

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.9>

Komparativna analiza životnih ciklusa aluminijskog i čeličnog okvira

Comparative life cycle analysis of aluminium and steel frames

Emanuel Krupa-Jurić¹, Davor Skejić¹, Ivan Lukačević¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, emanuel.krupa.juric@grad.unizg.hr, davor.skejic@grad.unizg.hr, ivan.lukacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Zagađenje okoliša je jedan od značajnijih problema današnjice. S obzirom na to da je građevinska industrija jedan od najvećih zagađivača potrebno je u fazi projektiranja, osim konstrukcijski učinkovitim, težiti rješenjima s manjim utjecajem na okoliš. U radu su analizirani čelični i aluminijski okviri istih dimenzija. U prvom koraku provedena je statička analiza i dimenzioniranje gdje su određeni profili i ukupna masa za pojedini okvir. U drugom koraku, s ciljem pronalaska optimalnog rješenja i u pogledu utjecaja na okoliš provedena je komparativna analiza životnih ciklusa. Komparativna analiza životnih ciklusa 'cradle to grave' čeličnog i aluminijskog okvira provedena je upotrebom računalnog programa openLCA. U analizi su identificirane faze s najznačajnijim utjecajem na okoliš te je utvrđeno kako je aluminijska varijanta okvira konkurentna čeličnom u pogledu utjecaja na okoliš.

Ključne riječi: analiza životnog ciklusa, aluminij, čelik, okvirni sustav, utjecaj na okoliš, komparativna analiza

Abstract

Environmental pollution is one of the most significant problems today. As the construction industry is among the largest polluters, it is essential to pursue solutions that minimise environmental impact during the design phase and enhance structural efficiency. This paper analyses steel and aluminium frames of identical span and height. In the first step, a static analysis and dimensioning were carried out, determining the profiles and total mass of each frame. In the second step, a comparative life cycle analysis was performed to identify the optimal solution regarding environmental impact. A cradle-to-grave life cycle analysis of steel and aluminium frames was conducted using the openLCA computer programme. The analysis pinpointed the phases with the most considerable environmental impact and concluded that the aluminium frame variant is competitive with the steel frame in terms of environmental impact.

Keywords: life cycle analysis, aluminium frame, steel frame, environmental impact, comparative analysis

1. Uvod

Jedan od najvećih izazova današnjice je problem zagađenja okoliša. Opći napredak u tehnologiji, zbog manjka znanja i svijesti, ima ozbiljne posljedice kao što su globalno zatopljenje, oštećenje ozonskog omotača, akumulacije otpada itd. Građevinska industrija ima veliki doprinos u potrošnji resursa i emisiji štetnih plinova [1]. Učinak građevinske industrije najbolje predočuju činjenice da koristi 50% resursa i generira 35% ukupne količine otpada u EU [2]. Iako utjecaj građevine na okoliš nije prioritet u projektiranju, osvješćivanjem ekoloških problema, postaje sve bitnija stavka u procesu projektiranja [3]. Projektiranjem održivih građevina moguće je značajno umanjiti negativni utjecaj na okoliš.

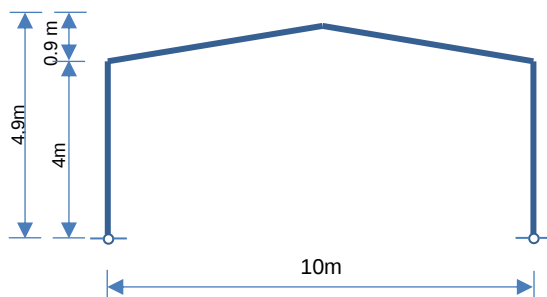
Kako bi se dobila ispravna slika o utjecaju na okoliš, u odabiru materijala potrebno je razmotriti ugrađenu energiju konstrukcijskog elementa, odnosno svu energiju utrošenu tijekom svih procesa proizvodnje, izvedbe te demontaže i recikliranja ili odlaganja na kraju životnog vijeka [4].

U slučaju industrijskih hala i skladišta, čelik je idealan s ekonomskog i konstruktivnog, ali i iz aspekta održivosti. Da je čelik izrazito povoljan iz aspekta održivosti potvrđuje činjenica da se može gotovo beskonačno puta reciklirati. Iako čelik ima energetski vrlo intenzivnu primarnu proizvodnju, analizom 'cradle to cradle' pokazano je kako se ti gubici nadoknade u ostalim fazama životnog vijeka [5]. Za spomenutu namjenu, aluminij je potencijalni konkurent čeliku. Konkurentnost proizlazi iz povoljnih karakteristika aluminija kao što su mala vlastita težina, otpornost na koroziju, velike oblikovne mogućnosti poprečnih presjeka [6,7]. Također, kao i čelik, aluminij se može reciklirati beskonačno puta, a sekundarna proizvodnja aluminija konzumira samo 5% ukupne energije potrebne za primarnu proizvodnju i proizvodi 5% ukupne količine CO₂ primarne proizvodnje [8].

