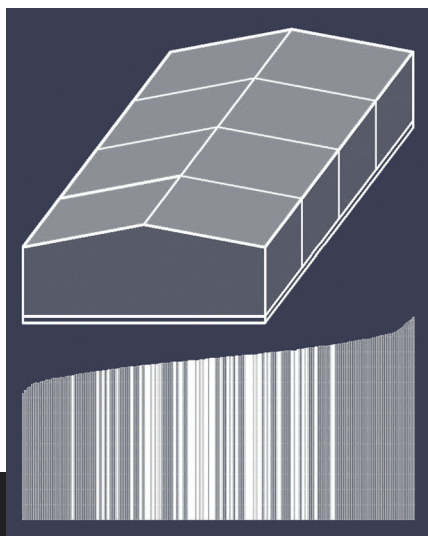




Raktár csarnokok összehasonlító beépített karbon elemzése

Comparative embodied carbon analysis of warehouses



V. Nagy Zoltán

okl. építőmérnök,
tartószerkezet tervező,
a Lapidárium Mérnöki Kft.
vezetője
vnagyzoltan33@gmail.com

Tartószerkezeti tervezőként fa-, acél- és vasbeton épületek statikai tervezésével, szakértésével, valamint műemléképületek rekonstrukciójával foglalkozom. Fontos számomra az épített örökség megőrzése és a szerkezetek fenntartható fejlesztése. Kutatási területem a szerkezeti rendszerek fenntarthatósági szempontú elemzése és összehasonlítása. Fontosnak tartom, hogy a mérnöki tervezésben egyre nagyobb hangsúlyt kapjon a környezeti hatások figyelembevétele.

Kivonat / Hun

Jelen cikk a magyar építési gyakorlatban előforduló, különböző épületszerkezeti kialakítású raktár csarnokok építéséhez köthető fajlagos szén-dioxid-kibocsátást elemzi a lakóépületekkel foglalkozó hasonló témájú elemzés folytatásaként. A raktár csarnokok külön figyelmet érdemelnek, mert jellegzetes épületszerkezeti megoldásaik jelentősen eltérnek a lakóépületektől és a hazai építési volumenük is számottevő. Az elérhető 2022-es statisztikai adatok alapján raktár csarnokokból és ipari épületekből a lakóépületeknél 40%-kal több alapterület épült hazánkban. Raktár csarnokok esetében az üzemeltetéshez tartozó karbon kibocsátás alacsony, így a beépített karbon fontossága felértékelődik. A cikk a különböző kialakítású csarnokok beépített karbon elemzése mellett ajánlásokat is megfogalmaz a környezetre figyelő tervezéshez.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, szén-dioxid lábnyom, beépített karbon értékelés, raktár csarnok

Abstract / Eng

The article analyses the carbon dioxide emissions associated with the construction of warehouses of different building systems of the Hungarian construction practice, as a second part of the previously presented analysis for residential buildings. Warehouses deserve special attention because their typical building design is very different from that of residential buildings and their domestic construction volume is significant. According to the available statistics for 2022, warehouses and industrial buildings account for 40% more floor area than residential buildings in Hungary. In the case of warehouses, the carbon emissions associated with their operation are low, thus the importance of embodied carbon is enhanced. In addition to an analysis of the embodied carbon of different types of warehouses, the article also provides recommendations for environmentally sensitive design.

Keywords: climate change, carbon footprint, embodied carbon benchmark, warehouse

Lektorált tartalom

1. | Bevezetés

A raktáracsarnokok a műszaki-gazdaságossági optimum megtestesítői az építőiparban. Kicsit olyanok, mint a haszonjárművek az utakon. Fő funkciójuk a raktározás, amit fajlagosan alacsony építési és üzemeltetési költséggel biztosítanak. A hazai építési gyakorlatban ez jellemzően moduláris előregyártott vasbeton, vagy acélvázzal készülő „dobozokat” jelent szendvicspanel burkolattal. Kiemelten fontos eleme még a raktáracsarnokoknak a megfelelő teherbírású és tartósságú ipari padló is.

