

Pregled digitalnih alata za kružno graditeljstvo

Marina Džunić Matak¹, izv. prof. dr. sc. **Maja–Marija Nahod²**

¹marina.dzunic.matak@student.grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, maja.marija.nahod@grad.unizg.hr

Sažetak

Primjena principa kružne ekonomije u građevinskom sektoru predstavlja značajan potencijal. Digitalne tehnologije ključne su za tranziciju na kružno graditeljstvo. Ovaj rad istražuje zastupljenost komercijalnih digitalnih alata u znanstvenoj literaturi i daje kratki pregled digitalnih alata za praćenje principa kružne ekonomije u graditeljstvu. Izvršena je pretraga literature za 27 digitalnih alata u bazi "Web of science" i sastavljen je prikaz rezultata.

Ključne riječi: digitalni alati, kružno graditeljstvo, kružnost građevinskog sektora, pregled literature

Overview of the digital tools for circular construction

Abstract

The application of circular economy principles in the construction sector presents significant potential. Digital technologies are key to the transition toward circular construction. This paper explores the presence of commercial digital tools in scientific literature and provides a brief overview of digital tools for monitoring circular economy principles in construction. A literature review was conducted in the "Web of Science" database for 27 selected digital tools, and the results are presented

Key words: circular construction, circularity in construction sector, digital tools, literature review

1 Uvod

Kružna ekonomija označava sustav zatvorenih tokova dobara između dobave, korištenja i ponovne uporabe proizvoda [1], čime se napušta linearni model proizvodnje i otpada. Cilj je smanjiti potrebu za prirodnim resursima i emisije stakleničkih plinova [2]. Građevinski sektor ima ključnu ulogu u ovom prijelazu jer generira oko 25–35 % otpada i troši više od 50 % prirodnih resursa [3–6]. Iako su principi poput 3R (reduce, reuse, recycle) već prisutni u drugim sektorima, građevinarstvo se još uvijek dominantno oslanja na recikliranje [7]. Istraživanja pokazuju da uspješna implementacija kružnosti ne ovisi isključivo o tehnologiji, već o integraciji lanaca opskrbe, regulativi i troškovima [8, 9]. Literatura ističe potrebu za pouzdanim i strukturiranim podacima [10–12], a ključne prepreke su projektna orijentiranost, tržišni mehanizmi i složenost lanaca dobave [7, 13, 14]. Istovremeno se prepoznaje potreba za novim poslovnim modelima i digitalnim alatima [7, 15–18]. Praćenje kružnosti često se temelji na alatima za LCA ("Life cycle analysis") i indikatorima kao što su MCI ("Material Circularity Indicator") i CI ("Circularity Index"), iako još uvijek postoji jaz između analize kružnosti i analize cijelog opskrbnog lanca [19].

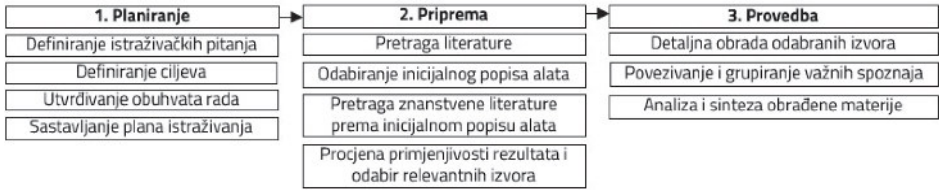
S obzirom na važnost digitalnih tehnologija za provedbu kružne ekonomije u građevinarstvu, ovaj rad ispituje prisutnost komercijalnih digitalnih alata u znanstvenoj literaturi. Također se daje pregled alata koji podržavaju praćenje principa kružnosti, s fokusom na održivost, LCA i ugljične kalkulatore.

Ciljevi ovog rada su: 1) ispitati pokrivenost tematskog područja digitalnih tehnologija za kružno graditeljstvo u znanstvenoj literaturi; 2) pružiti pregled dostupnih digitalnih alata za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru.

Istraživačka pitanja oko kojih je razvijen ovaj rad su: IS1: Postoji li znanstvena literatura koja pruža pregled i podatke o digitalnim alatima za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru?; IS2: Koji komercijalni digitalni alati su zastupljeni u znanstvenoj literaturi? Odgovori na istraživačka pitanja istraženi su kroz pregled stanja znanstvenog područja, pružanjem pregleda digitalnih alata zastupljenih u znanstvenoj literaturi.

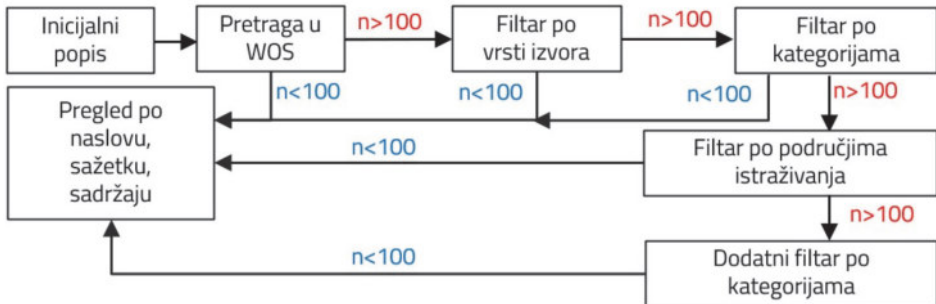
2 Metodologija

U inicijalnoj fazi rada sastavljen je plan istraživanja, prikazan na slici 1. koji se sastoji od 3 faze: Planiranje, Priprema i Provedba.



