

Smanjenje emisije zagađujućih materija i potrošnje energije u zgradarstvu korišćenjem procene životnog ciklusa

Sandra Kovačević, Mirko Komatina, Miloš Banjac

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Rezime – Za procenu ekološkog uticaja na životnu sredinu i potrošnje energije sektora zgradarstva koristi se metoda procene životnog ciklusa (LCA). Navedena metodologija predstavlja kompleksan proces koji obuhvata sve faze od procesa proizvodnje i transporta sirovina za proizvodnju građevinskih materijala, fazu izgradnje objekata, njihovog korišćenja, do odlaganja i reciklaže materijala nakon isteka životnog veka. S obzirom da je određivanje ekoloških uticaja kompleksan proces, koriste se softverski alati za sprovođenje analize životnog ciklusa, analize ugljeničnog otiska ili određivanje drugih ekoloških pokazatelja, kao što su: GaBi, SaaS, Open LCA i SimaPro. U cilju poređenja različitih građevinskih materijala, u radu je opisan postupak sprovođenja LCA analize za različite građevinske elemente: laka konstrukcija slama-glina, kob, zemljani zid, izolovani zemljani zid, izolovani drveni zid, betonski zid i izolovani betonski zid. Prikazana je i analiza inventara životnog ciklusa (LCI) u svim fazama proizvodnje u cementnoj industriji, ukoliko bi se koristio cement proizveden u Srbiji za dobijanje betonskog zida. Analizom dobijenih rezultata je utvrđeno da je potrošnja energije u toku procesa proizvodnje i transporta značajno veća nego u samom procesu eksploatacije sirovina. Najveći uticaj na emisiju zagađujućih materija kod betonskih zidova ima proces proizvodnje cementa, zbog štetnih i opasnih materija koje se ispuštaju u procesu proizvodnje, kao i od fugitivnih emisija koje se generišu tokom prenosa i obrade sirovina. Procenom uticaja na životni ciklus (LCIA) u fazi izgradnje za svih sedam građevinskih elemenata utvrđeno je da se korišćenjem građevinskih elemenata od prirodnih materijala smanjuje potrošnja energije za 30 – 83 %. Emisije zagađujućih materija smanjuju se za 27 – 99 %, dok se zakiseljavanje vazduha smanjuje za 57 – 98 %. Istraživanje je pokazalo da je opravdan prelazak ka zemljanoj i bio-baziranoj gradnji kao strategiji za smanjenje ekoloških uticaja zgrada na okolinu. Osim što smanjuju emisiju CO₂eq. i potrošnju energije, korišćenje ovih materijala smanjuje ukupnu emisiju zagađujućih materija tokom celokupnog životnog veka.

Ključne reči - procena životnog ciklusa (LCA), inventar životnog ciklusa (LCI), ekološki uticaji, građevinski materijali

I UVOD

Građevinski sektor ima značajan uticaj na emisiju zagađujućih materija. Potrošnja energije u zgradama (za grejanje i hlađenje prostora, sanitarnu toplu vodu, osvetljenje, kuvanje i druge namene) čini oko 30 % finalne potrebne energije, što predstavlja porast u odnosu na prethodni period [1].

Emisije CO₂ u vezi su sa izgradnjom i kasnijim korišćenjem zgrada porasle su za oko 5 % u 2021. godini u poređenju sa 2020. godinom. Porast je usledio nakon smanjenja emisija CO₂ u sektoru zgradarstva od oko 10 % u 2020. godini u odnosu na vrednosti iz 2019. godine, usled COVID-19 pandemije [1].

U poslednjih nekoliko godina, mere za smanjenje ekološkog uticaja zgrada bile su usmerene pre svega na operativne uticaje. Pomenute mere odnose se samo na upotrebnu fazu zgrada i stoga ne uzimaju u obzir uticaje tokom bilo koje druge faze životnog ciklusa (prikupljanje sirovina, proizvodnju materijala, transport, odlaganje i reciklažu na kraju životnog veka, kao i održavanje i zamene). Mere za uštedu energije pokazale su da dolazi do povećanja ugrađenih uticaja, i dovele do takozvanih ugrađenih emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG – *greenhouse gases*).

Za smanjenje ekoloških uticaja sektora građevinarstva, neophodno je analizirati celokupni životni ciklus zgrada, od prikupljanja i snabdevanja sirovinama, proizvodnje građevinskih materijala, njihove ugradnje do odlaganja i reciklaže po isteku radnog veka. Potrebno je izvršiti analizu i poređenje ekoloških uticaja različitih građevinskih konstrukcija. Najpogodnija je metodologija procene ciklusa života (LCA - *life cycle assessment*).

U Srbiji još uvek nema dovoljno podataka za sprovođenje adekvatne LCA analize. Zbog čega su u daljim analizama korišćeni relevantni podaci dobijeni iz istraživanja sprovedenih u drugim državama, a sa ciljem da se pokaže koliki je značaj pouzdanih podataka i sveobuhvatnih analiza u cilju predviđanja smanjenja emisija zagađujućih materija i potrošnje energije u sektoru građevinarstva.

II PROCENA ŽIVOTNOG CIKLUSA (LCA)

Životni ciklus zgrade sastoji se od pet faza, koje su prikazane na slici 1:

1. **faza proizvodnje** - obuhvata kompleksne procese koji podrazumevaju proizvodnju konstrukcionih materijala namenjenih za izgradnju. Ovi procesi uključuju prikupljanje i snabdevanje sirovinama (A1), transport do mesta proizvodnje (A2), kao i samu proizvodnju građevinskih materijala (A3). U ovoj fazi, neophodno je razmatrati sve aspekte pojedinačno, kako sa aspekta potrošnje energije tako i uticaja na životnu sredinu;
2. **faza procesa izgradnje** - obuhvata transport građevinskih materijala od mesta proizvodnje do mesta ugradnje. Ovo uključuje transport materijala od mesta proizvodnje do