Lakóépületeknél a környezettudatos tervezési szemlélet térnyerése az energiafogyasztás csökkentésére való törekvéssel kezdődött, és a mai napig ez az egyik fő hajtóereje a változásnak. Az építéssel kapcsolatos szén-dioxid-kibocsátások (beépített karbon) csökkentése – az energiamegtakarítással ellentétben – közvetlen anyagi haszonnal nem jár. A beépített karbon szerepe azért értékelődik fel, mert az energiahatékonyság javulásával a teljes karbonon (használati és építési kibocsátás) belüli aránya megnőtt, jelentőssé vált [1]. A teljes életciklusú szén-dioxid-kibocsátásra vonatkozó hatósági szabályozás az Európai Unióban már előkészítés alatt áll: az EU Taxonomy és a Level(s) keretrendszer alapján 2028-tól a nagyobb középületeknél, 2030-tól pedig általánosan is kötelező elem lesz az épületek teljes életciklusú (beépített és használati) karbonlábnymóának értékelése. Ezzel a karbonkibocsátás a tagállamok engedélyezési és minősítési eljárásainak szerves részévé válik. [2].

A raktáracsarnokok alapterületre vetített energiafelhasználása jelentősen eltér a lakóépületekétől, lényegesen alacsonyabb [3]. Jelen cikk általános célú, nem hűtőházakkal foglalkozik. Ezeknél az épületeknél a fő használati energiafogyasztást a világítás és a hűtés-fűtés jelenti. Kicsit megelőlegezve az elvégzett elemzés eredményét, nem csak a raktárépületek használati karbon kibocsátási szintje alacsonyabb, hanem a beépített karbon fajlagos szintje is. Míg egy lakóépületnél $139\text{--}547 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ -es értékeket számoltunk [4], ugyanez a raktáracsarnokoknál $166\text{--}266 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ között alakult. A lakóépületekhez viszonyítva a teljes karbon kibocsátáson belül a csarnoképületeknél jelentősebb a beépített karbon aránya, tehát jelentős szerepe lehet a kibocsátás csökkentésében.

Felmerülhet a kérdés, hogy mi a célja a raktáracsarnokokról szóló környezeti hatáselemzésnek? Legfőképp az, hogy az építési szándékot befolyásolhatja a műszaki alternatívák mellé társított ilyen információ. Megtudhatjuk, hogy a tervezett megoldásunk mellett van-e hasonló műszaki paraméterekkel bíró, közel azonos költségszintű, környezeti hatását tekintve kedvezőbb kialakítás. Emellett környezeti szempontú benchmarkingra is van lehetőség, amikor a rendelkezésre álló megoldások halmozán értékelhetjük a különböző változatok megfelelőségét. Ahhoz, hogy ezt megtehesünk, még a tervezés elején, a koncepciótervi fázisban kell rendelkezésre álljon ez az információ a különböző műszaki változatok esetére. Ilyen elemzések komplex megközelítése lehet például a BIM-et integráló parametrikus tervezés [5]. Jelen cikk ehhez képest egy jelentősen egyszerűsített,

inkább szemlélet fejlesztésre alkalmas módszert mutat be.

Itt és most a csarnokok környezeti minőségét egyszerűsített életcikluselemzéssel vizsgáljuk (LCA ISO 14040, 14044), mely során az építéshez szükséges anyagok típusaiból leltárt készítettünk, majd ezekhez rendelünk szén-dioxid-kibocsátás értékeket ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}$) a gyártói EPD-k (környezeti terméknnyilatkozatok) felhasználásával [6]. Ez egy egyszerűsített elemzés, mert csak az építőanyagok előállításával, szállításával és beépítésével foglalkozik (upfront carbon), üzemeltetéssel és bontás-újrahasznosítással nem. Érvényessége is korlátozott, mert csak a konkrét termékekből összeállított csarnoképületre vonatkozik. A szén-dioxid-kibocsátás mellett számos más környezeti indikátor elemzése is fontos lehet (pl. ózonréteg károsítás, savasodás, eutrofizáció). Jelentősége és ismertsége miatt itt csak az éghajlatváltozást generáló üvegházhatáshoz hozzájáruló szén-dioxid-kibocsátással (karbonlábnymómmal), azaz a GWP-vel (globális felmelegedési indexszel) foglalkozunk [7].

2. | Az épületszerkezetekhez tartozó fajlagos beépített-karbon-szintek

Az elemzés azzal kezdődött, hogy kijelöltük a raktáracsarnokok fő épületszerkezeit, úgymint a padlószerkezetet, a teherhordó szerkezetet, a homlokzatburkolatot és a tetőhéjalást. A padlószerkezet esetünkben az ipari padló az ágyazóréteggel együtt. A teherhordó váznál raszteres, ismétlődő keretvázat tételeztünk fel alapozással. A vázszerkezet közelítő geometriáját tartószerkezeti méretezéssel határoztuk meg. A homlokzatnál és a tetőnél a másodlagos teherhordó elemeket a burkolatok réteges felépítésében szerepeltettük.

