

Primljen / Received: 11.1.2023.

Ispravljen / Corrected: 11.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 21.8.2023.

Dostupno online / Available online: 10.9.2023.

Analiza životnog ciklusa armiranobetonske ploče kroz tri scenarija gospodarenja otpadom

Autori:



Dr.sc. **Ivana Carević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
ivana.carevic@grad.unizg.hr



Helena Naletilić, mag.ing.aedif.
Palace d.o.o
helenabradvica12@gmail.com



Prof.dr.sc. **Nina Štirmer**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
nina.stirmer@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Ivana Carević, Helena Naletilić, Nina Štirmer

Analiza životnog ciklusa armiranobetonske ploče kroz tri scenarija gospodarenja otpadom

U radu je prikazana analiza životnog ciklusa armiranobetonske podne ploče s posebnim naglaskom na kraj životnog vijeka. Prikazana su tri scenarija kraja životnog vijeka odnosno gospodarenja otpadom: scenarij I (trenutna situacija gospodarenja građevnim otpadom u Republici Hrvatskoj), scenarij II (100 % odlaganje na odlagalište) i scenarij III (potpuna oporaba građevnog otpada). Cilj je prikazati ekološke prednosti recikliranja u smjeru održive gradnje, ali i odrediti faze u životnom vijeku armiranobetonske podne ploče koje imaju najnegativniji utjecaj na okoliš. Na osnovi provedene analize, najveći negativni doprinos utjecaju na okoliš ima faza proizvodnje koja obuhvaća nabavu sirovina, njihovu obradu i prijevoz do mjesta proizvodnje samog građevnog proizvoda. Analiza kraja životnog ciklusa proizvoda pokazala je da način gospodarenja građevnim otpadom ima značajan utjecaj na vrijednosti kategorije utjecaja toksičnosti na ljude (HTP), pitku vodu (FAETP i MAETP), tlo (TETP) i eutrofikaciju (EP). Ocjenjivanje životnog ciklusa (LCA) s fokusom na kraj životnog vijeka je ključno jer može pružiti vrijedan uvid o utjecaju faze odlaganja na okoliš te pomoći u razvoju strategija za održivo gospodarenje otpadom.

Ključne riječi:

ocjenjivanje životnog ciklusa, armiranobetonska podna ploča, gospodarenje otpadom, održivost

Preliminary note

Ivana Carević, Helena Naletilić, Nina Štirmer

Life cycle analysis of reinforced concrete floor slab through three different waste management scenarios

This paper presents a life cycle analysis (LCA) of a reinforced concrete floor slab with special emphasis on the end of life (EoL). Three EoL waste management scenarios were presented: Scenario I (current situation of construction and demolition waste management in the Republic of Croatia), Scenario II (100% landfilling of construction and demolition waste), and Scenario III (complete recycling of construction and demolition waste). The aim of this study is to demonstrate the environmental benefits of recycling in terms of sustainable construction and to determine the phases in the life of reinforced concrete floor slabs that have the greatest negative impact on the environment. From the analysis, the largest negative contribution to the environmental impacts is in the production phase, which includes the supply of raw materials, their processing, and the transportation of products to the concrete and reinforcement plants. EoL analysis showed that the manner in which construction and demolition waste is managed has a significant impact on the values of the impact categories of human toxicity (HTP), freshwater and marine aquatic ecotoxicity (FAETP and MAETP), terrestrial ecotoxicity (TETP), and eutrophication (EP). Conducting an LCA focusing on the EoL is critical, as it can provide valuable insights into the environmental impacts of the disposal phase and help develop strategies for sustainable waste management.

Key words:

life cycle assessment, reinforced concrete floor slab, waste management, sustainability

1. Uvod

Na europskoj razini znatno se promiče primjena alata analize životnog ciklusa, LCA (engl. *life cycle analysis*) i koncepta razmišljanja o životnom ciklusu, LCT (engl. *life cycle thinking*) kao pomoćnih alata prilikom procesa donošenja odluka te odgovornog upravljanja proizvodima i procesima. LCA je metoda kojom se utvrđuje kako i na koji način razni procesi i proizvodi utječu na okoliš tijekom životnog vijeka. To je alat za prikaz interakcije čovjeka i prirode: prilikom proizvodnje i izrade nekog proizvoda, dolazi do opterećenja na okoliš koji se definira primjenom LCA [1]. LCA može poslužiti u početnim koracima gradnje, za vrijeme planiranja i projektiranja, kao osnova za odabir materijala, prijevoza, procesa, potrošnje energije, održavanja, gospodarenja otpadom i ostalo, koji imaju manje negativne utjecaje na okoliš. Ključni element za primjenu koncepta LCT je taj da svi relevantni sudionici, proizvođači te potrošači postanu svjesni ekoloških i socijalnih problema tijekom promatranja i analize životnog ciklusa proizvoda/procesa te u skladu s rezultatima poduzmu mjere za rješavanje identificiranih problema [2]. Prema *United Nations Environment Programme* [3], LCT uzima u obzir utjecaje bilo koje aktivnosti u svakoj fazi životnog ciklusa "od kolijevke do groba". Ključni društveni akteri ne mogu striktno ograničiti svoje odgovornosti na one faze životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti u koje su izravno uključeni nego LCT proširuje opseg njihove odgovornosti kako bi uključio utjecaj na okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti. Različiti dionici mogu identificirati i odrediti prioritete najvećih opterećenja i rizika te djelovati sveobuhvatno s razvijenim rješenjima za njihovo smanjenje. Svaki životni ciklus proizvoda raščlanjen je u nekoliko faza (modula):

- projektiranje i planiranje
- vađenje i prerada sirovina
- proizvodnja proizvoda
- pakiranje i distribucija
- korištenje i održavanje
- gospodarenje krajem životnog vijeka (EoL): ponovna uporaba, recikliranje i/ili odlaganje.



