

Épületek ökológiai lábnyoma: fából vagy betonból építsünk?

Szigeti Cecília¹, Szennay Áron², Major Zoltán³

DOI: [10.29180/978-615-6342-49-2_25](https://doi.org/10.29180/978-615-6342-49-2_25)

Absztrakt

Az építés és építőipar egyik legjelentősebb természeti erőforrás-fogyasztó és jelentős mennyiségű széndioxid (CO₂) kibocsátásért felelős (Kumar és mtsai., 2021), valamint az egyik legnagyobb anyagáramot jelentő emberi tevékenység. Kutatásunk célja annak meghatározása, hogy az építőiparban mekkora környezeti hatás kerülhető el innovatív, környezetbarát technológiák alkalmazásával. Elemzésünkben a környezeti hatást – korábbi kutatásainkhoz hasonlóan – az ökológiai lábnyom mutatóval mértük. Az alkalmazott minta két, hasonló méretű, kb. 100 m² alapterületű családi házat tartalmazott, ahol a Ház 1 egy gerendaház, amely, kizárólag fa, illetve faipari termékekből épült, míg a Ház 2 a manapság bevett, betonszerkezetes, falazóblokkos technológia alkalmazásával készült. A vizsgálatban kizárólag azokat az elemeket szerepeltettük, amelyek a két épület esetében eltérnek, a potenciálisan hasonló tételeket (pl. alapozás, tetőfedés, gépészet stb.) figyelmen kívül hagytuk. Számításaink alapján a Ház 2 megépítéséhez a Ház 1-hez képest közel négyszer annyi (11,17 vs. 39,88 tonna) CO₂ kapcsolódik. Ennek elsődleges oka, hogy a Ház 1 lényegesen kisebb térfogatú, tömegű, ezáltal környezetterhelésű anyag beépítését igényli.

Kulcsszavak: környezeti hatások mérése, ökológiai lábnyom, lakóépületek

Bevezetés

Az építés és építőipar egyik legjelentősebb természeti erőforrás-fogyasztó és jelentős mennyiségű CO₂ kibocsátásért felelős (Kumar és mtsai., 2021), valamint az egyik legnagyobb anyagáramot jelentő emberi tevékenység. Az anyaghasználat növekedése és a természeti erőforrásaink csökkenése közötti egyértelmű korreláció miatt minimális feladat, hogy az építőipar anyaghasználatja lassabban növekedjen, mint a kapcsolódó nemzeti termék (Bruttó Hazai Termék, GDP) növekedése (Beleznay, 2021). Ezen cél, valamint a minimális feladaton túlmutató valódi fenntarthatóság elérése érdekében szükséges az egyes projektek környezeti hatásainak mérése, illetve a mérési adatok alapján a folyamatok optimalizációja, az innovatív, kisebb környezetterhelésű anyagok, módszerek és folyamatok alkalmazása.

Korábbi kutatási eredményeink arra utalnak, hogy a vállalkozások környezetterhelése – a felhasznált anyagok kivételével – egy könnyen használható online kalkulátor által meghatározható (Szennay, Szigeti, és mtsai., 2021; Szigeti és mtsai., 2021). Mivel az anyaghasználat csak néhány szektor, így például az építőipar esetében játszik fontos szerepet, ezért egy, az online kalkulátort kiegészítő, ún. szatelit kalkulátort terveztünk és teszteltünk két családi ház mintáján. A tapasztalatok alapján az ökológiai lábnyom számítás ebben az esetben is könnyen standardizálható, hisz a házak teljes környezetterhelését néhány, nagyobb volumenben felhasznált és kifejezetten nagy környezeti hatású tétel (pl. beton, betonacél, falazóelemek, szigetelés) határozza meg (Szennay, Major, és mtsai., 2021)

¹ Budapesti Gazdasági Egyetem, A Fenntarthatóság Gazdasági és Társadalmi Hatásai Kiválósági Központ; Pénzügyi és Számviteli Kar, Menedzsment Tanszék, e-mail: szigeti.cecilia@uni-bge.hu