Az volt a szándék, hogy ezek az épületszerkezet típusok a magyar tervezési gyakorlatban előforduló megoldásokat minél jobban reprezentálják. A különböző szerkezeti alternatívák összehasonlíthatóságát az teremtettem meg, hogy azonos mechanikai (MSZ EN) és hőtechnikai (ÉKM) elvárásoknak feleltettük meg őket.

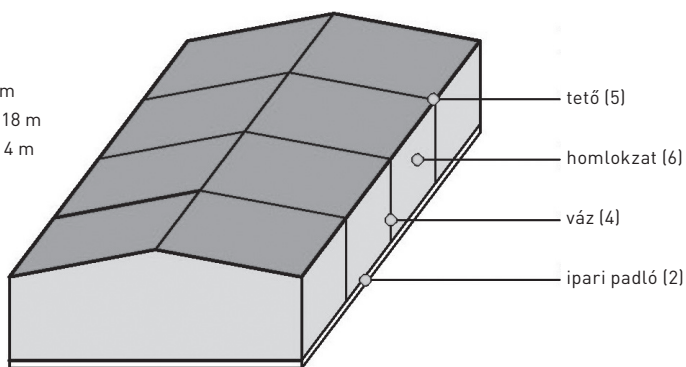
Csarnok geometria

keretek száma: 6 db

keretek távolsága: 6 m

csarnok szélessége: 18 m

csarnok magassága: 4 m



1. ábra: Az elemzett csarnok geometriája és az épületszerkezetek típusai

1. táblázat: Épületszerkezetek elnevezése és leltártartalma

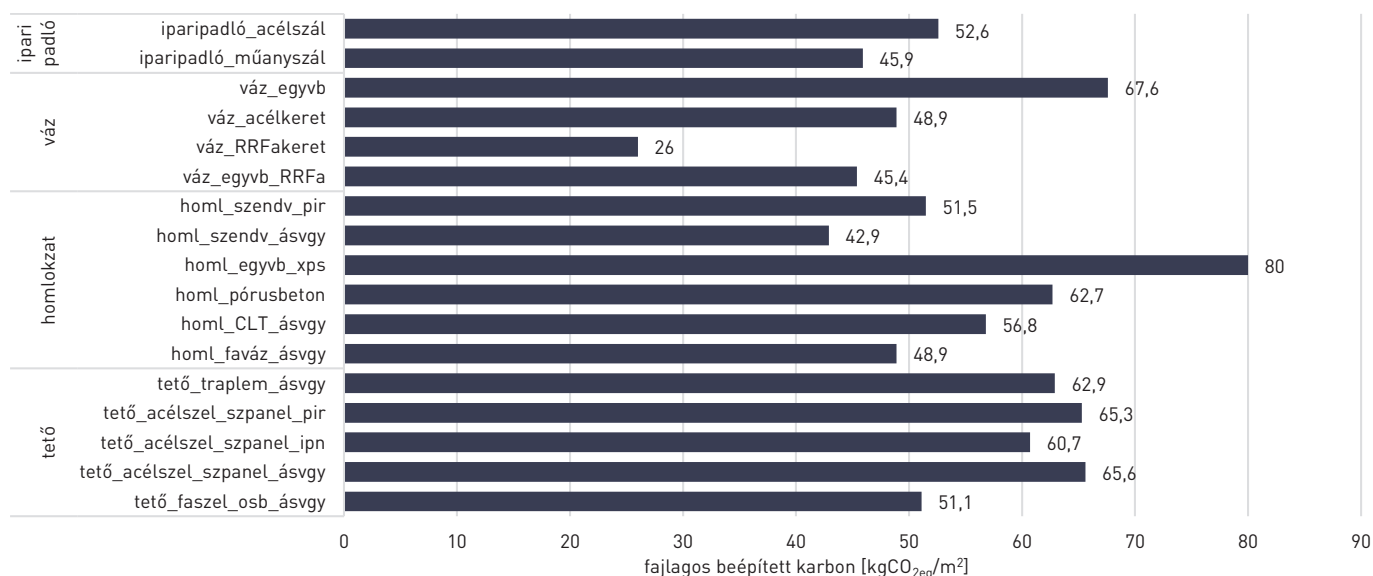
épületszerkezet	épületszerkezet megnevezése	épületszerkezte fő elemei
ipari padló	ipari padló_acélszál	zúzottkő ágyazat, 15 cm acélszállal erősített ipari padló, epoxi bevonat
	ipari padló_műanyagszál	zúzottkő ágyazat, 15 cm műanyag szállal erősített ipari padló, epoxi bevonat
vázszerkezet	váz_egyvb	mon. vb. tömbalap + egy. vb. kehely, egy. vb. pillér + feszített egy. vb. gerenda
	váz_acélkeret	mon. vb. tömbalap, kétsuklós egyedi hegesztett acélkeretváz
	váz_RRFakeret	mon. vb. tömbalap, háromsuklós RR fa keretváz
	váz_egyvb_RRFa	mon. vb. tömbalap + egy. vb. kehely, egy. vb. pillér + RR fa gerenda
homlokzat	homl_szendv_pir	homlokzati szendvicspanel, PIR hőszig.
	homl_szendv_ásvgy	homlokzati szendvicspanel, ásványgyapot hőszig.
	homl_egyvb_xps	egy. vb. panel, XPS hőszig.
	homl_pórusbeton	pórusbeton panel, ásványgyapot hőszig., szerelt fémburkolat
	homl_CLT_ásvgy	CLT falpanel, ásványgyapot hőszig., szerelt fémburkolat
	homl_faváz_ásvgy	BSH falváz, OSB, ásványgyapot hőszig., szerelt fémburkolat
tető	tető_traplem_ásvgy	acél trapézlemez, ásványgyapot hőszig., bitumenes lemez
	tető_acélszel_szpanel_pir	vékonyfalú acélszelemen, tető szendvicspanel, PIR hőszig.
	tető_acélszel_szpanel_ipn	vékonyfalú acélszelemen, tető szendvicspanel, IPN hőszig.
	tető_acélszel_szpanel_ásvgy	vékonyfalú acélszelemen, tető szendvicspanel, ásványgyapot hőszig.
	tető_faszal_osb_ásvgy	BSH faszelemen, OSB, ásványgyapot hőszig., bitumenes lemez