Kako bi se potaknuo prijelaz na kružno gospodarstvo i puna implementacija Direktive o gospodarenju otpadom (2008/98/EU) [4], potrebna je dosljedna provedba i implementacija zakonodavstva o otpadu unutar svih članica EU što uključuje i građevni otpad nakon kraja životnog vijeka nekog proizvoda ili građevine. Povećanje recikliranja i smanjenja odlaganja otpada jedan su od prioritetnih ciljeva gospodarenja otpadom. Građevni otpad i otpad od rušenja čini najveći tok otpada u Europi [5]. Prema [6], jedna od prepreka većim stopama uporabe je ilegalno odlaganje, slika 1. Primjena LCT i LCA alata doprinosi integriranom i sustavnom gospodarenju otpadom uzimajući u obzir ekološke, ekonomske, ali i socijalne aspekte [2, 3], te doprinosi korištenju i primjeni naučenih lekcija unutar programa politika i nacionalnih regulativa.

U ovom je radu primjenom LCA alata analizirana armiranobetonska (AB) podna ploča izvedena na gradilištu kako bi se dobile kvantitativne informacije o utjecaju na okoliš tijekom životnog ciklusa. Dodatno je rad usmjeren na usporedbu odabranih mogućnosti postupanja s otpadom u perspektivi životnog ciklusa, uzimajući u obzir i sustave odlagališta na kojima se ne odvija recikliranje (scenarij II), i sustave koji mogu minimizirati količinu odloženog otpada uz maksimalnu uporabu materijala (scenarij I i III). Cilj je da se već tijekom faze projektiranja razmišlja i uzima u obzir cijeli životni ciklus proizvoda i potakne svijest o negativnim ekološkim aspektima odlaganja, osobito ilegalnog (slika 1.).

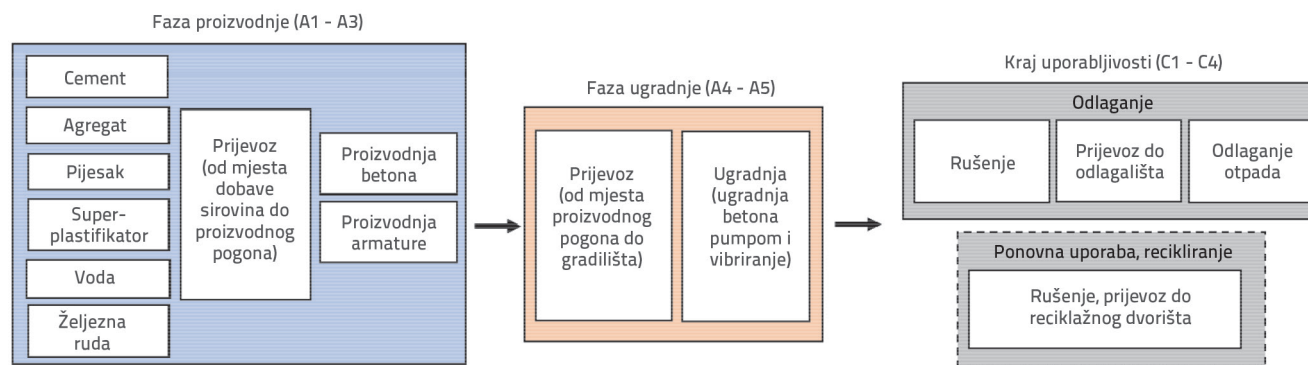
2. Metodologija

Ocjenjivanje životnog ciklusa napravljeno je u skladu s normama HRN EN ISO 14040:2008 [7] i HRN EN ISO 14044:2008/A2:2020 [8] koje daju temeljna načela i okvir za provođenje procjene životnog ciklusa, te su u ovom radu primijenjene četiri faze:

- definiranje cilja i opsega istraživanja
- faza analize inventara životnog ciklusa (engl. *life cycle inventory*, LCI)
- faza ocjenjivanja utjecaja životnog ciklusa (engl. *life cycle impact assessment*, LCIA)
- faza tumačenja životnog ciklusa.



Slika 1. Ilegalno odlaganje građevnog otpada u naseljenom području (fotografija: privatna kolekcija)



Slika 2. Granice sustava

2.1. Cilj i opseg, granice sustava i funkcionalna jedinica

Ciljevi provedbe procjene životnog ciklusa su: (1) kvantifikacija i procjena ekološke učinkovitosti građevnog proizvoda (AB podna ploča) i utjecaja pojedinih faza životnog ciklusa proizvoda na okoliš, te (2) ocjenjivanje utjecaja na okoliš kod različitih scenarija gospodarenja otpadom na kraju životnog vijeka proizvoda u odnosu na cjelokupni životni vijek kako bi se promovirala i povećala uporaba materijala i dijelova koji nastaju rušenjem. U građevinskoj industriji strategija uporabe i recikliranja materijala doprinosi smanjenju otpada, uštedi energije, smanjenju emisija stakleničkih plinova te smanjenju korištenja prirodnih resursa [9]. Ocjenjivanje životnog ciklusa napravljeno je na primjeru izvođenja armiranobetonske podne ploče s dilatacijama koje se dobivaju naknadnim piljenjem, ukupne površine 1000 m². Granice sustava od "kolijevke do groba" LCA modela armiranobetonske podne ploče s dilatacijama prikazane su na slici 2. te uključuju sljedeće module/faze (prema normi HRN EN 15804:2019 [10]: 1) faza proizvodnje koja obuhvaća nabavu sirovina za izradu betona i armature, prijevoz sirovina od dobavljača do proizvodnog pogona; te proizvodnju betona i armature u proizvodnom pogonu; 2) faza ugradnje koja obuhvaća prijevoz betona i armature od proizvodnog pogona do gradilišta i ugradnja betona i armature (korištenje pumpe i vibriranje); 3) kraj životnog vijeka koji obuhvaća rušenje armiranobetonske podne ploče, prijevoz građevnog otpada do odlagališta i reciklažnog pogona te odlaganje otpada i/ili uporabu.