² Budapesti Gazdasági Egyetem, A Fenntarthatóság Gazdasági és Társadalmi Hatásai Kiválósági Központ; Budapesti Gazdasági Egyetem, Pénzügyi és Számviteli Kar, Pénzügy Tanszék

³ Széchenyi István Egyetem Győr, Építés-, Építő- és Közlekedésmérnöki Kar, Közlekedéscépesítési és Vízmérnöki Tanszék

Jelen írásban egy, a kutatási folyamat későbbi szakaszában fejlesztett, még nem publikált, standardizált építőipari kalkulátort tesztelünk két eltérő építési technológiával készült, egy faszerkezetes, illetve egy, ma bevettnek tekinthető betonszerkezetes, falazóblokkokból épült családi ház mintáján. Célunk annak meghatározása, hogy mennyiben tekinthető környezettudatos választásnak egy gerendaház építése a leginkább elterjedt technológiákhoz képest.

A cikk 2. fejezete az építőipar üvegházgáz-kibocsátáshoz való hozzájárulását, innovatív trendjeit, valamint a környezeti hatás számítás elméleti háttérét foglalja össze. Az azt követő fejezetekben előbb az alkalmazott vizsgálati módszertant és a mintát, majd az eredményeinket bemutatjuk be. Az anyag az eredmények diszkussziójával és összefoglalásával, valamint a limitációkkal és a lehetséges további kutatási irányok felvázolásával végződik.

Szakirodalmi háttér

Globálisan az építőipar az összes erőforrás 50%-át, az összes energia 45%-át használja fel (Anzagira és mtsai., 2019). Ezért az éghajlatváltozás elleni küzdelem egyik legfontosabb eszköze az építőipar szén-dioxid-kibocsátásának csökkentése lehet. Ezek az erőfeszítések magukban foglalják magát a zöld épület (green building, GB) koncepciót, a különböző tanúsítási rendszereket és a fenntartható építőanyagok használatát (Labaran és mtsai., 2022). Egy épület akkor tekinthető zöld épületnek, ha a minősítő értékelési folyamat alapján mind a tervezése, mind a kivitelezése képes teljesíteni a meghatározott környezeti teljesítmény minimális szintjét. Ilyen zöld épület minősítési eszközök például a LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), a BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), a Green Star, a CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) stb. (Anzagira és mtsai., 2019). Bár az építőipar közvetlen környezeti lábnyoma viszonylag kicsi, ezek a számok jelentősen megnőnek, ha figyelembe vesszük a felhasznált anyagok előállításához kapcsolódó CO₂ kibocsátást is: egy brit tanulmány szerint az ország szénlábnyomának több mint fele közvetlenül vagy közvetve az infrastruktúra építéséhez és használatához kapcsolódik (Jackson, 2020). Bár az épületekhez köthető CO₂ kibocsátásának csökkentésére irányuló törekvés jól ismert és széles körben elfogadott, a megvalósítása mégsem egyszerű. Magyarországon a probléma különösen jelentős, mert szakértői becslések szerint jelenleg az épületállományunk több, mint 95%-a elavult (Beleznay, 2021).

A CO₂ kibocsátás csökkentésének egyik lehetősége az innovatív anyagok felhasználása. Egy tanulmány szerint egy 120 méteres felhőkarcoló építéséhez fa felhasználásával az épület szén-dioxid-kibocsátása 75%-kal csökkenthető (Holthaus, 2020). A fa épületek hatékony és más megoldásoknál (pl. földalatti tárolás) biztonságosabb szén megkötési lehetőségnek is tekinthetők, hiszen az alapanyag a fotoszintézis során a légköri CO₂-t építik be, amely végül az épület fog tárolni. További előny, hogy a fa ebben az esetben végső soron CO₂ intenzív építőanyagokat helyettesít, tehát további kibocsátás takarítható meg (Churkina és mtsai., 2020). Modelleredmény szerint 2100-ig az városokba költöző népesség 90%-ának lakhatása is megoldható közepesen magas (mid-rise) fa épületekben, amely jelentős mértékben csökkentheti a CO₂ kibocsátást (Mishra és mtsai., 2022). A szerzők kiemelik, hogy az intézkedés várhatóan nem jár a mezőgazdasági termelés nagyobb csökkentésével, ugyanakkor jelentős mennyiségű új erdő telepítésére, sőt a jelenleg nem védett erdők kitermelésének a fokozása szükséges, amely komoly tervezési, monitorozási és szabályozási igényt jelent.

