

szazsuzs_207_24



Dr. Szalay Zsuzsa

**Az épületek által okozott környezetterhelés
csökkentési lehetőségei**

MTA doktori értekezés tézisei

2024

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Rövidítések jegyzéke.....	3
Fogalommagyarázat	4
Bevezetés.....	5
A kutatás célja	6
Módszertan.....	7
Épületminta	7
Az energiaigény számítása	8
Az életciklus-elemzés.....	8
Új tudományos eredmények.....	10
A) Új épületekre vonatkozó tézisek	10
1. tézis – Az üzemeltetési energiaigény környezeti hatása [I]	10
2. tézis – A villamos energia dekarbonizációja [II] [III].....	11
3. tézis – Az épülettechnikai rendszerek beépített környezeti hatása [IV] [V]	11
4. tézis – A teljes épület beépített környezeti hatása [VI]	12
5. tézis – A teljes életciklusra vetített környezetterhelés [VII] [III].....	12
6. tézis – Karbonsemlegesség [VIII]	12
7. tézis – Határértékek meghatározása [I] [VI]	13
B) Meglévő épületekre vonatkozó tézisek	13
8. tézis – Meglévő épületek környezeti hatása [IX] [X]	13
9. tézis – Az életciklus szakaszok aránya [VII] [X]	14
10. tézis – Optimális hőszigetelés vastagság [XI] [XII] [III]	14
Jövőbeli hasznosítási lehetőségek és kutatási irányok	14
Az új tudományos eredményekhez kötődő publikációk.....	16
Egyéb hivatkozások.....	16

Rövidítések jegyzéke

ADP – abiotikus kimerülési pontecial (Abiotic Depletion Potential)

AP – savasodási potenciál (Acidification Potential)

EF – környezeti lábnyom (Environmental Footprint)

ÉKM – 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról

EP – eutrofizációs potenciál (Eutrophication Potential)

EPBD – az Európai Parlament és a Tanács irányelve az épületek energiahatékonyságáról

EPD – környezetvédelmi terméknyilatkozat (Environmental Product Declaration)

ETP – ökotoxicitási potenciál (Ecotoxicity Potential)

GWP – globális felmelegedési potenciál (Global Warming Potential)

HMV – használati melegvíz készítés

HTP – humántoxicitási potenciál (Human Toxicity Potential)

IPCC – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület

IRP – ionizáló sugárzás potenciál (Ionising Radiation Potential)

KNE – közel nulla energiaigényű épület

LCA – életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment)

ODP – sztratoszferikus ózonréteg-károsodási potenciál (Ozone Depletion Potential)

PM – szálló por kibocsátás (Particulate Matter)

POCP – troposzferikus (fotokémiai) ózonképződési potenciál (Photochemical Ozone Creation Potential)

PV – napelem (photovoltaics)

SQP – talajminőség (Soil Quality Potential)

ÜHG – üvegházhatású gázok

WDP – víz nélkülözési potenciál (Water Depletion Potential)

Fogalommagyarázat

Beépített környezeti hatások: a termékek, anyagok előállítása, szállítása, beépítése, karbantartása, cseréje, majd az életút végén a hulladékok kezelése által okozott közvetlen és közvetett kibocsátások és erőforrás használat.

Életciklus-elemzés (LCA): A termékek által okozott potenciális környezeti hatás értékelésének módszere, amely a „bölcsőtől a sírig”, azaz a teljes életutat végigkövetve méri a termék környezeti teljesítményét. A teljes életciklus alapú fenntarthatósági vizsgálat a környezeti életciklus-elemzés mellett életciklus-költségelemzésből és társadalmi elemzésből tevődik össze, de ebben az értekezésben csak a környezeti életciklus-elemzéssel foglalkozom.

Kibocsátásmentes (nulla kibocsátású) épület: a 2024/1275 EU irányelv által bevezetett fogalom, a definíció szerint „nagyon magas energiahatékonysággal rendelkező épület, amely nulla vagy nagyon alacsony energiamennyiséget igényel, nem okoz fosszilis tüzelőanyagokból származó helyszíni szén-dioxid-kibocsátást, az üzemeltetéshez kapcsolódó üvegházhatásúgáz-kibocsátásának mennyisége pedig nulla vagy nagyon alacsony” [1]. A pontos definíció meghatározása a tagállamok hatásköre és feladata.

Közel nulla energiaigényű épület: a 2010/31/EU irányelv által bevezetett fogalom, a definíció szerint „igen magas energiahatékonysággal rendelkező épület, ahol a felhasznált közel nulla vagy nagyon alacsony mennyiségű energiának igen jelentős részben megújuló forrásokból kell származnia, beleértve a helyszínen vagy a közelben előállított megújuló forrásokból származó energiát is” [2]. A pontos definíció meghatározása a tagállamok hatásköre és feladata volt, Magyarországon az ÉKM rendelet adja meg [3].

Összesített energetikai jellemző (E_{nren}): az épület fajlagos nem megújuló forrásból származó primerenergia-igénye egységnyi hasznos alapterületre és egy évre vetítve [3]. Az összesített energetikai jellemző tartalmazza az épület összes energiafogyasztását (fűtés, hűtés, használati melegvíz készítés, légtechnika), a rendszerek hatásfokát, veszteségeit és a megújuló energiaforrások hasznosítását. Nem tartalmazza viszont a háztartási, irodai és technológiai berendezések energiaigényét, illetve lakóépületek esetén a világítást sem.

Referenciaérték: a mai átlagos technológiára jellemző érték [4]. Ezen kívül megkülönböztethetjük a határértéket, amely az elfogadható teljesítmény legalacsonyabb értéke (pl. jogszabályi minimum) és a célértéket, amely a referenciaértéket meghaladó érték, az elméletileg elérhető legmagasabb teljesítmény. Meghatározható „top-down” (felülről lefelé építkező) vagy „bottom-up” (alulról felfelé irányuló) módszerekkel.

Üzemeltetési környezeti hatások: az üzemeltetési energiafelhasználás által okozott közvetlen és közvetett kibocsátások és erőforrás használat. Az értekezésben az üzemeltetési energiafelhasználást tovább bontottam az alapvetően az épülettől és alapvetően a használatától függő tételekre. Az épületenergetikai szabályozások csak az épülettől függő tételekre terjednek ki (ld. összesített energetikai jellemző).

Bevezetés

Az épületek és az építőipar a végső energiafelhasználás 34%-áért és az energiával kapcsolatos szén-dioxid kibocsátás 37%-áért felelt 2022-ben [5]. Az épületek üzemeltetése a legnagyobb kibocsátó (27%), de az építőanyagok, például az acél, a cement és az üveg gyártása szintén a kibocsátás kb. 10%-át teszi ki.