Az elemzéshez felhasznált algoritmus a Rhinoceros 3D (CAD) programon belül futó Grasshopperben készült, mely egy vizuális programozási nyelv és környezet [8]. A megkülönböztetett fő épületszerkezetek típusait, megnevezésüket, az altípusok számát, és a csarnoképület geometriai adatait az 1. ábra mutatja.

Az 1. táblázatban a különböző épületszerkezetek megnevezését és a leltárképzésben szereplő elemeiket foglaltuk össze.

Az elemzés első érdekes eredményei voltak, amikor a különböző épületszerkezeteknél megjelentek az építőanyagok karbonértékeiből kumulált érték, és érzékelhetővé váltak a különböző szerkezetek fajlagos karbonszintjeinek egymáshoz viszonyított arányai (2. ábra).

Látható, hogy az ipari padlók karbon-szintjénél a műanyagszálas megoldáshoz 13%-kal alacsonyabb kibocsátás tartozik. A tartószerkezetnél látványos a fa és vasbeton vázszerkezetek közötti különbség. A homlokzatoknál az előre-gyártott vasbetonpaneles kialakításnál volt várható a karbonintenzív vasbeton nagy mennyisége miatt a fajlagosan magas érték. Érdekes lehet az is, hogy az elemzett szendvicspanelek hasonló karbonszintet mutatnak a favázás megoldáshoz. Ebben szerepe van a hatékonyabb, vékonyabb hőszigetelésnek, és a faserkezetnél az elemzett rétegrendben szereplő szerelt fémburkolat



2. ábra: Épületszerkezetekhez tartozó fajlagos beépített karbon-kibocsátás értékek

magas karbonszintjének is. A tető fedésére szolgáló rendszerek között a fajlagos karbonszintben nem mutatott ki az elemzés jelentős különbséget.

A lakóépületeknél végzett elemzésre [4] visszautalva, a raktárcsarnoknál a fajlagos karbonértékek kevésbé eltérőek adott típusokon belül, ez alól csak a vázszerkezet tér el.