Kako bi se pronašlo optimalno rješenje i u pogledu održivosti, nakon provedene statičke analize i dimenzioniranja čeličnog i aluminijskog okvira gdje su određeni profili i mase pojedinog okvira provedena je komparativna analiza životnih ciklusa. S obzirom na to da su takvi konstrukcijski sustavi često primjenjivi u praksi, bitno je odrediti njihov utjecaj na okoliš. Analizom životnog ciklusa određeno je ekološki prihvatljivije rješenje, ali i pojedine faze životnog ciklusa s najnegativnijim utjecajem na okoliš.

2. Funkcijske jedinice

Dimenzije aluminijske i čelične hale su jednake kako bi se mogla napraviti usporedba. Tlocrtna dimenzija su 40 m x 10 m. Glavni nosivi sustav hale je dvozglozni okvir s dimenzijama prikazanim na slici 1. Okviri su postavljeni na razmaku od 4 m. Lokacija hale je Zagreb, na 160 m.n.v. Analiza opterećenja provedena je sukladno normama HRN EN 1991-1-1 [9], HRN EN 1991-1-3 [10] i HRN EN 1991-1-4 [11]. Ukupno dodatno stalno opterećenje sastoji se od pokrova, podrožnica i instalacija što iznosi 0,6 kN/m². Karakteristično opterećenje snijegom na tlu iznosi 1,25 kN/m². Opterećenje vjetrom određeno je za kategoriju terena III s osnovnom brzinom vjetera od 20 m/s. Provedena je analiza prvog unutarnjeg okvira za obje hale. Čelični i aluminijski okviri su dimenzionirani sukladno normama HRN EN 1993-1-1 [12] i HRN EN 1999-1-1 [13]. Primijenjeni razred čelika je S235 dok je primijenjena aluminijska legura EN-AW 6082 T6.



Slika 1. Geometrija čeličnog i aluminijskog okvira

Usvojeni profili za čelični okvir su sljedeći: IPE 270 za stupove i IPE 240 za prečku. Ukupna masa čeličnog okvira je 601 kg. Usvojeni profil za stupove i prečku aluminijskog okvira je IPE 330. Ukupna masa aluminijskog okvira je 307 kg.

3. Analiza životnog ciklusa

Provedena analiza životnog ciklusa '*cradle to grave*' predstavlja utjecaje na okoliš čeličnog i aluminijskog okvira. Faze životnih ciklusa određene su sukladno normi EN 15804 [14]. Razmatrane su faze proizvodnje (A1, A2, A3) i '*End of life*' faza (C1, C2, C3, C4) zajedno s potencijalnim negativnim ili pozitivnim utjecajima (D). Faza održavanja (B2) se razmatra samo za čelični okvir jer aluminijski okvir nije potrebno antikorozivno zaštititi, odnosno održavati.

Analiza životnog ciklusa provedena je upotrebom računalnog programa openLCA [15]. Faze životnog ciklusa pojedinog okvira su modelirane sa procesima iz baze podataka '*ecoinvent 3.11 EN15804GD Unit-Processes 2025-04-04*'. Procesima kojima su modelirane faze životnog ciklusa čeličnog okvira su prikazani u tablici 1. Za aluminijski okvir razmatrane su primarna i sekundarna proizvodnja aluminija pri čemu su razmatrani udjeli recikliranog aluminija od 25%, 50%, 75% i 100%. Procesima kojima su modelirane faze životnog ciklusa aluminijskog okvira prikazani su u tablici 2.