Az Európai Unió klímavédelmi céljai és az energiafüggetlenség elérésében fontos szerepe van a meglévő és az új épületállománynak [6]. A hatékony energiafelhasználást az elmúlt évtizedekben egyre szigorodó épületenergetikai szabályozásokkal és egyéb ösztönzőkkel támogatták [2] [7]. 2021-től az Európai Unióban csak közel nulla energiafelhasználású új épületet lehet építeni és 2030-tól az új épületeknek „kibocsátásmentesnek” kell lennie, összhangban a 2050-re kitűzött karbonsemlegességi célkitűzésekkel, melyekhez az épületállomány kibocsátásait nulla mérlegűre kell csökkenteni [1]. A törekvések elsősorban a fűtési és hűtési energiaigény csökkentésére irányulnak, az épületek energiahatékonyságának, a gépészeti rendszerek hatásfokának és a megújuló energia részarányának növelésével [8].

Mindennek azonban nem csak beruházási költségben, hanem energiában és emisszióban is kifejezhető „ára” van, ugyanis az építőanyagok, épületszerkezetek és épületgépészeti elemek gyártása, karbantartása-felújítása, majd bontása is erőforrás használattal és szennyezőanyag kibocsátásokkal jár [9] [10] [11], mellyel azonban a jelenlegi előírások kevésbé foglalkoznak [12]. Az ún. „beépített” energia a meglévő, hagyományos épületek esetén a mérsékelt égövben a teljes életciklusra vetített energiamérlegnek kb. 10-15%-a [13]. Alacsony energiaigényű épületek esetén azonban a beépített és az üzemeltetési energiaigény egymással összemérhető nagyságrendű, a beépített energia esetenként akár meg is haladhatja az üzemeltetési energiát az épület várható élettartama alatt [14]. Ezért fontos, hogy az épületek életútját a „bölcsőtől a sírig” megtervezzük, a teljes életciklus alatti minimális energiafelhasználást és kibocsátásokat megcélozva.

Az utóbbi években egyre több figyelem irányul az épületek építése által okozott környezetterhelésre. A World Green Building Council fokozott erőfeszítéseket sürget a beépített szén-dioxid (CO₂) csökkentésére [15]. Vízíójuk szerint 2030-ra minden új épület nettó nulla üzemeltetési kibocsátással és 40%-kal alacsonyabb beépített kibocsátással rendelkezik majd, 2050-re pedig az új épületek beépített kibocsátása nettó nulla és mind az új, mind a meglévő épületállomány nettó nulla üzemeltetési kibocsátású lesz. Az Európai Akadémiák Tudományos Tanácsadó Testülete (EASAC) szerint az épületek dekarbonizációja érdekében új szabályozás szükséges a beépített üvegházhatású gázok kibocsátására vonatkozóan [16]. A Monte Verita Nyilatkozat az új épületek és felújítások esetében 2025-ig jogilag kötelező érvényű, az életciklusra vonatkozó üvegházhatásúgáz-kibocsátási referenciaértékek bevezetését szorgalmazza [17].

Az épületek által okozott környezetterhelés az életciklus-elemzés (angolul Life Cycle Assessment – LCA) módszere segítségével számszerűsíthető. Az önkéntes zöld épület minősítő rendszerek, például a német DGNB már jelenleg is kéri az LCA elvégzését [18]. Ezekben az években több európai ország, például Dánia, Finnország és Franciaország tervezi vagy már be is vezette a kötelező életciklus számítást új épületek esetén [19]. Az európai uniós épületenergetikai irányelv felülvizsgálata 2030-tól minden új épület esetén előírja a teljes életciklusra vetített üvegházhatású gáz kibocsátás meghatározását [1]. Az Európai Unió

azonban csak a szabályozási kereteket adja meg, a pontos követelményeket és az ütemtervet a tagállamoknak kell kidolgozniuk.

A legtöbb országban egyelőre hiányoznak az életciklus-alapú referencia- és határértékek. A referenciaértékek segítségével az épületek környezeti teljesítménye összehasonlíthatóvá válik az átlaggal és a jó gyakorlattal, iránymutatást adva a fenntarthatóbb épületek tervezéséhez [20]. Ez különösen a tervezés korai szakaszában fontos, ahol a környezetterhelés hatékonyan csökkenthető, de referenciaértékek hiányában a célok kitűzése és az eredmények értelmezése nehézségekbe ütközik [21]. A referenciaértékek szintén jól használhatóak az épületek ököcímzése, szakpolitikák kialakítása és a zöld közbeszerzés során is [4].

Az építészeti tervezésben, stratégiákban még nem terjedt el az épületek által okozott környezeti hatás életciklus szemléletű megközelítése, hiányoznak az egységes módszertani keretek, a mai helyzetet jellemző referenciaértékek. Kérdés, hogy megújuló energiaforrások, különböző építési rendszerek alkalmazásával mennyire csökkenthető le az üzemeltetési energiaigény és a beépített hatás, ezek hogyan befolyásolják a teljes életciklust, melyek az optimális megoldások és elérhető-e a karbonsemlegesség épületléptékben.

A kutatás célja

A kutatás fő célja a lakóépületek teljes életciklusra vetített környezetterhelésének meghatározása és referenciaértékek kidolgozása, amelyek jól leírják a jellemző épületszerkezeti és épülettechnikai megoldásokkal épülő új épületeket. A kutatás részletesebb célkitűzései:

- Módszertani keretrendszer fejlesztése az épületek által okozott környezetterhelés számszerűsítéséhez. A módszertannak alkalmasnak kell lennie a teljes életciklus, az építés és az üzemeltetés figyelembevételére és általános következtetések levonására.
- Az üzemeltetési energiafogyasztás, kibocsátások és környezetterhelés, a megújuló energiahasznosító rendszerekkel elérhető megtakarítás meghatározása, a különböző épülettípusok (családi házak, társasházak) összehasonlítása.
- Az üzemeltetési energiaigény további csökkentési lehetőségeinek vizsgálata, különös tekintettel a villamos energia jövőben várható dekarbonizációjára.
- A különböző épülettechnikai rendszerek gyártása által okozott környezeti hatások meghatározása és összehasonlítása az üzemeltetési kibocsátásokkal.
- A jellemző építési rendszerek beépített környezeti hatásának meghatározása, a különböző épülettípusok összehasonlítása.
- A teljes életciklusra vetített környezeti hatások számszerűsítése, az egyes életciklus szakaszok egymáshoz viszonyított arányának meghatározása.
- A karbonsemlegesség elérésének lehetőségei a teljes életciklusra vetítve.
- Határértékek ajánlása a hazai épületenergetikai szabályozások számára az üzemeltetési energiaigényre és a teljes életciklusra vonatkozóan.
- A meglévő épületek által okozott környezeti hatások összevetése az épület mélyfelújításával, valamint bontásával és helyette új épület építésével.
- Az épülethatároló szerkezetek, a hőátbocsási tényező teljes életciklus alapú optimalizációja, a környezeti szempontú határértékek megtalálása.