Slika 1. Pregled plana istraživanja, izrada autora prema primjerima iz literature [10, 20]

U fazi 1. Planiranje, definirana su istraživačka pitanja i ciljevi, određena je tema i usmjerenost na digitalne alate u kružnom graditeljstvu čime je utvrđen obuhvat rada, i sastavljen je plan istraživanja. U fazi 2. Priprema, učinjena je preliminarna pretraga literature, na temelju čega je sastavljen inicijalni popis od 27 digitalnih alata. Inicijalni popis je uključio digitalne alate koji se mogu primijeniti za potrebe praćenja određenih principa kružnosti u građevinskom sektoru. Za potrebe ovog rada za inicijalni popis su odabrani digitalni alati proizašli iz praćenja održivosti, LCA alati i softveri i kalkulatori utjecaja na klimu ili okoliš, od kojih poglavito kalkulatori ugrađenog CO₂. Isključeni su okviri, strategije, baze podataka i katalozi, koji nisu implementirani u obliku softvera ili aplikacija. Na temelju inicijalnog popisa izvršena je pretraga znanstvene literature u bazi "Web of science core collection" (dalje u tekstu WOS). Radi obuhvata rada istraživanje je ograničeno na ovu bazu, koja pruža uvid u relevantnu znanstvenu literaturu. Pretraživanje je provedeno u svibnju 2025. godine te su rezultati posljednji put ažurirani 11. svibnja 2025. godine. Pretraga je uključila znanstvene članke, zbornike radova s konferencija i pregledne članke na engleskom jeziku. Slika 2. prikazuje tijek i korake u fazi pretraživanja.



Slika 2. Tijek i koraci faze pretraživanja baze WOS, izrada autora

Nakon inicijalnog unosa naziva alata, u slučaju broja rezultata <100, pristupilo se pregledu usklađenosti izvora s temom. U slučaju rezultata > 100, pretraga je filtrirana primjenom kategorija: "Architecture", "Construction & Building Techno-

logy", "Engineering, Civil", "Engineering, Environmental", "Engineering, Multidisciplinary", "Environmental Studies", "Environmental Sciences", "Green Sustainable Science Technology". Slijedeće filtriranje izvršeno je prema području istraživanja (izvorno: "research areas"): "Architecture", "Business Economics", "Construction Building Technology" i "Engineering". Ove kategorije i područja istraživanja su odabrani jer su za najviše alata pokazivale najveću zastupljenost izvora te u konačnici pružale rezultate povezuje sa zadanim alatom. Ukoliko je broj rezultata nakon ovih koraka i dalje veći od 100, pretraga se dodatno ograničila samo na kategorije: "Architecture", "Construction Building Technology" i "Engineering, Civil", jer su te kategorije relevantne za područje ovog rada. U zadnjem koraku faze 2. Priprema, izvršena je procjena primjenjivosti rezultata i odabir relevantnih izvora na temelju usklađenosti s temom. U fazi 3. Provedba, izvršena je detaljna obrada odabranih izvora. Odabrani znanstveni izvori su povezani uz stavke inicijalnog popisa digitalnih alata te je izvršena, analiza. U završnom koraku je učinjena sinteza i opis rezultata istraživanja.

Istraživanje je izvršeno uz određena ograničenja. Zbog ograničenja obuhvata i duljine rada, istraživanje se usmjerilo na identificirane komercijalne digitalne alate, iako je prepoznato da certifikacijske sheme zelene gradnje i razni drugi standardi održivosti također omogućavaju praćenje kružnosti u građevinskom sektoru [21]. Oni se ne mogu okarakterizirati kao digitalni alati u smislu softvera ili aplikacija, no neke njihove funkcionalnosti omogućuju digitalnu analizu pojedinih aspekata kružnosti. Primjerice, WELL koji je u potpunosti digitaliziran standard zelene gradnje [22]. Kompleksnost i funkcionalnosti BIM-a nadilaze principe kružnosti i obuhvat ovog rada te se ovdje ne obrađuju. Iz istraživanja su isključene materijalne putovnice, iako su se prema znanstvenoj literaturi prometnule kao ključni alati za integriranje kružnosti u građevinskom sektoru [23]. Po pitanju terminologije postoji cijeli niz inačica kao što su primjerice "building passport" [24] "building renovation passport" [25] ili "cradle-to-cradle passport" [26]. U znanstvenoj literaturi dostupne su evaluacije materijalnih putovnica [23, 27], koje zaključuju da materijalne putovnice još uvijek nisu realizirane kao dinamični digitalni alati [23] i da u njima još uvijek nedostaje standardizirani univerzalni pristup po pitanju kružnosti [27].