3. | A csarnoképületek beépített karbon elemzése

A következő lépésként teljes kombinációval, a különböző épületrésztípusokból generáltuk az összes műszakilag lehetséges csarnokialakítást. Ezekhez az épület változatokhoz számítottuk az összesített karbon kibocsátás értékeit, melyeket az alapterülettel (GIA) osztva fajlagosítottunk. Ezen értékek eloszlását mutatja a **3. ábra**. Azt, hogy ezen eloszláson belül a különböző szerkezeti változatok hol helyezkednek el, jól szemléltetik az 5-ös pontban bemutatott karboncsíkok.

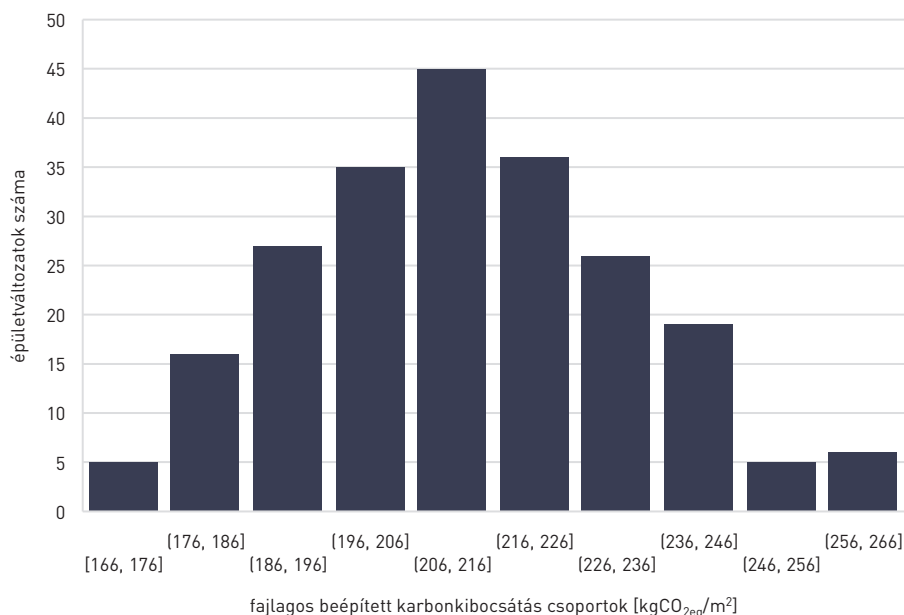
Három jellemző csarnoképületet emelnék ki a generált változatok közül, a legkisebb, a legnagyobb és az átlagos kibocsátású változatot:

Legalacsonyabb kibocsátás: 166 kgCO₂/m²

- iparipadló_acélszál: zúzottkő ágyazat, 15 cm műanyag szállal erősített ipari padló, epoxi bevonat
- váz_RRFakeret: monolit vasbeton tömbalap, háromcsuklós rétegelt-ragasztott fa keretváz
- homl_szendv_ásvgy: homlokzati szendvicspanel ásványgyapot hőszigeteléssel
- tető_faszal_osb_ásvgy: BSH faszelemen, OSB borítás, ásványgyapot hőszigetelés, bitumenes lemez

Legmagasabb kibocsátás: 266 kgCO₂/m²

- iparipadló_acélszál: zúzottkő ágyazat, 15 cm műanyag szállal erősített ipari padló, epoxi bevonat
- váz_egyvb: monolit vasbeton tömbalap + előregyártott vasbeton kehely, előregyártott vasbeton pillér + feszített, előregyártott vasbeton gerenda
- homl_egyvb_xps: előregyártott vasbeton panel XPS hőszigeteléssel
- tető_acélszel_szpanel_ásvgy: vékonyfalú acélszelemen, tető szendvicspanel ásványgyapot hőszigeteléssel



