

POSÚDENIE BUDOVY Z HĽADISKA UHLÍKOVEJ STOPY A CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY

ASSESSMENT OF BUILDING IN TERMS OF CARBON FOOTPRINT AND CIRCULAR ECONOMY

Jana Budajová*¹, Silvia Vilčeková¹, Peter Mésároš¹

*jana.budajova@tuke.sk

¹Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, Ústav pozemného stavitelstva, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovakia

Abstrakt

Stavebný priemysel je primárny zdroj environmentálnych vplyvov, najmä uhlíkovej stopy. Hodnotenie životného cyklu (LCA) sa používa na hodnotenie vplyvu skúmanej budovy na životné prostredie. Náklady na životný cyklus (LCC) z pohľadu cirkulárnej ekonomiky vytvárajú ekonomický model uprednostňujúci opätovné použitie a recykláciu. Cieľom tohto príspevku je posúdiť rezidenčnú budovu z hľadiska uhlíkovej stopy pomocou analýzy LCA a cirkulárnej ekonomiky pomocou analýzy LCC. Rezidenčná budova spôsobuje 1 756 ton CO_{2e}, čo predstavuje 41,35 kg CO_{2e}/m²/rok. Celkové odhadované náklady životného cyklu budovy v nominálnom vyjadrení sú 1 694 699,61 €. Priemerné celkové náklady životného cyklu 1 995,21 €/m².

Kľúčové slová

Uhlíková stopa, cirkulárna ekonomika, životný cyklus budov, náklady na životný cyklus

Abstract

The construction industry is the primary source of environmental impacts, especially the carbon footprint. Life cycle assessment (LCA) as an analytical method is used for quantifying the environmental impact of the investigated residential building. Life cycle costs (LCC) from the point of view of the circular economy create an economic model prioritizing reuse and recycling. The aim of this paper is to assess the residential building in terms of carbon footprint, using LCA analysis and circular economy, using LCC analysis. The residential building emits 1 756 tons of CO_{2e}, which represents 41.35 kg CO_{2e}/m²/year. The total estimated life cycle cost of the building in nominal terms is 1 694 699.61 €. This is the average total life cycle cost of 1 995.21 €/m².

Key words

Carbon footprint, circular economy, life cycle assessment, life cycle costs

1 ÚVOD

Nadmerné využívanie dostupných zdrojov a neustále sa rozvíjajúce mestá mali dôsledky v podobe znečistenia a nerovnováhy životného prostredia. Stavebný priemysel a jeho miestne a globálne dodávateľské reťazce sú zodpovedné za značné množstvo nesprávneho pridelovania zdrojov a využívania energie v kombinácii s emisiami skleníkových plynov (GHG). Udržateľnosť je široký pojem zahŕňajúci tri aspekty – ochranu životného prostredia, sociálnu rovnosť a ekonomickú bezpečnosť. Cirkulárna ekonomika je nevyhnutným predpokladom udržateľnosti [1]. Cirkulárna ekonomika (CE) poskytuje širokú škálu riešení na predĺženie životnosti budov s cieľom oddeliť vplyv na životné prostredie a ekonomický rast znížením spotreby surovín a predchádzaním vzniku odpadu udržiavaním hodnoty produktov čo najdlhšie. V strednej Európe je potrebné posunúť sa smerom k správnej hierarchii odpadu, od recyklácie po predchádzanie vzniku odpadu a opätovné použitie produktov a komponentov. Jedným zo spôsobov podpory CE by mohlo byť hodnotenie životného cyklu (LCA), ktoré sa stáva súčasťou predpisov a stáva sa kľúčovým nástrojom environmentálneho manažmentu v stavebníctve [2]. Stavebníctvo tvorí až 39 % celkových emisií CO₂ a približne 35 % celkového toku odpadu zo skládok [3]. LCA sa v súčasnosti vo veľkej miere využíva na hodnotenie vplyvov budov a zastavaného prostredia na životné prostredie vzhľadom na rastúci záujem o využívanie zdrojov v stavebníctve; spotreba energie počas ich prevádzky; likvidácia odpadu po skončení životnosti budov a súvisiace environmentálne dôsledky [4]. Tento článok hodnotí rezidenčnú budovu

z hľadiska uhlíkovej stopy pomocou LCA a CE jej vplyv na životné prostredie a ekonomiku. Môže byť budova bez negatívnych vplyvov na životné prostredie zároveň predražená? Túto otázku kladiem v tomto článku.

