

Primljen / Received: 15.11.2021.

Ispravljen / Corrected: 1.9.2022.

Prihvaćen / Accepted: 27.1.2023.

Dostupno online / Available online: 10.4.2023.

Varijante određivanja ugljičnog otiska građevinske proizvodnje

Autori:

Doc.dr.sc. **Zdenek Krejza**, dipl.ing.građ.Tehnološko sveučilište u Brnu, Republika Češka
Građevinski fakultet
krejza.z@fce.vutbr.czDoc.dr.sc. **Gabriela Kocourkova**, dipl.ing.građ.Tehnološko sveučilište u Brnu, Republika Češka
Građevinski fakultet
kocourkova.g@fce.vutbr.cz

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Lucie Vankova**, dipl.ing.građ.Tehnološko sveučilište u Brnu, Republika Češka
Građevinski fakultet
vankova.l@fce.vutbr.cz**Michaela Sebestova**, dipl.ing.građ.Tehnološko sveučilište u Brnu, Republika Češka
Građevinski fakultet
sebestova.m@fce.vutbr.cz

Stručni rad

Zdenek Krejza, Gabriela Kocourkova, Lucie Vankova, Michaela Sebestova

Varijante određivanja ugljičnog otiska građevinske proizvodnje

Cilj ovog rada jest odrediti ugljični otisak gradnje po kubnom metru izgrađenog volumena zgrade. Za određivanje ugljičnog otiska odabrano je pet tipskih samostojećih kuća. One imaju ista materijalna svojstva, no razlikuju se po volumenu i izgrađenoj površini. Za određivanje ugljičnog otiska tijekom gradnje samostojećih kuća primijenjen je računalni program LCA (engl. *Life Cycle Assessment* - LCA). Na temelju tih izračuna određen je indikator proračuna po kubnom metru izgrađenog volumena građevine.

Ključne riječi:

indikator proračuna, izgrađeni volumen, ugljični otisak, gradnja, uporabni vijek

Professional paper

Zdenek Krejza, Gabriela Kocourkova, Lucie Vankova, Michaela Sebestova

Variants of determining the construction production carbon footprint

The aim of the paper is to quantify the construction production carbon footprint per m³ of the built-up volume of the building. In order to determine the carbon footprint, 5 typical detached houses were selected. The individual buildings have the same material-construction characteristics; however, they differ in the size of the built-up volume, i.e. also in the built-up area. The LCA software was used to quantify the carbon footprint during the production phase of the model houses project. A budget indicator per m³ of the built-up volume was determined based on these calculations.

Key words:

budget indicator, built-up volume, carbon footprint, construction production, life cycle

1. Uvod

U posljednje vrijeme ljudi su se prestali ponašati u skladu s prirodom i počeli su je značajno transformirati. Intenzivno iskorištavanje prirodnih resursa narušava ravnotežu na Zemlji i dovodi do brojnih ekoloških problema na globalnoj razini. Zrak, voda i tlo opterećeni su emisijama štetnih tvari koje negativno utječu na okoliš i zdravlje ljudi, a posljedica su građevinske proizvodnje.

Klimatske su promjene najvažniji ekološki, politički i ekonomski problem 21. stoljeća [1-3]. Pariški sporazum, kojim se želi smanjiti emisija stakleničkih plinova na način da porast temperature ne prijeđe 1,5 °C i tako održati globalno zagrijavanje na prihvatljivoj razini, usvojen je na Pariškoj klimatskoj konferenciji Ujedinjenih naroda 2015. godine [4, 5]. Sporazum obuhvaća države koje imaju najveću emisiju stakleničkih plinova, a njegovim stupanjem na snagu 2016. zamijenjen je dotadašnji Protokol iz Kyota [6-8]. Program UN-a za okoliš (engl. *The UN Environment Programme - UNEP*) objavljuje godišnje izvješće o stanju emisija štetnih plinova, a cilj tog programa jest postići dogovorene ciljeve uz najniže moguće troškove. Očekuje se da će se emisije svih stakleničkih plinova smanjiti, a ukupna globalna emisija CO₂ (42 GtCO₂e) neće biti premašena 2030. godine [9]. Najnovija procjena pokazuje kako je Europska unija na dobrom putu da dostigne taj cilj zahvaljujući napretku u korištenju obnovljivih izvora energije diljem Europe [10]. Prijelaz na klimatski neutralno gospodarstvo bit će moguć samo ako svi tome pridonese. Ključ za postizanje klimatske neutralnosti jest smanjenje zaliha energije [11, 12].

Na građevinsku industriju otpada oko 40 % svjetske godišnje potrošnje energije [13]. Upravo potrošnja energije značajno doprinosi globalnom zagrijavanju Zemlje [14]. Prve pasivne kuće počele su se graditi u Njemačkoj 1990-ih kako bi taj utjecaj smanjio, a arhitekti su uspjeli smanjiti potrošnju energije za deset puta u usporedbi s niskoenergetskim kućama [15-17]. Treba promovirati arhitekturu koja, osim zadovoljenja potreba, rješava pitanje zaštite i prevencije negativnih utjecaja na prirodu u cijelom procesu, od izgradnje preko korištenja do rušenja građevine i njezinog recikliranja [18]. Pojam održiva arhitektura znači očuvanje okoliša za buduće generacije. Ne bavi se samo uštedom energije, korištenjem zdravih materijala iz obnovljivih izvora [19, 20], već se bavi svim kontekstima kao što su zaštita kulturnih vrijednosti, upravljanje razvojem velikih naselja da budu funkcionalna i učinkovita te da ne ostavljaju veliki ekološki otisak [21].

Količina utjecaja ljudske aktivnosti na okoliš (osobito na klimatske promjene) naziva se ugljičnim otiskom [22]. To je mjera količine emisija stakleničkih plinova koje proizlaze iz određenih aktivnosti ili proizvoda [23]. Rezultati su prikazani u CO₂ ekvivalentima [24]. Ugljični otisak može se odrediti na razini države, grada, pojedinca, tvrtke ili proizvoda. Najvažniji staklenički plin jest ugljikov dioksid, čija je kemijska formula CO₂, a oslobađa se izgaranjem fosilnih goriva, poput sirove nafte, prirodnog plina, ugljena itd. [25, 26].

