo celotno raziskavo. Postavljeni cilji definirajo razloge za izvedbo razi-

skave, določijo, kako detajlno bo raziskava izvedena in ali bo pokrivala široko področje ali bo zelo specifično usmerjena. Obseg raziskave pa poleg količine detajlov, ki bodo upoštevani, opredeljuje tudi omejitve sistema določene raziskave. V kateri fazi sistema se bo raziskava začela in v kateri končala, je zelo različno in pogojeno s subjektivno percepcijo raziskovalca, kaj v danem primeru predstavlja "cradle" in kaj "grave". Glede na določen začetek in konec cikla mora biti predmet raziskave jasno zastavljen (izdelki oziroma storitve, trženjski segmenti, alternative). Jasno morajo biti opredeljene funkcije sistema (primarne in sekundarne), razdelitve obremenitev in referenčni diagram, LCIA metodologija, vrste vplivov, geografske, časovne in tehnološke omejitve, interpretacija, ki bo uporabljena, vrsta kritičnega vrednotenja, opredeljeno mora biti, kateri podatki so potrebni in kakšna mora biti njihova kvaliteta, lahko pa sta definirana tudi vrsta in format poročila raziskave. Jasno morajo biti opredeljene tudi vse funkcionalne enote, ki predstavljajo referenčne enote, na katere so preračunani in normirani vsi vhodni in izhodni podatki ter njihovi vplivi na okolje. Poenotenje funkcionalnih enot je pomembno predvsem pri primerjavi različnih izdelkov. Pomembno je, da so cilji in omejitve zasnovani v skladu z nameravano uporabnostjo raziskave in da je vseskozi znano ali bodo rezultati namenjeni primerjavi javnega značaja ali bodo morda zaupne narave (Hassan et al., 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Vance et al., 2022; Vilén et al., 2022). Pri izvajanju prve faze LCA procesa mora raziskovalec sprejeti in definirati šest odločitev:

- definiranje cilja projekta;
- opredelitev, katera vrsta informacij je potrebna za pomoč pri sprejemanju odločitev;
- opredelitev potrebne specifičnosti;
- opredelitev, kako naj bodo podatki in rezultati predstavljeni;
- definiranje obsega, omejitve raziskave;
- opredelitev osnovnih pravil in pogojev dela (beleženje predvidevanj in predpostavk, postopki za kontrolo kakovosti, zahteve poročila).

Fazo analize inventarja (LCI faza) predstavlja proces kvantifikacije potrebne energije, potrebnih surovin ter nastalih emisij in odpadkov in zajema popis vseh zbranih podatkov, ki so potrebni za doseganje definiranih ciljev raziskave (Hassan et al., 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Vance et al., 2022;

Vilén et al., 2022). Glavni koraki za izvedbo LCI faze so:

- razvoj diagrama procesa ("flow diagram");
- razvoj načrta zbiranja podatkov;
- proces zbiranja podatkov;
- evalvacija in poročanje rezultatov.

Diagram procesa (življenjskega cikla izbranega izdelka) grafično prikazuje vse primarne in sekundarne procese v obravnavanem sistemu, pridobljeni podatki pa vključujejo kvalitativne in kvantitativne podatke za vsako fazo procesa znotraj omejitev. Pomembno je, da je vsaka faza procesa natančno opisana, da ne prihaja do napak oziroma napačnega razumevanja. Pri postavljanju diagrama procesa je najpomembnejša ohranitev sistemske enakosti, ki predstavlja ohranitev mase in energije znotraj oblikovanega diagrama. Osnovni problem analize življenjskega cikla je določevanje mej med aktivnostmi, ki sodijo v preučevani sistem, in aktivnostmi, ki spadajo v življenjski cikel predelanih ali že recikliranih izdelkov. V primeru odprte zanke recikliranja, ko se reciklirani materiali porabijo za drug izdelek, se delež materiala "odcepi" od glavnega sistema, posledično mora ocenjevalec presoditi, kateri način razmejitev obremenitev na okolje bo uporabil. Prvemu (glavnemu) izdelku pripadajo obremenitve pridobivanja surovin, procesa proizvodnje, uporabe in odstranjevanja nerecikliranih materialov, drugemu (odcepljenemu) pa obremenitve pridobivanja manjkajočih primarnih materialov, obremenitve proizvodnje, uporabe in odstranjevanja tega izdelka. Obremenitve na okolje, ki nastajajo v procesu reciklaže, lahko v celoti pripišemo ali prvemu ali drugemu izdelku. Obremenitve lahko tudi razdelimo in vsakemu pripišemo polovico. Lahko pa upoštevamo skupne obremenitve prvega in drugega izdelka v fazah pridobivanja primarnih materialov, recikliranja in odstranjevanja ter jih delimo na pol. Pri zaprti zanki recikliranja do tega problema ne prihaja. Poleg razmejitev sistema z deljenjem obremenitev, čemur standard ni naklonjen, obstaja tudi razširitev sistema. Pri tem soproducte, ki nastajajo, obravnavamo kot samostojne proizvode, ki služijo kot (okoljsko boljša) alternativa drugim izdelkom na trgu/v industriji in pri izračunu zmanjšujejo vplive celotnega cikla na okolje. Podatke za izvedbo LCA delimo na glavne informacije, ki se nanašajo direktno na obravnavani sistem, npr. emisije pri lakiranju stola, in na informacije "iz ozadja", ki jih prav tako

pridobimo iz baz podatkov, vendar se ne nanašajo direktno na obravnavani sistem, npr. predhodna analiza življenjskega cikla sadike drevesa (Ellingsen & Vildåsen, 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Vilén et al., 2022).

