



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építészmérnöki Kar
Csonka Pál Doktori Iskola
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék
Építőmérnöki Kar
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Épületek környezeti hatás szerinti többdimenziós optimalizálása

A

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen
a PhD fokozat követelményeinek részleges teljesítéséért
benyújtott disszertáció rövid összefoglalója

Kiss Benedek György

Témavezető:
Dr. Szalay Zsuzsa

Budapest 2022.

RÖVÍTÍTÉSEK

ADP	Abiotic Depletion Potential (Ásványi erőforrások kimerülése)
AP	Acidification Potential (Savasodási potenciál)
BAU	Business as Usual („Szokványos” építési mód)
BIM	Building Information Modelling (Építmény Információs Modellezés)
CED	Cumulative Energy Demand (Kumulatív energiaigény)
DP	Distance to Pareto-front (Pareto-fronttól mért távolság)
EEMM	European Electricity Market Model
EP	Eutrophication Potential (Eutrofizációs potenciál)
ÜHG	Üvegházhatású gáz
GWP	Global Warming Potential (Globális felmelegedési potenciál)
IEA	International Energy Agency
IP	Improvement Potential (Javulási potenciál)
LCA	Life Cycle Assessment (Életciklus-elemzés)
LCC	Life Cycle Cost (Életciklus-költség)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Életciklus-hatásértékelés)
MOOP	Multi-Objective Optimization Problem (Több célváltozós optimalizációs probléma)
ODP	Stratospheric Ozone Depletion Potential (Sztratoszferikus ózonréteg károsodása)
PPI	Pareto Position Index (Pareto pozíciós index)
PSI	Pareto Spread Indicator (Pareto-kiterjedtség indikátor)

FOGALOMMAGYARÁZAT

beépített hatás – az épület létesítése (gyártás, szállítás, építés) során keletkező környezeti hatás,

Business-as-usual (BAU) - az optimalizálás azon esetei, melyek a jelenlegi (szokványos) építési gyakorlatot fejezik ki. Ezek az esetek referenciaként szolgálnak az optimalizálással elérhető javulás meghatározásához. A modellezés során ezek az esetek az optimalizálás változóinak adott (szűkített) értéktartományaként jelennek meg

célfüggvény, célfüggvényérték – a célfüggvény olyan absztrakt függvény, mely az optimalizálás változóit bemenetként kezeli és a célváltozó értékét adja vissza. A célfüggvényérték a célfüggvény kimeneti értéke.

dekarbonizáció – az villamos energiatermeléshez köthető üvegházhatású gáz kibocsátás csökkentésére irányuló törekvés

dominánt megoldások – egy többcélváltozós optimalizálás azon megoldásai, melyekre igaz, hogy létezik legalább egy eltérő megoldás ugyanabban a célfüggvény térben, amely *minden* célfüggvény-érték tekintetében kedvezőbb

elitizmus – egy széleskörben elterjedt stratégia a jó megoldások kiválasztására a sztochasztikus több célváltozós optimalizálás során. A már kiszámított megoldáshalmaz (populáció) legjobb megoldásai további értékelés vagy változtatás (mutáció) nélkül kerülnek át a következő generáció megoldásai közé.

Global Warming Potential (GWP) – széleskörben alkalmazott környezeti hatásindikátor, mely az antropogén (emberek által okozott) kibocsátások az atmoszféra sugárzáselnyelő képességére gyakorolt hatását fejezi ki. Mértékegysége a kilogramm széndioxid-ekvivalens (*kgCO₂-eq.*), melyet bizonyos üvegház hatású gázokhoz megállapított karakterizációs tényezők segítségével számítanak ki.

konténerizáció – szoftvertechnológia, mely azt az operációsrendszer-szintű virtualizációt jelöli, mely megosztott rendszerű alkalmazások telepítésére és futtatására alkalmas anélkül hogy egy teljes virtuális gépet el kellene indítani

kvázi-optimális – egy többcélváltozós optimalizálás azon megoldásai, melyek a Pareto-optimális megoldásokhoz közel vannak (beleértve a Pareto-optimálisakat is). A kiválasztás kritériumaként a Pareto-fronttól mért távolság mérőszáma szolgál.

Life Cycle Cost (LCC) – életciklus-költség, vagy globális költség. Széleskörben alkalmazott gazdasági mutató, a kezdeti beruházási költségek jelenértékének összege, a fenntartási költségek összege és a csere költségek (a kezdőévre vonatkozóan), valamint adott esetben az ártalmatlanítási költségek.

nemdominánt megoldások - egy többcélváltozós optimalizálás azon megoldásai, melyeket semelyik egyéb megoldás nem dominál. A nemdominánt megoldások a vizsgált megoldásseregen belül Pareto-optimálisak

NSGA-II - Non-dominated Sorting Genetic Algorithm – egy széleskörben alkalmazott sztochasztikus többcélváltozós optimalizálási algoritmus. Feljesztői: K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan.