3 Rezultati

Rezultati su prikazani tablično i prezentirani u nastavku (Tablica 1.). Sa "*" su označeni rezultati za koje je bilo potrebno izvršiti filtriranja i dovesti rezultat do onog primjenjivog na alat. Za alate označene s "***" metodologija nije bila primjenjiva, jer nakon primjene opisanog postupka nije davala relevantne rezultate povezuje s traženim alatom. U nastavku je izložena diskusija s prikazom postupka za konkretne primjere i dana su pojašnjenja dobivenih rezultata.

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora

	Alat i autori	Kratki opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
1	DuboCalc Rijkswaterstaat, Nizozemska	Punog naziva "Duurzaam Bouwen Calculator", u prijevodu s nizozemskog: kalkulator održive gradnje. Softver obavezan za sve velike postupke javnih nabava, posebno u sektoru cestovne i vodne infrastrukture. Na temelju svih okolišnih utjecaja izračunava "Environmental Cost Indicator" (ECI), koji se oduzima od cijene ponude [28].	2	članak
2	Eco2soft baubook GmbH, Austrija	Online alat za izradu LCA analiza zgrada, uključujući troškove izgradnje, obnove i zbrinjavanja. Široko korišten u Austriji radi kompatibilnosti s nacionalnim certifikatima. Pruža "Oekoindex OI3" za ocjenu ekološke kvalitete i pregled zgrade u cjelini ili samo ovojnice [29].	3	članak
3	Klimatkalkyl Trafikverket, Švedska	Alat za izračun klimatskog utjecaja i potrošnje energije za određeni projekt, proizvod ili mjeru [30], [31].	1	zbornik
4	eLCA* BBSR institut, Njemačka	Online LCA alat primjenjuje se na procjenu utjecaja na okoliš cijelog životnog ciklusa građevine u skladu s njemačkim normama i BNB sustavom [32].	1*	članak
5	LCAbyg SBI, Aalborg University, Danska	Implementacija DGNB certifikata u Danskoj utjecala je na razvoj ovog alata. Alat podržava stadij proizvoda, module za zamjene, potrošnju energije, otpad i odlaganje. U skladu s europskim normama [33].	7	zbornik (4), članak (3)
6	TOTEM* OVAM, Brussels Environment i Public Service of Wallonia, Belgija	Punog naziva "Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials". Alat za procjenu utjecaja građevinskih komponenti na okoliš. Koristi tzv. MMG LCA metodu po kojoj ispituje 17 okolišnih utjecaja [34].	5*	zbornik (1*), članak (4*)
7	National Circularity Assessment Framework UNOPS Strategic Initiatives team i One planet network, UN	Okvir za procjenu kružnosti u građevinskom sektoru na strateškoj političkoj razini. Kvantitativne i kvalitativni pokazatelji u formi excel tablice. Namjena mu je za praćenje implementacije politika kružnosti u građevinski sektor u cjelini, na državnoj razini [35].	0	0

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratki opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
8	CoCircular 360° Advisor Saas CoCircular, Španjolska	Softver za digitalno i optimizirano upravljanje građevinskim otpadom, temeljen na AI [36].	0	0
9	Athena Impact Estimator Athena Sustainable Materials Institute, Kanada	Softver za procjenu utjecaja na klimu i okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa zgrada, fokusiran na sjevernoameričke standard [37].	30	zbornik (3), članak (27)
10	Beacon** Thornton Tomasetti, Inc., SAD	Revit "plug-in" alat za mjerenje ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima prilikom projektiranja. Kategorizira kalkulacije po tipu materijala, građevinskoj komponenti i po razini kata [38].	0**	0**
11	HVB:ERT (unos: puni naziv) Hawkins Brown Architecture Ltd., UK UCL Institute for Environmental Design and Engineering, UK	U punom nazivu "Hawkins Brown Emission Reduction Tool", Online alat i Revit "plug-in". Nadogradnje i manualne korekcije Revita kako bi se omogućilo izvješćavanje i vizualizaciju ugrađenog CO ₂ . Pregled podataka u online platformi, koja je omogućila jednostavnu vizualizaciju i usporedivost rezultata [39].	1	članak
12	One Click LCA* Bionova Ltd., Finska	Sveobuhvatan alat za LCA analize u građevinskoj industriji, kompatibilan s Revitom. Omogućuje analizu kružnosti kroz "Building Circularity tool". Kompatibilan s certifikacijskim sustavima LEED, BREEAM i Level(s) [40].	49*	zbornik (10*), članak (39*)
13	Tally KieranTimberlake Associates LLP, SAD	Revit dodatak za procjenu više kategorija okolišnih utjecaja tijekom životnog ciklusa materijala u građevinskim projektima [41],[42]. Usklađen s ISO 140400-14044.	15	članak (15)
14	Build Carbon Neutral** Mithun, Inc., SAD	Online kalkulator za procjenu ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima, primarno osmišljen za manje arhitektonske biroe i stručnjake koji nemaju resurse za razvoj sveobuhvatnih LCA [43].	0**	0**
15	EPIC** EHDD Architecture, Inc., SAD	U punom nazivu "Early Phase Integrated Carbon Assessment" je alat za analizu ugrađenog CO ₂ tijekom cijelog životnog ciklusa. Razvijen za podršku ranoj fazi planiranja kada je razina podataka niska i potencijal smanjenja emisija visok [44].	0**	0**