Namen faze analize vplivov na okolje je pridobivanje dodatnih informacij, ki so v pomoč pri razumevanju in vrednotenju rezultatov iz LCI faze. Tretjo fazo imenujemo tudi LCIA faza. Zajema razumevanje in ocenjevanje razsežnosti in pomembnosti nekega potencialnega vpliva na okolje in zdravje ljudi. Kljub temu da lahko na podlagi podatkov inventarja preučujemo mnogo različnih področij in tez, je faza analize vplivov namenjena predvsem pridobivanju ključnih osnov za izvedbo primerjav (med različnimi scenariji in posledično različnimi vrstami emisij) (Hassan et al., 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Vance et al., 2022; Vilén et al., 2022). Glavni koraki izvedbe LCIA faze so:

- izbor in definiranje vplivnih kategorij;
- klasifikacija (razporeditev rezultatov iz LCI faze v izbrane kategorije vpliva, npr. vpliv CO₂ razporedimo v kategorijo segrevanje ozračja);
- karakterizacija (pretvorba vplivov iz LCI faze v kategorije vpliva s pomočjo skupnih faktorjev karakterizacije (npr. vpliv CO₂ preračunamo kot potencialni vpliv na segrevanje ozračja);
- normalizacija (potencialne vplive izrazimo tako, da jih lahko med samo primerjamo);
- združevanje (razvrščanje npr. po razsežnosti merila);
- razvrščanje po pomembnosti, dodelitev uteži;
- evalvacija in priprava poročila LCIA rezultatov.

Faza interpretacije rezultatov združuje rezultate LCI in LCIA faz (fazi sta lahko obravnavani združeno ali pa vsaka posebej), ki so obravnavani in oblikovani v povzetek. Ta služi kot razprava rezultatov za izdelavo napotkov pri odločanju in kot usmeritev za sprejemanje odločitev v skladu s postavljenimi cilji. Vsebovati mora identifikacijo ključnih problemov glede na rezultate LCI in LCIA faz, celostno vrednotenje, kontrolo občutljivosti in doslednosti, zaključke, omejitve in priporočila (Ellingsen & Vildåsen, 2022; Hassan et al., 2022; Pirc Barčič et al., 2022; Vance et al., 2022; Vilén et al., 2022). Interpretacija rezultatov zajema:

- identifikacijo ključnih problematik na osnovi LCI in LCIA faz;

Preglednica 1. Kategorije vplivov za analizo življenjskega cikla izdelkov in storitev (de Carvalho Araújo et al., 2022; Klein et al., 2015; Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006; Vance et al., 2022).
 Table 1. Impact categories for life cycle assessment of products and services (de Carvalho Araújo et al., 2022; Klein et al., 2015; Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006; Vance et al., 2022).

Kategorija vpliva		Razse- žnost merila	Klasifikacija podatkov analize inventarja	Skupen faktor karakterizacije	Enota
Segrevanje ozračja	Skupno	Globalno	CO ₂ (ogljikov dioksid), NO ₂ (dušikov dioksid), CH ₄ (metan), CFC (klorofluoroogljikovodiki), HCFC (hidroklorofluoroogljikovodiki), CH ₃ Br (metil bromid)	Potencialno se- grevanje ozračja	kg CO ₂ ali ekvivalent
	Fosilna goriva				
	Biogeni vplivi				
Tanjšanje stratosferske ozonske plasti		Globalno	CFC, HCFC, CH ₃ Br, haloni	Potencialno tanjšanje ozonske plasti	kg CFC-11 ali ekvivalent
Zakisovanje		Regijsko in lokalno	SO _x (žveplovi oksidi), NO _x (dušikovi oksidi), HCl (klorovodikova kislina), HF (fluorovodikova kislina), NH ₄ (amonijak)	Potencialno zaki- sovanje	kg mol H+
Evtrofikacija	Evtrofikacija sladkih voda	Lokalno	PO ₄ (fosfati), NO (dušikov oksid), NO ₂ , nitrati, NH ₄	Potencialna evtrofikacija	kg PO ₄ ali ekvivalent
	Evtrofikacija morskih voda				kg N ali ekvivalent
	Evtrofikacija zemlje				mol N
Fotogemičen smog		Lokalno	NMHC (ne-metanski ogljikovodiki)	Potencial pojava fotokemičnega smoga	kg NMVOC ali ekvivalent
Izraba surovin	Izraba abiotskih surovin – mine- ralov in kovin	Globalna, regijska in lokalna	Količina porabljenih mineralov in kovin	Potencial izrabe surovin	kg Sb ali ekvi- valent
	Izraba abiotskih surovin – fosilna goriva		Količina porabljenih fosilnih goriv		MJ (neto)
Toksični vplivi na človekovo zdravje	Karcinogeni	Globalno, regijsko in lokalno	Skupni izpusti kemikalij v zrak, vodo in zemljo	LC ₅₀	CTU (št. bolezni na kg kemikalije)
	Nekarcinogeni				
Ekotoksičnost	Sladkih voda	Lokalno	Toksične kemikalije, za katere je bila ugotovljena smrtna koncentracija za določeno vrsto organizmov	LC ₅₀ (za sladko- vodne organizme)	CTU (št. Refe- renčnih toksič- nih vplivov na kg kemikalije)
	Morske vode			LC ₅₀ (za morske organizme)	
	Zemlje			LC ₅₀ (za glodalce)	
Raba vode		Regijsko in lokalno	Porabljena voda	Potencialno po- manjkanje vode	Pomanjkanje povprečne količine pora- bljene vode na svetovnem nivoju v m ³