- gradilišta (A4), kao i njihovu ugradnju u objekat (A5);
3. **faza upotrebe** - obuhvata procese koji se odnose na konstantnu funkcionalnost građevinskih materijala (B1) kao sastavnih delova zgrade, kao što su održavanje (B2), popravke (B3), zamena (B4) i renoviranje (B5). U ovu fazu takođe spada i kontinuirana operativna upotreba energije (B6) i vode (B7) unutar zgrade. Obično, ovi procesi se baziraju na scenarijima o tome kako će se oni odvijati u praksi;
4. **faza kraja životnog veka** - procesi u ovoj fazi se takođe baziraju na scenariju i odnose se na aktivnosti koje se dešavaju kada zgrada dostigne kraj svog životnog veka,

odnosno na njeno rušenje (C1), transport (C2), preradu otpada (C3) i odlaganje (C4);

5. **faza reciklaže građevinskog otpada** - zasnovana je na scenariju, obuhvaćeni su proračuni dobitaka i nedostataka ponovne upotrebe i reciklaže građevinskih proizvoda i materijala (D). Prema standardu EN 15978:2011, doprinosi iz ove faze moraju se uzeti u obzir izvan granica sistema i prijaviti kao odvojene stavke, što naglašava značaj prevencije i upravljanja otpadom u građevinarstvu.

Prve dve faze su najdostupnije za praćenje, dok su podaci za ostale faze nedovoljni i nepouzdati, jer se zasnivaju na pretpostavkama i scenarijima [2,3].

Životni ciklus zgrada															Dopuna	
Proizvodnja			Izgradnja		Korišćenje							Kraj životnog ciklusa				Izvan granica sistema
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
snabdevanje sirovih materijala	transport	proizvodnja	transport	izgradnja	korišćenje	održavanje	popravka	zamena	obnavljanje	operativna energija	operativno korišćenje vode	rušenje	transport	odlaganje	prerada otpada	ponovno korišćenje/ recikliranje

Slika 1. Faze životnog ciklusa zgrade [2]

Analizom rezultata procene životnog ciklusa mogu se predložiti mere za smanjenje ekološkog uticaja zgrada tokom njihovog životnog veka.

II-1 Uobičajeni uticaji na životnu sredinu uključeni u procenu životnog ciklusa

LCA analizira sve ulazne i izlazne podatke povezane sa životnim ciklusom sistema. Potencijalni uticaji na životnu sredinu posmatraju se na osnovu potrošnje energije i emisija opasnih i štetnih materija u svim fazama životnog ciklusa.

Rezultati LCA mogu se dobiti korišćenjem odabranih merljivih pokazatelja (indikatora). Najčešći indikatori za procenu uticaja na životnu sredinu i resurse predstavljeni su u nastavku:

- **potencijal globalnog zagrevanja (GWP – global warming potential)** - izražava se u CO₂ ekvivalentima (CO₂eq.) i odnosi se na emisiju gasova sa efektom staklene bašte u atmosferi (GHG). Porast emisije GHG dovodi do porasta temperature vazduha;
- **potencijal oštećenja ozonskog omotača (ODP – ozone depletion potential)** - brojna vrednost kojom se označava potencijalni uticaj supstanci koje izazivaju oštećenje ozonskog omotača i izražava se u R11 ekvivalentima (R11 eq). To oštećenje predstavlja ugrožavanje od štetnog UV-A i UV-B sunčevog zračenja;
- **potencijal zakiseljavanja (AP – acidification potential)** - izražava se u SO₂ ekvivalentima (SO₂ eq). Kada materije reaguju sa vodom, dolazi do stvaranja „kiselih kiša“;
- **potencijal smanjenja fosilnih goriva (ADPFF – abiotic depletion potential for fossil fuels)** - izražava se u MJ.

Značajna potrošnja prirodnih resursa može doprineti iscrpljivanju dostupnih fosilnih izvora energije, kao što su nafta ili uglj;

- **ukupna iskorišćena primarna energija (PE_{tot} – total use of primary energy)** - izražava se u MJ ili kWh. Upotreba resursa u primarnom obliku energije iz fosilnih goriva se dosta koristi, a obnovljivi izvori mogu doprineti iscrpljivanju prirodnih resursa;
- **korišćenje obnovljivih (sekundarnih) goriva (sec – secondary fuels)** - izražava se u MJ ili kWh. Sekundarna goriva (npr. otpad) su u principu ograničeni resursi, velika upotreba sekundarnih goriva može indirektno dovesti do oskudice resursa [3].

II-2 LCA istraživanje

Prema standardima ISO 14040 i ISO 14041, istraživanje LCA podeljeno je na četiri koraka:

1. definisanje cilja i opsega, odnosno obima i granice LCA istraživanja;
2. prikupljanje podataka i izračunavanje emisija zagađujućih materija povezanih sa svakim pojedinačnim procesom koji je u vezi sa proizvodom. Ova analiza predstavlja inventar životnog ciklusa (LCI – life cycle inventory) i njeni rezultati se prikazuju u vidu inventarnog spiska životnog ciklusa;
3. ocena potencijalnih i najvažnijih ekoloških uticaja i naziva se procena ekološkog uticaja (procena uticaja na životni ciklus);
4. interpretacija, odnosno kvantifikovanje i evaluacija rezultata istraživanja životnog ciklusa i procene uticaja

na životni ciklus, i izvođenje zaključaka i predloga promena, koje su potrebne u cilju smanjenja emisije zagađujućih materija tokom životnog veka.

III ANALIZA TROŠKOVA ŽIVOTNOG CIKLUSA (LCCA)

Analiza troškova životnog ciklusa (LCCA – *life cycle cost analysis*) koristi se za evaluaciju troškova životnog ciklusa (LCC – *life cycle cost*). LCC razmatra sve relevantne troškove i prihode u vezi sa izgrađenom imovinom (npr. zgrada). Većina LCC proračuna uzima u obzir vremensku vrednost. Standardom ISO 15686-5 troškovi su podeljeni na: troškove izgradnje, eksploatacione, troškove korišćenja, održavanja i kraja životnog ciklusa. Ukratko, LCC predstavlja zbir troškova nastalih u različitim fazama životnog ciklusa zgrade.