Az értekezésben bemutatott eredmények azonban nem terjedhetnek ki minden szempontra, bizonyos lehatárolások szükségszerűek:

- A vizsgálatok csak lakóépületekre vonatkoznak. Az egyéb épülettípusok sokfélesége miatt az üzemeltetési és beépített környezeti hatások kevésbé általánosíthatóak, ugyanis a tervezési alapadatokban, a használat módjában, illetve a jellemző épületszerkezeti kialakításokban is nagy különbségek vannak.
- A környezeti hatást valamennyi szabványos indikátorra kiszámítottam, de részletesen a klímaváltozás- globális felmelegedés kategória eredményeit mutatom be a potenciálisan súlyos következmények és az épületek nagy szerepe miatt. Az értekezésben a többi hatáskategóriára is röviden kitérek, valamint bemutatom a normalizált és súlyozott eredményeket is.
- Költségekkel az értekezésben nem, illetve csak érintőlegesen foglalkozom. Az életciklus szemlélet a költségszámításban is alkalmazható, a beruházási költségek mellett ekkor a cserék, karbantartás, üzemeltetés költségét is figyelembe kell venni. Korábbi munkáimban erre a szempontra is kitértünk, de a költségek gyors változása, nagy bizonytalansága miatt ez az értekezésemben nem került be részletesen.
- Az éghajlati adatokban, az üzemeltetési energiafogyasztás számításában a klímaváltozás várható hatását nem vettem figyelembe. A klímaváltozási forgatókönyveket, az épületekben a jövőben várható túlmelegedési kockázatot mérések és épületszimulációk segítségével részletesen vizsgáljuk más kutatásokban és a jövőben ezek beépíthetőek lesznek a környezetterhelés vizsgálatába.

Módszertan

Az épületek által okozott környezetterhelés vizsgálatához egy módszertani keretrendszer fejlesztettem ki, amelynek elemei az épületminta létrehozása, az üzemeltetési energiaigény számítása és az életciklus-elemzés.

Épületminta

Új épületek esetén kidolgoztam egy eljárást, amelyben a “műszakilag lehetséges” épületeket leíró nagy épületmintát hozok létre. Egyes konkrét épületek helyett az épületet leíró geometriai és egyéb paraméterek lehetséges és építészeti-funkcionálisan racionális tartományait definiáljuk, majd ez alapján véletlenszerűen generálunk nagyszámú kombinációt. Ez a minta nagy valószínűséggel tartalmazni fogja a jövőben megépülő új épületek populációját. A nagy minta alkalmazásával kiküszöbölhetőek a néhány tipikus épület elemzéséből származó bizonytalanságok és a következtetések megbízhatóbbak lesznek. A minta alapján meghatározható az épületek várható energiaigénye, vizsgálható különböző alternatívák hatása, a beépített anyagokkal összefüggő kibocsátások és a teljes életciklusra vetített energiaigény és emissziók is. A minta statisztikai elemzése alapján kidolgozhatóak épületenergetikai követelmények, a teljes életciklusra vetített környezetterhelésre vonatkozó referencia- és határértékek, jövőbeli stratégiák. A módszer alapjait PhD értekezésemben fektettem le, azóta kiegészítettem, pontosítottam, validáltam az elérhető forrásokkal.

Az üzemeltetési energiaigény számításához a következő geometriai paramétereket határoztam meg: fűtött szintek száma, az épület/szint fűtött hasznos alapterülete, átlagos belmagasság, az épület alakját leíró formatényező, az ablakok aránya a homlokzat felületéhez képest, alsó- és felső zárófödém típusa, magastető hajlásszöge, adiabatikus falak aránya. A teljes beépített anyagmennyiség számításához további, a belső kialakítást jellemző geometriai és szerkezeti

paramétereket vettem figyelembe (pl. válaszfalak hossza, lakásválasztó falak átlagos hossza, pillérek átlagos tengelytávolsága, merevítőfalak hossza). Kiválasztott mintaépületek alapján ellenőriztem a geometriai paraméterek érvényességét. A paraméterekre a funkcionális-építészeti-műszaki szempontok alapján meghatározott tartományokban egyenletes eloszlást feltételeztem, majd véletlenszerűen nagyszámú kombinációt generáltam és az elemzéseket az így kapott sokaságra végeztem el.

Meglévő épületek esetén a hazai épülettipológiát alkalmaztam, amely reprezentatív módon kiválasztott épületek felmérésén és statisztikai elemzésén alapszik és 23 típust határoz meg az építési idő, az épület mérete, valamint az építési technológia alapján [22]. A felmérés során a fűtési energiaigény szempontjából releváns épületszerkezetekre vonatkozó geometriai és hőtechnikai adatokat, valamint az épülettechnikai rendszereket leíró adatokat gyűjtötték. Az egyéb, az energiaigényt nem befolyásoló szerkezetekre nem készült adatgyűjtés, ezeket az új épületek esetén bemutatott módszerhez hasonlóan, paraméterek alapján becsültem, valós épületek dokumentációja, tervrajzai alapján.

Az energiaigény számítása

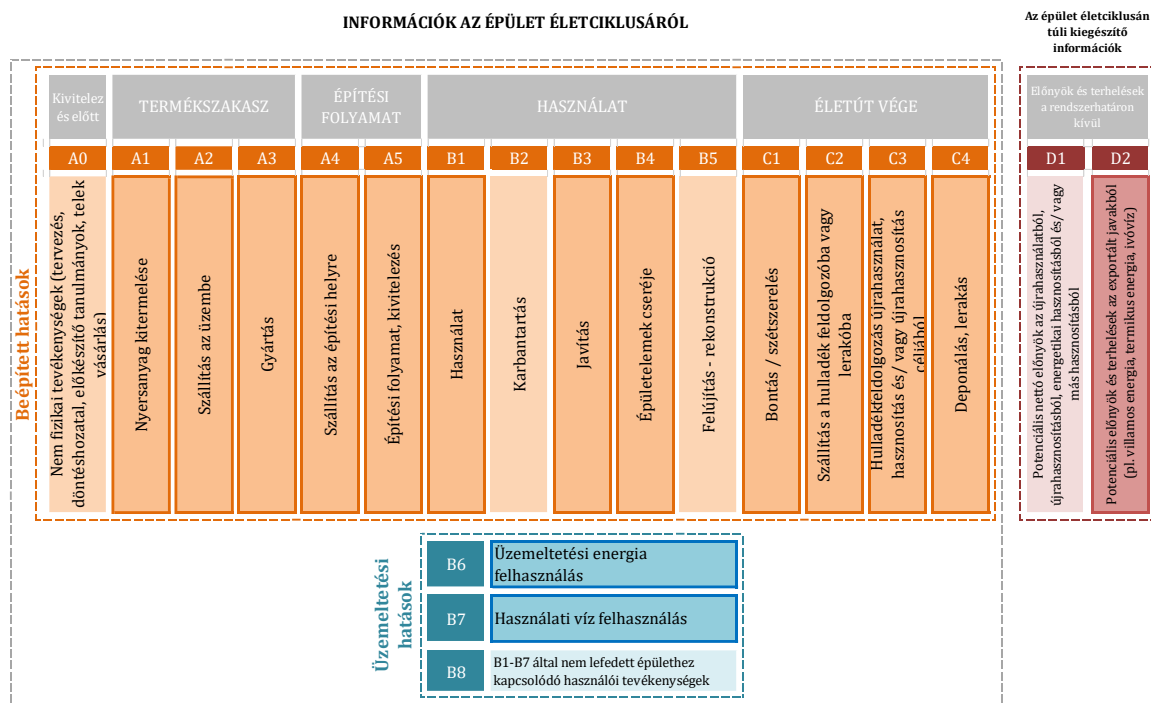
Az energiaigény számításához a magyar épületenergetikai rendelet szerinti havi számítási módszert alkalmaztam [3], a lakóépületekre vonatkozó tervezési alapadatok feltételezésével, figyelembe véve az épülettechnikai rendszerek átlagos hatásfokát, veszteségeit és villamos segédenergia-igényét.