Građevinska industrija u posljednje vrijeme nastoji ublažiti svoj negativni utjecaj na okoliš [27]. Građevinska industrija jedan je od najvećih svjetskih potrošača prirodnih resursa [23]. Značajno doprinosi proizvodnji stakleničkih plinova u svim fazama, od izgradnje, održavanja pa do rušenja građevina [28]. Stoga je osmišljena procjena zgrada i njihovo ekološko certificiranje.

Brojne su mogućnosti i načini smanjenja emisija CO₂ tijekom uporabnog vijeka građevine, od faze građenja, održavanja pa sve do rušenja [29]. Građevinska proizvodnja predstavlja skup brojnih proizvoda i radova s dugim trajanjem, pri čemu faza održavanja čini glavni dio uporabnog vijeka građevine. Već se u fazi projektiranja mogu uzeti u obzir emisije građevnih materijala i njihov vijek trajanja [30, 31].

Cilj istraživanja opisanog u ovom radu jest utvrditi ugljični otisak po jedinici indikatora proračuna, osobito u fazi proizvodnje građevnoga materijala i u fazi izgradnje kuća. Izračun ugljičnog otiska uglavnom uzima u obzir utjecaj uporabnog vijeka materijala koji se koristi u gradnji.

2. Metodologija

Globalno zatopljenje odnosi se na pojavu dugotrajnog porasta prosječne površinske temperature Zemlje, što uzrokuje klimatske promjene poput otapanja leda, podizanja razine mora, promjene količine oborina te sve češćih ekstremnih vremenskih uvjeta poput suša, poplava i drugih [32, 33]. Globalno zatopljenje uzrokovano je sve većim koncentracijama stakleničkih plinova u atmosferi, koji pojačavaju učinak staklenika [34, 35].

Potencijal globalnog zatopljenja pokazuje koliko topline staklenički plin zadržava u atmosferi [36]. Određuje se u ekvivalentima ugljičnog dioksida, mjeri se kg CO₂, što je ekvivalent CO₂e (potencijal globalnog zagrijavanja - GWP), a obuhvaća emisije tvari [37, 38]. Ekvivalent znači to da se ne radi samo o emisijama ugljičnog dioksida, već i o emisijama drugih stakleničkih plinova (metan, dušikov oksid, sumporov heksafluorid, freoni i haloni) [39]. Njihove emisije se prikazuju kao ugljični otisak [40]. Dakle, ugljični otisak je mjera utjecaja ljudske aktivnosti na okoliš i posredni je pokazatelj potrošnje energije, proizvoda i usluga [41, 42].

Za proračun i modeliranje trajanja proizvoda primjenjuju se različiti specijalizirani računalni programi i baze podataka [43]. U ovom istraživanju primijenjen je profesionalni računalni program *One Click LCA* koji je razvila tvrtka Bionova. Program sadrži različite izvore podataka iz cijelog svijeta [44]. Za potrebe izračuna velika je većina podataka preuzeta je baza podataka Cenia i Ökobau.dat, jer sadrže najviše podataka o građevnim materijalima koji se obično koriste u srednjoj Europi. Računalni program pokriva sve faze uporabnog vijeka građevine. Razlikuje faze proizvodnje, izgradnje, korištenja građevine, operativnu energiju i rušenje građevine [45]. Sustav LCA (engl. *life cycle assesment* - LCA) odabran je za izračun ugljičnog otiska, dok sami računalni program omogućuje detaljnije procjene, kao što su *BREAMM Mat* ili *CML Life Cycle Cost* [46].

Računalni program *One Click LCA* omogućuje prikaz podataka prema stavkama, skupinama i podskupinama materijala koji

najviše doprinose određenoj kategoriji utjecaja. Omogućuje procjenu udjela pojedinačnih materijala ili elemenata konstrukcije i ukupnog utjecaja projekta na okoliš. Računalni program pruža različite indikatore utjecaja na okoliš: potencijal globalnog zagrijavanja (kg CO₂ e), potencijal zakiseljavanja (kg SO₂ e), potencijal eutrofikacije (kg PO₄ e), potencijal oštećenja ozona (kg CFC-11e), potencijal fotokemijskog stvaranja ozona (kg Eten), ukupnu potrošnju primarne energije (MJ), potencijal abiotskog iscrpljivanja (kg Sb e) i druge. Iako su svi navedeni indikatori utjecaja važni za procjenu uporabnog vijeka, u ovom istraživanju posebno je razmatran ugljični otisak kuća, odnosno potencijal globalnog zatopljenja, koji se izražava u jedinicama kg CO₂ ili t CO₂ [41].

Svrha istraživanja bila je odrediti prosječnu količinu ugljičnog otiska po jedinici indikatora proračuna [47]. Određivanje ugljičnog otiska po jedinici indikatora proračuna može se odnositi na jedinicu izgrađenog volumena ili pojedini izgrađene površine pojedine građevine. Češka nacionalna klasifikacija: Jedinствena klasifikacija zgrada i građevinski radovi u prirodi proizvodnje (JKSO) odabrana je za određivanje količine ugljičnog otiska [48, 49]. Ta klasifikacija razvrstava građevine prema njihovim tehničkim svojstvima i karakteristikama materijala, za razliku od Međunarodne klasifikacije vrsta konstrukcija (CC) koja razvrstava građevine prema načinu uporabe [50].

3. Rezultati i rasprava

Računalni program *One Click* LCA razmatra uporabni vijek građevina u nekoliko faza (tablica 1.), prema LEED metodologiji koja definira faze uporabnog vijeka (A1-A3, A4, B1-B5 i C1-C4), tj. "od kolijevke do groba". Model "od kolijevke do groba" obuhvaća sve faze, od vađenja sirovina, proizvodnje materijala, transporta, ugradnje, održavanja tijekom uporabljivosti građevine do faze njenog uklanjanja. Računalni program utvrđuje i potencijalna opterećenja izvan tog sustava; međutim, ne primjenjuje ih u izračunu.