Másik lehetőség, hogy a vasbeton helyett egy betonból és szénzál-erősítésből álló kompozit anyagot használnak (carbon concrete, CC). A szénzálak szakítószilárdsága körülbelül hatszorosa az acélénak, így a CC viszonylag alacsonyabb betontartalommal tervezhető, így cementet és adalékanyagot lehet megtakarítani (Mostert és mtsai., 2022). Ez azért lényeges, mert világszerte a cement és az acél az építőipar anyagokkal kapcsolatos kibocsátásának két

legjelentősebb forrása. A cementgyártás felelős a globális szén-dioxid-kibocsátás 7%-áért, az acélgyártás az összes kibocsátás 7–9%-áért, amelynek fele az építésben kerül felhasználásra (Beleznay, 2021).

A körforgásos gazdaság irányába való elmozdulás megvalósítható az újrahasznosított adalékanyagok építési termékekbe való beépítésével, ami hozzájárulhat a hulladéklerakókba kerülő hulladék mennyiségének csökkentéséhez. A könnyűbeton (lightweight concrete, LWC) alkalmazása környezetvédelmi és gazdasági szempontól is jelentős (Hoffman és mtsai., 2003). Egy kutatócsoport a települési szilárd hulladék égetési hamuból, salakból és márványiszapból készült mesterséges adalékanyagokat használt fel az LWC előállítására, amely nem szerkezeti alkalmazások felé orientálható (Farina és mtsai., 2022).

A fenntartható építés megvalósításának másik módja a meglévő technológiák hatásainak jobb mérése. Ennek megkönnyítésére számos eszközt fejlesztettek ki. Az épületinformációs modellezés (Building Information Modeling, BIM) használata például a beépített anyagok típusának és pontos mennyiségének, illetve a kapcsolódó munkafolyamatok tervezése, ismerete és optimalizációja által lehetőséget kínál az épületek szén-dioxid-kibocsátásának csökkentésére (Liu és mtsai., 2022), egyes fejlettebb változatai komplex létesítmény menedzsmenttel akár az épület egész életciklusa során. Számos kezdeményezés létezik az építőiparban a szén-dioxid vagy szén-dioxid-egyenérték mérésére. A szén-dioxid-kalkulátorok két módszertani csoportba sorolhatók. Az egyik megközelítésben a felhasználók úgy végeznek értékelést, hogy minden egyes felhasznált elemet vagy anyagot kézzel beírnak egy táblázatba, majd az eszköz hozzárendel egy szén-dioxid-kibocsátási tényezőt az adott elemhez. A második megközelítés egy meglévő adathalmazt vesz alapul, amely lehet mennyiségi leltár vagy BIM-adatok formájában, és automatikusan hozzárendel egy kibocsátási tényezőt minden egyes elemhez (Jackson, 2020). Sok építőipari vállalat főként azokat a szén-dioxid-kibocsátásokat hozza nyilvánosságra, amelyek felett teljes mértékben rendelkezik ellenőrzéssel és információval, ami azt jelenti, hogy a további kibocsátáscsökkentés esélye veszélybe kerülhet (Labaran és mtsai., 2022). Míg egyes eszközök ágazatspecifikusak, és mint ilyenek, speciális adatkészleteket igényelnek, mások, mint például az Atkins Carbon Critical Knowledgebase, minden ágazatban használhatók. A legtöbb eszköz az Inventory of Carbon and Energy (ICE) adatbázist használja, amely egy szabadon hozzáférhető, megtestesült szén- és energiaadatbázis az építőanyagokra vonatkozóan (Hammond & Jones, 2008). Az adatbázist 2019-ben frissítették, ami azt jelenti, hogy az építőipar számára valószínűleg még sokáig ez lesz a "go to" adatbázis. Vannak olyan eszközök, amelyek segítségével a felhasználók kiválaszthatják az igényeiknek leginkább megfelelő nemzeti adatbázist (Jackson, 2020). Egyes felmérések azt mutatják, hogy a jelenlegi digitális eszközökkel sikerült automatizálni a szénlábnyom (carbon footprint, CF) számításokat, de a fejlettségi szint még messze van az intelligens számításoktól, mivel az eszközöket nem lehet könnyen adaptálni (Yan és mtsai., 2022).