Az életciklus-elemzés

Az életciklus-elemzés (LCA) az általános LCA szabványok [23] [24], valamint az épületre vonatkozó európai szabvány [25] előírásainak figyelembevételével készült.

Az elemzésben használt ún. funkcionális ekvivalens, azaz az elemzés vonatkoztatási alapja egy új lakóépület Magyarországon. A referencia vizsgálati időszak 50 év. A rendszerhatárt, azaz a figyelembe vett életszakaszokat a [26] szabvány alapján az 1. ábra mutatja. A vizsgálatban figyelembe vettem a termékszakaszt (A1-A3), azaz a nyersanyagok kitermelését, üzembe való szállítását és a gyártási folyamatot; az anyagok, termékek építési helyszínre történő szállítását (A4) és az épület kivitelezését (A5); a használati szakasz alatt a nem energiához kötődő közvetlen kibocsátásokat (B1), a javításokat (B3), az épületelemek cseréjét (B4), az üzemeltetési energiafelhasználást (B6) és a használati víz felhasználást (B7); valamint az életút végén az épület bontását (C1), a hulladékok szállítását (C2), illetve feldolgozásukat (C3) vagy deponálásukat (C4).

Megbízható adatok hiányában nem vettem figyelembe a hatályos szabványban még nem szereplő, újonnan bevezetendő előkészítési (A0), illetve egyéb használati tevékenységek (B8) szakaszt, valamint szintén adathiány miatt a karbantartást (B2). A B5 előre tervezett nagyobb felújítás modul irreleváns, ha az épület tervezésekor ezt nem veszik figyelembe [27]. A D modul az épület életútján túli potenciális előnyöket és terheléseket gyűjti össze, ami a vonatkozó szabványok szerint nem vonható össze az A-C modulokkal a jövőbeli hasznosulás nagy bizonytalansága miatt. A D1 modult adatok hiányában nem vettem figyelembe, míg a D2 modulban egyes változatokban a napelemes rendszerből exportált villamos energiával számoltam.



1. ábra: Az épület életútjának szakaszai, a figyelembevett modulok kiemelésével [26] alapján

Az elemzések az ecoinvent 3.8 (cut-off) nemzetközi adatbázissal készültek [28], mely általános adatokat tartalmaz. Ezt részben az indokolja, hogy egyelőre kevés a környezeti terméknnyilatkozattal (EPD) rendelkező hazai építőipari termék, másrészt az ilyen adatsorok alkalmasabbak általános konklúziók és referenciaértékek levezetésére.

Az épületmodellben az épület valamennyi épületszerkezeti elemét figyelembe vettem a létrehozott épületminta alapján, majd kiszámítottam a szerkezetek felületét, az anyagmennyiségeket és a környezeti hatásokat. Az épülettechnikai rendszerek gyártása által okozott környezeti hatást az életciklus-elemzéssel foglalkozó szakirodalom jellemzően elhanyagolja vagy jelentősen egyszerűsíti [29]. Az épületgépészeti rendszer elemei közül a hőtermelőt, a hőleadókat és az elosztó hálózatot, szerelvényeket részletesen figyelembe vettem. Megbízható környezeti adatok hiányában a víz- és szennyvíz, illetve az épületvillamos rendszer beépített anyagmennyiségeit elhanyagoltam.

A termékszaksaszt a beépített anyagok mennyisége és az ecoinvent adatbázis alapján számítottam (A1-A3 szakasz). A szállítás (A4) figyelembevételéhez az építőanyagokat szállítási kategóriákba soroltam az alapján, hogy importált termékről van-e szó, illetve hány gyártóüzem van az országban. Az A5, kivitelezés szakaszt szakirodalmi források alapján becsültem. Az épületelemek periodikus cseréjét (B4) a várható élettartam alapján vettem fel több szakirodalmi forrás összevetése alapján. A hulladékkezelési scénáriók (újrahasznosítás/lerakás/ energetikai hasznosítás) magyar, illetve európai statisztikákon alapulnak. Az üzemeltetési energiafelhasználás (B6) három részre osztható [26]. A B6.1, az energiafelhasználás szabályozott részét a hazai épületenergetikai rendelet szerint számítottam. A B6.2-t (az épületbe integrált épülettechnikai rendszerek energiafelhasználásának nem

szabályozott része, pl. külső világítás, liftek, biztonsági rendszerek) nem vettem figyelembe. A B6.3-at (egyéb, a használoi tevékenységhez kötődő energiafelhasználás) statisztikai adatok alapján határoztam meg. A B7 vízfelhasználást szintén statisztikákra alapozva vettem figyelembe.

Az elemzésekben a prEN 15978 szabványtervezet szerinti alap és kiegészítő hatáskategóriákat vettem figyelembe [26], de a toxicitás kategóriák nélkül, a szabvány által előírt EF v3.0 hatásértékelési módszerrel az openLCA 2.0.4 szoftver alkalmazásával [30].

Új tudományos eredmények

Az új tudományos eredmények között először az új (1-7. tézis), majd a meglévő épületekre (8-10. tézis) vonatkozó megállapításaimat ismertetem. Az új épületek esetén az üzemeltetési, a beépített, majd a teljes életciklusra vetített környezeti hatásokra, végül a határértékek meghatározására vonatkoznak a tézisek. Meglévő épületek esetén az alternatívák összehasonlítása után az életciklus szakaszok arányával foglalkozom. A 10. tézis meglévő és új épületekre is érvényes megállapítást fogalmaz meg.