One Click LCA alat za procjenu uporabnog vijeka zgrade obuhvaća sve prije navedene procese i utjecaje u proračunu. Kako bi se odredio ugljični otisak po jedinici indikatora proračuna, potrebno je odrediti prve dvije faze, tj. fazu proizvodnje (A1-A3)

i fazu gradnje (A4-A5), jer su te dvije faze najznačajnije u ovom istraživanju. Potrošnja energije i vode, koja ima najveći utjecaj na globalno zatopljenje ovisi, primjerice, o vrsti grijanja zgrade, pa nije dovoljno precizna za procjenu ukupnog ugljičnog otiska. Da bi se odredio ugljični otisak građevine, potrebni su troškovnik, tehničko izvješće i projekt građevine kako bi se mogla odrediti količina materijala. Odabrano je pet kuća za određivanje ugljičnog otiska i utjecaja građevinske proizvodnje na okoliš. Sve kuće bile su samostojeće, bez podruma, na betonskim temeljnim trakama, s nosivim sustavom od opeke, drvenom krovnom konstrukcijom i krovnim pokrovom od crijepa. Odabrane kuće odgovaraju JKSO klasifikaciji, (poglavlje: Kuće za stanovanje - obiteljske kuće; izolirane; zidane od opeke ili blokova; novogradnja - 803 61 11). Najprije je trebalo utvrditi pojedinačne materijale za određivanje ugljičnog otiska. Tražen je odgovarajući proizvod proizvođača ili proizvod koji je najslabiji tome. Moguće je koristiti opće podatke o proizvodu u slučaju da se konkretni proizvod ne može pronaći, pa se umjesto njega može koristiti proizvod slične kvalitete. Ti opći materijali mogu se pronaći u njemačkoj bazi podataka Öekobau.dat. Međutim, svaki materijal ima svoj vijek trajanja, koji je potreban za izračun utjecaja koji proizlaze iz njegove zamjene ili uklanjanja u kategoriji B4-B5.

U postavkama programa *One Click* LCA može se zadati ciljani uporabni vijek materijala koji se automatski primjenjuje za svaki materijal. Prema potrebi, ta se vrijednost može unijeti u program ručno, no takva mogućnost nije primijenjena u ovom istraživanju. Isto vrijedi i za transport materijala. Način transporta i udaljenost od skladišta građevnog materijala do gradilišta koriste se za svaki materijal u pojedinoj kući. Udaljenosti se automatski definiraju pomoću faktora kompenzacije. Budući da se kuće nalaze u Republici Češkoj, odabran je lokalni faktor kompenzacije koji prilagođava utjecaje proizvodnje materijala uvjetima te države. Stoga prema zadanim postavkama računalni program određuje lokaciju materijala, koja je ista za sve ostale kuće, kako bi se izbjegla zabuna.

Godišnja potrošnja energije svake kuće određena je na temelju energetske certifikata zgrade. Izvor električne energije je određen prema normi Bionova EN15804 (električna energija, Češka). Potencijal globalnog zagrijavanja bio je 0,59 kg CO₂ e/kWh.

Tablica 1. Faze uporabnog vijeka građevine, prema [9]

A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
Faza proizvoda	Faza akcijske primjene	Operativna faza	Faza kraja uporabnog vijeka	Prednosti i teret izvan sustava
A1 – Vađenje sirovina A2 – Prijevoz A3 – Proizvodnja	A4 – Prijevoz do gradilišta A5 – Ugradnja	B1 – Upotreba B2 – Održavanje B3 – Popravak B4 – Zamjena B5 – Obnova B6 – Potrošnja energije (operativna) B7 – Potrošnja vode (operativna)	C1 – Rušenje C2 – Prijevoz C3 – Procesuiranje otpada C4 – Odlaganje otpada	Ponovna upotreba / obnova / recikliranje

Tablica 2. Svojstva ispitanih kuća [rad autora]

Oznaka kuće	Izgrađeni volumen [m ³]	Izgrađena površina [m ²]	Površina kata [m ²]	Potrošnja energije [MWh/godišnje]	Potrošnja vode [m ³ /godišnje]
Kuća 1	457,60	102,06	78,66	12,40	144,00
Kuća 2	899,82	196,78	147,94	17,80	144,00
Kuća 3	591,53	121,37	95,54	13,30	144,00
Kuća 4	523,53	81,88	120,85	11,80	144,00
Kuća 5	604,77	129,36	101,41	13,70	144,00

Nadalje, tablica 2. prikazuje vrijednosti godišnje potrošnje energije u MWh/godini za svaku kuću. Podaci su preuzeti iz energetskih certifikata koji su dostavljeni s projektnom dokumentacijom kuća.

Godišnja potrošnja vode jednaka je za svih pet promatranih kuća, a odnosi se na godišnju potrošnju vode četveročlane obitelji koja živi u kući. Prosječna godišnja potrošnja vode prema Uredbi br. 120/2011 Coll iznosi 35 m³ po stanovniku kuće, a dodatni 1 m³ se uzima u obzir zbog potrošnje vode za čišćenje okoliša kuće. Stoga ukupna godišnja potrošnja vode po stanovniku iznosi 36 m³, a za četveročlanu obitelj 144 m³ godišnje.

U računalnom programu *One Click LCA* moguće je uzeti u obzir i utjecaje povezane s radovima na gradilištu korištenjem podataka specifičnih za projekt ili prosječnih utjecaja klimatskih zona. Za potrebe ovog istraživanja primjenjen je scenarij gradilišta koji odgovara prosjecima klimatskog pojasa u Češkoj (umjereno kontinentalna klima). Odabrana je odgovarajuća klimatska zona i izgrađenost objekta u m². Prosjeci se odnose na prosječnu potrošnju električne energije, goriva i utjecaj proizvodnje otpada na pojedine klimatske zone. Očekivana prosječna proizvodnja građevinskog otpada za umjereno kontinentalnu klimatsku zonu bila je 5 kg/m², očekivana potrošnja električne energije 37 kWh/m², a očekivana ukupna potrošnja dizelskog goriva 4,5 l/m². Potencijal globalnog zagrijavanja (A1-A3) iznosio je 30,34 kg CO₂ e/m² [29].