Funkcionalna jedinica može biti različita ovisno o vrsti građevnog proizvoda. Autori [8] koriste dvije funkcionalne jedinice: nosivost

podne ploče i zadržavanje jednake debljine ploče. U nekim se radovima kao funkcionalna jedinica upotrebljava masa podne ploče [12-14], a u nekim četvorni metar (m²) podne ploče [15, 16], koja je primijenjena i u ovom slučaju. Kao funkcionalna jedinica određeno je 1000 m² na osnovi čega je procijenjena količina potrebnih materijala za izradu armiranobetonske podne ploče veličine 1000 m², tablica 1.

Tablica 1. Procijenjene količine materijala za izvedbu 1000 m² AB podne ploče

Stavka	Mjerna jedinica	Potrebna količina
Beton	m ³	186
Armatura	t	14,9

2.2. Analiza inventara životnog ciklusa

Analiza inventara životnog ciklusa (LCI) obuhvaća postupke prikupljanja i izračuna podataka za kvantificiranje odgovarajućih ulaznih i izlaznih veličina proizvodnog sustava, u ovom slučaju izvedbu AB ploče s dilatacijama, te kraj životnog ciklusa. Potrebni građevni proizvodi za izradu armiranobetonske podne ploče su beton i armatura. Mješavina betona preuzeta je od skupine autora iz rada [11], a potrebne količine sirovina za izradu kubnog metra (1 m³) takvog betona dane su u tablici 2. Prilikom modeliranja uzeto je u obzir vađenje sirovina (materijal i energija za dobivanje cementa, agregata, pijeska i superplastifikatora), prijevoz sirovina do proizvodnog pogona/tvornice, te proizvodnja armature i betona.

Tablica 2. Količine materijala za proizvodnju 1 m³ betona [11]

Materijal	Mjerna jedinica	Količina	Pretpostavke
Cement (CEM I 42,5R)	kg	365,00	Proizvodnja cementa, agregata, pijeska i vode te superplastifikatora preuzeti su iz Ecoinvent baze podataka
Agregat (4-16 mm)	kg	1015,00	
Pijesak	kg	965,00	
Voda	L	221,00	
Superplastifikator	L	0,75	

Tablica 3. Različiti scenariji kraja životnog ciklusa podne AB ploče

Scenarij	Ključni broj 17 04 05	Ključni broj 17 01 01	Ostatak	Reference
SCENARIJ I	100 %	60 %	40 % odlaganje za ključni broj 17 01 01 kod ovlaštene tvrtke za gospodarenje otpadom	Preuzeto iz [19]
SCENARIJ II	100 %	0 %	100 % odlaganje za ključni broj 17 01 01 kod ovlaštene tvrtke za gospodarenje otpadom	Pretpostavka
SCENARIJ III	100 %	100 %	-	Pretpostavka

Tablica 4. Podaci inventara za izvedbu 1000 m² AB podne ploče

Faza	Inventar			Količina	Pretpostavke	
Faza proizvodnje	Nabava sirovine	Beton	Količina	m ³	186	Beton je modeliran u skladu tablicom 2
		Armatura	Količina	t	14,9	/
	Prijevoz sirovina do proizvodnog pogona	Beton	Cement – prijevoz kamionom	km	233	Cement se prevozi od tvornice cementa do betonare u Zagrebu (prosječna udaljenost)
			Agregat i pijesak – prijevoz kamionom	km	40	Agregat i pijesak se prevoze iz kamenoloma do betonare u Zagrebu (prosječna udaljenost)
			Superplastifikator – prijevoz kamionom	km	5	Prosječna udaljenost od prodajnog centra do betonare
	Proizvodnja građevnih proizvoda u proizvodnom pogonu	Armatura	Željezna ruda – prijevoz vlakom	km	2258	Prijevoz željezne rude iz Azije do mjesta proizvodnje armature u Italiji
		Beton	Miješanje betona	MJ	Ecoinvent baza podataka	
Armatura	Proizvodnja armature iz željezne rude	MJ				
Faza izgradnje	Prijevoz građevnih proizvoda od proizvodnog pogona na gradilište	Beton	Prijevoz autopumpom	km	30	Beton se prevozi iz betonare u Zagrebu do gradilišta (prosječna udaljenost)
		Armatura	Prijevoz vlakom	km	451	Armatura se prevozi iz Italije direktno na gradilište
	Ugradnja	Beton	Ugradnja pumpom	MJ	4199	Preuzeto iz [17]
			Vibriranje betona	kWh	127	Preuzeto iz [17]
Kraj životnog ciklusa	Rušenje	AB ploča	Energija potrebna za rušenje AB ploče	MJ	Ecoinvent baza podataka	
	Prijevoz do mjesta odlaganja i/ili uporabe	Građevni otpad	Prijevoz kamionom	km	50	Građevni otpad prevozi se od gradilišta do mjesta gdje se otpad odlaže i/ili reciklira

Za potrebe ovoga rada pretpostavljene su lokacije na kojima se pribavljaju sirovine i odvija proizvodnja. Pretpostavka je da se cement proizvodi u Hrvatskoj te prevozi cestovnim putem (kamionom) iz tvornice cementa do betonare u Zagrebu. Također je pretpostavljeno da je agregat i pijesak proizveden u Hrvatskoj te je iz kamenoloma dopremljen do betonare u Zagrebu (cestovnim prijevozom – kamionom). Podatci za dobivanje cementa, agregata, pijeska, vode i superplastifikatora

preuzeti su iz EcoInvent baze podataka. Pretpostavljeno je da se superplastifikator prevozi od prodajnog mjesta do betonare prosječne udaljenosti 5 km (cestovnim prijevozom – kamionom). Za vodu nije obračunan prijevoz budući da se u betonari koristi voda iz vodovoda. Jedna od pretpostavki u radu je i udaljenost od mjesta proizvodnje armature. Željezna ruda za dobivanje armature prevozila se iz Azije do mjesta proizvodnje u Italiji. Prijevoz željezne rude odvija se vlakom.