A) Új épületekre vonatkozó tézisek

Kidolgoztam egy olyan módszertani keretrendszert, amellyel új épületek teljes életciklusra vetített környezetterhelése nagyszámú, a műszakilag lehetséges épületeket jellemző parametrikus mintán meghatározható. Négy épülettípust (egy- és kétszintes családi házak, alacsony és középmagas társasházak) vizsgáltam, hatféle korszerű és helyszíni megújuló energiát hasznosító épülettechnikai rendszert (kondenzációs gázkazán, hővisszanyerővel ellátott gépi szellőztetés, biomassza hasznosítás faelgázosító kazánnal, levegő-víz hőszivattyú, kondenzációs gázkazán napkollektorral, illetve napelemmel kiegészítve) és négyféle építési rendszert (vázkerámia, hagyományos falazóblokk, pórusbeton, favázás), esetenként 500 db kombinációt tartalmazó sokaságra. A környezetterhelést 13 szabványos környezeti hatáskategóriára határoztam meg (klímaváltozás (GWP), sztratoszferikus ózonréteg károsodás (ODP), savasodás (AP), eutrofizáció-édesvízi (EP-freshwater), eutrofizáció-tengervízi (EP-marine), eutrofizáció-szárazföldi (EP-terrestrial), fotokémiai ózonképződés (POCP), abiotikus forráskimerülés-ásványok és fémek (ADP-m&m), abiotikus forráskimerülés-fosszilis tüzelőanyagok (ADP-f), vízhasználat (WDP), szálló por kibocsátás (PM), ionizáló sugárzás (IRP), földhasználat (SQP)). A hatáskategória eredményeket normalizáltam, majd környezeti lábnyomként súlyoztam az Environmental Footprint (EF) módszer szerint. A súlyozás szubjektivitást is tartalmaz, ugyanis az EF módszerben szakértői panel ítéli meg a hatáskategóriák egymáshoz viszonyított fontosságát.

1. tézis – Az üzemeltetési energiaigény környezeti hatása [I]

Meghatároztam a minta összesített energetikai jellemzőjét (E_{nren}), üzemeltetési GWP kibocsátását, valamint egyéb környezetterhelési indikátorait. Az épületenergetikai szabályozásoknak megfelelően a háztartási berendezések energiafogyasztásától itt eltekintettem és a napelemek termelését éves mérlegben, a becsült villamosenergia-fogyasztás mértékéig vettem figyelembe. Kondenzációs gázkazán esetén az összesített energetikai jellemző és a GWP várható tartománya: $E_{nren} 80,7 \pm 13,3 \text{ kWh/(m}^2\text{év)}$, $GWP = 23,7 \pm 3,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/(m}^2\text{év)}$ (teljes minta átlaga és szórása).

Megállapítottam, hogy míg általános esetben az összesített energetikai jellemző és a környezetterhelés korrelál az épületek kompaktságát és méretét jellemző felület-térfogataránnyal (A/V), addig napelemek alkalmazásával nincsen korreláció. Családi házak és kis társasházak esetén az elérhető tetőfelület elegendő a teljes villamosenergia-fogyasztás fedezésére, nagy társasházak esetén ez nem teljesül. A hasznos alapterületre vetített elérhető tetőfelület a jövőben fontos tervezési paraméter lehet a szoláris energia hasznosítása érdekében.

Megállapítottam, hogy a kondenzációs gázkazán rendszerhez képest jelentős primer energia- és GWP megtakarítás érhető el helyszíni megújuló energiaforrások, illetve hatékony szellőztetés alkalmazásával (átlagos megtakarítás a különböző épülettípusokban: E_{nren} : hővisszanyerős szellőzés 24-29%, faelgázosító kazán 26-27%, hőszivattyú 16-20%, napkollektor 19-27%, napelem 61-75%; GWP: hővisszanyerős szellőzés 25-31%, faelgázosító kazán 88-91%, hőszivattyú 36-40%, napkollektor 20-27%, napelem 42-52%).

A környezeti hatáskategóriák normalizálása és súlyozása után azonban a legmagasabb környezeti lábnyoma nem a kondenzációs gázkazánnak, hanem a hőszivattyús rendszernek van, elsősorban az édesvízi eutrofizáció, ionizáló sugárzás, illetve az abiotikus forráskimerülés-ásványok és fémek kategória nagy jelentősége miatt, amelyért főként a villamos energia előállítása és elosztása, ezen belül is elsősorban a hazai és import lignit és feketeköszén bányászata és égetése felel (átlagos változás a kondenzációs kazánhoz képest: hővisszanyerős szellőzés -(22-26)%, faelgázosító kazán -(26-34)%, hőszivattyú +(28-35)%, napkollektor -(7-26)%, napelem -(94-106)%).

2. tézis – A villamos energia dekarbonizációja [II] [III]

Egy nagy felbontású villamos energia piaci modell segítségével több jövő forgatókönyv szerint meghatároztuk a villamos energia környezeti hatását. **Megállapítottam, hogy a villamos energia jövőben várható nagymértékű dekarbonizációja jelentősen befolyásolja a hőszivattyúk értékelését. A 2050-es klímacélok figyelembe vevő, a 2020-2050-es évekre előrejelzett villamosenergia-összetétel feltételezésével a hőszivattyús változatok üzemeltetési GWP kibocsátása jelentősen csökken és a faelgázosító kazánhoz hasonló alacsony értékeket mutat.**

3. tézis – Az épülettechnikai rendszerek beépített környezeti hatása [IV] [V]

Meghatároztam az épülettechnikai rendszerek beépített környezeti hatásait és arra a következtetésre jutottam, hogy összetettebb épülettechnikai rendszerek alkalmazásával a beépített GWP növekszik, de az üzemeltetési megtakarítás ezt gyorsan ellentételezi. **Megállapítottam, hogy a kondenzációs gázkazán rendszerhez képest az épülettechnikai rendszerek előállításának GWP-ben kifejezett megtérülési ideje minden esetben 5 évnél rövidebb (faelgázosító kazánok, hőszivattyú 1 év, hővisszanyerős szellőzés 2-3 év, napelem 3-4 év, napkollektorok 4-5 év). A beépített hatások különösen az abiotikus forráskimerülés-ásványok és fémek kategóriában igen jelentősek a nagy mennyiségű fém használata miatt. Megállapítottam, hogy az épülettechnikai rendszer beépített hatásának elhanyagolása több hatáskategóriában jelentős hibát okoz. A beépített hatás nagy része a cserékből származik a rendszerelemek rövidebb várható élettartama miatt.**

4. tézis – A teljes épület beépített környezeti hatása [VI]

Meghatároztam az épületminta beépített környezetterhelési indikátorait. **Megállapítottam, hogy a beépített GWP vázkerámiás építési rendszer esetén 8,9- 17,7 kg CO₂-eq/m²év között mozog, amely új épületek esetén referenciaértékként szolgálhat.** Társasházak esetén a nagyobb szerkezeti igénybevételek és a járulékos fűtetlen terek (pince, garázs) miatt jellemzően nagyobb a fajlagos anyagfelhasználás és ezzel együtt a beépített környezeti hatás, mint családi házak esetén. A beépített GWP favázis építési rendszer alkalmazásával családi házak esetén átlagosan 22-25%-kal csökkenthető.