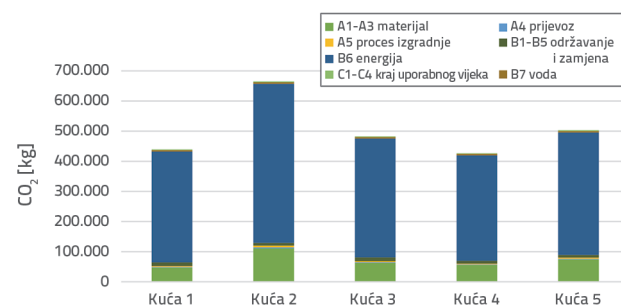
U računalnom programu se određuje uporabni vijek građevine sa svim utjecajima izračunanim za to razdoblje. Granice uporabnog vijeka u programu iznose između 0 i 80 godina. Iako uporabni vijek kuće iznosi oko sto godina, u istraživanju je uzet u obzir uporabni vijek od 50 godina, što je bilo unutar dopuštenih vrijednosti koje podržava program. Za ovo istraživanje bilo je potrebno uzeti u obzir proizvode i faze gradnje, koje nisu pod utjecajem uporabnog vijeka građevine.

Trebalo je odrediti ugljični otisak u kg CO₂ i izgrađeni volumen, odnosno izgrađenu površinu za svaku kuću. Udio ugljičnog otiska i izgrađenog volumena ili izgrađene površine određen je novim indikatorom, čija je mjerna jedinica kg CO₂/m³, odnosno CO₂/m². Taj podatak može poslužiti da se unaprijed odredi ugljični otisak zgrade, tj. kako izgradnja utječe na okoliš.

Taj se pokazatelj može primijeniti za brzo i jednostavno određivanje okvirne količine ugljičnog otiska. Osnovni princip je određivanje broja tehničkih jedinica, npr. po kubnom metru

izgrađenog volumena ili četvornom metru izgrađene površine. Samostojeće kuće odabrane su kao uzorci u ovom istraživanju kako bi se odredio ugljični otisak po jedinici mjere. Pojedinačne zgrade razlikuju se po izgrađenom volumenu, odnosno izgrađenoj površini. Međutim, nisu se pojavile nikakve ekstremne vrijednosti koje bi se morale isključiti zbog nepouzdanosti rezultata.

Tablice i slike prikazane u nastavku rada kvantificiraju utjecaje na okoliš tijekom cijelog uporabnog vijeka svake samostojeće kuće. Najveći dio ugljičnog otiska otpada na potrošnju energije, a zatim na građevne materijale. Međutim, samo prve dvije faze primjenjuju se za izračun ugljičnog otiska po jedinici indikatora proračuna. To su faza proizvodnje građevnih proizvoda, koja obuhvaća vađenje sirovina, transport i samu proizvodnju materijala, i faza izgradnje, koja obuhvaća transport do gradilišta i njihovu ugradnju. Cilj istraživanja bio je odrediti ugljični otisak po jedinici indikatora proračuna.

Slika 1. Procjena ugljičnog otiska tijekom uporabljivosti građevine u kg CO₂ [rad autora]

Grafikon (slika 1.) prikazuje ugljični otisak kuća potreban za analizu indikatora proračuna. Jasno se vidi da izvor i potrošnja energije u kućama i porijeklo energije imaju najveći utjecaj na stvaranje ugljičnog otiska. Stoga su samo prve faze (A1-A5) cijelog uporabnog vijeka zgrade uzete u obzir za određivanje indikatora proračuna (slika 2.). Slika 2. prikazuje faze koje su odabrane za određivanje ugljičnog otiska po jedinici izgradnje (građevni materijal, transport i njegova ugradnja). Sav građevni materijal koji je korišten za izgradnju kuće izdvojen je iz proračuna. Tablica 3. prikazuje popis uvezenih materijala za kuću br. 3. Na isti način priređeni su popisi materijala za preostale četiri kuće.

Tablica 3. Popis građevnih materijala za kuću br. 3 [rad autora]