Analiza LCCA sprovodi se koristeći sledeće korake:

- definisanje cilja i granica analize;
- utvrđivanje osnovnih pretpostavki za LCCA, uključujući period analize i diskontnu stopu;
- izračunavanje LCC sumiranjem troškova po svakom tipu i
- analizu LCC, uključujući neto uštede, odnos uštede i investicija, period okupljanja i analizu osetljivosti.

LCA i LCCA se uglavnom sprovode nezavisno, LCA predstavlja metod za ekološku analizu kojim se određuje uticaj zgrade na životnu sredinu tokom svih faza njenog životnog ciklusa. LCCA je finansijska analiza ukupnih troškova zgrade u istom periodu (životnom ciklusu zgrade) i obuhvata početne investicije, operativne troškove, troškove održavanja i eventualne troškove rušenja objekta. Kombinovanje ove dve analize predstavlja izazov jer koriste različite jedinice mere (npr. emisije gasova izražene su u tonama CO₂eq. u odnosu na troškove u €) i različiti su zahtevi ulaznih podataka. Na primer, ekološki prihvatljiv materijal može imati visoku cenu, što otežava usklađivanje ekoloških i ekonomskih ciljeva i donošenje jedinstvenog zaključka. Potencijalno rešenje ovog problema je modeliranje informacija o zgradama (BIM – *building information modelling*), virtuelni 3D model zgrade sa bazom podataka građevinskih elemenata. Primenom BIM-a može se efikasnije i brže upravljati podacima potrebnim za LCA i LCCA.

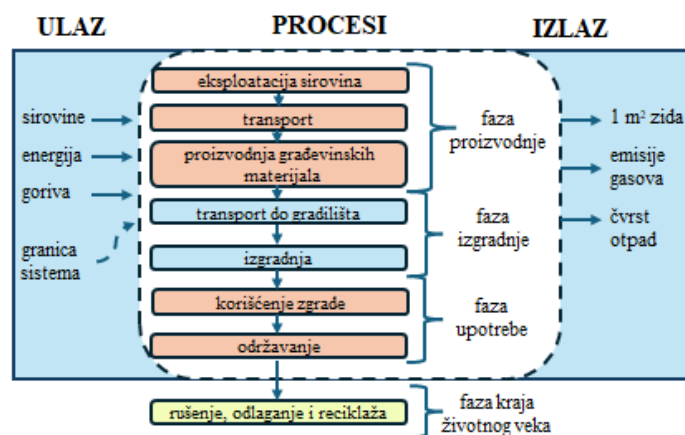
IV METODOLOGIJA I SOFTVERI

Osnovna funkcija softverskog paketa za LCA je određivanje energetskog i masenog bilansa izabranog modela, kako bi se dobili podaci o emisiji gasova, potrošnji energije, itd. Određivanje ekoloških uticaja zgrada je kompleksan proces. Na tržištu postoji širok spektar softverskih alata koji su dizajnirani za sprovođenje analize životnog ciklusa (LCA), analizu ugljeničnog otiska (CF – *carbon footprint*) ili određivanje drugih ekoloških pokazatelja. Najčešće se koriste GaBi i SimaPro, koji su prisutni na tržištu više od 15 godina, imaju zatvoren pristup, i visoku cenu licence. Open LCA¹, je besplatan paket, koji je prvobitno dizajniran za izračunavanje ekološkog uticaja proizvoda i procesa, sada omogućava i dodavanje ekonomskog paketa. Osnovni elementi softverskih alata su baza podataka i metodologija. Baze podataka moraju biti dobro definisane i

redovno ažurirane. Sa stanovišta određivanja ekološkog uticaja bitni su kvalitet, preciznost i relevantnost podataka dostupnih u softveru. Rezultati analiza predstavljaju se u izveštajima tabelarno i grafički [4].

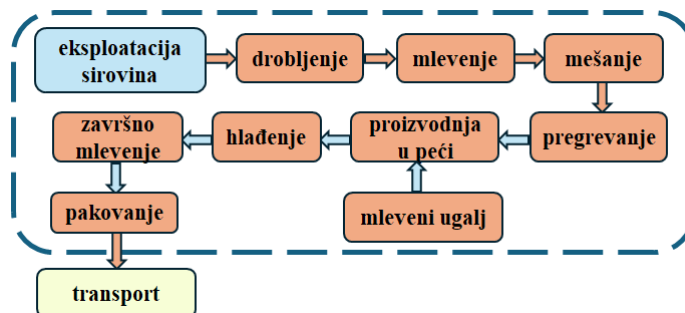
V GRANICE SISTEMA

Granice sistema obuhvataju faze proizvodnje, izgradnje, kao i fazu životnog veka (koja u proseku traje 50 godina). U fazu proizvodnje spadaju procesi eksploatacije sirovina, njihov transport do mesta prerade u građevinske materijale i sam proces prerade i proizvodnje finalnog produkta. Zatim sledi faza izgradnje (podrazumeva transport građevinskih materijala do gradilišta) i proces izgradnje objekta. Korišćenje zgrade i njeno održavanje predstavljaju fazu životnog veka. Faza kraja životnog veka obuhvata rušenje zgrade, odlaganje i reciklažu otpada. Ona jedina ne pripada granici sistema (slika 2) [5].



Slika 2. Šema granice sistema za analizu LCA, uključujući faze izgradnje i fazu upotrebe [5]

Prvi deo faze proizvodnje cementa predstavlja eksploatacija sirovina i njihovo prikupljanje. Zatim sledi transport do mesta prerade. Proizvodni proces uključuje drobljenje, mlevenje, mešanje, predgrevanje, proizvodnju cementa u peći, hlađenje, završno mlevenje i pakovanje [6]. Na kraju, dobijeni proizvod se transportuje do gradilišta (slika 3), prva faza izgradnje sa slike 2.



Slika 3. Šema granice sistema za analizu LCA proizvodnje cementa [6]

VI ANALIZA INVENTARA ŽIVOTNOG CIKLUSA (LCI)

Analiza inventara životnog ciklusa (LCI) uključuje prikupljanje i organizaciju podataka. Ukoliko ne postoje dovoljni i pouzdani podaci o vrsti, starosti opreme, mehanizacije i vozila, njihovo

¹ <https://www.openlca.org/>

potrošnji, količini materijala potrebnih za proizvodnju, potrošnji energije u procesu proizvodnje, emisije gasova, itd., ne može se izvršiti pouzdana procena uticaja na životnu sredinu.