A környezeti hatásvizsgálatok túlmutathatnak a CF-számításokon, egyes kutatócsoportok különböző számításokat végeznek. Az épületek életciklus-értékelése (life-cycle analysis, LCA) alapvető eszközzé vált az építőipar környezeti hatásainak minimalizálásában és annak lehetővé tételében, hogy az építőipari ágazat a fenntarthatóság felé mozduljon el (Fenner és mtsai., 2018). A környezeti teljesítményt a globális felmelegedési potenciál (global warming potential, GWP), a fosszilis erőforrások szűkössége (fossil resource scarcity, FRS), az ásványi erőforrások szűkössége (mineral resource scarcity, MRS) és a vízlábnyom (water footprint, WF) alapján értékelik; a kumulatív energiaigényt (cumulative energy demand, CED) az energiateljesítmény (Leão és mtsai., 2022), az anyag-, energia- és éghajlati lábnyom (Mostert és mtsai., 2022) alapján. Pulselli és szerzőtársai (2008) kidolgozták az Emergy Investment Ratio (EIR) szintetikus fenntarthatósági mutatót építőipari alkalmazásokhoz. Az eredményeik azt mutatták, hogy a cement- és betongyártás nagymértékben függ a külső erőforrás-áramlásoktól. Ezenkívül az EIR magas értéke gyenge versenyképességre utalt a külső instabilitásokkal szembeni

nagyfokú érzékenység miatt. Bastianoni és munkatársai (2006) az ökológiai lábnyom (ecological footprint, EF) mutatót használják az épületek építésének környezeti hatásának kiszámítására két olaszországi épülettípus tanulmányozásával és összehasonlításával. Az egyes lakóépületekre vonatkozó számítások során az EF nem tartalmazza a közvetetten elfoglalt földterületet, az építési és bontási hulladéklerakókat és a bontási energiát. Ennek eredményeképpen a számított teljes EF némi pontatlanságot tartalmazhat. Az "életciklus-ökológiai lábnyom" (LCEF) e módszer továbbfejlesztése az építőanyagok környezeti hatásainak értékelésére (Kumar és mtsai., 2021). Az ökológiai lábnyom mutató használata jó megoldásnak tekinthető, mert más kalkulátorokkal ellentétben a növekedésnek is felső határt szab (Tóth & Szigeti, 2016).

Módszertan és az alkalmazott minta

A vizsgálatban két, kb. 100 négyzetméter alapterületű, sátortetős családi ház ökológiai lábnyomát számszerűsítettük. A Ház 1 egyszintes, valamennyi statikai, építő és kiegészítő eleme fából, illetve faipari termékből készült. Ezen épületről egy nem szabványos kimutatás állt rendelkezésünkre a beépítésre kerülő anyagok mennyiségéről és minőségéről. A Ház 2 a korszerű építési módszereknek megfelelően vasbeton szerkezettel, téglafalakkal épült, továbbá tetőtér beépítéssel és garázzsal is rendelkezik. Ebben az esetben a magyar gyakorlatban általánosan alkalmazottnak tekinthető – (árazatlan) tervezői költségbecslés állt rendelkezésünkre. Mivel mindkét épület esetében hasonló méretű és típusú alapozással, ablakokkal és tetőfedéssel alkalmazható, ezért a vizsgálatban az azonosnak tekinthető tételeket figyelmen kívül hagytuk. Ennek megfelelően a Ház 2 esetében az építőiparban elterjedt árazatlan költségbecslésből csupán az alábbi lapokat vettük alapul: (1) helyszíni beton és vasbeton munka (kivéve aljzatbeton építés); (2) előregyártott épületszerkezet; (3) falazás és egyéb kőművesmunkák; (4) ácsmunka; (5) vakolás és rabicolás; (6) Könnyűszerkezet építés. Az ökológiai lábnyom kalkulációkat négy lépésben hajtottuk végre. Elsőként a kimutatások transzformációját végeztük el, vagyis az azonosítottuk, hogy az abban feltüntetett tételek anyagát (pl. beton, természetes fa, poli(vinil-klorid) [PVC] stb.), továbbá átszámítottuk azokat a kalkulációban preferált mértékegységre (pl. m², m³, db stb.). Az azonos mértékegység lehetővé teszi, hogy a különböző kiszerelésben (pl. 10, 15 vagy 30 cm vastagságban) felhasznált anyagokat a kalkuláció során aggregáljuk.