Element konstrukcije	Materijal	Količina	Jedinica	Debljina [mm]	Napomena
1	temelj	lijevani beton	17 799	m ³	beton C 20/25 X 0 X C2 frakcija agregata 0/22 (temeljna ploča)
2	temelj	drvena građa	17 968	m ²	oplata temeljne ploče
3	temelj	armatura	413	kg	zavarene mreže Kari 150 x 150 D 5 mm
4	temelj	lijevani beton	26 548	m ³	betonske temeljne trake i stope C12/15 frakcija 0/22
5	temelj	ziđe, blokovi ZTB	31,6	m ²	300 izgubljena oplata za zidanu betonsku ploču debljine 300 mm
6	temelj	lijevani beton	8 557	m ³	beton C 16/20 X0, XC1 frakcija agregata 0/22
7	temelj	armatura	468	kg	rebrasta armatura BSt 5005
8	unutarnji zid	ziđe, mljevena opeka	46,65	m ²	250 mljevena opeka debljine 250 mm
9	vanjski zid	ziđe, mljevena opeka	100,28	m ²	440 termoizolacija od mljevene opeke debljine 440 mm
10	vanjski zid	ziđe, mljevena opeka	9,88	m ²	380 termoizolacija od mljevene opeke debljine 380 mm
11	vanjski zid	žbuka	654	kg	suha mješavina za žbukanje
12	vanjski zid	nadvoj, keramika	1,211875	m ³	keramički premaz visokog sjaja
13	vanjski zid	polistiren EPS	8,88	m ²	80 EPS toplinska izolacija između nadvoja
14	vanjski zid	lijevani beton	281	m ³	nadvoj od armiranog betona C 20/25 X 0 X C2
15	vanjski zid	armatura	236	kg	ojačanje nadvoja, čelični profil
16	vanjski zid	drvena daska	53	m ³	oplata za nadvoj
17	unutarnji zid	ziđe, mljevena opeka	38,85	m ²	115 pregrada od mljevene opeke debljine 115 mm
18	unutarnji zid	ziđe, blokovi od porobetona	3,96	m ²	150 nadvratnik od porobetonkih blokova debljine 150 mm
19	horizontalne konstrukcije	lijevani beton	3,57	m ³	armaturne trake i armirani beton cc, C 16/20
20	horizontalne konstrukcije	armatura	513,13	kg	ojačanje s armaturnim trakama i oblogama s dodatkom čelika BSt 5005
21	ploča	keramički premaz	105 751	m ²	190 keramički premaz
22	ploča	lijevani beton	9 688	m ³	beton C20/25
23	ploča	armatura	681	kg	zavarene mreže Kari debljine 150x150 D 5 mm
24	ploča	anhidrit	95,6	m ²	60 samorazlivajući estrih anhidrit C20
25	ploča	PE folija	95,6	m ²	razdjelni sloj od PE folije
26	ploča	PE traka	9,6	m ²	ekspandirajuća pjenasta traka debljine 80 mm
27	vanjski zid	polistiren, XPS	49 613	m ²	60 izolacijska ploča debljine 60 mm
28	završna obrada	prskanje cementa	1139,3	kg	cementni sprej, suha smjesa za žbuku
29	završna obrada	tkanina od stakloplastike	155	m ²	vanjski zidovi obloženi mrežom od stakloplastike, tkanina od stakloplastike za ETIC TICS fasade 162 g/m ²
30	završna obrada	estrih, cement	651	kg	suho ljepilo i mješavina cementa za estrih
31	završna obrada	žbuka, vanjska termoizolacija	1515,125	kg	žbuka za toplinsku izolaciju, suha mješavina za termoizolacijsku žbuku
32	završna obrada	žbuka, vanjska, silikonsko silikatna	346	kg	završna silikatno-silikonska žbuka
33	temelj	premaz, penetrirajući	19	kg	akrilna smjesa za temeljni premaz
34	temelj	premaz, penetrirajući	46	kg	hidroizolacija od vlage u tlu, penetrirajući premaz za asfalt
35	temelj	asfaltna traka	182,62	m ²	zaštita od vlage u tlu, asfaltna traka, topljivi modificirani SBS debljine 4 mm s oblogom od staklene tkanine, mineralni posip

Tablica 3. Popis građevnih materijala za kuću br. 3 [rad autora] - nastavak

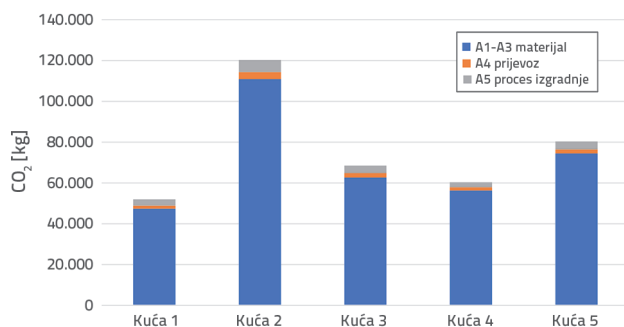
Element konstrukcije	Materijal	Količina	Jedinica	Debljina [mm]	Napomena	
36	krov	premaz, penetrirajući	34	kg	zaštita od vlage u tlu, penetrirajući premaz za asfalt	
37	krov	asfaltna traka	130 548	m ²	zaštita od vlage u tlu, asfaltna traka debljine 4 mm fuzijski modificirani SBS s oblogom od staklene tkanine, mineralni posip	
38	završna obrada	tkanina od staklenih vlakana	27,5	m ²	oblaganje unutarnjih zidova mrežom od staklenih vlakana, tkanina od staklenih vlakana za ETICS 162 g/m ²	
39	završna obrada	estrih, cement	115,5	kg	suho ljepilo i mješavina cementa	
40	završna obrada	žbuka za unutarnje zidove, vapneni cement	6075	kg	fina vapneno cementna žbuka za unutarnje štukature	
41	krov	polistiren, mineral	234,6	m ²	140	univerzalna izolacija od mineralne vune debljine 140 mm
42	ploča	polistiren, EPS	97 512	m ²	70	oplniska izolacija EPS siva
43	temelj	polistiren, XPS	21	m ²	40	XPS toplinska izolacija, debljine 40 mm
44	krov	drvena građa, drvene grede	6 642	m ³		krovni nosači
45	krov	drvena građa, smreka	3,52	m ³		krovnna oplata od crnogorične smreke debljine 18-32 mm
46	krov	drvena građa, smreka	1 596	m ³		letvice, drvene letvice
47	krov	podna obloga, smreka	33,11	m ²		podne obloge
48	krov	fungicidni premaz	19,2	kg		premaz za drvo protiv insekata
49	krov	pričvršćivači	73,32	kg		pričvršćivači krovnih nosača, oplata, letvica
50	drugo	lim, Pz	4,44	m ²	0,6	limarija, Pz limovi debljine do 400 mm
51	drugo	lim,, Pz	9,9	m ²	0,6	krovni žlijeb, debljine 330 mm
52	drugo	lim, Pz	4,7728	m ²	0,6	ovalni odvod
53	krov	reljefna kanalica	168,86	m ²		keramička pločica s utomom
54	krov	PES/PR folija	184	m ²		zaštitna hidroizolacijska folija
55	horizontalne konstrukcije	penetrirajući premaz	126,6	kg		penetrirajući premaz za podove
56	horizontalne konstrukcije	cementno ljepilo	101,28	kg		fleksibilno cementno ljepilo
57	horizontalne konstrukcije	podne keramičke pločice	24 776	m ²	8	glatke keramičke pločice za pod
58	horizontalne konstrukcije	estrih, hidroizolacija	16,2	kg		izolacija zaštitnog sloja ispod pločica, hidroizolacijski estrih
59	horizontalne konstrukcije	podna obloga, laminat	78 225	m ²	8	laminat debljine 8 mm
60	horizontalne konstrukcije	PE podloga	74,5	v		izolacijska podloga od PE pjene s parnom branom
61	obrada vertikalnih površina	penetrirajući premaz	270	kg		penetrirajući premaz za zidove
62	obrada vertikalnih površina	estrih, hidroizolacija	15,53	kg		izolacija sloja estriha ispod pločica
63	obrada vertikalnih površina	smjesa za fugiranje	24	kg		cementna pasta za fugiranje
64	obrada vertikalnih površina	zidne keramičke pločice	44	m ²	8	keramičke pločice
65	obrada vertikalnih površina	zidne obloge od opeke	50	m ²	14	zidne obloge od opeke
66	završna obrada	boja otporna na habanje	100,1	kg		boja za zidove