Kategorija vpliva	Razsežnost merila	Klasifikacija podatkov analize inventarja	Skupen faktor karakterizacije	Enota
Raba tal	Globalno, regijsko in lokalno	Količina odloženih odpadkov na organizirana in neorganizirana odlagališča ter ostali posegi v prostor/tla	Razpoložljivost tal	Ni merljivo v konstantnih enotah, spremembe v kvaliteti zemlje
Radioaktivnost	Lokalno, regijsko	Pojavljane negativnih stranskih učinkov na ljudeh in ekosistemih zaradi sevanja	Potencialni vpliv na človeško zdravje	KBq U-235
Emisije drobnih delcev	Lokalno, regijsko	Indikator pogostosti obolenj zaradi emisij drobnih delcev	Potencialna pogostost obolenj	Pogostost obolenj

- evalvacijo, ki zajema preverjanje celostnosti, občutljivost in doslednosti;
- pripravo zaključkov, priporočil in poročila.

3 KATEGORIJE IN PARAMETRI

3 CATEGORIES AND PARAMETERS

V preglednici 1 so prikazane kategorije vplivov na okolje, ki jih lahko obravnavamo v okviru LCA raziskave. Kategorije lahko na okolje in človeka vplivajo na različnih nivojih razsežnosti (lokalnem, regijskem ali globalnem nivoju), oziroma se vplivi kažejo na večrazsežnostnih nivojih. Preglednici je dodana klasifikacija podatkov, ki nastane v fazi analize inventarja in predstavlja najpogostejše podatkovne parametre, ki vplivajo na določeno kategorijo. Vse te podatke se pri izračunih združuje na skupni faktor karakterizacije s funkcionalno enoto, ki je glavna referenčna vrednost za primerjavo (Quintana-Gallardo et al., 2021).

4 KROŽENJE OGLJIKA IN IMPLEMENTACIJA LCA V LESNOPREDELOVALNO INDUSTRIJO

4 CARBON CYCLE AND IMPLEMENTATION OF LCA IN WOOD SECTOR

Ogljik je četrti najbolj razširjen element v vesolju in glavni vir življenja na Zemlji. Največji delež ogljika na Zemlji je vezan v kamenje in skalovje, preostali del pa je v oceanu, atmosferi, rastlinah, zemlji in fosilnih gorivih. S kopičenjem ogljika v skalovju se regulira količina ogljika v atmosferi, posledično pa tudi temperatura na Zemlji. Količina vodne pare v ozračju sorazmerno narašča in pada s povečanjem oziroma zmanjšanjem koncentracij CO₂ v atmosferi,