2 UHLÍKOVÁ STOPA

Pojem uhlíková stopa sa používa na označenie celkového množstva emisií CO₂ a iných skleníkových plynov (GHG), za ktoré je zodpovedná osoba alebo organizácia. Uhlíkovú stopu teda možno charakterizovať ako celkové množstvo CO₂ a iných skleníkových plynov emitovaných počas životného cyklu produktu alebo služby [5]. Uhlíková stopa je podkategóriou ekologickej stopy [6].

Podľa Kjótskeho protokolu existuje šesť hlavných skleníkových plynov s potenciálom spôsobiť zmenu klímy, pričom každý z nich má iný potenciál globálneho otepľovania. Na uľahčenie bola vplyvu otepľovania CO₂ priradená hodnota jedna a potenciál globálneho otepľovania iných skleníkových plynov sa používa na premenu bezuhlíkových plynov na ekvivalenty CO₂ [5].

Potenciál globálneho otepľovania (GWP)

Potenciál globálneho otepľovania (GWP) spôsobený emisiami skleníkových plynov sa vzťahuje na oxid uhličitý CO₂ a vyjadruje sa ako ekvivalent oxidu uhličitého CO_{2e} [7]. Pomocou GWP môžeme určiť uhlíkovú stopu produktu. GWP je toľko tepla (infračerveného žiarenia) koľko zachytí jednotka skleníkového plynu v atmosfére počas daného obdobia v porovnaní s tým, čo je zachytené v rovnakom množstve oxidu uhličitého (CO₂) [8].

Hodnotenie životného cyklu (LCA)

Uhlíková stopa môže byť hodnotená pomocou metódy LCA a vyjadrená prostredníctvom potenciálu globálneho otepľovania GWP. Životný cyklus budovy zahŕňa všetky etapy od jej vzniku cez vývoj počas života až po jej zánik. Naším cieľom je preto znižovať vplyv budov na životné prostredie počas celého životného cyklu budov [9].

Analýza životného cyklu budovy je riešená metódou LCA, ktorá hodnotí vplyv výstavby od prvej etapy ťažby, získavania materiálu, výroby stavebných konštrukcií cez zaťaženie počas prevádzky a aktívnej životnosti budovy až po likvidáciu odpadu a demoláciu [10]. Podľa tohto hodnotenia je možné stavbu posúdiť v rámci systémových hraníc:

- "od kolísky po bránu" alebo "od kolísky po bránu s možnosťami",
- "od kolísky po hrob"
- "od kolísky ku kolíske" [9].

Náklady na životný cyklus (LCC)

Náklady na životný cyklus sa môžu vykonávať v ktorejkoľvek fáze životného cyklu budovy. Náklady na životný cyklus (LCC) sú celkové náklady spojené s projektovaním a výstavbou budovy, prevádzkou a údržbou budovy, s výnimkou nákladov spojených s demoláciou budovy na konci jej životného cyklu.

Medzinárodná norma ISO 15686-5: 2008 poskytuje jasnú štruktúru rozpisu nákladov na zložky nákladov životného cyklu budovy, ktorá zahŕňa štyri hlavné kategórie, ktorými sú: 1. náklady na návrh a výstavbu, 2. prevádzkové náklady, 3. náklady na údržbu a 4. koniec - životné náklady. V rámci každej kategórie sú navrhnuté podrobnejšie zložky nákladov na pokrytie všetkých relevantných nákladov spojených s vlastníctvom budovy počas jej životného cyklu [11].