A második lépésben az azonosított és közös mértékegységre átszámított anyagféleségeket a teljes épületre vonatkozóan aggregáltuk. Ezt az indokolja, hogy a kimutatások logikája az építkezés munkafolyamatait tükrözi, ami azt jelenti, hogy egy anyagféleség nem csak többféle kiszerelésben, hanem több munkafolyamatban vagy több tételben is előfordulhat.

Egyes anyagféleségeknél további mértékegység konverzióra van szükség, ugyanis előfordulhat, hogy az EF adatbázisban a preferált mértékegységtől eltérő mértékegységben kifejezett fajlagos érték szerepel. Fontosnak tartjuk kiemelni, hogy a preferált mértékegység a költségvetés tételeinek összevonását szolgálja, így elsősorban a tervezői szempontot tükrözi. Ugyan ez a legtöbb esetben megfelel az EF adatbázisban szereplő mértékegységgel, néhány kisebb tétel (pl. PVC dilatációs profilok stb.), valamint a nyílászárók esetében további kiegészítő kalkulációkra van szükség.

A tényleges EF számítást, vagyis az azonosított és összevont anyagféleségek fajlagos EF értékek általi értékelését a negyedik lépésben végeztük el. A fajlagos értékeket (Hammond & Jones, 2008) Inventory of carbon and energy 1.6a változata alapján határoztuk meg. A felhasznált anyagféleségek és az inventory-ban szereplő tételek nem feltétlen voltak egymással megfeleltethetők, ezért az inventory-ba számos új elemet vettünk fel (pl. falazóelemek). Hasonlóan, új elemek felvételét alkalmaztuk abban az esetben, ha az inventory fajlagos értéke – műszaki okokból kifolyólag – viszonylag tág intervallumot zár be. Ilyen esetben valós termékek adatainak felvételével igyekeztünk az intervallumból a ténylegesen beépített

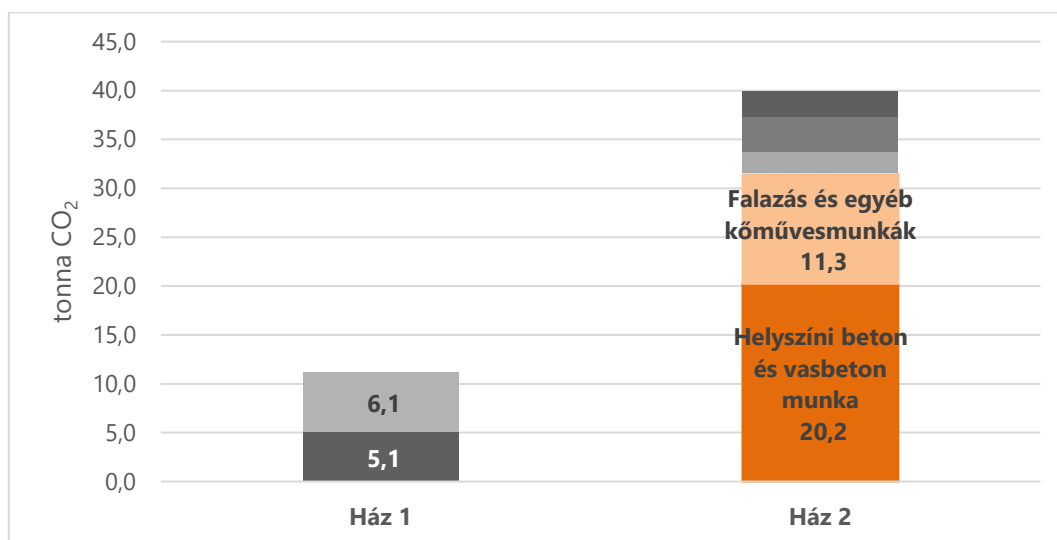
anyagféleségnek leginkább megfelelő értéket kiválasztani. Figyelemmel arra, hogy a legtöbb fajlagos érték kg CO₂/kg mértékegységben áll rendelkezésre, ezért szükséges a vizsgált anyagféleségek tömegének meghatározása. Ehhez szakmai útmutatókat (pl. Dr Palotás, 1981; Hammond & Jones, 2008), adott esetben termékek adatlapjait használtuk fel.