5. tézis – A teljes életciklusra vetített környezetterhelés [VII] [III]

A teljes életciklusra vetített hatások az épülettel függő üzemeltetési, a beépített, valamint a használati tételekből (háztartási villamos energia és vízfelhasználás) állnak. **Megállapítottam, hogy ha a teljes életciklust vizsgáljuk, a helyszíni megújuló energiaforrások hasznosításával arányaiban kisebb megtakarítás érhető el, mint ha csak az üzemeltetést tekintjük** (átlagos megtakarítás a kondenzációs gázkazános rendszerhez képest, GWP: hővisszanyerős szellőzés 12-13%, faelgázosító kazán 40-45%, hőszivattyú 16- 20%, napkollektor 8-11%, napelem 17-23%).

A súlyozott környezeti lábnyom szerint a teljes életciklust figyelembe véve a csökkenés még kisebb (átlagosan: hővisszanyerős szellőzés: 5-6%, faelgázosító kazán 6-8%, napelem 20-23%), de a hőszivattyús rendszer esetén 10%, a napkollektornál 2-5% a növekedés.

Jövőbeli, dekarbonizálódó villamosenergia-összetétel feltételezésével a hőszivattyús rendszer a faelgázosító kazánhoz hasonló értékeket mutat. A villamos energia dekarbonizációja a használati tételekre is kedvező hatással van (teljes átlagos csökkenés 50-55% GWP-ben és 20-21% a környezeti lábnyomban).

6. tézis – Karbonsemlegesség [VIII]

A klímacélok eléréséhez nem elegendő csak az üzemeltetési, vagy csak a beépített hatásokra fókuszálni, hanem a teljes életciklusra vetített kibocsátásokat kell csökkenteni. Megvizsgáltam, hogy a teljes életciklusra vetítve a karbonsemlegesség elérhető-e helyszíni megújuló energiaforrások hasznosításával.

Megállapítottam, hogy egyetlen helyszíni megújuló energiaforrás hasznosításával a karbonsemlegesség nem valósítható meg. Több megújulóenergia-hasznosító rendszer kombinációjával (hővisszanyerős szellőzés + hőszivattyú/ faelgázosító kazán + napelem) az üzemeltetési GWP majdnem nullára csökkenthető és a teljes életciklusra vetítve is jelentős csökkenés érhető el (kondenzációs gázkazánhoz képest 35-65%), **azonban a karbonsemlegesség még messze van.**

Megvizsgáltam, hogy a karbonsemlegesség teljesíthető-e éves nettó mérleg szemléletben, azaz az épület villamosenergia-fogyasztását meghaladó napelemek elhelyezésével és a kiváltott villamos energia által elkerült emissziók figyelembevételével. **Megállapítottam, hogy jellemző építési rendszerrel, faelgázosító kazánal vagy hőszivattyúval és a rendelkezésre álló teljes tetőfelületre beépített napelemekkel egyszintes családi házak esetén elérhető a teljes életciklusra vetített karbonsemlegesség, sőt a napelemek több kibocsátást váltanak ki, mint a teljes terhelés.** Társasházak esetén azonban a nettó nulla mérleg nem teljesíthető, mert az elérhető tetőfelület nem elegendő.

A jövőbeli villamosenergia-összetételt figyelembe véve a napelem kisebb kibocsátású villamos energiát fog kiváltani, ezért az elkerült emissziók is alacsonyabbak lesznek. Így a teljes életciklusra vetített karbonsemlegesség már kis családi házakban sem érhető el, de a nettó nulla mérleg megközelíthető.

7. tézis – Határértékek meghatározása [I] [VI]

Az általam kidolgozott módszer segítségével, a műszakilag lehetséges épületeket leíró minta statisztikai jellemzői alapján meghatározhatóak referencia- és határértékek is. Meghatároztam a közel nulla energiaigényű lakóépületek szintjére javasolható nem megújuló primerenergiaigény és CO₂- kibocsátási követelményeket. A kiindulási peremfeltételek szerint olyan követelmények megadása volt szükséges, amelyet az elvárt hőátbocsátási tényezőkkel és egy megújuló energia energiaforrás hasznosításával az új épületek 90%-a teljesíteni tud.

Megállapítottam, hogy az összesített energetikai jellemzőre 76 kWh/(m²év), a fajlagos üzemeltetési GWP kibocsátásra 20 kg CO₂-eq/(m²év) határérték javasolható.

Meghatároztam, hogy a ma jellemző építési és épülettechnikai rendszerek, valamint a közel nulla energiaigényű épületeknél elvárt energetikai teljesítmény esetén a teljes életciklusra vetített GWP referenciaértéke 35 kg CO₂-eq/(m²év), melyet az épületek 90%-a teljesíteni tudna. Ez egy jövőbeli szabályozás alapján képezheti, amely fokozatosan szigorítható.

B) Meglévő épületekre vonatkozó tézisek

A meglévő épületek környezeti hatásának vizsgálatokor a hazai lakóépülettipológiában szereplő 23 reprezentatív típusépületet alkalmaztam.

Három alternatívát hasonlítottam össze: 1) meglévő épület eredeti épületszerkezetekkel és a tipológia szerinti legnagyobb előfordulási gyakoriságú épülettechnikai rendszerrel, 2) mélyfelújítás az épületszerkezetek követelmény szerinti hőszigetelésével, ablakcserével és levegő-víz hőszivattyúval, 3) a meglévő épület bontása és az eredeti épülettel geometriailag megegyező, de ma jellemző épületszerkezetekkel megépített új épület az elvárásoknak megfelelő hőtechnikai minőséggel és levegő-víz hőszivattyúval. Feltételeztem, hogy a meglévő épület élettartama meghosszabbítható min. 50 évvel és az épület gazdaságosan felújítható (pl. nincs állékonysági problémája).

8. tézis – Meglévő épületek környezeti hatása [IX] [X]

A hazai lakóépülettipológia épületeinek vizsgálata alapján megállapítottam, hogy az épületek mélyfelújítása a teljes életciklusra vetített üvegházhatású gáz kibocsátás szempontjából minden esetben kedvezőbb, mint az épület bontása és új épület építése.

Megállapítottam, hogy a mélyfelújítás GWP szempontjából minden épülettípus esetén 1-3 év alatt megtérül. A gyenge energiahatékonyságú (1990 előtti) épületek esetén a bontás- új építés megtérülése is 10 év alatti, de a mélyfelújítás környezetterhelése minden esetben alacsonyabb, mint az új építésé. A jobb energiahatékonyságú (2006 utáni) épületekben a bontás-új építés megtérülése igen hosszú (30-50 év).

Meghatároztam, hogy a teljes hazai lakóépületállomány megépítése hozzávetőlegesen 195 millió tonna CO₂-eq kibocsátást jelentett a múltban. Ha a teljes állományt ma jellemző szerkezeti és épülettechnikai megoldásokkal építenénk újra, ez összesen kb. 228 millió

tonna CO₂-eq kibocsátással járna. Ehhez képest a teljes állomány mélyfelújítása kb. 29 millió tonna CO₂-eq kibocsátást okozna, az új építésnél 87%-kal kevesebbet.