Tablica 1. Faze životnog ciklusa čeličnog okvira [15]

LCS ¹		Procesi					
Proizvodnja	'hot rolling'	'iron ore'	'iron scrap'	'coke'	'limestone'	'alkyd paint'	'lorry ³ '
Montaža	'lorry ³ '						
Održavanje	'alkyd paint'						
EOL ²	'market for waste steel'						

¹Faze životnog ciklusa, ²Kraj životnog ciklusa, ³freight lorry, 7.5-15 tons, diesel, EURO 6

Tablica 2. Faze životnog ciklusa aluminijuskog okvira [15]

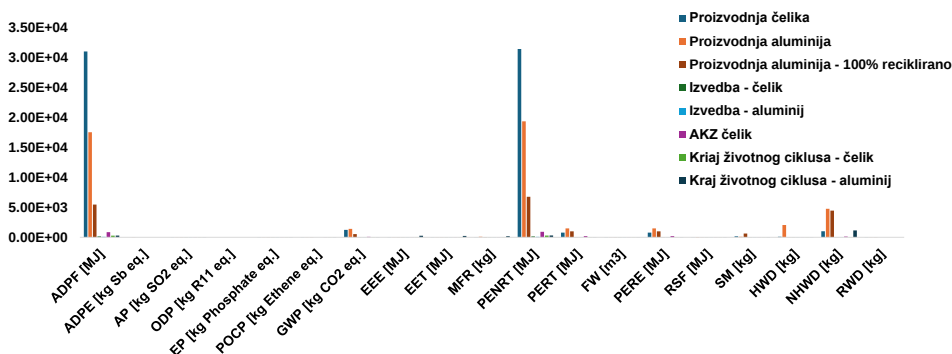
LCS ¹	Procesi						
1 ^o Proizvodnja	'extrusion ¹ '	'NaOH'	'AlF ₃ '	'cryolite'	'Al ₂ O ₃ '	'water'	'lorry ³ '
2 ^o Proizvodnja	'aluminium scrap'	'extrusion ⁴ '					
Montaža	'lorry ³ '						
EOL ²	'market for waste aluminium'						

¹Faze životnog ciklusa, ²Kraj životnog ciklusa, ³freight lorry, 7.5-15 tons, diesel, EURO 6,

⁴impact extrusion of aluminium, 1 stroke

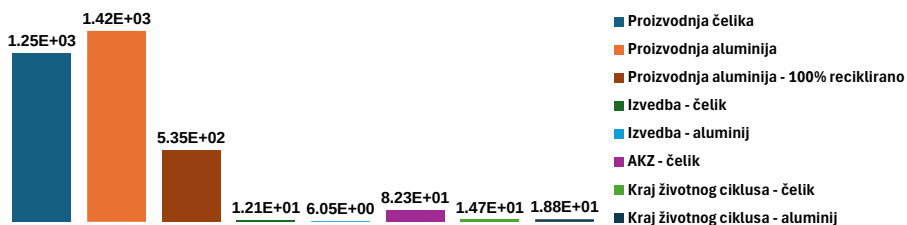
4. Rezultati analize životnog ciklusa

Na slici 2 prikazani su rezultati pojedine faze životnog ciklusa za pojedinu kategoriju utjecaja na okoliš. Očito je kako su najveće vrijednosti kategorija utjecaja na okoliš postignute u fazi proizvodnje čelika i aluminija što je bilo očekivano. Čelik ima do dva puta veće vrijednosti potencijala abiotičkog iscrpljivanja fosilnih goriva (ADPF) i ukupne upotrebe neobnovljivih primarnih izvora energije (PENRT) u odnosu na aluminij. S druge strane, aluminij ima nešto veće vrijednosti potencijala globalnog zatopljenja (GWP) i značajno veće vrijednosti u kategoriji odlaganja neštetnog otpada (NHWD).

**Slika 2.** Kategorije utjecaja na okoliš

Ako se detaljnije analizira ukupna količina emitiranog CO₂e kroz cijeli životni ciklus, slika 3, odnosno vrijednosti potencijala globalnog zatopljenja (GWP) kao jedne od značajnih kategorija utjecaja na okoliš, može se vidjeti razlika od 5,93% više CO₂e u odnosu na čelični okvir. Iako aluminij ima dva do tri puta veće vrijednosti emitiranog CO₂e po 1 kg u odnosu na čelik razlika za cjelokupni životni vijek je znatno manja. Razlog tomu je činjenica što je težina aluminijuskog okvira dvostruko manja i što za aluminijски okvir nije potrebna antikoroziivna zaštita. Također, ukoliko bi se u analizi životnog ciklusa kao sirovina koristi 100% reciklirani aluminij vrijednosti emitiranog CO₂e po 1 kg u fazi proizvodnje prema [16] bile bi jednake što bi za cijeli životni ciklus rezultiralo s 58,8% manjim emisijama CO₂e u korist aluminija. U slučaju udjela recikliranog aluminija od 25%, 50% i 75% izračunate su

manje emisije CO₂e u korist aluminija od 3,6%, 21% i 38,6%. Objašnjenja ostalih kategorija utjecaja dana su u [17].