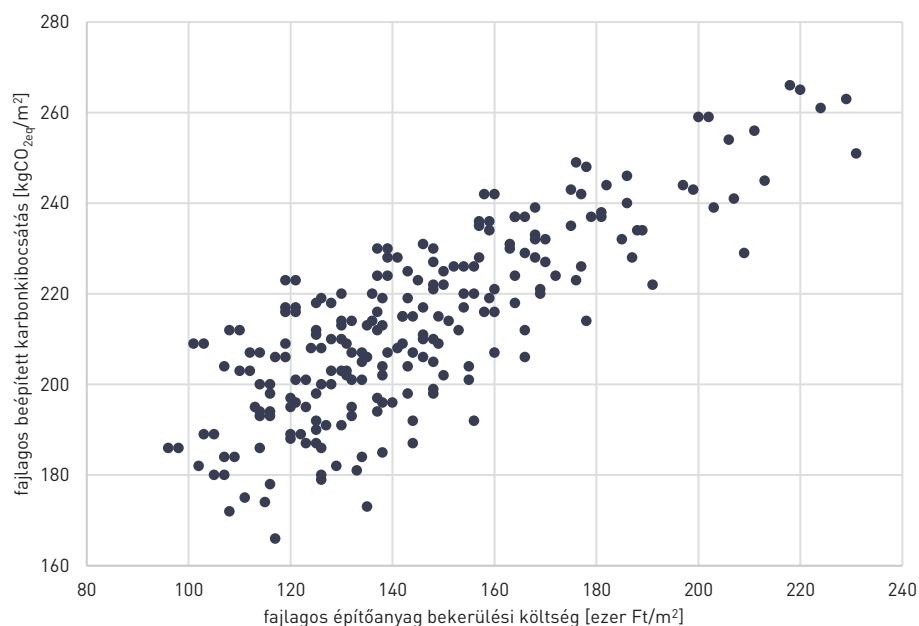
3. ábra: A csarnokváltozatokhoz tartozó fajlagos beépített karbonkibocsátás értékek eloszlása

Átlagos kibocsátás: 213 kgCO₂/m²

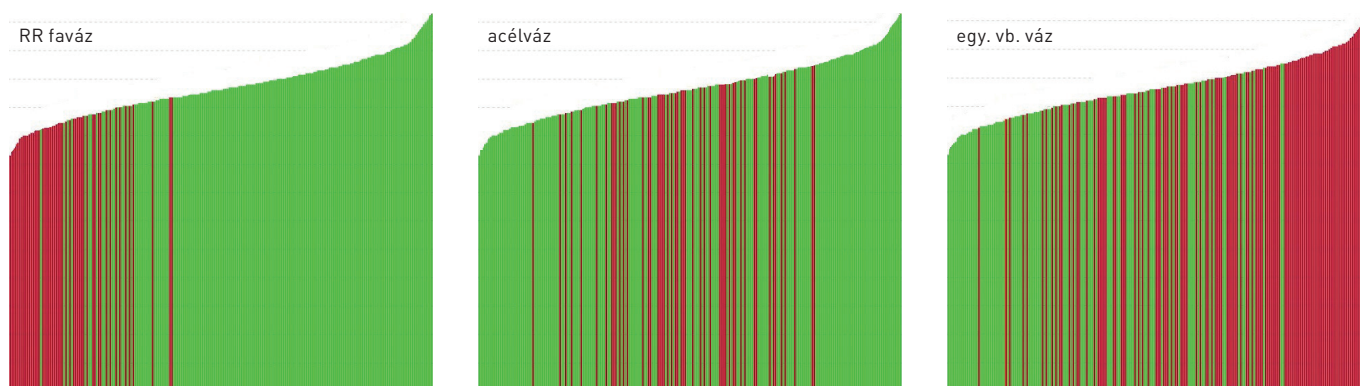
- iparipadló_acélszál: zúzottkő ágyazat, 15 cm műanyag szállal erősített ipari padló, epoxi bevonat
- váz_egyvb_RRFa: monolit vasbeton tömbalap + előregyártott vasbeton kehely, előregyártott vasbeton pillér + rétegelt-ragasztott fagerenda
- homl_faváz_ásvgy: BSH falváz, OSB borítás, ásványgyapot hőszigetelés, szerelt fémburkolat

- tető_acélszel_szpanel_ásvgy: vékonyfalú acélszelemen, tető szendvicspanel ásványgyapot hőszigeteléssel

Fontos megállapítás, hogy a generált csarnokváltozatok karbonszintje nem tér el jelentősen. A legkisebb és a legnagyobb érték között 60%-os a különbség. Ugyanez az eltérés a lakóépületeknél végzett elemzésben 294%-os volt [4].