3 METÓDY A MATERIÁLY

Prípadová štúdia – rezidenčná budova

Rezidenčná budova sa nachádza v Poprade. Hrubá podlahová plocha je 849,38 m² na štyroch podlažiach. Budova je súčasťou komplexu štyroch rovnakých bytových domov a spĺňa tepelnotechnické požiadavky pre kategóriu A0 (nulová budova). Stavba má murovaný nosný systém z pálených tehál; stropy sú tvorené železobetónovými doskami hrúbky 160 mm. Budova je zateplená izoláciou Greywall EPS (expandovaný polystyrén). Hodnoty energetickej spotreby budovy sú 42,4 kWh/m² a elektrickej energie a 68,8 kWh/m². Uhlíková stopa obytnej budovy

bola vypočítaná na 1 m² podlahovej plochy za obdobie 50 rokov. Materiály použité v rezidenčnej budove, ich množstvo a cena sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Materiály, množstvo a náklady.

CLASS	QUANTITY	UNIT	€	CLASS	QUANTITY	UNIT	€
FOUNDATION				BEAM			
Aggregate (crushed gravel)	19,272	m ³	559	Ready-mix concrete C25/30	164,784	m ³	24965
Ready-mix concrete C16/20	13,178	m ³	1 996	Reinforcement steel (rebar)	5,863	ton	3 548
Ready-mix concrete C25/30	42,268	m ³	6 404	Reinforcement steel (rebar)	12,583	ton	7 614
Reinforcement steel (rebar)	1,82	ton	1 101	Ready-mix concrete C25/30	5,148	m ³	776
Ready-mix concrete C25/30	99,74	m ³	15111	Reinforcement steel (rebar)	0,651	ton	394
Formwork blocks	5,825	m ²	79	Ready-mix concrete C25/30	3,229	m ³	489
Formwork blocks	63,9	m ²	746	Reinforcement steel (rebar)	0,361	ton	218
Reinforcement steel (rebar)	0,628	ton	380	PVC roofing membrane	324	m ²	2 494
Aggregate (crushed gravel)	39,875	m ³	1 156	Geotextile	324	m ²	279
Geotextile	52,65	m ²	45	EPS 150 mm	11,9	m ³	827
Geotextile	66,603	m ²	57	EPS 150 mm	17,2	m ³	1 195
Asphalt penetration varnish	70,042	kg	538	PIR insulation 200 mm	232	m ²	3 371
EXTERNAL WALL				Asphalt roofing membrane			
Clay brick 25	190,127	m ³	21945	Bitumen roofing membrane	262	m ²	1 782
Clay brick 20	27,832	m ³	1 548	Penetration	68	kg	143
Clay brick 25	52,93	m ³	3 460	Oriented strand board (OSB)	262	m ²	2 835
Clay brick 2in1	7,057	m ³	815	PE foil	809,12	m ²	785
Masonry lintel	2	m	23	EPS 100 S 50 mm	214,19	m ²	169
Masonry lintel	85	m	988	EPS 100 S 100 mm	214,19	m ²	169
Masonry lintel	3	m	35	EPS acoustic floor slab	2,681	m ²	3
Clay brick 11,5 P10	318,396	m ³	15824	Rock wool insulation panels	623,095	m ²	683
Clay brick 14 P10	264,689	m ²	1 779	FINISH			
Formwork blocks	30,03	m ²	1 779	Lime plaster	480	kg	62
Aerated concrete Extruded polystyrene (XPS)	38,64	m ²	804	Penetration	3011,254	m ²	6 324
EPS 70 F 100 mm	70,8	m ²	1 415	Acrylic dispersion paint	140	kg	672
Greywall EPS 100 mm	90,8	m ²	579	Dispersion-based interior paints	2200	kg	10560
Greywall EPS 150 mm	61,546	m ²	478	Reinforcement steel (rebar)	9,6	ton	5 856
Greywall EPS 180 mm	612,866	m ²	7 141	DPL laminated flooring	618,375	m ²	2 962
SITE				Ceramic tiles			
	59,024	m ²	825	Waterproofing	231,663	m ²	1 297
					217,492	m ²	1 183