9. tézis – Az életciklus szakaszok aránya [VII] [X]

Meghatároztam a beépített és üzemeltetési kibocsátások (használoi tételek nélküli) arányát meglévő és új épületek esetén a hazai épülettípológia alapján 50 éves vizsgálati időszakra. **Megállapítottam, hogy gyenge energiahatékonyságú épületek esetén a beépített hatások a teljes életciklus 10-15%-áért felelnek, jobb energiahatékonyságú épületekben 20-25%-ért. A mai elvárásoknak megfelelő új épületekben ez az arány 40-50% között van az anyaghasználat megváltozása és az energiahatékonyság javulása miatt.** Meglévő épületek esetén ez egy megalapozott becslésnek tekinthető, mivel a beépített kibocsátások a múltban történtek és korabeli adatok nem érhetőek el.

Az épületek környezeti hatásának csökkentése érdekében tehát a meglévő épületállomány mélyfelújítása a legfontosabb feladat. Az új építések esetén a jó energiahatékonyság mellett a beépített hatások csökkentésére is törekedni kell.

10. tézis – Optimális hőszigetelés vastagság [XI] [XII] [III]

Meghatároztam a környezetterhelés szempontjából optimális hőszigetelés vastagságokat. A hőszigetelés csökkenti a fűtési energiaigényt, de a hőszigetelő anyagok előállítása, szállítása energiafelhasználással és kibocsátásokkal jár.

Megállapítottam, hogy az utólagos hőszigetelés vastagságának a vizsgált tartományban (0-60 cm) környezetterhelés szempontjából nincsen korlátja, azaz akár nagy vastagságú hőszigetelések is megtérülnek, de kb. 20 cm után a határhaszon egyre kevesebb. A hőszigetelés optimális vastagsága GWP szempontjából 60 cm, a súlyozott eredmények szerint 30-60 cm ($U < 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényező). A különböző anyagú hőszigetelés típusok között csekély a különbség, azaz mind a természetes, mind a mesterséges anyagú hőszigetelések alkalmazása előnyös.

Alacsony ÜHG kibocsátású hőtermelő esetén (pl. biomassza) az üzemeltetési kibocsátások jelentősen csökkennek, ezért a hőszigetelés kevésbé befolyásolja a teljes életciklusra vetített GWP-t, akár növelheti is. Más hatáskategóriákat is figyelembe véve azonban a súlyozott eredmények ebben az esetben is 30-60 cm optimális vastagságot mutatnak.

Jövőbeli hasznosítási lehetőségek és kutatási irányok

Az üzemeltetési energiaigény csökkentése mellett új kihívás a beépített környezeti hatások mérséklése. Jelentős potenciál rejlik a szerkezetek optimalizálásában, az anyagok élettartamának, tartósságának növelésében, a természetes, újrahasznosított anyagok alkalmazásában, valamint a gyártási technológiák fejlesztésében és a villamos energia dekarbonizációjában, amely a beépített környezetterhelésre is jelentős hatással van. Az életciklus-elemzés módszere támogatja az építőanyagok fejlesztését és iránymutatást az építészek, tervezők számára a fenntartható épületek létrehozásában.

Az általam kidolgozott módszertani keretrendszer alkalmazható épületenergetikai követelmények, referencia- és határértékek meghatározására. A nagy épületminta segíti az általános érvényű következtetések levonását és kiküszöböli a néhány tipikus épület elemzéséből eredő bizonytalanságokat. Az értekezésben bemutattam, hogyan alkalmaztam a módszert a

közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó határértékek meghatározására, amely a jelenleg hatályos hazai épületenergetikai rendelet alapját képezte. A jövőben a módszer segíthet a 2030-tól bevezetendő „kibocsátásmentes” épület definíciójának és határértékeinek megalkotásában. Elvárás a teljes életciklusra vonatkozó GWP referencia- és határértékek fokozatos bevezetése, majd szigorítása is, amelyre szintén javaslatot lehet adni a módszer segítségével.

Jelenleg nincsen egységes hazai módszertan és adatbázis az épületek életciklus-elemzésére. Kutatásaim hozzájárulhatnak ezek megalkotásához, hiszen fontos, hogy a módszertan, az adatbázis, illetve a referenciaértékek egységet képezzenek. Az épületek életciklus-elemzését meghatározó szabványok 2024-ben felülvizsgálat alatt állnak. Bár a szabványok célja az egységes módszertan megalapozása, még nagyon sok nyitott kérdés van, amelyekben további harmonizáció, illetve a nemzeti különbségek figyelembevétele is szükséges. Fontos kutatási irány a számítás részletességének, a bizonytalanságok hatásának elemzése érzékenységvizsgálattal.

A kutatásban hazai adatok hiányában egy általános életciklus adatbázist használtam az anyagok, termékek előállításának figyelembevételére. A piaci és pénzügyi ösztönzők, valamint a jogszabályok hatására Európában és hazánkban várhatóan már rövid távon is egyre nagyobb számban készítenek majd a gyártók specifikus, egyes termékekre vonatkozó elemzéseket és környezeti terméknnyilatkozatokat. Érdekes egy egységes módszertani kereteken nyugvó hazai adatbázist kialakítani. Ennek alapja lehet egy megbízható általános adatbázis, ami kiegészíthető egyedi adatokkal.

Az általam generált parametrikus minta jól jellemzi az új épületek lehetséges tartományát, de ezt a jövőben érdemes lesz minél több valós épületen ellenőrizni. Várhatóan egyre több épületre készül majd életciklus-elemzés, amelyből az energiatanúsítványokhoz hasonlóan adatbázist lehet építeni és statisztikai elemzések készíthetők a módszerek és elvárások fejlesztése érdekében. Az értekezésben csak lakóépületekkel foglalkoztam, de fontos kutatási irány az egyéb épületekre vonatkozó üzemeltetési adatok és épületszerkezeti kialakítások összegyűjtése és fejlesztése.

Az értekezésben *bottom-up* módszerrel, mintaépületek segítségével vontam le általános következtetéseket és különböző műszaki megoldások hatását hasonlítottam össze a teljes életciklusra vetített környezetterhelésekre. Ez a tervezők számára is hasznos iránymutatást adhat. A *bottom-up* eredményeket azonban *top-down* elemzésekhez kell igazítani a globális célkitűzések teljesítése érdekében.