Slika 3. Potencijal globalnog zatopljenja (GWP)

5. Zaključak

U radu je prikazana komparativna analiza životnih ciklusa čeličnog i aluminijskog okvira. Funkcijske jedinice su čelični i aluminijski okviri jednake visine, raspona i opterećenja. Prvo su dimenzioniranjem definirani profili za pojedini okvir te su određene ukupne mase okvira. Ukupna masa čeličnog okvira je 601 kg dok je masa aluminijskog okvira 301 kg. Na temelju dobivenih masa pojedinog okvira provedena je analiza životnog ciklusa pojedinog okvira te su uspoređeni rezultati. Razmatrane su faze životnog ciklusa od proizvodnje pa do kraja životnog ciklusa. Analizom životnog ciklusa je utvrđeno kako najveći utjecaj na okoliš ima faza proizvodnje profila za obje varijante okvira. Usporedbom rezultata zaključeno je kako je, iz aspekta utjecaja na okoliš, aluminij dobra alternativa čeliku s obzirom na to da je masa aluminijskog okvira dvostruko manja i zbog toga što nije potrebna antikorozivna zaštita. Iako primarna proizvodnja čelika i aluminija ima veliki utjecaj na okoliš, čelik i aluminij se opravdano smatraju održivim materijalima zbog malog utjecaja na okoliš u drugim fazama životnog ciklusa, vrlo dugog životnog vijeka i velikog reciklažnog potencijala. U slučaju 100% recikliranog materijala dobivaju se puno povoljniji rezultati u korist aluminija, a naročito u odnosu na druge građevinske materijale koji se ne mogu reciklirati beskonačno mnogo puta kao u slučaju ova dva konstrukcijska metala.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektima: IP-2022-10-9298, Pouzdane metode za proračun aluminijskih konstrukcija koje odgovaraju zahtjevima budućnosti (REAL-fit), voditelj Davor Skejić i UIP-2020-02-2964, Inovativna lagana međukatna konstrukcija – spregnuti sustav hladno oblikovani čelik i beton (LWT-FLOOR), voditelj Ivan Lukačević.

Literatura

- [1] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 29:394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.

- [2] Mrežna stranica Europske unije, link (https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en), pristupljeno: 14.05.2025.
- [3] Guggemos AA, Horvath A. Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems* 2005;11:93–101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93)).
- [4] Dixit MK, Fernández-Solís JL, Lavy S, Culp CH. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:3730–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>.
- [5] Lukačević I, Rajić A, Ungureanu V, Buzatu R. A comparative life-cycle assessment of structural composite steel-concrete floor systems – A case study. In: Biondini F, Frangopol DM, editors. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, London: Taylor & Francis; 2023, p. 751–8.
- [6] Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić. *Aluminijske konstrukcije*. Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; 2017.
- [7] Skejić D, Boko I, Torić N. Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* 2015;67:1075–85. <https://doi.org/10.14256/JCE.1395.2015>.
- [8] Dokšanović T, Farkaš M, Njegovanović N. Tržišna prihvatljivost građevinskog materijala s malim udjelom ugljika. *Elektronički Časopis Građevinskog Fakulteta Osijek - e-GFOS* 2012;3:1–20.
- [9] HRN EN 1991-1-1:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada (EN 1991-1-1:2002+AC:2009)
- [10] HRN EN 1993-1-3:2024, Eurokod 3 -- Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-3: Hladno oblikovani elementi i limovi (EN 1993-1-3:2024)
- [11] HRN EN 1991-1-4:2012, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-4: Opća djelovanja -- Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)
- [12] HRN EN 1993-1-1:2014, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005+AC:2009)
- [13] HRN EN 1999-1-1:2015, Eurokod 9: Projektiranje aluminijских konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila (EN 1999-1-1:2007+A1:2009+A2:2013)
- [14] Održivost građevina - Izjave o utjecaju proizvoda na okoliš - Osnovna pravila za kategorizaciju građevinskih proizvoda (EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021) 2021.
- [15] Green Delta GmbH, 2025, openLCA (2.4.0.).
- [16] Mrežna stranica: Sustainize, link (<https://www.sustainize.com/blog/how-much-co2-is-saved-when-an-aluminum-automobile-frame-is-used-instead-of-a-steel-one>), pristupljeno: 16.05.2025.
- [17] Rigueiro, Constança: SBRI+ Valorizacija spoznaja o održivosti spregnutih mostova u izgrađenom okolišu - Priručnik za projektiranje I: Opće informacije i riješeni primjeri, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018