Iz slike 2. i tablice 4. vidljivo je da kuća broj 2 ima najveći ugljični otisak, 120,3 tone CO₂. To je najveća kuća po izgrađenom volumenu odnosno izgrađenoj površini, i po najvećoj količini

ugrađenog materijala. Prema rezultatima prikazanim u tablici 5., veličina kuće nema značajan utjecaj na određivanje rezultata, stoga se taj podatak može koristiti u proračunu.

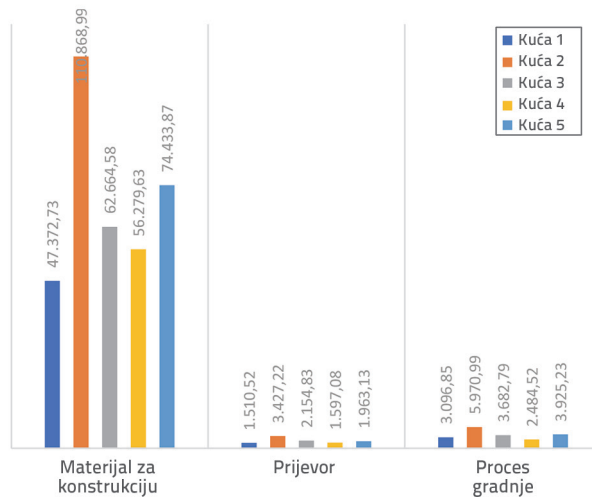
Tablica 4. Procjena faza uporabnog vijeka A1-A5 u kg CO₂ [rad autora]

Broj kuće	Materijal [kg CO ₂]	Transport [kg CO ₂]	Proces izgradnje [kg CO ₂]	Ukupno [kg CO ₂]
Kuća 1	47 372,73	1 510,52	3 096,85	51 980,10
Kuća 2	110 868,99	3 427,22	5 970,99	120 267,20
Kuća 3	62 664,58	2 154,83	3 682,79	68 502,20
Kuća 4	56 279,63	1 597,08	2 484,52	60 361,23
Kuća 5	74 433,87	1 963,13	3 925,23	80 322,23


 Slika 2. Procjena faza uporabnog vijeka A1-A5 u kg CO₂ [rad autora]

Čini se da građevni materijali nemaju najznačajniji utjecaj na stvaranje ugljičnog otiska kao što se može vidjeti u tablici 4. i na slici 3. Manji utjecaj od materijala ima njihova ugradnja, a najmanji utjecaj na ugljični otisak ima transport materijala. Kao što je spomenuto, najveći proizvođač ugljičnog otiska je kuća broj 2, sa 120,27 tona CO₂. S druge strane, najmanji ugljični otisak ima kuća broj 1, a iznosi 51,98 t CO₂.

Tablica 5. prikazuje određivanje ugljičnog otiska po jedinici indikatora proračuna. Izračunani su izgrađeni volumen i izgrađena površina pojedinih kuća te njihov ugljični otisak u fazama uporabnog vijeka kuća A1-A5 te su određeni indikatori proizvodnje.


 Slika 3. Ugljični otisak pojedinih kuća u fazama A1-A5 u kg CO₂ [rad autora]

Određivanje ugljičnog otiska po jedinici indikatora proračuna može biti u korelaciji s jedinicom izgrađenog volumena ili izgrađene površine pojedinih kuća. Autori ovog rada pretpostavljaju da je određivanje ugljičnog otiska po kubnom metru izgrađenog volumena preciznije. To se može vidjeti u tablici 5., gdje su određeni ponderirani aritmetički prosjek

Tablica 5. Ponderirana aritmetička sredina po izgrađenom volumenu/izgrađenoj površini [rad autora]

Broj kuće	Kuća 1	Kuća 2	Kuća 3	Kuća 4	Kuća 5
Ugljični otisak [kg CO ₂]	51 980,10	120 267,20	68 502,20	60 361,23	80 322,23
Izgrađeni volumen [m ³]	457,60	899,82	591,53	523,53	604,77
Pokazatelj – ugljični otisak/izgrađeni volumen [kg CO ₂ /m ³]	113,59	133,66	115,81	115,30	132,81
Ponderirani aritmetički prosjek [kg CO ₂ /m ³]	122,25				
Odstupanje od prosjeka	8,66	-11,41	6,44	6,88	-10,57
Izgrađena površina [m ²]	102,06	196,78	121,37	81,88	129,36
Pokazatelj – ugljični otisak /izgrađena površina [kg CO ₂ /m ²]	509,31	611,18	564,41	737,19	620,92
Ponderirani aritmetički prosjek [kg CO ₂ /m ²]	608,60				
Odstupanje od prosjeka	99,29	-2,58	44,19	128,59	12,32

izgrađenog volumena od 122,25 kg CO₂/m³, ponderirani aritmetički prosjek izgrađene površine od 608,60 kg CO₂/m² i ugljični otisak pojedinačnih kuća. Redak u tablici 5. pod nazivom "Odstupanje od prosjeka" dokazuje da je određivanje ugljičnog otiska po proizvodnoj jedinici izgrađene površine kuća točnije. Ugljični otisak je trenutačno na prilično visokim razinama, pa postoji tendencija njegova smanjenja. Jedna od preporuka za smanjenje ugljičnog otiska u fazi proizvodnje materijala jest korištenje lokalnih materijala i sirovina kako bi se smanjila udaljenost prijevoza sirovina za proizvodnju materijala. Druga mogućnost smanjenja ugljičnog otiska u fazi izgradnje jest korištenje materijala koji imaju niži ugljični otisak u proizvodnji uz njihovo zadržavanje, ili čak boljih tehničkih i fizikalnih svojstava [51]. Osim toga, preporuka je povećati primjenu načela kružnog gospodarstva, i motivirati proizvođače na mijenjanje ili prilagođavanje tehnoloških procesa u proizvodnji materijala.