Obzirom da u Srbiji ne postoje dovoljni i pouzdani podaci o emisiji gasova u svim fazama procesa proizvodnje cementa, korišćeni su podaci dobijeni iz LCI analize sprovedene u Indoneziji 2018. godine [6]. Osnovne sirovine u proizvodnji cementa su krečnjak i glina. U tabeli 1 prikazani su ulazni i izlazni podaci prilikom procesa eksploatacije sirovina [6].

Tabela 1. Inventar procesa eksploatacije sirovina [6]

Ulaz			Izlaz		
Energija		Količina	Emisije		Količina
1	Dizel gorivo	12 512 kWh	1	CO ₂	69 485 t
			2	SO ₂	270 t
			3	NO ₂	5351 t
			4	PM	431 t
			5	CO	2 560 t
			Proizvod		Količina
			1	Krečnjak	15 474 525 t
			2	Glina	3 516 160 t

Naredna faza procesa je drobljenje krupnih komada gline i krečnjaka, kako bi mogli da se samelju. U tabeli 2 prikazani su ulazni i izlazni podaci prilikom procesa drobljenja [6]. Pri analizi podatak pretpostavljeno je da se proces proizvodnje cementa odvija u Srbiji, pri čemu se smatra da se 70 % električne energije potrebne za drobljenje dobija iz termoelektrane (lignit). Emisije CO₂ dobijene su na osnovu specifične bruto emisije CO₂, koja iznosi 1,165 kg CO₂/kWh_{el} [6].

Tabela 2. Inventar procesa drobljenja gline i krečnjaka [6]

Ulaz			Izlaz		
Energija		Količina	Emisije		Količina
1	Električna energija	278 683 246 kWh	1	CO ₂	227 266 t
Proizvod		Količina	Proizvod		Količina
1	Krečnjak	15 474 525 t	1	Drobljeni krečnjak	15 474 525 t
2	Glina	3 516 160 t	2	Drobljena glina	3 516 160 t

Proces mlevenja služi za usitnjavanje komada gline i krečnjaka većih dimenzija. U tabeli 3 prikazani su ulazni i izlazni podaci u procesu mlevenja. Materijali koji prođu kroz automatske vage, sadrže smešu krečnjaka, gline, kvarcnog peska, metalnog otpada zatim se melju i suše u mlinu do određenog stepena finoće [6].

Tabela 3. Inventar procesa mlevenja smeše [6]

Ulaz			Izlaz		
Materijal		Količina	Emisije		Količina
1	Krečnjak	15 474 525 t	1	SO ₂	2,73 t
2	Glina	3 516 160 t	2	NO ₂	22,32 t
3	Kvarcni pesak	353 342 t	3	PM	0,41 t
4	Metalni otpad	78 359 t	Proizvod		Količina
5	Bakarni otpad	230 261 t	1	Smeša sirovina	19 731 006 t
6	Rude gvožđa	78 359 t			

Sledeća faza procesa je mlevenje uglja, kako bi se pripremio za proces sagorevanja. U tabeli 4 prikazani su ulazni i izlazni podaci u procesu mlevenja uglja [6]. Emisije CO₂ dobijene su istim postupkom objašnjenim za tabelu 2.

Tabela 4. Inventar procesa mlevenja uglja [6]

Ulaz			Izlaz		
Materijal		Količina	Emisije		Količina
1	Ugalj za mlevenje	2 396 587 t	1	CO ₂	513 524 t
Energija		Količina	2	PM	2 156 t
1	Električna energija	629 705 199 kWh	Proizvod		Količina
			1	Mleveni ugalj	2 029 826 t

U tabeli 5 prikazani su ulazni i izlazni podaci u procesu pečenja smeše [6]. Peć se koristi za pečenje smeše sirovina, kako bi se dobila osnovna sirovina, klinker. Emisije metana (CH₄) i azot-oksida (N₂O), gasova staklene bašte, predstavljene su u ekvivalentima ugljen-dioksida ili „CO₂eq.“. CO₂eq. je zajednička jedinica za opisivanje različitih gasova staklene bašte. Za bilo koju količinu i vrstu gasa staklene bašte, CO₂eq. označava količinu CO₂ koja bi imala ekvivalentan uticaj globalnog zagrevanja. Množenjem količine emitovanog gasa sa njegovim potencijalom globalnog zagrevanja (GWP vrednost: za CH₄ = 29,8 kg CO₂eq., za N₂O = 273 kg CO₂eq.), dobijena je emisija gasova izražena u t CO₂eq. [6].

Tabela 5. Inventar procesa pečenja smeše [6]

Ulaz			Izlaz		
Materijal		Količina	Emisije		Količina
1	Smeša sirovina	19 731 006 t	1	Primarni CO ₂	309 802 t
Energija		Količina	2	CH ₄	4 321 t CO ₂ eq.
1	Električna energija	379 893 019 kWh	3	N ₂ O	19 110 t CO ₂ eq.
2	Dizel gorivo	1 207 kWh	4	PM	2 259 t
3	Mleveni ugalj	2 029 826 t	Proizvod		Količina
4	Bio-gorivo od pirinča	41 009 t	1	Klinker	9 978 633 t
5	Kokosova slama	12 564 t			
6	Duvan	12 564 t			
7	Smola	861 t			
8	Otpadno gorivo	2 700 t			

U završnoj fazi obrade vrši se mešanje i mlevenje. Pored toga, u ovoj fazi se dodaju različiti materijali i na taj način se određuje tip cementa koji će biti proizveden. U tabeli 6 prikazani su ulazni i izlazni podaci u procesu završnog mlevenja [6].