Pareto-front – az összes Pareto-optimális megoldás halmaza.

Pareto-optimális – egy többcélváltozós optimalizálás megoldásai közül azok Pareto-optimálisak, melyekre igaz, hogy nincs másik megoldás, ami bármelyik célfüggvény szerint kedvezőbb lenne anélkül, hogy legalább egy másikban kedvezőtlenebb lenne.

1. Bevezetés és a kutatás motivációja

Az épületek felelősek a globális energiafogyasztás 36%-áért, a globális üvegházhatású gáz (ÜHG) kibocsátás 40%-áért az IEA jelentése alapján [1], és Európában a teljes végenergiafelhasználás 40%-áért [2]. Az épített környezet a legnagyobb ipari szektor mind gazdasági, mind pedig kutatási értelemben véve [3]. A meglévő és új épületek energiahatékonyságának növelése alapvető fontosságú a energetikai és klímacélok elérésében és az energiabiztonság fokozásában [4]. A 2002-ben bevezetett [5], majd 2010-ben megújított [6] európai irányelv az épületek energiahatékonyságáról (Energy Performance of Buildings Directive – EPBD) az Európai Unió egyik legfontosabb jogszabályalkotási lépése volt az épületállomány energetikai teljesítményének javítása érdekében. A téma iránt mutatott, a kutatók és a jogszabályalkotás körében tapasztalt jelentős érdeklődés az épületek energiahatékonyságának növelését továbbra is folyamatosan napirenden tartja.

Ugyanakkor friss kutatások arra mutatnak rá, hogy modern energiahatékony épületek esetén a „beépített” ÜHG kibocsátások – az épület létesítése során keletkező kibocsátások – akár ugyanakkora mértékűek is lehetnek, mint az épület üzemeltetéséhez köthető ÜHG kibocsátások [7]. Ez többek között annak köszönhető, hogy az energiafogyasztás csökkentésének érdekében jelentős mennyiségű többlet-hőszigetelés, illetve gépészeti berendezés kerül az épületekbe [8–10]. Ennek következtében az épület használati fázisában elkerült kibocsátás egy része az építési és bontási életciklus-fázisokra tevődik át [11–13], mellyel a problémát inkább csak megkerüljük minthogy megoldást nyújtanánk rá. A problémafelvetést a „beépített” és a használati környezeti hatások közötti kompromisszumkeresésként is értelmezhetjük. Megoldásként számos intézkedés számba vehető, úgy mint a hőszigetelés, az energiahatékony ablakok használata, hatékony és szabályozható gépészeti rendszerek és a megújuló energián alapuló technológiák alkalmazása, melyek igen jelentős keresési teret eredményeznek [14].

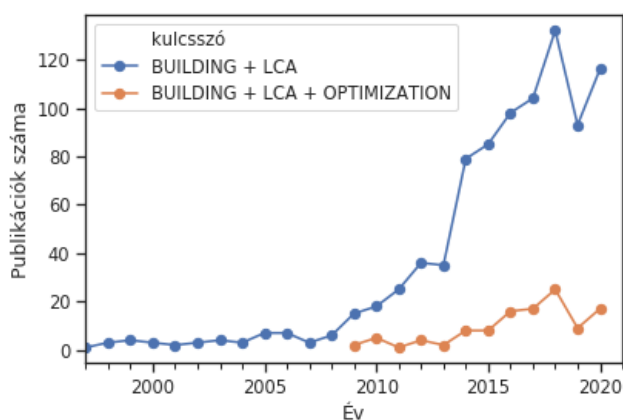
Az életciklus-elemzés (LCA) egy széleskörben elfogadott és alkalmazott tudományos módszer termékek egész életciklusukra vetített környezeti hatásának vizsgálatára. Egyre több esetben alkalmazzák épületek esetén is [15,16]. Annak ellenére, hogy az épületek környezetre gyakorolt hatása egyre elismertebb probléma a társadalmunkban, az épületeket érintő intézkedéseket számos gazdasági tényező korlátozza. Ezért az életciklus-szemlélet alkalmazása nélkülözhetetlen az épületek gazdasági számításai során is, mely az életciklus-költségelemzésben (Life Cycle Costing – LCC) tud megvalósulni.