Ready-mix concrete								
C12/15	2,808	m ³	510	Silica (sand)	30,552	kg	5	
Aluminium plinth	68,3	m	464	Silicone resin plaster	95,475	kg	372	
Aggregate (crushed gravel)	5,265	m ³	153	Screed mortar	1737	kg	499	
OTHER				Screed mortar	722	kg	207	
Ready-mix concrete								
C25/30	6,889	m ³	1 044	Screed mortar	2 000	kg	574	
Reinforcement steel (rebar)	0,766	ton	464	Ready mix screed	21 976,071	kg	31138	
DOOR and WINDOW				Textile mesh	71,971	m ²	297	
External door	26,792	m ²	0	Silicone resin plaster	1 904,1	kg	3 515	
External door	27	m ²	3 828	Lime-cement plaster	71 000	kg	9 230	
External door	87	m ²	7 846	Dry mortar mixture	3 200	kg	4 368	
Window	173,51	m ²	34876	Lime-cement plaster	14 000	kg	1 820	
Interior door	86,68	m ²	0	Glass fibre mesh	89,02	m ²	191	

LCA analýza

Na analýzu vplyvov budovy na životné prostredie bol použitý softvér One Click LCA, ktorý pracuje v súlade s EN 15987, STN EN ISO 14040 a ISO 14044 pre systémovú hranicu „od kolísky po bránu s možnosťami“. Vplyvy na životné prostredie boli zisťované na celkovej podlahovej ploche budovy za obdobie 50 rokov. Hodnotenie LCA zahŕňa tieto fázy: etapa produktu (A1-A3), doprava z výroby na stavenisko (A4), výmena (B4), renovácia (B5), spotreba energie (B6), spotreba vody (B7), fáza konca životnosti (C1-C4), modul D.

LCC analýza

Kalkulácia životného cyklu sa vykonáva pomocou softvéru One Click LCA v súlade s normou ISO 15686-5 pri dodržaní štruktúry normy EN 16627. Analýza nákladov životného cyklu zahŕňa fázu produktu (A0 - A5), výmenu (B4), renováciu (B5), prevádzkovú spotrebu energie (B6), prevádzkovú spotrebu vody (B7) a fázu konca životnosti (C1-C4).

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

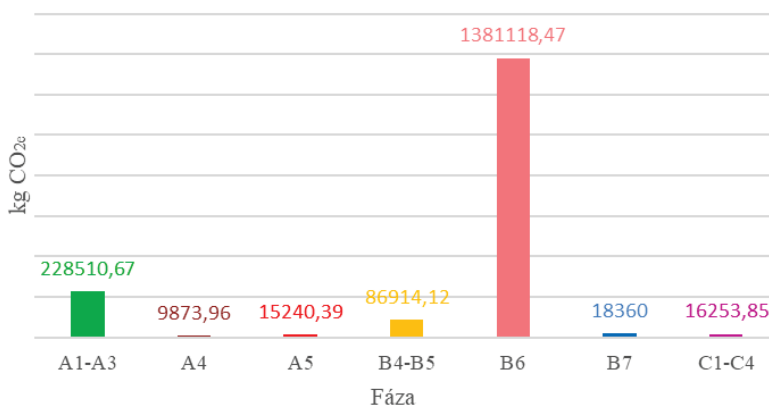
LCA – potenciál globálneho otepľovania GWP

V kategórii GWP má najväčší podiel na emisiách CO_{2e} prevádzková energetická fáza B6 až 78,6 %, nasleduje produktová fáza s 13 %, kde najnegatívnejší vplyv na vývoj majú použité tehly, malty a potery 25,5 % a 18,1 %. Životné prostredie. Fázou s najnižším podielom CO_{2e} je doprava s podielom 0,6 %. Spotreba elektriny a energie sú hlavnými prispievateľmi CO_{2e}.