Sve udaljenosti od mjesta dobivanja sirovine do proizvodnog pogona izražene su u kilometrima i navedene u tablici 2. Kada su sve sirovine dostavljene u proizvodni pogon, započinje se s njihovom obradom. Proizvodnja građevnih proizvoda u proizvodnom pogonu obuhvaća miješanje betona i proizvodnju armature iz željezne rude. U ovoj fazi uzete su u obzir utrošene energije za navedene procese. Vrijednosti tih energija koje obuhvaćaju npr. utrošak struje, rada strojeva i korištenje goriva preuzete su iz Ecoinvent baze podataka, budući da su ti podaci već prethodno određeni i sadržani u toj bazi. Nakon što su proizvedeni beton i armatura, prevoze se na gradilište na kojem se izvodi armiranobetonska podna ploča. Pretpostavljeno je da se gradilište nalazi u blizini Zagreba. Beton se iz betonare dovozi kamionskom pumpom, a prosječna udaljenost je 30 km. Armatura se iz Italije na gradilište prevozi vlakom. Energija koja je potrebna za ugradnju betona (korištenje pumpe i vibriranje) preuzeta je iz rada [17], a ljudski rad nije uzet u obzir zbog nedostupnosti podataka. Kako bi se dodatno potaknulo i povećalo recikliranje građevnog otpada te kako bi se odredio ekološki utjecaj gospodarenja građevnim otpadom nakon kraja životnog vijeka građevnog proizvoda, razmatrana su tri različita scenarija prikazana u tablici 3. Prilikom uklanjanja AB ploče nastaju dvije vrste građevnog otpada prema Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15) [18]: ključni broj 17 01 01 *beton, cigle, crijep/pločice i keramika*, odnosno 17 01 01 *beton* i ključni broj 17

04 *metali (uključujući njihove legure)*, odnosno 17 04 05 *željezo i čelik*. Ukupna količina građevnog otpada nastalog u 2020. godini procijenjena je na 1.399.192,7 t [19]. Prema metodi izračuna određenoj Odlukom komisije 2011/753/EU [20], stopa uporabe građevnog otpada za 2020. godinu iznosi 60 %, što je manje od ciljane stope uporabe prema Okvirnoj direktivi o otpadu (2008/98/EU) [4]. U scenariju I pretpostavljeno je recikliranje cjelokupno nastalog građevnog otpada (100 %) za ključni broj otpada 17 04 05, te 60 % za ključni broj 17 01 01, a ostatak se odlaže na odlagalište. U drugom scenariju (scenarij II) pretpostavka je najgora scenarija (100 % odlaganje za ključni broj otpada 17 01 01) kako bi se prikazao utjecaj na okoliš, u slučaju da se cjelokupna količina betona odlaže. Scenarij III predstavlja ciljane vrijednosti 100 % recikliranja betona i čelične armature. Za model kraja životnog ciklusa primjenjuje se pristup isključenja (engl. *cut off approach*) [21]. To znači da su u sustav uključeni utjecaji na okoliš svih faza od proizvodnje sirovina do postupaka s otpadom, dok su utjecaji recikliranja na okoliš isključeni iz sustava jer se smatraju utjecajima za sljedeći proizvodni sustav. Faza korištenja i održavanja AB ploče nije uzeta u obzir ovom analizom. Dodatno je za scenarij I napravljena analiza utjecaja prijevoza od gradilišta do pogona za razvrstavanje otpada: uspoređene su dvije udaljenosti (50 i 150 km), jer se pogoni za recikliranje često ne nalaze blizu lokacije rušenja.

Tablica 5. Pregled razmatranih kategorija utjecaja u okviru procjene životnog ciklusa prema metodi utjecaja CML 2002 [22, 23]

Kategorija utjecaja	Pokazatelj kategorije	Uzrok	Mjerna jedinica
Abiotičko iscrpljivanje	Potencijal abiotičkog iscrpljivanja (engl. <i>Abiotic depletion potential</i>), ADP	Korištenje prirodnih resursa (voda, metali itd.)	kg Sb eq
Abiotičko iscrpljivanje (fosilna goriva)	Potencijal abiotičkog iscrpljivanja fosilnih goriva (engl. <i>Abiotic depletion potential (fossil fuels)</i>), ADP-FF	Korištenje prirodnih resursa (fosilnih goriva)	MJ
Klimatske promjene	Potencijal globalnog zatopljenja (engl. <i>Global warming potential</i>) za v razdoblje od 100 godina, GWP100a	Efekt stakleničkih plinova uzrokovan antropogenim djelovanjem	kgCO ₂ eq
Oštećenje ozona	Oštećenje ozona (engl. <i>Ozone layer depletion</i>), ODP	Oštećenje ozonskog omotača uzrokovano različitim plinovima	kgCFC11 eq
Toksičnost za ljude	Toksični učinci na čovjeka (engl. <i>Human toxicity potential</i>), HTP	Utjecaj emisija štetnih tvari i kemikalija na ljude uzrokujući negativan utjecaj na zdravlje (kancerogenost itd.)	kg 1,4-DP eq
Ekotoksičnost za slatku vodu	Ekotoksični učinci na slatku vodu (engl. <i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>), FAETP	Utjecaj emisija štetnih tvari i kemikalija na kopnene, slatkovodne, morske i zračne ekosustave uzrokujući povećanu smrtnost, mutacije, smanjenu reprodukciju, promjene u ponašanju itd.	kg 1,4-DP eq
Ekotoksičnost za morsku vodu	Ekotoksični učinci na morsku vodu (engl. <i>Marine aquatic ecotoxicity</i>), MAETP		kg 1,4-DP eq
Ekotoksičnost za tlo	Ekotoksični učinci na tlo (engl. <i>Terrestrial ecotoxicity</i>), TETP		kg 1,4-DP eq
Fotokemijsko stvaranje ozona	Potencijal stvaranja troposferskog ozona, (engl. <i>Formation potential of tropospheric ozone</i>), POCP	Fotokemijsko stvaranje ozona i drugih reaktivnih spojeva kisika u troposferi iz emisija VOC i NO _x pod utjecajem svjetlosti	kg C ₂ H ₂ eq
Zakiseljavanje	Potencijal zakiseljavanja (engl. <i>Acidification potential</i>), P	Zakiseljavanje tla i vodenih sustava prekomjernim korištenjem antropogenih spojeva kao npr. SO _x , NO _x , HCl, H ₂ SO ₄	kg SO ₂ eq
Eutrofikacija	Eutrofikacijski potencijal (engl. <i>Eutrofication</i>), EP	Taloženje dušika i/ili fosfora u slatkim vodenim ekosustavima	kgPO ₄ ³⁻ eq