Bár a jogszabályalkotók és a tudományos közösség is egyetért a kis környezeti hatással bíró és gazdaságosan megvalósítható épületek szükségességében, az ahhoz vezető út számos nehézséget tartogat. Ez különböző okokra vezethető vissza, úgymint az energiahatékonyságot célzó lehetséges intézkedések hosszú sora; az épületek egyediségéből következő modell-alapú megközelítés; a modellezés során felmerülő módszertani kérdések; a tervezés során felmerülő döntések ellentmondásossága és a többféle szempont szerint elérni kívánt cél [17]. Ezen szempontok összefoglalásaként a tervezési folyamat egy több célfüggvény szerinti optimalizációs problémaként (Multi-Objective Optimization Problem – MOOP) is felfogható. Amennyiben az épület matematikai algoritmusok segítségével optimalizálható, továbbá több célfüggvényt is egyidejűleg figyelembe tudunk venni, akkor az optimalizálási folyamat alkalmas lehet arra, hogy az épületek tervezésében résztvevőket aktívan támogassa. Ahhoz, hogy ezt elérjük különböző szakterületek szoros együttműködése szükséges, úgymint a matematika az optimalizáláshoz, az épületfizika az energetikai teljesítmény számításához, a környezeti vizsgálatok a környezetre gyakorolt hatások számszerűsítéséhez stb.

2. Szakirodalmi áttekintés

A fenti problémafelvetésből következően a kutatásom célja a következőképpen fogalmazható meg: **Hatékony, a teljes életciklusa során alacsony környezetre gyakorolt hatással rendelkező, de ésszerű költségek mellett megvalósítható épületek tervezésének támogatása algoritmikus optimalizálás segítségével.** Ennek elérése érdekében áttekintettem a vonatkozó szakirodalmat, hogy naprakész információkkal rendelkezek a szakterületet illetően.

Az épületek életciklus-elemzésével és optimalizálásával foglalkozó publikációk száma egyre gyarapszik, amit számos áttekintő cikk is alátámaszt [16,18–20]. Az eszközök és a számítási kapacitás elérhetővé válása, az épületinformációs modellezés (Building Information Modelling – BIM) egyre széleskörűbb alkalmazása és a kis környezeti hatással rendelkező épületek iránti növekvő érdeklődésnek köszönhetően számos kiváló kutatás születik szerte a tudományos világban (1. ábra).



1. ábra – Épületek életciklus alapú optimalizálása témakörben megjelent publikációk száma évek szerint a Scencedirect.com oldalon végzett keresés alapján. A keresést a "BUILDING + LCA" és a "BUILDING + LCA + OPTIMIZATION" kulcsszavak "Title, abstract author-specified keywords" mezőben történő használatával végeztem el legutóbb 2021. június 18-án.

Matematikai szempontból nézve az optimalizálás egy vagy több, néhány változó függvényeként számított célváltozó minimalizálását vagy maximalizálását jelenti [21]. Egy célváltozós optimalizálás esetén egy, több célváltozós optimalizálás esetén kettő vagy több, egymással ellentmondó célváltozó optimális értékeit keressük egyidejűleg [22,23]. A szakirodalomban az épületek környezeti optimalizálása sok esetben néhány tervezési opció összehasonlításában merül ki, és ezt a folyamatot „optimalizálásként” említik [24–27]. Ezzel a megközelítéssel azonban nem lehet teljeskörű következtetéseket levonni. Ugyanakkor egyre több tudományos publikáció jelenik meg, melyben matematikai optimalizálási algoritmusokat alkalmaznak épületek optimalizálásához [17,28,29]. A lehetséges célváltozók között előfordul példa a költség minimalizálására [30–33], az energiaigényre [34,35], a hőkomfort maximalizálására [36–38], épületszerkezetek teljesítményére [39] vagy akár különböző hibrid megújuló energiatermelő rendszerek optimális kombinálására [40] is. Mindezek mellett kevés optimalizálást alkalmazó kutatás foglalkozik az épületek életciklusra vetített környezeti hatásával [17].

Ezek a munkák különböző módszerekkel próbálják a problémát megközelíteni, úgymint az LCA integrálása egy BIM alapú rendszerbe [41–48], vagy egy matematikai képletekkel leírható parametrikus modell definiálása [13,49,50]. Az elérhető tervezési eszközök használata nem csupán a BIM használatában merül ki, hanem sok esetben részletes energiaigény számításokat is végeznek épületenergetikai szimulációs szoftverek segítségével [50,51].