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratak opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
16	Kaleidoscope** Payette Associates, Inc., SAD	Alat koji pruža dodatne informacije o ugrađenom CO ₂ , dok se LCA provodi u alatu Tally. Služi za usporedbu građevinskih sustava tijekom ranih faza dizajna, kroz više tzv. "leća" (različiti scenariji za izračun ugrađenog ugljika) [45].	0**	0**
17	EC3** Building Transparency, SAD	U punom nazivu "Embodied Carbon in Construction Calculator": Alat za benchmarking i smanjenje ugrađenog CO ₂ u građevinskim projektima. Koristi bazu podataka iz okolišnih deklaracija proizvoda (Environmental product declarations-EPD), koja omogućuju usporedivost materijala [46].	0**	0**
18	Pathfinder** Climate Positive Design, Inc., SAD	Online alat razvijen za krajobraznu arhitekturu i podršku mjerenju emisija CO ₂ u izgrađenom okolišu. Računa koliko se CO ₂ oslobađa korištenjem materijala, gradnjom, održavanjem i transportom i, obrnuto, koliko se smanjuje zelenom infrastrukturom [47].	1**	članak (1**)
19	UpStream Forestry & LCA Tool** ZGF Architects LLP i University of Washington, SAD	Alat za procjenu utjecaja na okoliš u šumarstvu i drvenih materijala u građevinskim projektima [48].	0**	0**
20	Climate&Circularity Calculator** Ihobe, Španjolska	Alat za procjenu klimatskog utjecaja i kružnosti, usmjeren na organizacije. Koristi pokazatelje kružnosti prema metodologiji "Circular Transition Indicators 3.0", koja je kompatibilna s budućom normom ISO 59020 [49].	0**	0**
21	GaBi* drugi naziv: Sphera "LCA for Experts" (rezultati za drugi naziv označeni s +) Sphera Solutions, Inc., SAD	Naziv potječe od 'Ganzheitliche Bilanzierung'. Osnovni autor je tvrtka PE International GmbH iz Njemačke (1992.), a danas ga razvija i održava Sphera Solutions, Inc. Sveobuhvatni profesionalni alat za LCA koji nudi i GaBi Circularity Toolkit za analizu kružnosti građevinskih projekata, implementacijom "Material Circularity Indicator"(MCI) [19].	27+5*	zbornik (3*), članak (24+5*)

Tablica 1. Prikaz rezultata istraživanja, izrada autora - nastavak

	Alat i autori	Kratak opis	Izvori iz baze WOS	
			Broj	Vrsta
22	OpenLCA GreenDelta GmbH, Njemačka	Sveobuhvatni alat za izradu LCA koji omogućuje i analizu kružnosti kroz izračune indeksa kružnosti kao što su "Material Circularity Indicator" (MCI) i "Circularity Index" (CI) [19].	24	zbornik (5), članak (19)
23	SimaPro PRé Sustainability B.V., Nizozemska	Profesionalni LCA softver. Modelira životni ciklus proizvoda ili procesa definiranjem životnih faza i daje podatke o individualnim okolišnim aspektima, potrošnji sirovih materijala, štetnosti procesa i emisija tijekom životnog ciklusa [50]. Omogućuje izračun MCI, ali nije moguće pratiti sve faze životnog ciklusa [19].	120	zbornik (22), članak (98)
24	Circular Buildings Toolkit ARUP Group Ltd, UK	Priručnik i alati za integraciju principa kružnosti u dizajn zgrada [51].	0**	0**
25	EIME LCIE Bureau Veritas, CODDE, Francuska	EIME (Environmental Improvement Made Easy) je softver za LCA i eko-dizajn, razvijen od strane odjela CODDE unutar LCIE Bureau Veritas. Ovaj alat omogućava kvantificiranje utjecaja proizvoda i usluga na okoliš tijekom cijelog njihovog životnog ciklusa, te identifikaciju putova materijala za postizanje eko-dizajna [52].	1**	zbornik**
26	Brightway2 Mutel, C.; Hellweg, S.; ETH Zurich	Open-source softver za LCA analize napisan u programskom jeziku Python. Omogućuje analizu dobara ili usluga [53], [54].	17	zbornik (1), članak (16)
27	CO₂ Performance Ladder SKAO, Nizozemska	Sustav certificiranja za upravljanje energijom i praćenje emisija CO ₂ koji se koristi kao alat za zelenu javnu nabavu u Nizozemskoj [55].	2	članak (2)