2.3. Ocjenjivanje utjecaja životnog ciklusa

Ocjenjivanje utjecaja životnog ciklusa (LCIA) je faza u kojoj se informacije iz elementarnih tokova inventara životnog ciklusa preračunavaju u specifične kategorije utjecaja na okoliš i pokazatelje kategorija. Za razliku od ostale tri LCA faze, LCIA je u praksi u velikoj mjeri automatizirana LCA softverom, a korisnici računalnog programa trebaju dobro poznavati principe tog programa kako bi osigurali kvalitetno tumačenje rezultata. Software korišten u ovom radu je SimaPro version 9.3. Cilj je LCIA faza ocijeniti veličinu doprinosa na okoliš svakog elementarnog toka iz LCI inventara primjenom kategorija utjecaja [7]. Prvi korak u sklopu LCIA faze jest odabir kategorija utjecaja na okoliš, koje će biti promatrane kao dio ukupne LCA. Za LCIA, utjecaji su definirani kao negativne posljedice uzrokovane ulaznim i izlaznim tokovima sustava na ljudsko zdravlje, biljke, životinje, ali i na dostupnost prirodnih resursa u budućnosti. Kategorije utjecaja koje su opisane u ovom radu prikazane su u tablici 5. Kategorija utjecaja je klasifikacija koja identifikira probleme okoliša koji su od velike važnosti i kojima se mogu pripisati rezultati analize inventara životnog ciklusa. Za svaku kategoriju utjecaja navedenu u tablici 5. navedeni su ekološki i antropogeni uzroci.

Drugi obvezni korak u LCIA je klasifikacija, tj. dodjeljivanje rezultata LCI kategorijama utjecaja prema njihovim poznatim potencijalnim utjecajima. Elementarni tok iz LCI može pridonijeti nekoliko kategorija utjecaja: na primjer, emisija CO₂ u zrak pripisuje se klimatskim promjenama ili se potrošnja vode pripisuje kategoriji utjecaja na korištenje vode [22]. Karakterizacija uključuje izračun rezultata pokazatelja kategorije koji kvantificiraju doprinose tokova različitim kategorijama utjecaja. U ovom koraku primjenjuju se koverzijski faktori, odnosno faktori karakterizacije koji su izrađeni na osnovi znanstvenih analiza. Ti faktori služe kako bi se veličine dobivene u LCI fazi analizi pretvorile u reprezentativne pokazatelje utjecaja ili predstavljaju doprinos elementarnog protoka određenom utjecaju na okoliš (kategoriji). Postoje dvije različite vrste pokazatelja utjecaja prema [22]: središnji pokazatelji utjecaja (*engl. midpoint*) i krajnji pokazatelji utjecaja (*engl. endpoint*). Općenito središnji i krajnji pokazatelji predstavljaju dva različita pristupa odabira pokazatelja utjecaja: pristup usmjeren na problem i pristup usmjeren na štetu duž uzročno-posljedičnog lanca. U pristupu usmjerenom na problem, kvantitativno se modeliranje događa u relativno ranoj fazi i ne fokusira se toliko na štetu okolišu kao kod krajnjih pokazatelja utjecaja. Krajnji pokazatelji pokazuju stvarnu štetu okolišu s velikom nesigurnosti i to kroz tri razine, a to su: učinak na ljudsko zdravlje, bioraznolikost i nedostatak resursa. U ovom radu korišteni su središnji pokazatelji utjecaja primjenom metode CML 2002. Izlazni podaci, odnosno rezultati analize u okviru SimaPro računalnoga programa, proračunani su prema metodi ekoloških pokazatelja i prikazani u obliku dijagrama ili tablica za svaki od četiri koraka LCA.