Tabela 6. Inventar procesa završnog mlevenja [6]

Ulaz			Izlaz		
Materijal		Količina	Emisije		Količina
1	Klinker	9 978 633 t	1	CO ₂	332 057 t
2	Gips	467 067 t	2	PM	20 t
3	Iscrpljeno zemljište	7 675 t	Proizvod		Količina
4	Pepeo	156 439 t	1	Cement	12 395 563 t
5	Leteći pepeo	127 745 t			
6	Krečnjak	582 858 t			
7	Šljaka visoke peći	304 793 t			
Energija		Količina			
1	Električna energija	407 183 164 kWh			

Nakon završne obrade u mlinu, cement se iz silosa vazdušnim transporterom šalje na pakovanje. Rotaciona mašina za pakovanje koristi se u završnom procesu. U tabeli 7 prikazani su ulazni i izlazni podaci pri procesu pakovanja cementa [6].

Tabela 7. Inventar procesa pakovanja cementa [6]

Ulaz		Izlaz	
Materijal	Količina	Emisije	Količina
1 Cement	12 395 563 t	1 CO ₂	14 323 t
Energija	Količina	2 PM	0,35 t
1 Električna energija	17 563 953 kWh	Proizvod	Količina
		1 Pakovani cement	12 395 563 t

Sprovođenje LCI analize za druge konvencionalne građevinske materijale, kao i bio-bazirane, je složeno zbog nedostatka pouzdanih podataka.

VII KOMPARATIVNA ANALIZA (LCA) PRIRODNIH I KONVENCIONALNIH MATERIJALA U GRAĐEVINSKIM ELEMENTIMA

S obzirom da u Srbiji nema dovoljno pouzdanih podataka za sprovođenje adekvatne LCA analize, a posebno za korišćenje savremenih građevinskih materijala, u daljim analizama korišćeni su podaci dobijeni iz istraživanja sprovedenog u SAD 2021. godine. Sa ciljem da se pokaže koliko su analize značajne kako bi se izabrao određeni materijal prilikom gradnje zgrada. Analizirane su četiri savremene, prirodne zidne konstrukcije (laka slama-glina, kob, izolovana i neizolovana zemlja) i tri konvencionalne zidne konstrukcije (drveni zid, izolovani i neizolovani betonski zid).

Ekološki uticaji uzimaju u obzir uštedu energije i smanjenje emisija na primeru stambenog objekta sa jednim porodičnim domaćinstvom u klimatskim područjima sa visokim temperaturama u SAD kako je definisano od strane ASHRAE tople-vruće klimatske zone [5]:

- topla pustinja klima 2B (npr. Arizona),
- suptropska klima 3B (npr. Teksas) i
- blaža semiaridna klima 3C (npr. Los Anđeles, Kalifornija).

Dodatno, zbog tradicionalne upotrebe zemljanih materijala u umerenim i hladnim klimatskim područjima, razmotrene su sledeće zone:

- blaža mediteranska klima 4B (npr. Novi Meksiko),
- umereno okeanska klima 4C (npr. Portland, Oregon) i
- kontinentalna blaža klima 5B (npr. Denver, Kolorado).

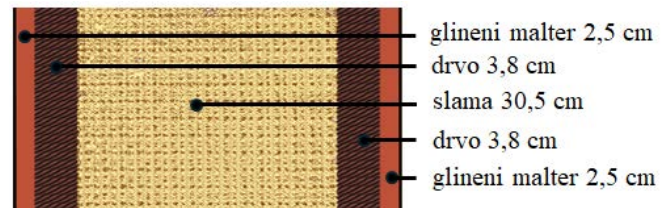
Za analizu je izabrana funkcionalna jedinica od 1 m² površine nosivog spoljašnjeg zida prilagođenog za izgradnju stambenih objekata niske gradnje, do dva sprata. Funkcionalna jedinica je izabrana kako bi se obezbedila primenljiva merna jedinica koja omogućava da se rezultati sistematizuju na različite skale projektovanja i izgradnje [5].

VII-1 Analizirane zidne konstrukcije

Zidne konstrukcije koje su uključene u ovu LCA analizu navedene su i opisane u nastavku.

Laka konstrukcija slama-glina

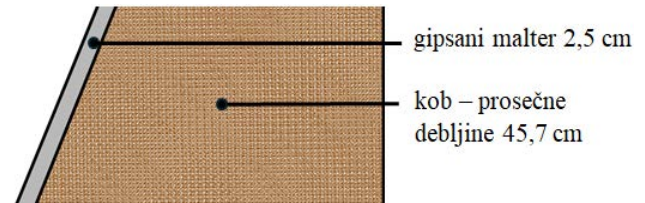
Konstrukcija zida od slame-gline ilustrovana je na slici 4. Sastoji se od dva drvena stuba dimenzija 38 × 89 mm. Ukupna gustina jezgra zida debljine 305 mm od slame-gline iznosi 192 kg/m³ na osnovu 85 % sadržaja slame. Vrednost koeficijenta prolaženja toplote zida je 0,26 W/m²K. Materijal slama-glina je dobar toplotni izolator i kompatibilan je sa konvencionalnim materijalima, što ga čini pogodnim za renoviranje izolacije u postojećim objektima. Smatra se ekološki prihvatljivim građevinskim materijalom koji je održiva alternativa za objekte osetljive na buđ i hemijske supstance.



Slika 4. Laka konstrukcija slama-glina [5]

Kob

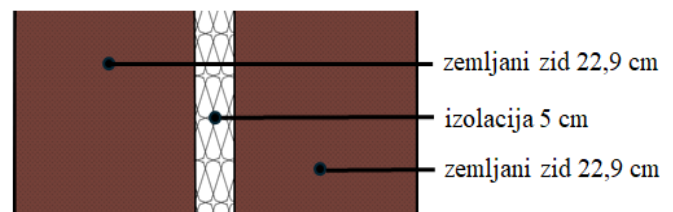
Konstrukcija zida od koba prikazana je na slici 5. Pretpostavljeno je da je minimalna debljina zida od koba 305 mm na vrhu zida i na njegovoj osnovi 610 mm, što za rezultat ima srednju vrednost debljine zida 457 mm. Vrednost koeficijenta prolaženja toplote zida iznosi 0,5 W/m²K. Prisutnost slame u sastavu koba omogućava materijalu da se deformiše pre nego što dođe do potpunog loma, čime se postiže odgovarajuće ponašanje u seizmičkim područjima.