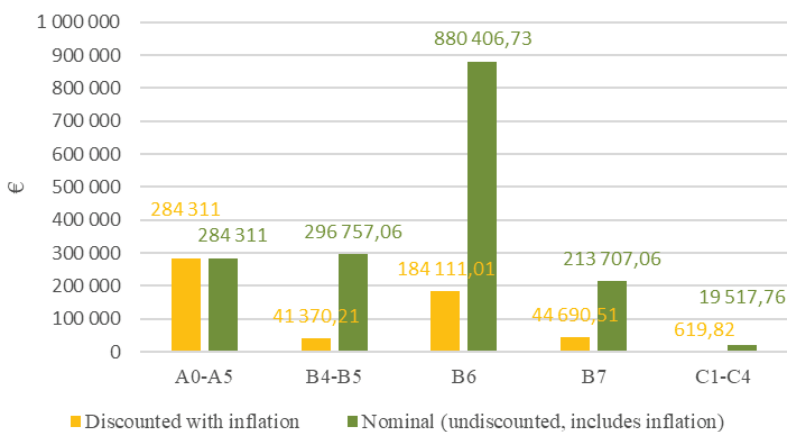
Celý objekt komplexne vytvára emisie CO_{2e} v rozsahu 1 756 ton CO_{2e}, čo je 41,35 kg CO_{2e}/m²/rok. Etapy, ktoré najviac prispievajú k uhlíkovej stope, sú prevádzková energia B6, produkt A1-A3 a obnova a renovácia B4-B5. Fáza transportu A4 najmenej vplyva na emisie. Výsledky sú uvedené na obrázkoch 1 a 2.

LCC výsledky

Celkové odhadované náklady životného cyklu budovy v nominálnej hodnote sú 1 694 699,61 €. Celkové náklady životného cyklu na hrubú podlahovú plochu sú 1 995,21 € / m² (1 694 699,61 € / 849,5 m²). Tabuľka Tab. 1 poskytuje celkový súhrn odhadovaných nákladov na životný cyklus a hmotnosti. Náklady na energiu tvoria 52,0 % z celkového rozpočtu životného cyklu. Okrem nákladov na energiu predstavujú náklady na výstavbu 16,8 % a náklady na údržbu budovy 17,5 %.



Obr. 1 Potenciál globálneho otepľovania GWP.



Obr. 2 Náklady na životný cyklus stavby.

Diskusia

Uhlíková stopa rezidenčnej budovy bola určená prostredníctvom GWP pomocou LCA. Predpokladaná životnosť bola vypočítaná na obdobie 50 rokov, čo sa bežne používa pri hodnotení LCA v stavebníctve. Celá budova produkuje emisie CO_{2e} v rozsahu 1 756 ton, čo predstavuje 41,35 kg CO_{2e}/m²/rok a 2 065 kg CO_{2e}/m². V porovnaní so štúdiou rezidenčných budov z juhovýchodného Turecka [12], ktorá hodnotí 5-poschodovú budovu a 13-poschodovú budovu, spôsobuje budova hodnotená na Slovensku menej emisií CO_{2e}. Rozsahy emisií v budovách sa pohybujú od 3 956 do 5 809 kg CO_{2e}/m².

V budovách sa posudzovali aj náklady na životný cyklus. Celkové náklady na životný cyklus sa odhadujú na 7,28 milióna USD, čo je 6,4 milióna € pre 5-poschodovú budovu a 1,72 milióna USD, čo je 1,5 milióna € pre 13-poschodovú. Náklady na stavbu tvoria 52–49 % z celkových LCC, pričom najdrahšie položky sú základy a podlahy. V porovnaní s riešenou stavbou na Slovensku, ktorá má celkové odhadované náklady životného cyklu 1,69 mil. €, majú vyššie náklady [12].