3. Tumačenje rezultata

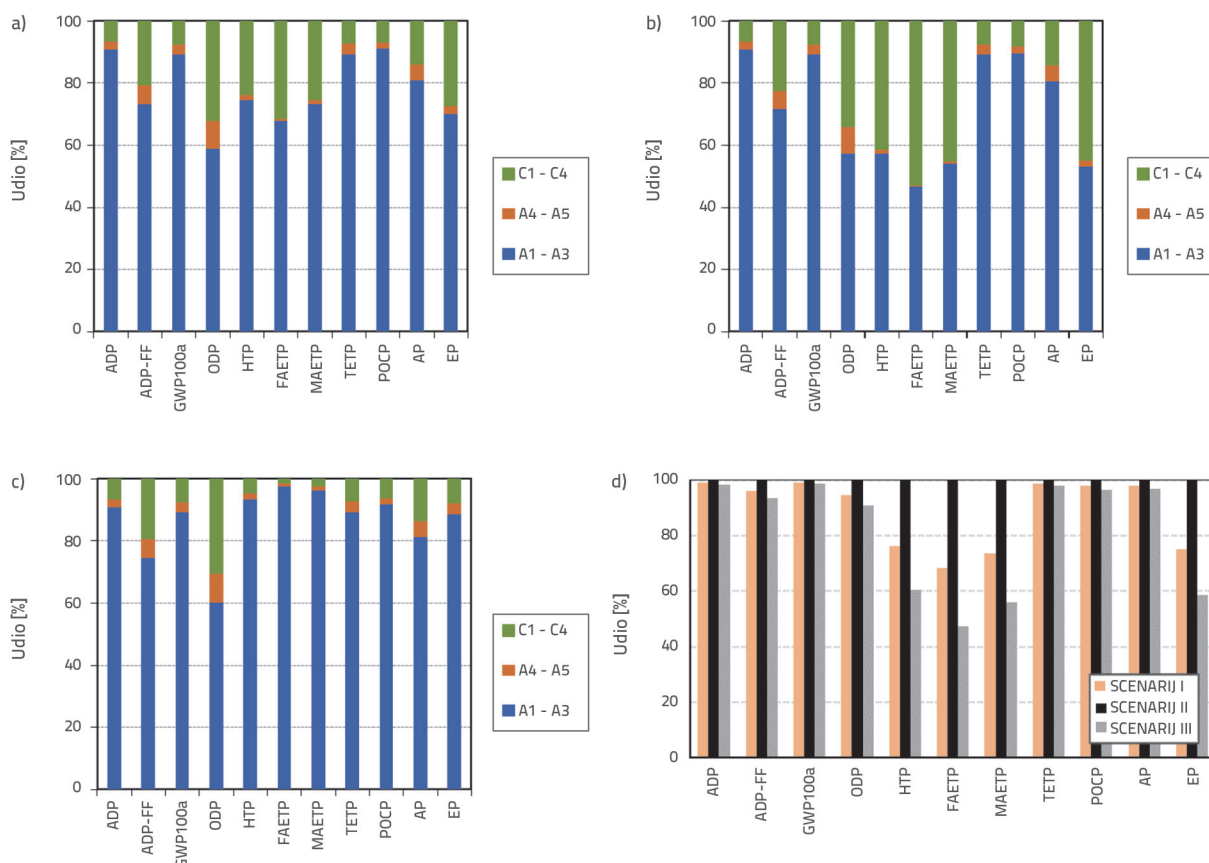
Tablica 6. prikazuje pojedinačne rezultate LCA prema kategorijama utjecaja armiranobetonske podne ploče za tri scenarija, a slike 3.a, 3.b i 3.c prikazuju doprinose pojedinih faza životnog ciklusa u ukupnom životnom ciklusu po pojedinim kategorijama utjecaja. Usporedba utjecaja na okoliš prema različitim načinima gospodarenja otpadom (scenarij I, II i III) prikazana je na slici 3.d. Prema tablici 6., u sva tri slučaja po svim kategorijama utjecaja najveći negativni doprinos utjecaju na okoliš ima faza A1-A3 (osim za kategoriju utjecaja FAETP, scenarij II). Razlog tome je zasigurno proizvodnja cementa, pribavljanje agregata i pijeska iz prirode te korištenje željezne rude kao sirovine za proizvodnju armature. Osim toga, autori [11] preporučuju betonsku mješavinu za proizvodnju 1 m³ betona s relativno velikim vodocementnim omjerom (0,605). Smanjenje ovog omjera moglo bi potencijalno smanjiti utjecaj faza A1-A3 na okoliš. U gotovo svim kategorijama utjecaja za scenarij I, vidljivo je da faza A1-A3 doprinosi najviše, od 58,74 % (kategorija utjecaja: oštećenje ozona, ODP) do 90,83 % (kategorija utjecaja: fotokemijsko stvaranje ozona, POCP). U scenariju III doprinos faza A1-A3 još je značajniji poglavito za kategorije vezano za toksičnost (HTP: 93,15 %, FAETP: 97,4 %, MAETP: 96,07 % i TETP: 89,36 %) i kategoriju ADP (90,41 %) koja označava korištenje prirodnih resursa i vode. Životni ciklus proizvoda koji obuhvaća module A1-A3 tiče se nabave sirovina, njihove prerade, prijevoza i proizvodnje. Očekivano je da će doprinos tih modula na utjecaj na okoliš biti izrazito velik zbog pribavljanja resursa i njihove obrade koji primarno imaju velik utjecaj na okoliš [24, 25] što je pokazano i na ovom slučaju.

Faze A4-A5 obuhvaćaju prijevoz građevnih proizvoda do mjesta ugradnje, te samu ugradnju AB ploče. Njima je obrađen utjecaj na okoliš prijevoznih sredstava i korištenje energije potrebne za rad strojeva prilikom ugradnje. U scenariju I, najveći utjecaj faza A4-A5 na okoliš je u kategorijama ODP (kategorija utjecaja: oštećenje ozona, 9,08 %), ADP-FF (kategorija utjecaja: abiotičko iscrpljivanje (fosilna goriva), 5,82 %) i AP (kategorija utjecaja: zakiseljavanje, 5,13 %). Nema značajnijih varijacija za kategorije utjecaja za faze A4-A5 u scenarijima II i III u odnosu na scenarij I.

Prema rezultatima danim u tablici 6., može se vidjeti da u svim promatranim kategorijama utjecaja očekivano scenarij II ima povećane vrijednosti, odnosno znatan utjecaj na okoliš. Povećanje recikliranja građevnog otpada značajno doprinosi smanjenju toksičnosti na tlo, vodu i ljude. Vrijednosti HTP, FAETP, TETP i MAETP povećavaju se kada se građevni otpad odlaže na odlagališta (scenarij III). Navedeno je vidljivo i kod vrijednosti eutrofikacije. To je potrebno naglasiti u slučaju nekontroliranog odlaganja na ilegalna odlagališta (slika 1.) čime se jasno vidi negativan utjecaj na okoliš i zdravlje. Kod scenarija II, vrijednosti toksičnosti za ljude, pitku vodu i tlo povećavaju se redom za 130 %, 145 % i 140 %, dok se vrijednosti eutrofikacije povećavaju za 122 % u odnosu na scenarij I. U slučaju scenarija II vidljiva su značajna smanjenja u kategoriji utjecaja toksičnosti za ljude, HTP (smanjenje od 87 %), pitke vode, FAETP (97 %), i eutrofikacije, EP (81 %), vidljiva su kada se korprimjenisti scenarij II za otpad od rušenja (100 % recikliranje), slika 3.c.