4. Zaključak

Cilj je istraživanja opisanog u ovom radu utvrditi ugljični otisak građevinske proizvodnje po jedinici indikatora proračuna te usporediti kuće koje su izgrađene od različitih materijala. Posljednjih godina veliki je naglasak na zaštiti okoliša, a građevinska industrija značajno doprinosi globalnom zatopljenju. Stoga je težište ovog istraživanja na pronalasku mogućnosti za

jednostavnijim određivanjem ugljičnog otiska zgrada. Utjecaji građevina na okoliš uglavnom se odnose na njihov energetski intenzitet, primjerice energetsku učinkovitost. Što je veća potrošnja energije zgrade, veći je njezin utjecaj na okoliš. Moguće je smanjiti taj utjecaj korištenjem obnovljivih (zelenih) izvora energije, primjenom češkog nacionalnog programa *New Green Savings Programme*. Kućanstva mogu ostvariti subvencije za zamjenu bojlera, npr. za dizalicu topline, kotao na biomasu ili plinski kondenzacijski kotao. Program također podržava izgradnju novih niskoenergetskih zgrada.

Za potrebe istraživanja opisanog u radu odabrano je pet samostojećih kuća iste proizvodne tehnologije, a njihov izgrađeni volumen i ugljični otisak izračunani su u računalnom programu One Click LCA. Potom je pomoću ponderirane aritmetičke sredine određena količina ugljičnog otiska po metru kubnom izgrađenog volumena (122,25 kg CO₂/m³). Ugljični otisak određen je u fazi proizvodnje građevinskih materijala, koja obuhvaća vađenje sirovina, njihov transport i proizvodnju materijala, i u fazi izgradnje kuća, koja obuhvaća transport materijala do gradilišta i njegovu ugradnju.

Zahvala

Ovaj je rad priređen u sklopu projekta specifičnog istraživanja na Tehnološkom sveučilištu u Brnu br. FAST-S-22-7970 "Ekonomski i upravljački procesi u građevinarstvu".

LITERATURA

- [1] Koutroulis, G., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I.N., Jacob, D.: Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece, *Journal of hydrology (Amsterdam)*, 479 (2013), pp. 146-158
- [2] Nakicenovic, N., Lempert, R.J., Janetos, A.C.: A Framework for the Development of New Socio-economic Scenarios for Climate Change Research: Introductory Essay, *Climatic change*, 122 (2014) 3, pp. 351-361
- [3] Ren, X., Weitzel, M., O'neill, B.C., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., Balistreri, E.J., Dalton, M.: Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS), *Climatic change*, 146 (2018) 3, pp. 517-531
- [4] Wang F., Zhang, J.: Heat stress response to national-committed emission reductions under the paris agreement, *International journal of environmental research and public health*, 16 (2019) 12, pp. 2202
- [5] Tanaka, K., O'neill, B.C.: The Paris Agreement zero-emissions goal is not always consistent with the 1.5 °C and 2 °C temperature targets, *Nature climate change*, 8 (2018) 4, pp. 319-324
- [6] Aakre, S.: The political feasibility of potent enforcement in a post-Kyoto climate agreement, *International environmental agreements: politics, law and economics*, 16 (2016) 1, pp. 145-159
- [7] Pandey C.L., Kurian, P.A.: The Media and the Major Emitters: Media Coverage of International Climate Change Policy, *Global environmental politics*, 17 (2017) 4, pp. 67-87
- [8] Ghazouani, A., Jebli, M.B., Shahzad, U.: Impacts of environmental taxes and technologies on greenhouse gas emissions: contextual evidence from leading emitter European countries, *Environmental science and pollution research international*, 28 (2021) 18, pp. 22758-22767
- [9] Hausfather, Z., Peters, G.P.: Emissions – the 'business as usual' story is misleading, *Nature (London)*, 577 (2020) 7792, pp. 618-620
- [10] Fontaras, G., Zacharof, N.G., Ciuffo, B.: Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions, *Progress in energy and combustion science*, 60 (2017), pp. 97-131
- [11] Baltar de Souza Leão, E., do Nascimento, L.F.M., de Andrade, J.C.S., Puppim de Oliveira, J. A.: Carbon accounting approaches and reporting gaps in urban emissions: An analysis of the Greenhouse Gas inventories and climate action plans in Brazilian cities, *Journal of cleaner production*, 245 (2020), p. 118930
- [12] State of the Union: Commission raises climate targets and proposes to reduce emissions by 2030 by 55 %. (In Czech). Czech Republic - European Commission [online], https://ec.europa.eu/czech-republic/news/200917_emissions_cs, 2020.
- [13] Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M., Orioli, A.: The role of the building sector for reducing energy consumption and greenhouse gases: An Italian case study, *Renewable energy*, 60 (2013), pp. 586-597