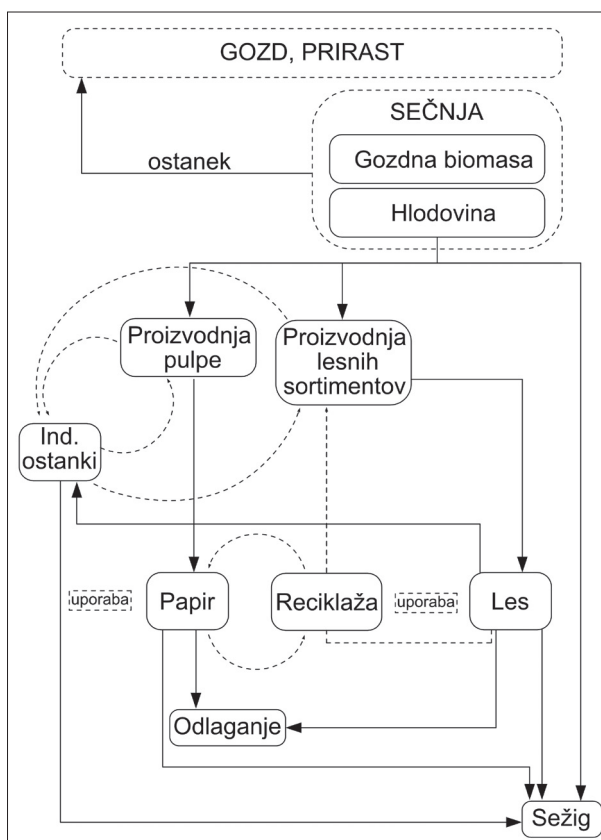
zemlja pa se segreje pri povečanih količinah vodne pare v ozračju in obratno. Ogljikov dioksid, ki je vezan v rastlino (ali fitoplankton), se sprosti nazaj v atmosfero šele, ko pride do fotosintezi obratne kemijske reakcije. Ta nastopi v štirih različnih scenarijih. V želji po pridobivanju energije lahko rastline same porabijo sladkor, ko potrebujejo energijo za rast ali pa živali in ljudje pojedjo rastline. Do sproščanja CO₂ prihaja tudi, ko rastline odmrejo in se razkrajajo ali pa če zgorijo. Lesni izdelki vsebujejo ogljik, ki so ga absorbirali v fazi rasti drevesa v procesu fotosinteze. Znano je, da drevo za vsak kubik svoje rasti absorbira 1 tono CO₂ iz atmosfere in proizvede 0,7 tone kisika. Večinski del (0,9 tone) CO₂ drevo obdrži absorbiranega po procesu rasti in se v lesu ohranja ne glede na to, kako ga predelujemo (v kakšne izdelke). Izloči se šele, ko nastopi eden izmed štirih scenarijev. Lesna biomasa je pogosto opisana kot obnovljiv, trajnostni vir surovine in energije. Čeprav se les smatra kot zelo dobra alternativa marsikateremu drugemu materialu z večjim ogljičnim odtisom, pa je nivo dejanske obnovljivosti in trajnosti odvisen od količine neobnovljivih virov, ki smo jih vnesli v sistem predelave. Ogljično nevtralnost zmanjšujejo gojeni sistemi dreves in netrajnostno upravljanje z gozdnimi sistemi. V splošnem življenjski cikel lesnih izdelkov zajema fazo pridobivanja surovin (aktivnosti gojenja gozdov, sečnja in spravilo lesa iz gozda), fazo proizvodnje materialov (predelava hlodovine v žagane elemente, ploščne kompozite, itd.), fazo uporabe in vzdrževanja ter fazo uničenja in odstranjevanja na deponijo. Med vsemi fazami se pojavljata distribucija in transport. V fazo proizvodnje so zajete tudi vse aktivnosti sekundarne predelave, kjer so posamezni materiali

uporabljeni in vgrajeni v izdelek. Nadaljnja uporaba se lahko pojavlja v različnih oblikah. Kot ponovna uporaba, kjer izdelek uporabimo za isti namen, kot predelava, kjer izdelek uporabimo za drug namen ali pa kot recikliranje, kjer izdelek predelamo v surovino za nadaljnjo rabo (Aryapratama & Pauliuk, 2022; Cordier et al., 2022; Duan et al., 2022; Fimbres Weihs et al., 2022; Klein et al., 2015; Pirc Barčič et al., 2022).

Na sliki 1 je prikazano kroženje lesa v Evropi, ki si prizadeva za čimbolj celovito rabo lesa in lesnih ostankov.

Prvotne LCA raziskave za lesnopredelovalno verigo so se osredotočale na manjše segmente (produkte) lesne industrije, danes pa se analiza življenjskega cikla večinoma uporablja za celostno vrednotenje lesnih alternativ v gradbeništvu. Gradnja bivalnih in javnih objektov je v zadnjih letih močno narasla, hkrati pa je gradbeni sektor postal ciljani sektor za zmanjševanje vplivov na okolje, saj vsako leto proizvede kar 39 % vseh svetovnih emisij (Andersen et al., 2022). Podatki kažejo, da bi z uvedbo 17 % lesa kot alternativnega materiala, emisije v gradbeništvu zmanjšali za 20 %. Pri LCA, kjer je bila lesena gradnja celostno obravnavana (Duan et al., 2022), pa je bilo ugotovljeno, da bi emisije lahko zmanjšali za kar 22-50 %. Najnovejše direktive Evropske unije izpostavljajo nujno po zmanjšanju emisij stavb do leta 2050, kar podpira tudi iniciativa novi evropski Bauhaus, ki temelji na okolju prijazni gradnji in zajema estetska, trajnostna in inkluzivna načela.