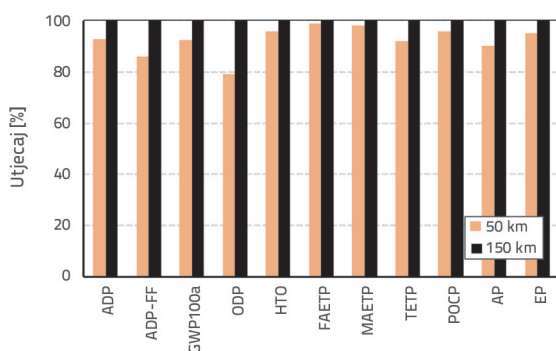
Tablica 6 Ocjenjivanje utjecaja na okoliš

Kategorija utjecaja	Mjerna jedinica	Beton	Armatura	A1-A3	A4-A5	SCENARIJ KRAJA ŽIVOTNOG CIKLUSA		
						SCENARIJ I	SCENARIJ II	SCENARIJ III
ADP	kg Sb eq	0,14475651	0,17645108	0,32120759	0,009881355	0,021012126	0,023985391	0,01903
ADP-FF	MJ	218850,7	331169,31	550020,01	43721,45835	144665,9155	174275,8415	124926
GWP100a	kgCO ₂ eq	55071,269	31887,224	86958,493	3016,16349	6701,471537	7453,763237	6199,944
ODP	kgCFC11 eq	0,001653489	0,001720816	0,003374305	0,000522114	0,001702541	0,002017075	0,001493
HTP	kg 1,4-DP eq	10437,592	42580,879	53018,471	1142,433611	16812,46506	38814,26606	2144,598
FAETP	kg 1,4-DP eq	7841,0345	67409,368	75250,4025	628,654546	35037,54386	86006,33886	1058,347
MAETP	kg 1,4-DP eq	14377256	83780623	98157879	1248593,669	34083548,23	82007166,23	2134470
TETP	kg 1,4-DP eq	44,33091	59,139936	103,470846	3,6000872	7,625547857	8,837892557	6,817318
POCP	kg C ₂ H ₂ eq	5,8508979	15,255837	21,1067349	0,460033969	1,539221468	2,007485668	1,227045
AP	kg SO ₂ eq	111,12009	114,10954	225,22963	14,33112091	35,51929962	40,61704162	32,12081
EP	kgPO ₄ ³⁻ eq	37,838173	59,488952	97,327125	3,66391501	37,34047848	82,74636248	7,069889



Slika 3. Doprinos pojedinih modula ukupnom utjecaju na okoliš prema kategorijama utjecaja za: a) scenarij I; b) scenarij II; c) scenarij III; d) usporedba utjecaja na okoliš prema različitim načinima gospodarenja otpadom

Analiza utjecaja udaljenosti pogona ili mjesta za recikliranje od gradilišta prikazana je na slici 4., i to za scenarij I kada je pogon udaljen 50 km, odnosno 150 km. Vidljivo je značajno smanjenje svih pokazatelja kategorija kada je pogon za recikliranje bliži gradilištu, pokazujući da građevni otpad treba reciklirati u blizini mjesta rušenja. Navedeno je u skladu sa zaključcima danim u [24] gdje se ne preporučuju velike udaljenosti od mjesta rušenja do postrojenja za recikliranje. Prijevoz se smatra važnim prilikom gospodarenja građevnim otpadom zbog velikih količina. Autori predlažu korištenje malih mobilnih postrojenja te strateško planiranje izgradnje sortirnice na državnoj razini kako bi se smanjilo ilegalno odlaganje [25]. Dodatno je analizom različitih scenarija upravljanja građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa pokazano da je otpad najbolje obrađivati na samom mjestu nastanka [26], ako je moguće.



Slika 4. Utjecaj prijevoza na ukupni životni ciklus za scenarij I po pojedinim kategorijama utjecaja

Jedan od ključnih elemenata za primjenu LCA metodologije u budućnosti je visokokvalitetna baza inventarnih podataka koji se odnose na proizvodnju materijala, prijevoz i ugradnju, te posebno na bazu podataka gospodarenja građevnim otpadom prilagođenu relevantnom geografskom području, jer kvaliteta rezultata utjecaja na okoliš uvelike ovisi o kvaliteti inventarnih podataka. Ocjenjivanje životnog ciklusa može dati šira znanja o pojedinim metodama gospodarenja otpadom, a sve s ciljem sprečavanja ili smanjenja nastanka otpada, poboljšanja učinkovitosti uporabe i povećanja recikliranja i

korištenja recikliranih materijala. LCA pruža mogućnost analize ekoloških aspekata različitih strategija gospodarenja otpadom i omogućuje usporedbu potencijalnih utjecaja tih opcija na okoliš.

4. Zaključak

U ovom radu napravljena je LCA armiranobetonske podne ploče uz usporedbu tri scenarija gospodarenja otpadom od rušenja betonske podne ploče na kraju njezina životnog ciklusa. Scenarij I zasniva se na sadašnjim postotcima recikliranja građevnog otpada u Hrvatskoj, Scenarij II zasniva se na 100 % odlaganja, dok scenarij III predstavlja idealnu situaciju u kojoj se reciklira 100 % građevnog otpada. Vidljivo je kako postotak recikliranja ima velik utjecaj na okoliš. Prema svim kategorijama utjecaja, najniže vrijednosti dobivaju se prema scenariju III. Za sva tri scenarija faze A1, A2 i A3 definirane su kao žarišne točke za kategorije utjecaja AD, ADP-FF, GWP100a, TETP, POCP i AP (iznad 70 %) u životnom ciklusu armiranobetonske podne ploče, što znači da pribavljanje sirovina, njihov prijevoz te proizvodnja betona i armature imaju najznačajniji učinak na okoliš. Razlog tome je zasigurno količina sirovina koja se dobavlja iz prirode, proizvodnja cementa, betona i armature te štetni plinovi koji nastaju prilikom njihove prerade, ali i velike udaljenosti prijevoza sirovina do krajnjeg proizvodnog mjesta. Jedan od potencijalnih prijedloga za smanjenje ugljičnog otiska tijekom faze proizvodnje uključuje primarno korištenje lokalnih sirovina i/ili sekundarnih materijala. Time se smanjuje udaljenost potrebna za transport sirovina za proizvodnju [27]. U fazi projektiranja potrebno je voditi računa o posljednjoj fazi životnog ciklusa građevine [28], gdje odluka o recikliranju doprinosi zdravijem okolišu i održivom korištenju prirodnih resursa kao jednom od temeljnih zahtjeva za građevinu [29].