Azt hogy az LCA és az optimalizáció a tervezési döntéshozást hogyan tudja segíteni ritkán tárgyalják a szakirodalomban [52]. A megfelelő vizualizációs technikák ígéretes lehetőségnek bizonyulnak [53–55], és több esetben jelentős javulást sikerült elérni a környezeti hatásban a segítségükkel [56], valamint a tervezési folyamatban résztvevők közti együttműködést is segíteni tudták [57].

Kulcsfontosságú területet jelent a villamos energiaellátás környezeti hatásának vizsgálata, mely indirekt módon jelentősen befolyásolhatja az épületek optimalizálását. Ennek oka az elektromos áramtermelés dekarbonizációjában rejlő komoly potenciál, valamint az épületek elektromos áramtól való egyre jelentősebb függése [58]. A szakirodalomban számos tanulmány foglalkozik a különböző dekarbonizációs stratégiák technológiai és gazdaságossági megvalósíthatóságával (pl. [59–63]). Ezek jelentősége akkor látszik igazán, ha az épületek LCA vizsgálata során jövőbeli elektromos áram mix scenáriókat is figyelembe veszünk [64–68]. Néhány további kutatásban arra is rámutattak, hogy az épületek elektromos áramfogyasztásának részletes órai szintű modellezése és az ahhoz köthető környezeti hatás jelentős hatással bír az LCA számítás eredményeire [69,70].

3. A kutatás célkitűzései

A szakirodalomban található hiányosságok azonosítása után a következőket tűztem ki a kutatás céljaiként:

- 1. célkitűzés: Moduláris keretrendszer fejlesztése.** A szakirodalmi áttekintés során felmerült szempontok alapján megállapítottam, hogy egy új számítási keretrendszert kell kifejlesztenem, ami megfelel a következő elvárásoknak: A számítás vegye figyelembe az épület összes életciklus-fázisát a „beépített” és az üzemeltetési környezeti hatásokat és költségeket is beleértve. A tervezési opciók algoritmikus definícióján alapuló parametrikus modellezési megközelítést alkalmazza, és így tegye lehetővé az automatizált optimalizálást. Végül pedig legyen moduláris, vagyis az egyes számítási lépések legyenek könnyen kiválthatóak egy-egy másik módszertannak megfelelő modullal.
- 2. célkitűzés: A több kritérium szerinti elemzés definiálása.** Mivel az optimalizálás célja a tervezési döntéshozás támogatása, ezért kulcsfontosságú, hogy az optimalizálás eredményeit hogyan értékeljük. Nem csak a környezeti hatás minimalizálása, hanem annak ésszerű költségek mentén történő elérése is fontos, mely célokat egyidejűleg figyelembe kell venni. Az eredmények mind az optimalizálással elérhető megtakarítást, mind pedig annak eléréséhez szükséges tervezési ajánlásokat is alá kell, hogy tudják támasztani.
- 3. célkitűzés: Az optimalizálás egy esettanulmány-épületen történő alkalmazása.** Egy megfelelő optimalizálási algoritmus segítségével a környezeti hatásban és az életciklus költségben elérhető potenciális megtakarításokat számszerűsíteni kell. Ezenfelül azt is meg kell mutatni, hogy melyek az optimális tervezési változók egy kis környezeti hatású, de alacsony költségű épület esetén. Ezeket megfelelő vizualizációs technikákkal kell alátámasztani, hogy a több célfüggvény szerinti optimalizálás eredményét részletesen értelmezni lehessen.
- 4. célkitűzés: Fűtési rendszerek hatásának vizsgálata.** Az épületben alkalmazott fűtési rendszertől függ, hogy milyen energiahordozó szükséges az épület fűtéséhez. A

beépített és a használathoz köthető környezeti hatások arányától és az energiahordozó és a környezeti hatás közti átváltási tényezőtől függően az optimalizálás eredménye jelentősen eltérhet. Meg kell tehát vizsgálni, hogy különböző energiahordozók (úgy mint a biomassa, fosszilis tüzelőanyagok vagy az elektromos áram) hogyan befolyásolják az optimalizálást.

5. célkitűzés: Az elektromos áram dekarbonizációjának vizsgálata. Elektromos áramon alapuló fűtési rendszerek esetén, ahol az energiaigényt a hálózatból fedezik, az áramtermelés dekarbonizációja ugyanúgy befolyásolni tudja az optimalizálás eredményeit, mint a 4. célkitűzésben említett energiahordozók. Ezért ennek hatását is vizsgálni kell különböző scenáriók segítségével.