Slika 5. Konstrukcija kob [5]

Zemljani zid

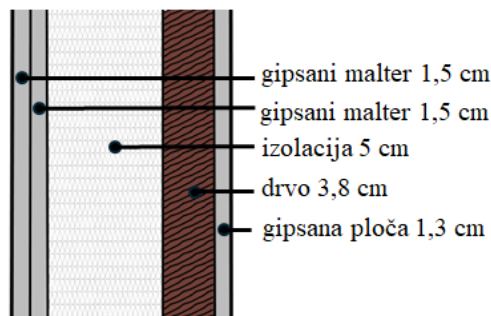
Konstrukcija zemljanog zida sastoji se od glinene zemlje, peska i šljunka (bez dodavanja vlakana), u koji se dodaje mala količina vode kako bi se postigla optimalna kompaktnost. U ovom istraživanju se pretpostavlja da sadrži 20 % šljunka i 8 % vode. Dodatno, za zemljani zid debljine, 457 mm pretpostavlja se da nema maltera, što je uobičajena praksa za postizanje željenog estetskog efekta komponenti od zemlje. Vrednost koeficijenta prolaženja toplote ovog zida iznosi 0,63 W/m²K. Razmatran je i izolovani zemljani zid (slika 6) u koji je u središnjem planu dodata izolacija debljine 51 mm. Vrednost koeficijenta prolaženja toplote izolovanog zemljanog zida iznosi 0,27 W/m²K.



Slika 6. Izolovani zemljani zid [5]

Izolovani drveni zid

Konvencionalna konstrukcija zida od drveta ilustrovana je na slici 7 i predstavlja tipičnu kuću od lakog drveta u SAD. Zid se sastoji od gipsane ploče, drveta, izolacije, šperploče i gipsanog maltera, navedeno od unutrašnjeg ka spoljašnjem sloju. Ukupna debljina zida iznosi 131 mm dok je vrednost koeficijenta prolaženja toplote 0,33 W/m²K.



Slika 7. Izolovani drveni zid [5]

Betonski zid

Betonska zidna konstrukcija sastoji se od gipsane ploče, betonskog bloka i gipsanog maltera, navedeno od unutrašnjeg ka spoljašnjem sloju. Razmatrana su dva slučaja: neizolovana betonska konstrukcija i izolovana koja ima izopolistirenu izolaciju između betonskog bloka i unutrašnje gipsane ploče (slika 8). Vrednost koeficijenta prolaženja toplote neizolovanog zida debljine 228 mm iznosi 0,71 W/m²K. Vrednost koeficijenta prolaženja toplote izolovanog zida debljine 278 mm iznosi 0,24 W/m²K.



Slika 8. Izolovani betonski zid [5]

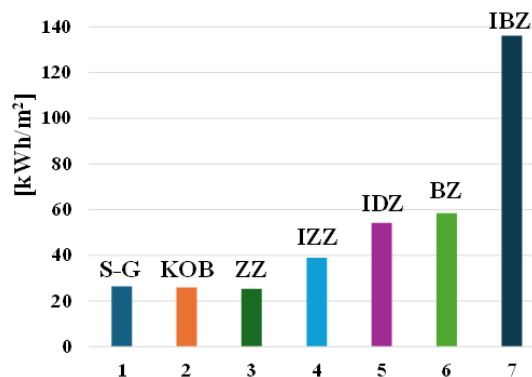
7.2 Rezultati i diskusija o proceni životnog ciklusa

Poređenje potrošnje energije, emisija gasova staklene bašte, kiselih emisija i zagađenja vazduha česticama u fazama proizvodnje i izgradnje između svih sedam zidnih konstrukcija prikazano je na slici 9, sa sledećim brojevima:

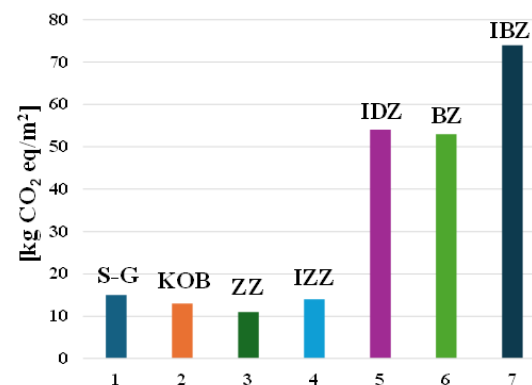
1. laka konstrukcija slama–glina (S-G),
2. kob (KOB),
3. zemljani zid (ZZ),
4. izolovani zemljani zid (IZZ),
5. izolovani drveni zid (IDZ),
6. betonski zid (BZ),
7. izolovani betonski zid (IBZ).

Kao što je i očekivano, prirodne zidne konstrukcije pokazuju značajno bolje osobine nego konvencionalni izolovani drveni okvir i betonska konstrukcija zida (izolovana i neizolovana), za sve kategorije uticaja.

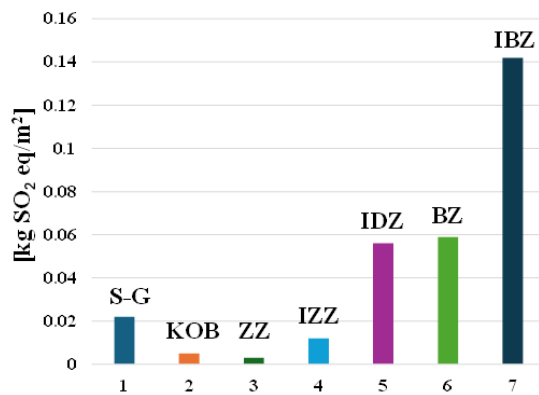
1) Potrošnja energije



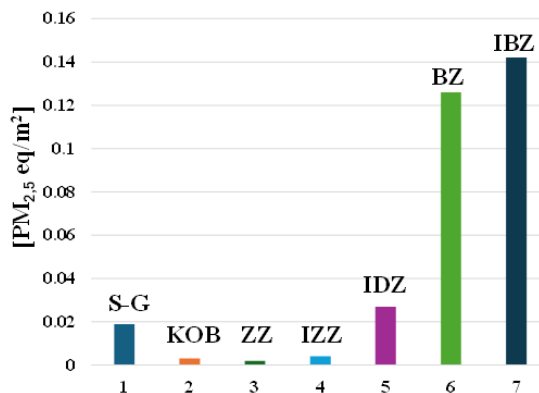
2) Emisije CO₂ eq



3) Kisele emisije



4) Zagađenje česticama PM_{2,5}



Slika 9. Uticaj zidnih konstrukcija na okolinu u fazi izgradnje [5]