4. ábra: A csarnokváltozatokhoz tartozó fajlagos beépített karbonkibocsátás értékek és az építőanyag bekerülési költségének összefüggései



5. ábra: A rétegelt-ragasztott faváz, az acélváz és az előregyártott vasbeton vázas csarnokok karboncsíkjai az összes generált változat között

4. | Építőanyagok bekerülési költségének és karbonkibocsátásának összefüggései

Érdekes és hasznos elemezni, hogy adott építési költség mellett milyen karbon kibocsátás eloszlás jelentkezik. Ezt mutatja a 4. ábra, ahol a vízszintes tengelyen a csarnokváltozatokhoz tartozó építőanyagok összesített bekerülési költségei, míg a függőleges tengelyen a karbon kibocsátás értékek szerepelnek. Az elemzés elkészítéséhez a 2023 novemberi tervezési munkák költségvetési kiírásainál használt építőanyag árakat használtuk fel. Látszik, hogy minden költség szinten jelentős különbségek vannak a karbon kibocsátás szintjében. Főleg az alsóbb költség szinteken van értelme elemezni és összehasonlítani a különböző műszaki megoldásokhoz tartozó kibocsátásokat, mert nem jelent automatikusan drágítást a beépített karbon szint csökkentése.

5. | Karboncsíkok

Egy tervező, építető számára hasznos ismeret lehet, hogy egy műszaki megoldás típus, például a vasbeton vázszerkezettel épülő csarnokokhoz tartozó kibocsátás értékek hol helyezkednek el a különböző lehetséges épület válto-

zatok között. Ezt jól lehet szemléltetni az 5. ábrán látható karboncsíkokkal.

Ezek az oszlopdiagramokon zöld csíkokkal a generált csarnokváltozatok karbon szintjei [$\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$] láthatók növekvő sorrendbe rendezve. A piros csíkok a kérdéses alváltozatok (RR faváz, acélváz, egy. vb. váz) előfordulását mutatják az összes generált változat között. Látható, hogy a faszervezetű csarnokok jellemzően karbon szegény épülettípust jelentenek. Az acél keretvázal készülő csarnokok karbon szintjei a közbelső, átlagos zónába esnek. Az előregyártott vasbeton kialakítások jellemzően karbon intenzívek, de jó tervezéssel ezt lehet kompenzálni.

6. | Összefoglalás

A raktárcsarnokok ökológikus tervezésére, ezen belül a beépített karbon számítására kevesebb figyelem irányul, mint a lakóépületek esetén, pedig az építési volumenük jelentősebb és a teljes karbon kibocsátásukon belül az épített karbon aránya is magasabb.

A cikkben bemutatott egyszerűsített életciklus elemzésen alapuló módszer bármely gyakorló mérnök számára elérhető, mivel nyilvánosan elérhető EPD adatok felhasználásával készül. Segítségével az éghajlatváltozásban játszott szerepét felfogó és felelősen gondolkodó tervezőmérnök a

gyakorlatban elemezheti tevékenysége hatását.

A bemutatott elemzés szerint a raktárcsarnokok kibocsátásértékei az egyenletes karbon szintű épületszerkezeti megoldások miatt kisebb spektrumban szóródnak, mint a lakóépületek értékei. A fa-acél-vasbeton karbon intenzitási sorrend is itt jelentkezik. Fontos azonban kiemelni, hogy mint a karbon csíkokon is látszik, önmagában egy anyag használata nem minősíti az épület környezeti minőségét. Jó beépített karbon kibocsátási szintű épülethez gondos tervezés vezet el.

Források

- [1] Aileen Carroll: Embodied carbon vs. operational carbon. OneClickLCA, 2025.02.10., <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/embodied-carbon-vs-operational-carbon>
- [2] oneClickLCA: Regulations and policies driving embodied and whole life carbon, weboldal, <https://www.oneclicklca.com/regulations-and-policies-driving-embodied-and-whole-life-carbon/>
- [3] APS: What type of building uses the most energy?, weboldal, <https://www.s4btradeally.com/what-type-of-building-uses-the-most-energy/>
- [4] V. Nagy Zoltán: Lakóépületek összehasonlító beépített karbon elemzése, Magyar Építőipar 73. évf. 3. szám (2024), 122-126. o., DOI10.17168/MEIP.2024.73.122
- [5] Ajtayné Károlyfi Kitti, Szép János: A parametric BIM framework to conceptual structural design for assessing the embodied environmental impact. Sustainability 2023, 15, 11990. <https://doi.org/10.3390/su15111990>
- [6] EPD-Online Platform: Institut Bauen und Umwelt e.V (IBU), <https://epd-online.com>