Za alate označene s jednom zvjezdicom ("*") primjerice *eLCA*, osnovni unos "eLCA" daje ukupno 493 rezultata koji otkrivaju da se akronim "ELCA" koristi za širok spektar pojmova u raznim sferama znanosti. Odabirom prethodno određenih vrsta izvora, rezultat je smanjen na 439. Primjenom kategorija, pretraga je svedena na 56 izvora. Prema područjima istraživanja dobiveno je ukupno 34 rezultata. Na temelju pregleda naslova, sažetaka i sadržaja izvora ustanovljeno je da se niti jedan od navedenih izvora ne odnosi na alat *eLCA* već autori taj akronim koriste za pojmove poput "environmental LCA", "exergy" ili "exergetic" LCA. Tek unosom pojma "eLCA software" dobiven je 1 članak koji se zaista odnosi na navedeni alat, od ukupno 9 koji su dobiveni pretragom po tom pojmu. Za alat *TOTEM* osnovna pretraga dala je ukupno 2048 izvora, od kojih 1736 traženih vrsta te se nakon opisanog postupka ustanovilo da samo 5 izvora odgovara traženom alatu. Za softver *Tally* inicijalna pretraga je davala 6753 rezultata. Tu je primijenjen međukorak gdje su isključena imena autora čime je broj sveden na 6198, od čega su 5867 tražene vrste izvora. Nakon primjene filtriranja prema kategorijama, područjima istraživanja i dodatnog ograničenja kategorija, kako je opisano metodologijom, dobiveno je ukupno 74 rezultata od kojih se 15 odnosilo na traženi digitalni alat *Tally*. Predlaže se radije započeti pretragom unosom "Tally LCA", što u inicijalnom koraku daje 31 rezultat. *GaBi* (u znanstvenoj literaturi također pod nazivom *Sphera LCA for Experts* [56]) je pretragom u bazi WOS inicijalno rezultirao s 6859 izvora, isključenjem autora "Gabi" sa 6712, te primjenom opisanih metoda rezultirao s ukupno 27 primjenjiva izvora. Dodatnih 5 izvora pronađeno je pretragom prema drugome nazivu "Sphera LCA for Experts". Za alat *One Click LCA* izvršena je pretraga za unose "One Click LCA", "OneClick LCA" i "OneClickLCA", kako bi se izbjegle ortografske pogreške te je od inicijalnih 46 izvora ustanovljeno da se 41 odnosi na traženi alat, te je nakon dodatnih unosa ukupan broj rezultata uvećan za 7 u prvoj iteraciji te dodatan 1 izvor u posljednjoj iteraciji.

Za alate označene s dvije zvjezdice ("**") metodologija nije primjenjiva. Na primjeru alata *Beacon*, inicijalni rezultat od 27035 izvora je nakon primjene opisanog postupka sveden na 358 izvora, te od tih izvora niti jedan nije moguće povezati s traženim alatom. Unos pretrage je iteriran u 4 dodatna navrata kako bi se bolje povezao s traženim alatom ("Beacon tool for Revit LCA", "Beacon tool for Revit", "Beacon Revit", "Beacon LCA", "Beacon Thornton") te je u tim slučajevima pretraga davala 0 rezultata ili rezultate koji se nisu mogli povezati sa zadanim alatom. Isto se odnosi na ostale manje poznate komercijalne alate čiji nazivi nisu jednoznačno određujući i daju velik broj nepovezanih rezultata u inicijalnoj pretrazi: za *Build Carbon Neutral* (2418), *EPIC* (35063), *Kaleidoscope* (2546), *EC3* (1521), *UpStream Forestry & LCA Tool* (202332). Stoga je potrebno u osnovnu pretragu unijeti dodatne opisne riječi kao npr. "LCA", "tool", "software", "calculator" ili kombinaciju navedenog ili puno ime alata ili ime autora. U svim iteracijama, za sve navedene

alate, rezultati u konačnici nisu bili povezivi sa zadanim traženim alatom, osim u slučaju alata *Pathfinder*, gdje je detektiran 1 izvor. Posebnost je *Climate&Circularity Calculator*, organizacije Ilobe iz Španjolske, koji je za bilo koju iteraciju unosa davao 0 rezultata. Zaključuje se da u tim slučajevima metodologija nije primjenjiva. Prilikom pretrage znanstvene literature zabilježeni su dodatni alati koji nisu bili navedeni na inicijalnom popisu. To su: *Precinct Carbon Assessment (PCA) Tool* [47], *Elodie* [57], *SimulEIcon* [58], *DOE-2 eQUEST*, *IESVE Revit Plug-in* i Autodeskov *Green Building Studio* [59], *SIDAC* [60], *EnergyPlus* [61, 62], *Umberto* [63-65], *System Advisor Model (SAM)* i *Thermoflex + PEACE* [65], *Sustainable Minds* [50], *BEES* [66, 67], *BRE*, *Analytica*, *Pre*, *TEAM*, *GB Tool*, *Woolley*, *Curwell*, *March* [66], *Ansys Granta EduPack* (prethodno *CES EduPack*) i *SolidWorks Sustainability* [68]. Ispostavilo se da su brojni alati razvijeni za potrebe izgradnje i upravljanja cestama kao *VegLCA* [69], *ZEROInfra* i *FuelSave* [31], te alati za prometnu infrastrukturu kao što su: *ROAD-RES*, *PaLATE Version 2.2*, *ROADEO*, *PE-2*, *ECORCE-M*, *CO₂NSTRUCT* i *Virginia Tech Transportation Institute—University of California asphalt pavement LCA model* [28].