Sa slike 9.1 se može videti da se više energije troši za proizvodnju, transport i izgradnju materijala potrebnih za izolovani betonski zid, nego za proces eksploatacije sirovina i šumarskih operacija prirodnih konstrukcija. Uticaj na klimatske promene (slika 9.2), zbog velikih emisija zagađujućih materija, ima proizvodnja cementa, glavnog materijala betonske zidne konstrukcije (izolovane i neizolovane), i staklene vune (izolacionog materijala) zbog vađenja kvarca i obrade stakla.

U pogledu zakiseljavanja, procesi koji koriste fosilna goriva i poljoprivredne aktivnosti najviše utiču na životnu sredinu, drugim rečima, zidovi od zemlje i koba pokazuju najniže kisele emisije (slika 9.3). Poslednji primer slike 9. razmatra zagađenje vazduha česticama koje utiču na ljudsko zdravlje. Betonski zidovi su jedan od najvećih izvora zagađenja, zbog velike količine štetnih materija koje se emituju tokom proizvodnje cementa, kao i od fugitivnih emisija koje se generišu tokom transporta i obrade sirovina.

Kada se posmatraju ekološki uticaji spoljašnjih zidova na životnu sredinu, preporučuje se gradnja korišćenjem zemljanih i bio-baziranih materijala. Izolovani zemljani zid ekološki je bolji od izolovane betonske konstrukcije, zbog manje potrošnje energije od 72 %, smanjenih emisija zagađujućih materija za 78 %, 90 % manjih kiselih emisija i 98 % manjeg zagađenja vazduha česticama.

Zid slama - glina u fazi proizvodnje i izgradnje rezultuje manjom potrošnjom energije za 55 %, smanjenim emisijama zagađujućih materija za 71 %, 57 % manjim kiselim emisijama i 27 % manjim zagađenjem vazduha česticama, u poređenju sa konvencionalnom izolovanom konstrukcijom sa drvenim okvirima. U fazi proizvodnje Ukupno, konstrukcije od prirodnih materijala u fazi proizvodnje smanjuju potrošnju energije za 30-83%, potencijal za klimatske promene za 60-82 %, kisele emisije za 57-98 % i zagađenje vazduha česticama za 27-99 % u poređenju sa konvencionalnim građevinskim konstrukcijama. Posebno, kob i neizolovani zemljani zid pokazuju najniže uticaje na životnu sredinu, dok betonska konstrukcija pokazuje najviše uticaje.

Analizom operativne faze dobijeni su godišnji podaci o količini toplote potrebnoj za grejanje i hlađenje, koji pokazuju da je najmanja potrebna količina toplote za grejanje i hlađenje dobijena za konstrukciju zida slama-glina za svake tipove klima, zbog visokog toplotnog otpora i srednjeg toplotnog kapaciteta. Izolovani zemljani zid, u uslovima umerenih klima, sa najvećim toplotnim kapacitetom i umerenim toplotnim otporom, pokazuje manju potrebnu količinu toplote za grejanje i hlađenje u odnosu na konvencionalne zidne konstrukcije.

Zahtevi za održavanjem različitih zidnih konstrukcija uključuju mnogo neizvesnosti, jer zavise od različitih aspekata kao što su detalji dizajna, kvalitet izvorne gradnje, kvalitet materijala i proizvoda, klime i vremenskih uslova, kao i održavanja. Posebno za prirodne konstrukcije, zahtevi za održavanjem mogu značajno biti smanjeni ili u potpunosti izbegnuti.

Zbog nedostatka podataka o održavanju različitih zidnih konstrukcija i verovatnoće da će značaj uticaja održavanja biti relativno nizak, uticaji održavanja u ovom istraživanju ograničeni su na zamenu spoljnog završnog sloja. Razmatrano je sledeće:

- kob i zid od slame – gline pretpostavljeno je da će biti ponovo malterisani na svakih 10 godina;
- zemljani zid se pretpostavlja da će zahtevati popravke koristeći originalnu zemljanu smesu ekvivalentnu uticaju štukature od 25 mm, na svakih 10 godina;
- štukatura od portlandskog cementa u konvencionalnim konstrukcijama pretpostavlja se da će biti obnovljena na svakih 20 godina.

Za vreme od 50 godina životnog veka zgrade, ekološki uticaji procesa održavanja zgrada i dalje će biti u korist zemljane i bio-bazirane gradnje [5].

Prethodno navedeni podaci pokazuju potencijal široke upotrebe zemljanih i bio-baziranih materijala. Što se tiče proizvodnje cementa, koja uzrokuje oko 600 kg CO₂ po toni proizvoda, potrebne su značajne izmene za smanjenje pridruženih emisija ako se žele postići ciljevi Pariskog sporazuma iz 2016. godine. U 2020. godini, Procenjuje se da je širom sveta proizvedeno 4,2 milijarde tona cementa, od čega je 55 % proizvedeno u Kini. Postalo je tehnički i ekonomski izvodljivo smanjiti sadržaj portlandskog klinkera u cementu na do 50 %, postizujući slične performanse kao postojeći cement, što značajno smanjuje CO₂ emisije. Jedna od opcija je cement sa kalcinovanom glinom i krečnjakom (LC3), gde se kao zamena do polovine sadržaja portlandskog klinkera dodaju krečnjak i kalcinovana glina. Kao rezultat, mogu se postići smanjenja emisija CO₂ do 40 % u odnosu na obični portlandski cement. Nacionalni standardi i regulative za cement ponekad mogu biti prepreka za proizvodnju i uvođenje na tržište cementa sa nižim sadržajem klinkera od uobičajenog portlandskog cementa. Ipak, sve više zemalja adaptira svoje regulative kako bi otvorile put za zelenije alternative cementu. Prva takva adaptacija odigrala se u Evropi gde je standard EN 197 ažuriran na EN 197-5 u maju 2021. godine. U većini zemalja Latinske Amerike, korišćenje LC3 već je moguće. Dodatne zemlje, među kojima su Indija, Senegal i Egipat, takođe su u procesu prilagođavanja svojih standarda novom nižem faktoru klinkera. Nekoliko proizvodnih postrojenja za LC3 već je izgrađeno (npr. u Kolumbiji, na Kubi i u Obali Slonovače), dok su druga trenutno u izgradnji (npr. u Francuskoj, Gani i Kamerunu). [5,6].