Izvedene so bile analize občutljivosti (Duan et al., 2022) za izolacije, osnovne materiale, uporabo fenol-formaldehidne smole, razdaljo transporta, vrsto uporabljene energije, energijsko učinkovitost, prehajanje zraka, uporabo recikliranih materialov, upravljanje z ostanki biomase, življenjsko dobo, učinkovitost toplotne črpalke in še posebej za delež ponovno uporabljenega lesa. Kot najbolj vplivni in ključni za nadaljnjo raziskovanje njihovih alternativnih možnosti so se izkazali: izolacija (Bucklin et al., 2022; Duan et al., 2022; Fuchsl et al., 2022; Galimshina et al., 2022), vrsta uporabljenih lesnih kompozitov (Andersen et al., 2022; Bucklin et al., 2022; Cascione et al., 2022; Duan et al., 2022; Kromoser et al., 2022), transport materiala za gradnjo (Duan et al., 2022), vrsta uporabljene energije (Duan et al., 2022; Saadatian et al., 2022; Tushar et al., 2022)



Slika 1. Kroženje lesa v Evropi (prirejeno po Mantau, 2012).

Figure 1. Wood flow in Europe (adapted from Mantau, 2012).

in vrsta oken (Duan et al., 2022; Saadatian et al., 2022; Tushar et al., 2022), kjer so še posebej opazne prednosti uporabe lesenih oken v primerjavi s PVC, aluminijastimi oziroma kompozitnimi (les-aluminij) sistemi oken. Pomembno vplivajo tudi ostali dejavniki, kot sta razmerje velikosti oken glede na steno in orientacija oken v objektu. Analiza vplivov na okolje (Quintana-Gallardo et al., 2021) pri bivanju v primerljivih stanovanjskih objektih na različnih lokacijah po Evropi kaže, da je prav lokacija najbolj vplivala na okoljsko obremenjujoče razlike pri emisijah, še posebej na porabo elektrike in vrsto vira energije. Zaradi potrebe po ponovni uporabi odsluženega lesa (Szichta et al., 2022) se uveljavljajo tudi LCA raziskave, ki se osredotočajo na rušenje objektov z (deloma) lesenimi konstrukcijami in upravljanje z njimi po končani življenjski dobi, še posebej pa pretvarjanje odsluženega lesa v izdelke, surovino ali snovi z višjo dodano cenovno in funkcionalno vre-

dnostjo (Ivanica et al., 2022; Khodaei et al., 2022). Hkrati se razvijajo inovativni kompoziti, ki vključujejo les. Pri razvoju lesno-betonskega kompozita za talne obloge (Tighnavard Balasbaneh et al., 2022) so se prednosti pokazale ne samo pri zmanjšani rabi betona in zmanjšanju negativnih vplivov na okolje, ampak tudi pri mehanskih lastnostih tega kompozita. Duan in sodelavci (2022) poudarjajo, da lesena gradnja ni vedno upravičena, oziroma ne pomeni avtomatskega zmanjšanja emisij na okolje, še posebej v državah in pokrajinah, ki niso bogato poraščene z gozdom. Quintana-Gallardo in sodelavci (2021) izpostavljajo še pretirano poenostavljanje okoljske učinkovitosti lesene gradnje in dodatno pojasnjujejo, da je za dejansko zmanjšanje vplivov na okolje potrebna implementacija različnih biomasnih materialov tudi v druge elemente celotne stavbe – ne samo uporaba lesa za konstrukcijo objekta.

Velik delež negativnih vplivov na okolje predstavljajo nelesni materiali v lesnih sistemih npr. smole in površinski premazi. S pomočjo LCA raziskovalci poskušajo opredeliti možnosti na zmanjšanje vplivov že med proizvodnjo smol in veziv (Vujanović et al., 2022) oziroma razviti alternativne »zelene smole« na osnovi taninov (Hu et al., 2023) sojinih proteinov (Liu et al., 2022), agro-industrijskih ostankov lignina (de Carvalho Araújo et al., 2022). S tem bi se izognili (tolikšni) uporabi fenol-formaldehida. De Carvalho Araújo in sodelavci (2022) poudarjajo tudi pomembnost biomimikrije in nanodelcev pri razvoju novih sistemov in rešitev. Razširjena pa postaja tudi proizvodnja in uporaba lesno-plastičnih kompozitov, tudi na osnovi odsluženega lesa (de Carvalho Araújo et al., 2022; Friedrich, 2022; Huang et al., 2022).

Potreba po produktih iz biomasnih ostankov z višjo dodano vrednostjo se v veliki meri obravnava v okviru biorafinerij in manjših predelovalnih obratov. Ti na podlagi LCA ter stroškovnih analiz opredelijo smiselnost pridobivanja, ekstrakcije, produkcije, zbiranja odpadkov in njihove pretvorbe (Zhang et al., 2023). V praksi se iz lignocelulozne biomase že pridobiva vodik (Buffi et al., 2022; Wu et al., 2023), nanoceluloza (Shahzad et al., 2023), mlečne kisline, ksilitol, etanol, metan, različne lipide, betakaroten (Zhang et al., 2023), itd. To so običajno zgolj ciljni produkti, tehnološke izboljšave pa bi omogočile še dodatne stranske produkte, ki so bili do sedaj namenjeni le sežigu – pridobivanju energije. V to

skupino velikokrat odpade lignin, ki je kljub njegovi uporabnosti stroškovno ugodnejši za pridobivanje energije kot za nadaljnjo predelavo v vanilin, polihidroksialkanoate in aldehide. Raziskave zato ocenjujejo možnosti uporabe lignina kot celote za različne namene npr. kot del asfaltnega sistema (Moretti, 2023). Ugotovljeno je bilo, da znotraj lesnopredelovalne biorafinerije lignifikacija predstavlja 80 % vseh vplivov ekotoksičnosti sladkih voda in zemlje, saharifikacija pa predstavlja nezanemarljivo generacijo drobnih delcev, evtrofikacijo sladkih voda, segrevanje ozračja, toksičnost za ljudi in ekotoksičnost zemlje (Zhang et al., 2023).