4 Zaključak

Na temelju provedenog istraživanja zaključeno je kako znanstvena literatura pruža informacije o digitalnim alatima za potrebe praćenja kružnosti u slučaju 7 najpoznatijih softvera, dominantno usmjerenih na LCA: *SimaPro*, *One Click LCA*, *GaBi*, *Athena Impact Estimator*, *OpenLCA*, *Brightway2* i *Tally*. Za ukupno 17 od promatranih 27 alata znanstvena literatura daje 5 ili manje relevantnih izvora, dok za 10 alata znanstvena literatura ne pruža niti jedan znanstveni izvor. Komercijalni alati koje razvijaju konzultantske ili projektantske tvrtke nisu znanstveno recenzirani. Rad je ispitao pokrivenost tematskog područja digitalnih tehnologija za kružno graditeljstvo u znanstvenoj literaturi i pružio pregled odabranih dostupnih digitalnih alata za praćenje kružnosti u građevinskom sektoru, čime je ostvario zadane ciljeve. Ograničenja istraživanja su radi razumijevanja rezultata predstavljena u poglavlju "2 Metodologija". Metodologija je pokazala slabosti u 10 slučajeva, gdje se pokazalo da nije primjenjiva i predloženi su načini dorade. Za daljnja istraživanja predlaže se provesti sistematični pregled literature, prema PRISMA metodi te uključiti bazu "Scopus" u istraživanje. Rezultati ovog istraživanja pružaju informaciju o postajanju i jednostavan pregled osnovnih funkcionalnosti digitalnih alata, što je korisno za stručnjake u građevinskom sektoru, te zbog toga što pružaju pregled praznine u znanstvenim istraživanjima, kao informacija za znanstvenu zajednicu. Osim toga, rad pomaže u promicanju osviještenosti o principima kružne ekonomije i popularizaciji istih u građevinskom sektoru.

Literatura

- [1] Ellen MacArthur Foundation, www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview
- [2] Iyer-Raniga, U.: Using the ReSOLVE framework for circularity in the building and construction industry in emerging markets, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Tokyo, 2019.
- [3] Europska komisija: Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i Odboru regija - Novi akcijski plan za kružno gospodarstvo - Za čišću i konkurentniju Europu, COM/2020/98 final, eur-lex. europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098#footnote37
- [4] Ness, D.A. i Xing, K.: Toward a Resource-Efficient Built Environment: A Literature Review and Conceptual Model, *Journal of Industrial Ecology*, 21 (2017) 3, pp. 572–592.
- [5] Tukker, A., Behrens, P., Deetman, S., Hu, M., Migoni Alejandre, E., van der Meide, M., Zhong, X., Zhang, C.: Circular construction: Six key recommendations, *One Earth*, 6 (2023) 11, pp. 1425–1429.
- [6] Benachio, G.L.F., Freitas, M. do C.D., i Tavares, S.F.: Circular economy in the construction industry: A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, 260 (2020).
- [7] Metinal, Y.B. i Gumusburun Ayalp, G.: Uncovering Barriers to Circular Construction: A Global Scientometric Review and Future Research Agenda, *Sustainability* 2025, 17 (2025) 4, pp. 1381.
- [8] Antunes, M., Santos, R.L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R.B., i Colaço, R.: Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review, *Materials* 2022, 15 (2021) 1, pp. 209.
- [9] Del Serrone, G. i Moretti, L.: A stepwise regression to identify relevant variables affecting the environmental impacts of clinker production, *Journal of Cleaner Production*, 398 (2023), pp. 136564.
- [10] Bellini, A., Tadayon, A., Andersen, B., i Klungseth, N.J., :The role of data when implementing circular strategies in the built environment: A literature review, *Cleaner Environmental Systems*, 13 (2024), pp. 100183.
- [11] Davari, S., Jaber, M., Yousfi, A., i Poirier, E.: A Traceability Framework to Enable Circularity in the Built Environment, *Sustainability (Switzerland)*, 15 (2023) 10, pp.8278.
- [12] Çetin, S., Gruis, V., i Straub, A.: Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations, *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15 (2022), pp. 200110.

- [13] Winkler, H.: Closed-loop production systems-A sustainable supply chain approach, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4 (2011) 3, pp. 243–246.
- [14] Nasir, M.H.A., Genovese, A., Acquaye, A.A., Koh, S.C.L., i Yamoah, F.: Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry, *International Journal of Production Economics*, 183 (2017), pp. 443–457.
- [15] Kovacic, I., Honic, M., i Sreckovic, M.: Digital platform for circular economy in aec industry, *Engineering Project Organization Journal*, 9 (2020), pp. 1–16.
- [16] Četin, S., De Wolf, C., i Bocken, N.: Circular digital built environment: An emerging framework, *Sustainability (Switzerland)*, 13 (2021) 11, pp. 6348.
- [17] Setaki, F. i van Timmeren, A.: Disruptive technologies for a circular building industry, *Building and Environment*, 223 (2022), pp. 109394.
- [18] Yu, Y., Yazan, D.M., van den Berg, M., Firdausy, D.R., Junjan, V., i Iacob, M.E.: Circularity information platform for the built environment, *Automation in Construction*, 152 (2023), pp. 104933.
- [19] Cilleruelo Palomero, J., Freboeuf, L., Ciroth, A., i Sonnemann, G.: Integrating circularity into Life Cycle Assessment: Circularity with a life cycle perspective, *Cleaner Environmental Systems*, 12 (2024), pp. 100175.
- [20] Saunders, M., Lewis, P., i Thornhill, A.: *Research Methods for Business Students*, 9th Edition. Harlow, United Kingdom: PEARSON EDUCATION LIMITED, 2023.
- [21] Wong, D.H., Zhang, C., Di Maio, F., i Hu, M.: Potential of BREEAM-C to support building circularity assessment: Insights from case study and expert interview, *Journal of Cleaner Production*, 442 (2024), pp. 140836.
- [22] International WELL Building Institute (IWBI), :Standard | WELL V2., <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>
- [23] Markou, I., Sinnott, D., i Thomas, K.: Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review, *Case Studies in Construction Materials*, 22 (2025), pp. e04267.
- [24] Dos Santos Gonçalves, J., Mateus, R., Dinis Silvestre, J., Pereira Roders, A., i Bragança, L.: Building passport for the sustainable conservation of built heritage, *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 15 (2022) 2, pp. 168–180.
- [25] Sesana, M.M. i Salvalai, G.: A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives, *Energy and Buildings*, 173 (2018) 9, pp. 195–205.
- [26] Cojocar, C.R.: Costs, Time, Reliability, Warehousing and Information Technology-source of Contradicting Requirements in Green Logistics, *Metalurgia International*, 17 (2012) 3, pp. 215–219.