5 ZÁVER

Stavebné konštrukcie sa vyrábajú zo širokého spektra zdrojov energeticky náročnými procesmi, od ťažby surovín až po konečnú fázu likvidácie. Energeticky náročné procesy spotrebúvajú veľké množstvo energetických zdrojov a produkujú značné emisie a odpad. Vplyvy na životné prostredie spojené s výstavbou zahŕňajú ťažbu materiálu,

prepravu, výrobu produktu, fázu prevádzky, obnovu, koniec životnosti a recykláciu. Tieto fázy majú tiež značné ekonomické náklady. Posúdenie vplyvu na životné prostredie a nákladov na budovu ako celok je zložitá úloha, pretože si vyžaduje posúdenie všetkých jej prvkov a štádií životného cyklu [13]. Výsledky tejto štúdie poukazujú na to, že na uhlíkovej stope sa najviac podieľa prevádzková energia (78,6 %) a zároveň najväčšie náklady spôsobuje prevádzková energia. Množstvo emisií CO_{2e} je ovplyvnené nielen výberom materiálov, ale aj celkovou hrubou podlahovou plochou. Budúce výskumné práce budú zamerané na hĺbkovú analýzu a porovnanie environmentálnych a ekonomických aspektov viacerých budov s cieľom nájsť environmentálne priaznivé opatrenia.

PodĎakovanie

Táto štúdia bola finančne podporená Grantovou agentúrou Slovenskej republiky na podporu projektu č. 1/0512/20 a 1/0832/21.

Použité zdroje

- [1] MHATRE, Purva, Vidyadhar GEDAM, Seema UNNIKRISHNAN a Sanjeev VERMA. Circular economy in built environment – Literature review and theory development. *Journal of Building Engineering* [online]. 2021, 35 [cit. 2021-11-27]. ISSN 23527102.
- [2] JOENSUU, Tuomo, Roosa LEINO, Jukka HEINONEN a Arto SAARI. Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustainable Cities and Society* [online]. 2021 [cit. 2021-11-27]. ISSN 22106707.
- [3] KAMALI, Mohammad, Kasun HEWAGE a Rehan SADIQ. Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings* [online]. 2019, 204 [cit. 2021-11-27]. ISSN 03787788.
- [4] JOENSUU, Tuomo, Roosa LEINO, Jukka HEINONEN a Arto SAARI. Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustainable Cities and Society* [online]. 2021 [cit. 2021-11-27]. ISSN 22106707.
- [5] EAST, Andrew John. What is a carbon footprint? An overview of definitions and methodologies. In: *Vegetable industry carbon footprint scoping study—Discussion papers and workshop*, 26 September 2008. Horticulture Australia Limited. 2008.
- [6] ŠTEVO, Stanislav. Uhlíková stopa bývania v globalizovaných domoch. *TZB Haustechnik*. roč. 25: 16-20.
- [7] AMOO, Leye M. a R. LAYI FAGBENLE. Climate change in developing nations of the world. *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 437-471 [cit. 2021-11-27]. ISBN 9780128179499.
- [8] SHINE, Keith P. The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrieval. *Climatic Change* [online]. 2009, 96(4), 467-472 [cit. 2021-11-27]. ISSN 0165-0009.
- [9] KRAJCSOVICS, Lorant, Henrich PIFKO a Tatiana PIFKOVÁ. Ukážka energetickej efektívnosti a využitie obnoviteľných zdrojov energie na príklade verejných budov. *Zručnosti a príklady. Národný školiaci materiál (CEC5, 3sCE412P3)*.
- [10] PIFKO, Steven, Diego JANCHES, Sigrid CLOSE, Jonathan SPARKS, Takuji NAKAMURA a David NESVORNY. The Meteoroid Input Function and predictions of mid-latitude meteor observations by the MU radar. *Icarus* [online]. 2013, 223(1), 444-459 [cit. 2021-11-27]. ISSN 00191035.
- [11] DWAIKAT, Luay N. a Kherun N. ALI. Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications. *Journal of Building Engineering* [online]. 2018, 18, 303-311 [cit. 2021-11-27]. ISSN 23527102.
- [12] ATMACA, Adem. Life-cycle assessment and cost analysis of residential buildings in South East of Turkey: part 2—a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2016, 21(7), 925-942 [cit. 2021-11-27]. ISSN 0948-3349.
- [13] ISLAM, Hamidul, Margaret JOLLANDS a Sujeeva SETUNGE. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 42, 129-140 [cit. 2021-11-27]. ISSN 13640321.