5 ZAKLJUČKI

5 CONCLUSIONS

Analiza življenjskega cikla je standardizirana metoda ocene vplivov nekega izdelka ali storitve na okolje v času celotnega življenjskega cikla. Zajema pridobivanje surovin, pridobivanje potrebnih energetskih virov, proizvodnjo in distribucijo potrebne energije, proizvodnjo polizdelkov, potrebnih sestavnih delov in dodatkov, proizvodnjo končnih izdelkov in soproductov, transport med posameznimi proizvodnimi sistemi, transport in distribucijo končnih izdelkov, pakiranje, uporabo, vzdrževanje, morebitno recikliranje ter končno odlaganje na deponijo.

LCA zajema štiri faze, ki se med seboj interaktivno prepletajo in dopolnjujejo. Prva faza je faza definiranja ciljev in obsega raziskave. V samem začetku mora raziskovalec jasno definirati razloge za raziskavo in posledično postaviti cilje raziskave. Ključna je ustrezna izbira omejitev LCA, ki zajema obseg, specifičnost, količino podatkov, začetno in končno fazo obravnavanega sistema in vse vmesne faze sistema ter način raziskave in njeno kontrolo doslednosti. Sledi faza analize inventarja, ki zajema popis vseh potrebnih podatkov za izvedbo raziskave in njihovo vrednotenje. Faza zajema tudi razvoj diagrama procesa, ki grafično prikazuje vse faze znotraj življenjskega cikla izdelka. Tretja faza je faza analize vplivov na okolje, kjer raziskovalec podatke iz druge faze smiselno pripiše kategorijam, ki predstavljajo različne vplive na okolje in jih normalizira tako, da so vrednosti primerljive med sabo. V zadnji fazi, fazi interpretacije, so obravnavani rezultati druge in tretje faze. Oblikuje se povzetek raziskave, ki mora vsebovati identifikacijo ključnih problemov

glede na rezultate LCI in LCIA faz, celostno vrednotenje, kontrolo občutljivosti in doslednosti, zaključke, omejitve in priporočila.

Les je pogosto opisan kot obnovljiv in trajnostni vir surovine, energije in kot okoljsko zelo dobra alternativa marsikateremu drugemu materialu. Če drevesa rastejo v gozdnih sistemih, ki so upravljani po trajnostnih načelih, lahko les predstavlja ogljično nevtralno surovino. Kljub temu pa lahko lesen izdelek v svojem življenjskem ciklu ustvari nezamenarljivo količino negativnih vplivov na okolje, zato je izvedba LCA smiselna za ohranitev okoljske nevtralnosti v čim večji meri. Dosedanje raziskave so opredelile izzive lesne industrije s problematičnimi vplivi na okolje, ki se nanašajo predvsem na pomožne materiale in transport, in izpostavile učinkovitejša možnosti upravljanja z lesno biomaso za pridobivanje trajnostnih produktov z višjo dodano vrednostjo. To podpira tudi iniciativa novi evropski Bauhaus, ki predlaga LCA metodologijo kot možnost za vodilo oblikovanja stavb, saj bi celostno obravnavanje pripomoglo k praksam, ki stremijo k dolgi življenjski dobi, uporabljajo obnovljive vire, ponovno uporabljajo odslužen material in zmanjšujejo vplive na okolje, ki nastajajo zaradi transporta. Hkrati takšne prakse vseeno ohranjajo raznoliko kulturo in ne omejujejo kreativnega razvoja.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

Life cycle assessment (LCA) is a methodological process that has been developing since 1960. It discusses and evaluates products and services throughout their life cycle. It covers the acquisition of raw materials and energy, production and distribution of energy, production of intermediate products, main products and by-products, production of final products and co-products, transport between production systems, transport and distribution of final products, packaging process, use, maintenance, possible recycling and final landfill scenario. LCA is mainly a tool for strategic decision making, but it can also be used to identify opportunities for improvement throughout the product production process. The main disadvantage of LCA is the huge amount of data needed coupled with the lack of accurate data that is available.