Zahvala

Ovaj rad je podržan projektnim prijedlogom "CE-LCA: Procjena životnog ciklusa (LCA) otpada kao sekundarne sirovine za kružne i otporne građevinske inovacije" u okviru poziva Razvojne istraživačke potpore koju financira Europska unija – NextGenerationEU.

LITERATURA

- [1] Heiskanen, E.: The institutional logic of life cycle thinking, *Journal of Cleaner Production*, 10 (2002) 5, pp. 427–37, doi: 10.1016/S0959-6526(02)00014-8
- [2] Lazarevic, D.A.: *Life Cycle Thinking and Waste Policy: Between Science and Society*, Thesis, 2012.
- [3] UNEP/SETAC Life cycle Initiative: *Life Cycle approaches: The road from analysis to practice*, United Nations Environment Programme, pp. 1-89, 2005.
- [4] European Commission: 2011/753/EU: Commission Decision of 18 November 2011 establishing rules and calculation methods for verifying compliance with the targets set in Article 11(2) of Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document C), *Official Journal of the European Union*, pp. 1-11, 2011.
- [5] European Commission Directorate - General: *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*, *Official Journal of the European Union*, pp. 1–22, 2016.

- [6] Chen, J., Hua, C., Liu, C.: Considerations for better construction and demolition waste management: Identifying the decision behaviours of contractors and government departments through a game theory decision-making model, *Journal of Cleaner Production*, 212 (2019), pp.190–199, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.262>
- [7] HRN EN ISO 14040:2008 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006; EN ISO 14040:2006), Croatian Standard Institution, p. 1–32, 2008.
- [8] HRN EN ISO 14044:2008/A2:2020 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006/A2:2020; EN ISO 14044:2006/A2:2020), Croatian Standard Institution, pp. 1–11, 2020.
- [9] High Level Group on Energy Intensive Industries: Masterplan for a competitive transformation of EU energy intensive industries enabling a climate-neutral, circular economy by 2050, pp. 1–55, 2019, doi:10.2873/854920
- [10] HRN EN 15804:2019 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products (EN 15804:2012+A2:2019), Croatian Standard Institution, pp. 1–73, 2019.
- [11] Wang, J.J., Tingley, D.D., Mayfield, M., Wang, Y.F.: Life cycle impact comparison of different concrete floor slabs considering uncertainty and sensitivity analysis, *Journal of Cleaner Production*, 189 (2018), pp.374–85, doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.094
- [12] Dala cement, Björbo, AB: Environmental product declaration Precast floor slabs, EPD registration number: S-P-03023, <https://buildingtransparency.org/ec3/epds/ec3q94yg>, 01.12.2022.
- [13] Dzelzsbetons MB (DzMB): Environmental Product Declaration Precast concrete filigree slabs, EPD registration number: RTS_93_21, <https://www.mbbetons.lv/uploads/certs/rts-epd-93-21-concrete-filigree-slabs-upb.pdf>, 10.01.2023.
- [14] K-Prefab AB: Environmental Product Declaration Solid precast concrete, EPD registration number: S-P-01455 Precast Concrete pre-stressed Slab, <https://www.kprefab.se/wp-content/uploads/2021/09/K-Prefab-EPD-Forspand-bjalklagsplatta-sept-2021.pdf>, 10.01.2023.
- [15] Ahmed, I.M., Tsavdaridis, K.D.: Life cycle assessment (LCA) and cost (LCC) studies of lightweight composite flooring systems, *Journal of Building Engineering*, 20 (2018) 10, pp.624–33, doi:10.1016/j.jobe.2018.09.013.
- [16] Deutschen Naturwerkstein-Verband e.V. (DNV): Sustainability Study: Life Cycle Assessment of Floor Coverings, https://www.natursteinverband.de/fileadmin/user_upload/Nachhaltigkeitsstudie/Bodenbel%C3%A4ge/Studie-Nachhaltigkeit-Boden_engl-zus_final_B.pdf, 10.01.2023.
- [17] Van Gorkum, C.O.M: CO2 emissions and energy consumption during the construction of concrete structures, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A10b5fa56-432f-4188-a927-26f29d509681>, 10.01.2023.
- [18] Ministry of Environment and Nature Protection: Waste catalogue order (OG 90/2015), Official Gazette, 2015.
- [19] Kufirin, J.: Report on construction waste management in 2020., Ministry of Economy and Sustainable Development, pp. 1–54, 2021.
- [20] The European Parliament and the Council of European Union: Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, Official Journal of the European Union, pp.1–28, 2008.
- [21] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I.: Concrete Recycling in Life Cycle Assessment, Sustainability of Constructions Integrated Approach to Life-time Structural Engineering, COST Action C25, Proceedings of the Workshop, eds. L. Bragança, H. Koukari, R. Blok, H. Gervásio, M. Veljkovic, Z. Plewako et al., pp. 225–239, 2009.
- [22] Hauschild, M.Z., Olsen, S.I., Rosenbaum, R.K.: Life Cycle Assessment theory and practice, Springer, 2018.
- [23] Van Den Heede, P., De Belie, N.: Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations, *Cement and Concrete Composites*, 34 (2012) 4, pp.431–42. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004
- [24] Marinković, S.B., Ignjatović, I., Radonjanin, V.: Life-cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, (2013), pp. 569–604, doi:10.1533/9780857096906.4.569
- [25] Blengini, G.A: Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy, *Building and Environment*, 44 (2009) 2, pp.319–30, doi:10.1016/j.buildenv.2008.03.007.
- [26] Amato, A., Gabrielli, F., Spinozzi, F., Magi Galluzzi, L., Balducci, S., Beolchini, F.: Strategies of disaster waste management after an earthquake: A sustainability assessment, *Resources, Conservation and Recycling*, 146 (2019) 2, pp.590–597, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.033
- [27] Krejza, Z., Kocourkova, G., Vankova, L., Sebestova, M.: Variants of determining the construction production carbon footprint, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 3, pp. 273–281, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3396.2021>
- [28] Baričević, A., Kovač, D., Didulica, K.: Construction of a new day hospital in Zadar using recycled aggregate concrete, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 833–844, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3233.2021>
- [29] Croatian Parliament: Construction law (OG 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), Official Gazette, 2019.