Eredmények

Eredményeink alapján a vizsgált családi házak vizsgálatba bevont anyagféleségeinek környezetterhelése jelentősen eltérő: a Ház 1-be 11,17 tonna, míg a Ház 2-be 39,88 tonna CO₂ kerül beépítésre, ami rendre 3,8, illetve 13,5 globális hektár ökológiai lábnyomnak felel meg (ld. 1. ábra). Fontosnak tartjuk hangsúlyozni, hogy ez az érték a két háztípus potenciálisan eltérő elemeire vonatkozik, így elsősorban az alapozás, tetőfedés, szigetelés, nyílászárók és a gépészet nem került figyelembevételre.

A jelentős eltérést elsősorban a különböző anyagféleségek eltérő környezetterhelése okozza, másodsorban a két családi ház eltérő felépítése okozza. A faszervezetű Ház 1 valamennyi eleme valamilyen faipari termék, a statikai tartóváz 659 darab különböző méretű fűrészelt léceket tartalmaz, amely együttesen csaknem 25 m³, illetve 11 tonna faanyagot jelent. Az építőlemez, szigetelések, kiegészítő faanyagok további 15,1 m³ különböző fa építőlemez, léceket, illetve hajópadló beépítését jelenti. Ezzel szemben a Ház 2 a pillérek, a monolit vasbeton födémlemez, illetve a lépcső jelentős mennyiségű, összesen 41,1 m³ betonra, illetve 3,88 tonna kapcsolódó betonacélra van szükség, amely önmagában a Ház 1 teljes számított környezetterhelésének csaknem kétszeresét, 20,23 tonna CO₂ beépítését jelenti. A téglafalazat szintén jelentős, a Ház 1-gyel összemérhető beépített CO₂ mennyiséget okoz (11,29 tonna).

1. ábra: A vizsgált családi házakba épített CO₂ mennyisége és eloszlása



Forrás: saját szerkesztés

Diszkusszió és összefoglalás

Kutatásunk céljaként annak vizsgálatát tűztük ki, hogy az építőiparban mekkora környezeti hatás kerülhető el innovatív, környezetbarát technológiák alkalmazásával. Elemzésünkben a környezeti hatást – korábbi kutatásainkhoz hasonlóan – az ökológiai lábnyom (EF) mutatóval mértük. Az alkalmazott minta két, hasonló méretű, kb. 100 m² alapterületű családi házat tartalmazott, ahol a Ház 1 egy gerendaház, amely, kizárólag fa, illetve faipari termékekből épült, míg a Ház 2 a manapság bevett, betonszerkezetes, falazóblokkos technológia alkalmazásával készült. A vizsgálatban kizárólag azokat az elemeket szerepeltettük, amelyek a két épület