Az új tudományos eredményekhez kötődő publikációk

- [I] Z. Szalay, A. Zöld, Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample, *Energy Policy* 74 (2014) 510–521. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.001>.
- [II] B. Kiss, E. Kácsor, Z. Szalay, Environmental assessment of future electricity mix – Linking an hourly economic model with LCA, *J. Clean. Prod.* 264 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121536>.
- [III] B. Kiss, Z. Szalay, Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization: a life cycle-based multi-objective optimization approach, *Int. J. Life Cycle Assess.* 28 (2023) 933–952. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02043-y>.
- [IV] L. Gergely, E. Barna, M. Horváth, Z. Szalay, Lakóépületek épületgépészeti rendszerének beépített szén-dioxid kibocsátása, *Magy. Épületgépészet LXXIII.* (2024) 1–6.
- [V] L. Gergely, E. Barna, M. Horváth, Z. Szalay, Assessing Embodied Carbon of Residential HVAC Systems: Baselines for Life-cycle Sustainability, *Beadva* (n.d.).
- [VI] Z. Szalay, A parametric approach for developing embodied environmental benchmark values for buildings, *Int. J. Life Cycle Assess.* 29 (2024) 1563–1581. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02322-w>.
- [VII] Z. Szalay, T. Csoknyai, Life cycle costs and environmental impacts of a nearly zero-energy detached house, *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 4 (2013) 163–169. <https://doi.org/10.1556/irase.4.2013.2.11>.
- [VIII] Z. Szalay, D. Szagri, Á. Bihari, B. Nagy, B. Kiss, M. Horváth, P. Medgyasszay, Development of a life cycle net zero carbon compact house concept, *Energy Reports* 8 (2022) 12987–13013. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.197>.
- [IX] S. Hrabovszky-Horváth, Z. Szalay, T. Csoknyai, Comparative analysis for the refurbishment of the high-rise concrete building stock based on life cycle assessment scenarios, in: A. Passer, K. Höfler, P. Maydl (Eds.), *Proc. Int. Sustain. Build. Conf. 2013 - Graz*, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, 2013: pp. 241–250. <http://dx.medra.org/10.3217/978-3-85125-301-6>.
- [X] S. Hrabovszky-Horváth, Z. Szalay, Environmental assessment of a precast concrete building stock in a time perspective, *Environ. Eng. Manag. J.* 13 (2014) 2797–2804. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.312>.
- [XI] P. Medgyasszay, Z. Szalay, Optimization of building envelope components based on life cycle environmental impacts and costs, *Adv. Mater. Res.* 899 (2014) 93–98. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.899.93>.
- [XII] B. Kiss, Z. Szalay, Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings, *Autom. Constr.* 111 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103044>.

Egyéb hivatkozások

- [1] European Union, Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings, *Off. J. Eur. Union* 1275 (2024) 1–68. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive

- [2] European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Off. J. Eur. Union (2010). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- [3] ÉKM, 9/2023. (V.25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, (2023). <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>.
- [4] ISO 21678, Sustainability in buildings and civil engineering works - Indicators and benchmarks - Principles, requirements and guidelines, (2020).
- [5] United Nations Environment Programme, Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector, 2024. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>.
- [6] N. Sajn, Energy efficiency of buildings: A nearly zero-energy future?, Eur. Parliam. Res. Serv. (2016) 10.
- [7] European Union, Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency, Off. J. Eur. Union 328 (2018) 210–230. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2002&from=EN>.
- [8] C. Ionescu, T. Baracu, G.E. Vlad, H. Necula, A. Badea, The historical evolution of the energy efficient buildings, Renew. Sustain. Energy Rev. 49 (2015) 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062>.
- [9] P. Chastas, T. Theodosiou, K.J. Kontoleon, D. Bikas, Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings, Build. Environ. 130 (2018) 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>.
- [10] T. Ibn-Mohammed, R. Greenough, S. Taylor, L. Ozawa-Meida, A. Acquaye, Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends, Energy Build. 66 (2013) 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>.
- [11] O. Lucon, D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, M.V. Vilarinho, IPCC 5th Assessment Report, Working Group III Chapter 9 Buildings, (2014) 1–68. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf.
- [12] A. Zöld, Z. Szalay, What is missing from the concept of the new European Building Directive ?, Build. Environ. 42 (2007) 1761–1769. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.003>.
- [13] M. Röck, M.R.M. Saade, M. Balouktsi, F.N. Rasmussen, H. Birgisdottir, R. Frischknecht, G. Habert, T. Lützkendorf, A. Passer, Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation, Appl. Energy 258 (2020) 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.
- [14] I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : A review article, 39 (2007) 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.

- [15] WorldGBC, Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon, World Green Build. Counc. (2019) 35. https://www.worldgbc.org/sites/default/files/WorldGBC_Bringing_Embodied_Carbon_Upfront.pdf.
- [16] EASAC, Decarbonisation of buildings: for climate, health and jobs, 2021. <https://easac.eu/publications/details/key-messages-from-european-science-academies-for-unfccc-cop26-and-cbd-cop15/>.
- [17] IEA EBC Annex 72, Monte Verita Declaration on a built environment within planetary boundaries, (2021). https://annex72.iea-ebc.org/Data/Sites/5/media/documents/montevertadeclaration_final_signed.pdf.
- [18] DGNB, DGNB certification, Dtsch. Gesellschaft Für Nachhalt. Bau. (n.d.). <https://www.dgnb.de/en>.
- [19] BPIE, Whole-life Carbon: Challenges and solutions for highly efficient and climate-neutral buildings, 2021. <https://www.bpie.eu/publication/whole-life-carbon-challenges-and-solutions-for-highly-efficient-and-climate-neutral-buildings/>.
- [20] D. Trigaux, K. Allacker, W. Debacker, Environmental benchmarks for buildings: a critical literature review, Int. J. Life Cycle Assess. 26 (2021) 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01840-7>.
- [21] A. Hollberg, T. Lützkendorf, G. Habert, Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process, Build. Environ. 153 (2019) 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>.
- [22] T. Csoknyai, A magyarországi lakóépület-állomány energetikai modellezése, a korszerűsítés lehetőségei. MTA doktori értekezés, 2022. https://real-d.mtak.hu/1472/7/dc_2011_22_doktori_mu.pdf.
- [23] MSZ EN ISO 14040:2022 EV, Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Alapelvek és keretrendszer, (2022).
- [24] MSZ EN ISO 14044:2022 EV, Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Követelmények és irányelvek, (2022).
- [25] MSZ EN 15978:2012, Építmények fenntarthatósága. Épületek környezetvédelmi értékelése. Számítási módszer, (2012).
- [26] prEN 15978-1, Sustainability of construction works - Methodology for the assessment of performance of buildings - Part 1: Environmental Performance, (2021).
- [27] T. Lützkendorf, M. Balouktsi, Context-specific assessment methods for life cycle-related environmental impacts caused by buildings, IEA Annex 72, 2023.
- [28] Ecoinvent Centre, Ecoinvent, (2023). <https://ecoinvent.org/> Accessed 20 Nov 2023.
- [29] Y. Decorte, N. Van Den Bossche, M. Steeman, Importance of technical installations in whole-building LCA: Single-family case study in Flanders, Build. Environ. 250 (2024) 111209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111209>.
- [30] GreenDelta, openLCA 2.0.4, (2023). <https://www.openlca.org/>.