- [27] Mao, S. i Cao, W.J.: Evaluating material passports for circularity in the construction industry, *Sustainable Production and Consumption*, 54 (2025), pp. 88–101.
- [28] Dos Santos, J.M.O., Thyagarajan, S., Keijzer, E., Flores, R.F., i Flintsch, G.: Comparison of life-cycle assessment tools for road pavement infrastructure, *Transportation Research Record*, 2646 (2017) 1, pp. 28–38.
- [29] Hafez, H., Kurda, R., Al-Ayish, N., Garcia-Segura, T., Cheung, W.M., i Nagaratnam, B.: A whole life cycle performance-based ECONomic and ECOlogical assessment framework (ECO2) for concrete sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 292 (2021), pp. 126060.
- [30] Toller, S.: Klimatkalkyl-Calculating greenhouse gas emissions and energy use of transport infrastructure from a life cycle perspective, 2018., https://bransch.trafikverket.se/contentassets/eb8e472550374d7b91a4032918687069/klimatkalky_report_v_5_0_and_6.0_english.pdf
- [31] Gebre, T.D., Wang, D., Eklöf, N., i Cannone Falchetto, A.: Evaluation of LCA Tools for Road Construction and Operation Purposes: A Case Study in Nordic Europe, *RILEM Bookseries*, 51 (2024), pp. 198–205.
- [32] Grajcar, M., Rumiantceva, K., i Weidlich, I.: On the Imaginary Accuracy of the LCA on the Basis of the Houseboat in Hamburg (Holistic Approach), *Environmental and Climate Technologies*, 23 (2019) 2, pp. 222–237.
- [33] Kanafani, K., Zimmermann, R.K., Rasmussen, F.N., i Birgisdóttir, H.: Learnings from developing a context-specific LCA tool for buildings—the case of Icabyg 4, *Sustainability (Switzerland)*, 13 (2021) 3, pp. 1–23.
- [34] Ramon, D., Allacker, K., Trigaux, D., Wouters, H., i van Lipzig, N.P.M.: Dynamic modelling of operational energy use in a building LCA: A case study of a Belgian office building, *Energy and Buildings*, 278 (2023), pp. 112634.
- [35] UNOPS; UNEP and UN-Habitat, *National Circularity Assessment Framework*. Copenhagen, Denmark, 2024. <https://drive.google.com/file/d/1OeMsDH5mUXLuisAhdSQR5yhnl8rtDmxx/view>
- [36] CoCircular 360 Advisor Saas, <https://cocircular.es/en/saas-360-advisor/>
- [37] Inyim, P., Zhu, Y., i Orabi, W.: Analysis of Time, Cost, and Environmental Impact Relationships at the Building-Material Level, *Journal of Management in Engineering*, 32 (2016) 4, pp. 04016005.
- [38]: Beacon, www.thorntontomasetti.com/capability/beacon
- [39] Bowles, L., Attwood-Harris, J., Khan-Fitzgerald, R., Robinson, B., i Schwartz, Y.: The Hawkins\Brown emission reduction tool, *The Journal of Architecture*, 26 (2021) 1, pp. 32–51.