esetében eltérnek, a potenciálisan hasonló tételeket (pl. alapozás, tetőfedés, gépészet stb.) figyelmen kívül hagytuk. Számításaink alapján a Ház 2 megépítéséhez a Ház 1-hez képest közel négyszer annyi (11,17 vs. 39,88 tonna) CO₂ kapcsolódik. Ennek elsődleges oka, hogy a Ház 1 lényegesen kisebb térfogatú, tömegű, ezáltal környezetterhelésű anyag beépítését igényli. A nagy mennyiségben építendő anyagok közül a helyszíni beton és vasbeton munkák emelhetők ki, ugyanis a beton sűrűsége és fajlagos környezetterhelése kifejezetten magas. Ez azt jelenti, hogy a beton alkalmazását nélkülöző építési technológiák környezeti szempontból rendre kiemelten hatékonyak tekinthetők. Ezt az eredményt mérsékeli a különböző épületszerkezetek eltérő várható élettartama. Ugyan a tervezett élettartam egy kisblokkos (pl. téglá) szerkezetű épület esetén is 50 év, a tapasztalatok alapján egy megfelelően felépített épület valós élettartama ezt lényegesen meghaladhatja, amelyre jó példát kínálnak Budapest belső kerületeinek 19. század végén, 20. század elején épült bérházai, amelyek a két világháború, valamint az 1956-os forradalom hatásai ellenére statikailag megfelelő állapotban vannak. Hasonló példák hozhatók a faszervezetű házak esetén is, bár a rendszeres karbantartás, kártevőirtás azok esetében kiemelt jelentőséggel bír. További szempontként említhető az éghajlat szerepe. A faépületek elsősorban a kisebb hőingással jellemezhető alpesi, Skandináv, illetve észak-amerikai területeken jellemzők, ahol megfizethető, helyi és megfelelő minőségű faanyag is rendelkezésre áll.

A vizsgálatban szereplő Ház 1 és Ház 2 összehasonlíthatóságát a technológia mellett az épületek mérete is korlátozza, hisz a Ház 2 tetőtérbeépítéssel rendelkezik, amely befolyásolja a földem műszaki paramétereit, további lépcső kiépítését is szükségessé teszi. A földem tetőtér beépítés miatti többlet környezetterhelése nem ismert, a lépcső azonban 2,6 m³ beton felhasználását teszi szükségessé, amely a kapcsolódó betonacél nélkül 0,85 tonna CO₂ beépítését jelenti. Ez a Ház 2 vizsgálatba bevont környezetterhelésének 2,12%-a.

A két épület vizsgálata során két további szempontot emelnénk ki. Egyrészt ugyan megfelelő szigeteléssel a Ház 1 a Ház 2-höz mérhetően alacsony energiaszükségletű épület lehet, a lényegesen kisebb beépített tömeg következtében a hőtartó képessége feltétlenül alacsonyabb lesz, ennek következtében hűvös időben elengedhetetlen a hőmérséklet folyamatos szinten tartása. Másrészt a faszervezetű épületek – megfelelő szigetelés és nyílászárók alkalmazása mellett – áteresztik a párákat, ezáltal a belső levegő páraszintje folyamatosan a természetes szinten lesz.

Összefoglalva az eredmények alapján a Ház 1 a tetőtér beépítés, illetve a várható élettartam eltéréseit figyelembe véve is kedvezőbb környezetterhelési jellemzőkkel rendelkezik.

Eredményeink legfőbb limitációját a minta nagysága jelenti, hisz mindkét technológia esetén csupán 1-1 épületet vizsgáltunk. Mindazonáltal a bemutatott példák tipikusnak mondhatók, az adatigénylés során külön felhívtuk a kivitelező vállalkozás figyelmét arra, hogy az átlagos igényeket tükröző épület adatait adja meg. A következtetések robusztusságát azonban növelné, ha nagyobb és diverzebb minta állna rendelkezésre. A nagyobb mintán végzett kutatás mellett másik potenciális kutatási irány lehet más, alternatív építési módok vizsgálata, így a modern, vályogból épült épületek, vagy akár a sokkal inkább bevett gipszkartonos változatoké.