LCA consists of four phases. The first phase is the definition of the aim and scope, in which the researcher defines the main purpose of the LCA and, accordingly, the goals of the research. It is also very important to define the scope properly – where is the beginning of the analysed system, where is the end and which production phases are included in the system. This is followed by the inventory analysis (LCI phase), where a flow chart is created, a plan for data collection is designed and all the necessary data is collected and analysed. The third phase is the impact assessment phase. In this phase of the research process, all data from the previous phase are classified into impact categories and further normalized so that all data have the same functional unit. The following impact categories are considered in LCA: climate change (which is described as the potential for global warming and can be divided into general climate change, climate change from fossil fuels and climate change from biogenic emissions), ozone depletion (which is caused in particular by the presence of CFCs, HCFCs, CH₃Br and halogens in the atmosphere), acidification (especially of soil), eutrophication (which is subdivided into eutrophication of freshwater, marine eutrophication or terrestrial eutrophication), photochemical ozone formation (which occurs due to NMHCs in the atmosphere), resource depletion (resources are subdivided into minerals and metals and fossil fuels), human toxicity (subdivided into carcinogenic and non-carcinogenic due to the presence of certain chemicals in the atmosphere), ecotoxicity (of freshwater, marine and terrestrial ecotoxicity), water use, land use, ionizing radiation and particulate matter emissions (indicating how frequently various diseases occur due to the presence of such emissions). Finally, the interpretation phase takes place, in which all data sorted by category are evaluated, the most important hotspots (phases in the system with the most problematic environmental impacts) are identified and conclusions and recommendations are formulated.

Wood products contain carbon that was absorbed by the trees during their growth phase through photosynthesis. As long as the wood does not rot or burn, CO₂ remains in the wood. And even then, only the amount of CO₂ that was absorbed during growth is released. The goal is, however, is to delay incineration by reusing it as much as possi-

ble. Although wood is often seen as a more environmentally friendly solution than many other materials, it is important to understand that its processing can have a significant impact on the environment. In order to maximize the use of wood, and in particular reclaimed wood before incineration, many sectors are developing new technologies and products with the support of LCA. The most important sector is construction, where the goal of sustainable buildings can be achieved with timber structures. In addition to timber construction, LCA also supports innovation research in wood-based materials, energy, chemistry, pharmaceuticals and other sectors.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), v okviru programa Les in lignocelulozni kompoziti (P4-0015).

VIRI

REFERENCES

- Andersen, J. H., Rasmussen, N. L., & Ryberg, M. W. (2022). Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. *Energy and Buildings*, 254, 111604. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111604>
- Aryapratama, R., & Pauliuk, S. (2022). Life cycle carbon emissions of different land conversion and woody biomass utilization scenarios in Indonesia. *Science of The Total Environment*, 805, 150226. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150226>
- Bucklin, O., Menges, A., Amtsberg, F., Drexler, H., Rohr, A., & Krieg, O. D. (2022). Mono-material wood wall: Novel building envelope using subtractive manufacturing of timber profiles to improve thermal performance and airtightness of solid wood construction. *Energy and Buildings*, 254, 111597. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111597>
- Buffi, M., Prussi, M., & Scarlat, N. (2022). Energy and environmental assessment of hydrogen from biomass sources: Challenges and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, 165, 106556. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106556>
- Cascione, V., Roberts, M., Allen, S., Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Walker, P., & Emmitt, S. (2022). Integration of life cycle assessments (LCA) in circular bio-based wall panel design. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130938. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130938>
- Cordier, S., Blanchet, P., Robichaud, F., & Amor, B. (2022). Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material substitutions. *Building and Environment*, 226, 109695. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109695>
- de Carvalho Araújo, C. K., Bigarelli Ferreira, M., Salvador, R., de Carvalho Araújo, C. K. C., Camargo, B. S., de Carvalho Araújo Camargo, S. K., de Campos, C. I., & Piekarski, C. M. (2022). Life cycle assessment as a guide for designing circular business models in the wood panel industry: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131729. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131729>
- Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*, 221, 109320. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109320>
- Ellingsen, O., & Vildåsen, S. S. (2022). Developing circular business models: LCA and strategic choice. *Procedia CIRP*, 109, 437–442. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.05.275>
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook general guide for life cycle assessment: detailed guidance. Publications Office.
- Fimbres Weihs, G. A., Jones, J. S., Ho, M., Malik, R. H., Abbas, A., Meka, W., Fennell, P., & Wiley, D. E. (2022). Life cycle assessment of co-firing coal and wood waste for bio-energy with carbon capture and storage – New South Wales study. *Energy Conversion and Management*, 273, 116406. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116406>
- Friedrich, D. (2022). Success factors of Wood-Plastic Composites (WPC) as sustainable packaging material: A cross-sector expert study. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 506–517. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.12.030>
- Füchsl, S., Rheude, F., & Röder, H. (2022). Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. *Cleaner Materials*, 5, 100119. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100119>
- Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Padey, P., Lasvaux, S., Sudret, B., & Habert, G. (2022). Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study. *Applied Energy*, 316, 119102. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119102>
- Hassan, S. R., Megahed, N. A., Abo Eleinen, O. M., & Hassan, A. M. (2022). Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy and Buildings*, 267, 112144. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112144>
- Huang, Y., Lu, L., Ding, C., & Pan, M. (2022). Eco-friendly wood-plastic composites from laminate sanding dust and waste poly(propylene) food pails. *Waste Management*, 149, 96–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2022.06.012>
- Hu, J., Skinner, C., Ormondroyd, G., & Thevenon, M. F. (2023). Life cycle assessment of a novel tannin-boron association for wood protection. *Science of The Total Environment*, 858, 159739. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159739>