- [40] Dragonetti, L., Papadaki, D., Mazzoli, C., Monacelli, A., Assimakopoulos, M.N., i Ferrante, A.: Circular deep renovation versus demolition with reconstruction: Environmental and financial evaluation to support decision making in the construction sector, *Energy and Buildings*, 336 (2025), pp. 115610.
- [41] Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M.A., Navaratnam, S., Giustozzi, F., i Hou, L.: Retrofit of Building Façade Using Precast Sandwich Panel: An Integrated Thermal and Environmental Assessment on BIM-Based LCA, *Buildings*, 12 (2022) 12, pp. 2098.
- [42] Zahabi, N., Gu, H., Gong, M., i Blackadar, J., :A Comparative Whole-Building Life Cycle Assessment of the Four Framing Systems of the Bakers Place Building Using the Tally LCA Tool, *Buildings* 2025, 15 (2025) 7, pp. 1192.
- [43] Build Carbon Neutral 2.0 - Mithun, www.mithun.com/r-d-project/build-carbon-neutral-2/
- [44] EPIC | EHDD Architecture, www.ehdd.com/philosophy/epic/
- [45] Kaleidoscope: Embodied Carbon Design Tool - Payette, www.payette.com/kaleidoscope/
- [46] EC3 - Building Transparency, www.buildingtransparency.org/tools/ec3/
- [47] Nikologianni, A., Plowman, T., i Brown, B.: A Review of Embodied Carbon in Landscape Architecture. Practice and Policy, *C-Journal of Carbon Research*, 8 (2022) 2, pp. c8020022.
- [48] UpStream Documentation, <https://github.com/UpStream-LCA/Upstream-Forestry-Carbon-LCA>
- [49] Climate&Circularity Calculator, www.ihobe.eus/climate-circularity-3
- [50] Grajewski, D., Dudkowiak, A., Wiśniewski, M., i Dostatni, E.: Analysis of Selected IT Tools for Environmental Product Assessment, *Applied Sciences* 2024, 14 (2024) 24, pp.12002.
- [51] ARUP - Circular Buildings Toolkit, <https://ce-toolkit.dhub.arup.com/>
- [52] LCIE Bureau Veritas - LCA EIME software, www.lcie.fr/en/our-services/ecoconception/
- [53] Brightway LCA Software Framework — Brightway documentation, <https://docs.brightway.dev/en/latest/>
- [54] Alaux, N., Schwark, B., Hörmann, M., Ruschi Mendes Saade, M., Passer, A.: Assessing the prospective environmental impacts and circularity potentials of building stocks: An open-source model from Austria (PULSE-AT), *Journal of Industrial Ecology*, 28 (2024) 6, pp. 1435–1448.

- [55] Rietbergen, M.G., Van Rheede, A., i Blok, K.: The target-setting process in the CO₂ Performance Ladder: does it lead to ambitious goals for carbon dioxide emission reduction?, *Journal of Cleaner Production*, 103 (2015), pp. 549–561.
- [56] Sečkář, M., Schwarz, M., Pochyba, A., i Polgár, A.: A Comparative Analysis of the Environmental Impacts of Wood–Aluminum Window Production in Two Life Cycle Assessment Software, *Sustainability (Switzerland)*, 16 (2024) 21, pp. 9581.
- [57] Van Gulck, L. i Steeman, M.: The environmental impact of circular building design: A simplified approach to evaluate remountable building elements in life cycle assessment, *Building and Environment*, 254 (2024), pp. 111418.
- [58] Inyim, P., Rivera, J., i Zhu, Y.: Integration of Building Information Modeling and Economic and Environmental Impact Analysis to Support Sustainable Building Design, *Journal of Management in Engineering*, 31 (2014) 1, pp 1–10.
- [59] Mostafavi, N., Farzinmoghadam, M., i Hoque, S.: Envelope retrofit analysis using eQUEST, IESVE Revit Plug-in and Green Building Studio: a university dormitory case study, *International Journal of Sustainable Energy*, 34 (2015) 9, pp. 594–613.
- [60] Pereira de Souza, L., Melo, A.P., Triana, M.A., i Lamberts, R.: Thermal resilience and life cycle assessment of social housing: a discussion about limitations in Brazil, *Architectural Engineering and Design Management*, (2025) pp-1–20.
- [61] Zhu, S. i Chen, J., :A simulation study for a low carbon consumption HVAC project using energyplus, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7 (2012) 3, pp. 248–254.
- [62] Naeem, A., Ho, C.O., Kolderup, E., Jain, R.K., Benson, S., i de Chalendar, J.: EnergyPlus as a computational engine for commercial building operational digital twins, *Energy and Buildings*, 329 (2025), pp. 115257.
- [63] Lopes Silva, D.A., Nunes, A.O., Piekarski, C.M., da Silva Moris, V.A., de Souza, L.S.M., i Rodrigues, T.O.: Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem, *Sustainable Production and Consumption*, 20 (2019), pp. 304–315.
- [64] Sečkář, M., Schwarz, M., Golej, J., i Veverková, D.: Life cycle assessment and software tools comparison, *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 24 (2025) 2, pp. 145–162.
- [65] Gobio-Thomas, L.B., Darwish, M., i Stojceska, V.: Environmental impacts of solar thermal power plants used in industrial supply chains, *Thermal Science and Engineering Progress*, 38 (2023), pp. 101670.
- [66] Taygun, G.T. i Balanlı, A.: Analysis of the models for life cycle assessment of the building and building products, *Environmental Engineering and Management Journal*, 6 (2007) 1, pp. 59–64.

- [67] Asadi, S., Babaizadeh, H., Foster, N., i Broun, R.: Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: A case study, *Journal of Cleaner Production*, 137(2016), pp. 1228–1236.
- [68] Ren, Z. i Su, D.: Comparison of different life cycle impact assessment software tools, *Key Engineering Materials*, 572 (2014) 1, pp. 44–49.
- [69] Gebre, T.D., Wang, D., Eklöf, N., i Cannone Falchetto, A.: Evaluation of LCA Tools for Road Construction and Operation Purposes : A Case Study in Nordic Europe, *RILEM Bookseries*, 51 (2024), pp. 198–205.