Finanszírozás: A TKP2021-NKTA-44 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Tématerületi Kiválósági Program 2021 (TKP2021-NKTA) pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

1. Anzagira, L. F., Duah, D., & Badu, E. (2019). A conceptual framework for the uptake of the green building concept in Ghana. *Scientific African*, 6, e00191. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00191>

2. Bastianoni, S., Galli, A., Niccolucci, V., & Pulselli, R. M. (2006). The ecological footprint of building construction. *The Sustainable City IV: Urban Regeneration and Sustainability*, 1, 345–356. <https://doi.org/10.2495/SC060331>
3. Beleznay, É. (2021). Szakértői tanulmány az építési ágazat karbon lábnyom csökkentésére (NFFT Műhelytanulmány). Nemzeti Fenntartható Fejlődési Tanács. https://www.nfft.hu/documents/1238941/0/NFFT_Epitoipar_20210316+%281%29.pdf/eb8d7060-6829-48a4-0926-37f1cc3400da?t=1621501854096
4. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), Art. 4. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
5. Dr Palotás, L. (Szerk.). (1981). *Mérnöki Kézikönyv – I. kötet*. Műszaki Könyvkiadó.
6. Farina, I., Moccia, I., Salzano, C., Singh, N., Sadrolodabae, P., & Colangelo, F. (2022). Compressive and Thermal Properties of Non-Structural Lightweight Concrete Containing Industrial Byproduct Aggregates. *Materials*, 15(11), Art. 11. <https://doi.org/10.3390/ma15114029>
7. Fenner, A. E., Kibert, C. J., Woo, J., Morque, S., Razkenari, M., Hakim, H., & Lu, X. (2018). The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(C), 1142–1152. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v94y2018icp1142-1152.html>
8. Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87–98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
9. Hoffman, L., Józsa, Z., & Nemes, R. (2003). Üveghulladékból könnyűbeton adalékanyag—„Geofil-Bubbles” – felhasználási lehetőségek. *Építőanyag*, 55(1), 13–17. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2003.3>
10. Holthaus, E. (2020). *Thee Future Earth A Radical Vision For Whats’s Possible In The Age Of Warming*. HarperCollins Publishers.
11. Jackson, D. J. (2020). Addressing the challenges of reducing greenhouse gas emissions in the construction industry: A multi-perspective approach [PhD thesis, The University of Edinburgh]. <https://era.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/36968/Jackson2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

12. Kumar, A., Singh, P., Kapoor, N. R., Meena, C. S., Jain, K., Kulkarni, K. S., & Cozzolino, R. (2021). Ecological Footprint of Residential Buildings in Composite Climate of India—A Case Study. *Sustainability*, 13(21), Art. 21. <https://doi.org/10.3390/su132111949>
13. Labaran, Y. H., Mathur, V. S., Muhammad, S. U., & Musa, A. A. (2022). Carbon footprint management: A review of construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>
14. Leão, A. S., Araujo, M. C., de Jesus, T. B., & Almeida, E. dos S. (2022). Is the Soil-Cement Brick an Ecological Brick? An Analysis of the Life Cycle Environmental and Energy Performance of Masonry Walls. *Sustainability*, 14(19), Art. 19. <https://doi.org/10.3390/su141912735>
15. Liu, Z., Li, P., Wang, F., Osmani, M., & Demian, P. (2022). Building Information Modeling (BIM) Driven Carbon Emission Reduction Research: A 14-Year Bibliometric Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), Art. 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912820>
16. Mishra, A., Humpenöder, F., Churkina, G., Reyer, C. P. O., Beier, F., Bodirsky, B. L., Schellnhuber, H. J., Lotze-Campen, H., & Popp, A. (2022). Land use change and carbon emissions of a transformation to timber cities. *Nature Communications*, 13(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32244-w>
17. Mostert, C., Bock, J., Sameer, H., & Bringezu, S. (2022). Environmental Assessment of Carbon Concrete Based on Life-Cycle Wide Climate, Material, Energy and Water Footprints. *Materials*, 15(14), Art. 14. <https://doi.org/10.3390/ma15144855>
18. Pulselli, R. M., Simoncini, E., Ridolfi, R., & Bastianoni, S. (2008). Specific energy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 8(5), 647–656. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.10.001>
19. Szennay, Á., Major, Z., & Beke, J. (2021). Ecological footprint satellite calculators to determine the environmental impact of material usage of SMEs. In J. Nikodem & R.
20. Klemmous (Szerk.), 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021): Proceedings (o. 677–680).