- ISO (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006).
- ISO (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006).
- Ivanica, R., Risse, M., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2022). Development of a life cycle inventory database and life cycle impact assessment of the building demolition stage: A case study in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130631. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130631>
- Khodaei, H., Olson, C., Patino, D., Rico, J., Jin, Q., & Boateng, A. (2022). Multi-objective utilization of wood waste recycled from construction and demolition (C&D): Products and characterization. *Waste Management*, 149, 228–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2022.06.021>
- Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., & Weber-Blaschke, G. (2015). 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 556–575. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0847-1>
- Kromoser, B., Reichenbach, S., Hellmayr, R., Myna, R., & Wimmer, R. (2022). Circular economy in wood construction – Additive manufacturing of fully recyclable walls made from renewables: Proof of concept and preliminary data. *Construction and Building Materials*, 344, 128219. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128219>
- Liu, Z., Liu, T., Jiang, H., Zhang, X., Li, J., Shi, S. Q., & Gao, Q. (2022). Biomimetic lignin-protein adhesive with dynamic covalent/hydrogen hybrid networks enables high bonding performance and wood-based panel recycling. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 230–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.06.042>
- Mantau, U. (2012). Wood flows in Europe. CEPI, CEI-Bois.
- Moretti, C. (2023). Reflecting on the environmental impact of the captured carbon feedstock. *Science of The Total Environment*, 854, 158694. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.158694>
- Pirc Barčič, Klarič, K., & Kruhac, T. (2022). The role of life cycle assessment in business and production processes in wood industry: a literature review. In Jelačić, Denis (Ed.), *Controlling of business and production processes in forest based industry* (1st ed., Vol. 1, pp. 47–64). WoodEMA, i.a.
- Quintana-Gallardo, A., Schau, E. M., Niemelä, E. P., & Burnard, M. D. (2021). Comparing the environmental impacts of wooden buildings in Spain, Slovenia, and Germany. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129587. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129587>
- Rey-Álvarez, B., Sánchez-Montañés, B., & García-Martínez, A. (2022). Building material toxicity and life cycle assessment: A systematic critical review. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130838. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130838>
- Saadatian, S., Rodrigues, C., Freire, F., & Simões, N. (2022). Environmental and cost life-cycle approach to support selection of windows in early stages of building design. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132624. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132624>
- Scientific Applications International Corporation (SAIC). (2006). *Life cycle assessment: principles and practice*. Cincinnati: National risk management research laboratory.
- Shahzad, A., Ullah, M. W., Ali, J., Aziz, K., Javed, M. A., Shi, Z., Manan, S., Ul-Islam, M., Nazar, M., & Yang, G. (2023). The versatility of nanocellulose, modification strategies, and its current progress in wastewater treatment and environmental remediation. *Science of The Total Environment*, 858, 159937. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159937>
- Szichta, P., Risse, M., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2022). Potentials for wood cascading: A model for the prediction of the recovery of timber in Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106101. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RES-CONREC.2021.106101>
- Tighnavard Balasbانه, A., Sher, W., Yeoh, D., & Koushfar, K. (2022). LCA & LCC analysis of hybrid glued laminated Timber–Concrete composite floor slab system. *Journal of Building Engineering*, 49, 104005. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104005>
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., & Zhang, G. (2022). Energy simulation and modeling for window system: A comparative study of life cycle assessment and life cycle costing. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129936. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129936>
- Vance, C., Sweeney, J., & Murphy, F. (2022). Space, time, and sustainability: The status and future of life cycle assessment frameworks for novel biorefinery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112259. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112259>
- Vilén, A., Laurell, P., & Vahala, R. (2022). Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. *Journal of Environmental Management*, 324, 116356. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116356>
- Vujanović, A., Puhar, J., Krajnc, D., Awad, P., & Čuček, L. (2022). Reducing the environmental impacts of the production of melamine etherified resin fibre. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 479–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.10.014>
- Wu, N., Lan, K., & Yao, Y. (2023). An integrated techno-economic and environmental assessment for carbon capture in hydrogen production by biomass gasification. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106693. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106693>
- Zhang, Y., Ding, Z., Shahadat Hossain, M., Maurya, R., Yang, Y., Singh, V., Kumar, D., Salama, E. S., Sun, X., Sindhu, R., Binod, P., Zhang, Z., & Kumar Awasthi, M. (2023). Recent advances in lignocellulosic and algal biomass pretreatment and its biorefinery approaches for biochemicals and bioenergy conversion. *Bioresource Technology*, 367, 128281. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128281>