VIII ZAKLJUČAK

Procena životnog ciklusa (LCA) prihvaćena je kao veoma pouzdana tehnika za procenu uticaja zgrada na životnu sredinu. Većina istraživanja o proceni životnog ciklusa zgrada se fokusira prvenstveno na potrošnju energije i emisije zagađujućih materija niskih zgrada sa različitim rasponima parametara kao što su životni vek, funkcionalna jedinica i kategorije uticaja. Značajna varijacija u ovim parametrima ograničava mogućnost poređenja ishoda istraživanja. Veoma je važan sveobuhvatni pristup proceni ekoloških uticaja tokom celokupnog životnog ciklusa zgrada.

Rezultati istraživanja ukazuju na varijacije u ekološkim uticajima različitih faza, od samog procesa proizvodnje do korišćenja i krajnjeg odlaganja ili reciklaže.

Napredak u LCA metodologiji omogućava nam bolje razumevanje kompleksnih ekoloških uticaja zgrada i identifikaciju mogućnosti za poboljšanje. Kombinovanjem

tehnoloških inovacija, održive izgradnje i promene u ponašanju korisnika može se doprineti izgradnji zgrada koje su ekološki prihvatljivije tokom njihovog životnog veka.

Istraživanje je pokazalo da je opravdan prelazak ka zemljanoj i bio-baziranoj gradnji kao strategiji za smanjenje ekoloških uticaja zgrada na okolinu. Osim što pružaju bolju energetske efikasnost i manju emisiju CO₂eq., korišćenje ovih materijala ima pozitivne efekte na životnu sredinu tokom celokupnog životnog veka.

Ključni problemi koji se javljaju primenom LCA u praksi su nedostatak dostupnih podataka i složenost procene uticaja različitih faktora, što je posebno prisutno u Srbiji. Za napredak u ovom području potrebna je saradnja između istraživača, industrije i regulatornih tela kako bi se razvile preciznije metodologije i ustanovile smernice za procenu ekoloških uticaja zgrada.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultati istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-136/2025-03/ 200105, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, od 04.02.2025. god., kao i projekta Fonda za nauku Republike Srbije, 4344, Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN.

LITERATURA

- [1] Global status report for buildings and construction, 2022. https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf [pistupljeno 26.12.2024]
- [2] Mouton, L., Allacker, K., Roch, M. Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2), *Energy and Buildings*, Vol. 282, 112767, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767>
- [3] Birgisdottir, H., Rasmussen, F.N. *Introduction to LCA of Buildings*, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2016.
- [4] Ormazabal, M., Jaca, C., Puga-leal, R. Analysis and Comparison of Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Software, in *Proc. 8th International Conference on Management Science and Engineering Management, ICMSEM 2014 - Lisboa*, Lisbon, Portugal, pp 1521–1530, 25-27 July, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55122-2_131
- [5] Ben-Alon, L., Loftneer, V., Harries, K.A., Cochran Hameen, E. Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 144, 110951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110951>
- [6] Rosyid, A., Boedisantoso, R., Iswara, A.P. Environmental Impact Studied using Life Cycle Assessment on Cement Industry, in *Proc. Joint International Conference on Civil, Environmental, and Geo Engineering 2019, JIC-CEGE 2019 - Surabaya*, Indonesia, article no. 012024, 1-2 October, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012024>

AUTORI

msr Sandra Kovačević, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, skovacevic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0009-0007-2567-6735](https://orcid.org/0009-0007-2567-6735)
prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mkomatina@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-5035-446X](https://orcid.org/0000-0002-5035-446X)
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Reduction of Pollutant Emissions and Energy Consumption in Buildings Using Life Cycle Assessment

Abstract – Life cycle assessment (LCA) is used to evaluate environmental impact and energy consumption of the construction sector. This methodology is a complex process that includes all stages, from the production and transportation of raw materials for building materials, through the construction phase, to the usage and recycling of materials at the end of their lifetime. Since determining any environmental impact is a complex process, software tools designed for conducting LCA, carbon footprint analysis, or other environmental indicator assessments are used, such as: GaBi, SaaS, Open LCA and SimaPro. For the purpose of comparing different construction materials, the paper outlines the procedure for conducting LCA analysis on various construction elements: light straw clay, cob, rammed earth, insulated rammed earth, insulated wooden wall, concrete wall and insulated concrete wall. Additionally, an analysis of the life cycle inventory (LCI) across all stages of production in the cement industry is presented, assuming the use of cement produced in Serbia for the production of concrete walls. The analysis of the obtained results revealed that energy consumption during the production and transportation process is significantly higher than during the raw material extraction phase. The cement production process has the greatest impact on the emission of pollutants that affect human health in concrete walls, due to harmful and hazardous substances released during production, as well as fugitive emissions generated during the transport and processing of raw materials. Life cycle impact assessment (LCIA) during the construction phase of all seven building elements showed that using building elements made from natural materials reduces energy consumption by 30 – 83 %. Pollutant emissions are reduced by 27 - 99 %, while air acidification is reduced by 57 - 98 %. The study showed that transitioning to earth and bio-based construction is a justified strategy for reducing the ecological impact of buildings on the environment. In addition to reducing CO₂eq. emissions and energy consumption, the use of these materials also alters the total emissions of pollutants throughout the entire life cycle.

Index terms – Life cycle assessment (LCA), Life cycle inventory (LCI), Environmental impacts, Construction materials