- [14] Pressley, P.N., Aziz, T.N., Decarolis, J.F., Barlaz, M.A., He, F., Li, F., Damgaard, A.: Municipal solid waste conversion to transportation fuels: a life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption, *Journal of cleaner production*, 70 (2014), pp. 145-153
- [15] Reda, F., Tuominen, P., Hedman, Å., Ibrahim, M.G.E.: Low-energy residential buildings in New Borg El Arab: Simulation and survey based energy assessment, *Energy and buildings*, 93 (2015), pp. 65-82
- [16] Liang, X., Wang, Y., Roskilly, T.: Reduce Household Energy Consumption Using Passive Methods, *Energy procedia*, 75 (2015), pp. 1335-1340
- [17] Tetley, U.Y.A., Dodoo, A., Gustavsson, L.: Design strategies and measures to minimise operation energy use for passive houses under different climate scenarios, *Energy efficiency*, 12 (2019) 1, pp. 299-313
- [18] Saito, O.: Future science-policy agendas and partnerships for building a sustainable society in harmony with nature, *Sustainability science*, 12 (2017) 6, pp. 895-899
- [19] Yazici, S., Tanacan, L.: Material-based computational design (MCD) in sustainable architecture, *Journal of Building Engineering*, 32 (2020), pp. 101543
- [20] Dodoo, A.: Lifecycle Impacts of Structural Frame Materials for Multi-storey Building Systems, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 24 (2019) 1, pp. 17-28
- [21] Piekienė, N., Stančius, A.: Aspects for Evaluation of the Effect of Natural and Artificial Bodies of Water to Protected Areas' Landscape, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 13 (2015) 4, pp. 12-17
- [22] Carbon Footprint Analysis, *International journal of climate change strategies and management*, 5 (2013) 2, pp. 621-627
- [23] Wu, P., Xia, B., Zhao, X.: The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete – A review, *Renewable & sustainable energy reviews*, 37 (2014), pp. 360-369
- [24] Arto I., Dietzenbacher, E.: Drivers of the Growth in Global Greenhouse Gas Emissions, *Environmental science & technology*, 48 (2014) 10, pp. 5388-5394
- [25] Sekiya A., Okamoto, S.: Evaluation of carbon dioxide equivalent values for greenhouse gases: CEWN as a new indicator replacing GWP, *Journal of fluorine chemistry*, 131 (2010) 3, pp. 364-368
- [26] Liu, X., Wang, X., Licht, G., Licht, S.: Transformation of the greenhouse gas carbon dioxide to graphene, *Journal of CO2 utilization*, 36 (2020), pp. 288-294
- [27] Babak, N.A.: Transport Construction Negative Impact on the Environment, *Procedia engineering*, 189 (2017), pp. 867-873
- [28] Ji, Y., Li, K., Liu, G., Shrestha, A., Jing, J.: Comparing greenhouse gas emissions of precast in-situ and conventional construction methods, *Journal of cleaner production*, 173 (2018), pp. 124-134
- [29] Chou, J.S., Yeh, K.C.: Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction, *Journal of cleaner production*, 101 (2015), pp. 137-147
- [30] Seo S., Hwang, Y.: Estimation of CO₂ Emissions in Life Cycle of Residential Buildings, *Journal of construction engineering and management*, 127 (2001) 5, pp. 414-418
- [31] Wu, H.J., Yuan, Z.W., Zhang, L., Bi, J.: Life cycle energy consumption and CO₂ emission of an office building in China, *The international journal of life cycle assessment*, 17 (2012) 2, pp. 105-118
- [32] Peñuelas, J., Sardans, J., Estiarte, M., et al.: Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere, *Global change biology*, 19 (2013) 8, pp. 2303-2338
- [33] Winton, M., Griffies, S. M., Samuels, B.L., Sarmiento, J.L., Licher, T.L.F.: Connecting Changing Ocean Circulation with Changing Climate, *Journal of climate*, 26 (2013) 7, pp. 2268-2278
- [34] Huntingford, C., Jones, P.D., Livina, V.N., Lenton, T.M., Cox, P.M.: No increase in global temperature variability despite changing regional patterns, *Nature (London)*, 500 (2013) 7462, pp. 327-330
- [35] Climate change and global warming, TZB-info: <https://oze.tzb-info.cz/klimaticke-zmeny/20816-klimaticke-zmeny-a-globalnioteplivani>, 2020.
- [36] Brown P.T., Caldeira, K.: Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget, *Nature London*, 552 (2017) 7683, pp. 45-50
- [37] Cook, B.I., Smerdon, J.E., Seager, R., Coats, S.: Global warming and 21st century drying, *Climate dynamics*, 43 (2014) 9, pp. 2607-2627
- [38] Tian, H., Ciais, C., Lu, P., Michalak, A.M. et al.: The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere, *Nature (London)*, 531 (2016) 7593, pp. 225-228
- [39] van Groenigen, K.J., Osenberg, C.W., Hungate, B.A.: Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂, *Nature (London)*, 475 (2011) 7355, pp. 214-U121
- [40] Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., et al.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 degrees C, *Nature (London)*, 458 (2009) 7242, pp. 1158-U96
- [41] Impact Assessment Categories, One Click LCA, <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015036980-Impact-Assessment-Categories>, 2020.
- [42] Envimat.cz – LCA, <http://www.envimat.cz/metodika/lca/>, 2020.
- [43] Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., et al.: Recent developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, 91 (2009) 1, pp. 1-21
- [44] Calculate your environmental impacts in minutes, <https://www.oneclicklca.com/>, 2020.
- [45] Speck, R., Selke, S., Auras, R., Fitzsimmons, J.: Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results, *Journal of industrial ecology*, 20 (2016) 1, pp. 18-28
- [46] Peng, W., Huang, H. -zhong, Li, Y., Zuo, M.J., Xie, M.: Life cycle reliability assessment of new products-A Bayesian model updating approach, *Reliability engineering & system safety*, 112 (2013), pp. 109-119
- [47] URS Praha: Indicators of the average budget price for specific and special-purpose unit, 2018., ISBN 978-80-7369-746-4
- [48] Uniform classification of buildings: České stavební standardy, RTS a.s., [http://www.stavebnistandardy.cz/default.asp?Typ=1&ID=8&Pop=0&IDm=8613339&Menu=Jednotn % E1 % 20klasifikace % 20stavebn % EDch % 20objekt % F9 % 20\(JKSO\), 2020.](http://www.stavebnistandardy.cz/default.asp?Typ=1&ID=8&Pop=0&IDm=8613339&Menu=Jednotn%20%20klasifikace%20stavebn%20EDch%20objekt%20F9%20(JKSO),2020)
- [49] Classification of buildings: Cenová soustava ÚRS, ÚRS CZ a.s., <https://www.cs-urs.cz/tridniky-a-ciselniky/kso-jkso/>, 2020.
- [50] Classification of construction works CZ-CC, Czech statistical office, https://www.czso.cz/csu/czso/klasifikace_stavebnich_del_-cz_cc-, 2020.
- [51] Hertwich, E.G.: Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments, *Nature Geoscience*, 14 (2021) 3, pp. 151-155