6. célkitűzés: Éghajlati és gazdasági kontextus hatásának vizsgálata. Mivel az épületek energiafogyasztása függ az éghajlattól, valamint a költségeket és a beépített hatásokat is befolyásolják a helyi gazdasági és technológiai adottságok, ezért az optimalizálás eredménye jelentősen függ az épület lokációjától. Ennek mértékét az optimalizáció különböző helyszíneken történő elvégzésével szükséges vizsgálni.

4. Alkalmazott módszerek

A környezetre gyakorolt hatások számszerűsítésére az életciklus-elemzés szabványosított módszertanát alkalmaztam [71,72]. Az EN 15978 szabvány [73] meghatározza azt a hat legfontosabb környezeti hatásindikátort, melyek következetesen alá vannak támasztva tudományos értelemben és széleskörben alkalmazzák épületek esetén. Ezek közül a Globális felmelegedési potenciál (Global Warming Potential – GWP) [74] a legelterjedtebb. A GWP az emberiséghez köthető kibocsátások hatását fejezi ki a légkör sugárzáselnyelő képességére vonatkozóan, és gyakran a „klímaváltozás” indikátoraként is hivatkoznak rá. A GWP-t széndioxid ekvivalens kilogrammban (*kg CO₂-eq.*) fejezzük ki, melyet bizonyos ÜHG-khoz rendelt karakterizációs tényezők segítségével számítunk ki. A gazdaságossági szempontok számszerűsítésére a *globális költséget* választottam, mint a GWP-vel ellentmondásban álló célváltozót. Az EPBD-t alátámasztó EU rendelet [75] alapján a „*globális költség a kezdeti beruházási költségek jelenértékének összege, a fenntartási költségek összege és a csere költségek (a kezdőévre vonatkozóan), valamint adott esetben az ártalmatlanítási költségek*”. A globális költség számításához az életciklus-költségelemzés (Life Cycle Costing) módszertanát alkalmaztam, ennek eredményére pedig életciklus költségként (Life Cycle Cost – LCC) hivatkozok.

Az optimalizálás végrehajtásához a parametrikus modellezési megközelítést alkalmaztam. Definiáltam egy hierarchikus épület-adatmodellt, amely minden szükséges információt tartalmaz az LCA és LCC számítások elvégzéséhez. Az adatmodell alapján olyan táblázatokat állítottam elő, melyek segítségével a háttér adatok az épületben található összes szerkezettel és anyaggal könnyen összeegyeztethetőek. A szükséges LCIA (Life Cycle Impact Assessment) adatok kiszámításához a legismertebb általános adatbázist az *ecoinvent* – 3.6-os verzió, Cut-Off rendszermodell [76] – alkalmaztam. Az adatsorok adaptálásához meghatároztam egy lokalizációs eljárást, amely helyettesíti a termékek ellátási láncában az eredeti elektromos áram és földgáz szolgáltatókat a helyi viszonyoknak megfelelővel. A rendszerhatárok megállapításánál figyelembe vettem a termék fázist (A1-3), az építési fázist (A4-5), a használati fázist (B4 csere és B6 használati energiafelhasználás) és az életút végét (C2-C4) az EN 15978 szabványnak [73]

megfelelően. Minden életciklus fázisban az ahhoz köthető környezeti hatás a háttér adatok és az adatmodell alapján számított mennyiségek segítségével kiszámítható.

A költség adatok egy évenként publikált gyártóspecifikus és átlagos építési költségeket összefoglaló kiadványból [77] származnak. Azon anyagok esetén, amelyekre nem volt megfelelő adat a kiadványban további gyártói és piaci árakat vettem figyelembe. A munkadíjakat a munkafolyamatonként eltérő építőipari általános rezsioradíj és egy online költségbecslés készítő platformból [78] származó szabványos normaidők segítségével számítottam ki. Az energiahordozók költségei a földgáz és elektromos áram esetén statisztikai adatokból [79,80], míg a pellet esetén piackutatásból származnak. A költség számítás folyamata hasonló a környezeti hatások számításához, beleértve az életciklus fázisokat, úgymint a gyártás, a beépítés, csere és üzemeltetés. A mennyiségek számítása szintén az épület adatmodell alapján történik. Minden költségelemre általános 3%-os diszkontrátát alkalmaztam.

Megvizsgáltam és a számítási keretrendszerbe integráltam három különböző energiaigény számítási módszert: egy dinamikus épületenergetikai szimulációt EnergyPlus [81] segítségével, az EN ISO 52016 [82] szabvány szerinti állandósult állapotra vonatkozó havi számítási módszert és a hazai épületenergetikai szabályozásban megtalálható szezonális számítási módszert [83]. A három opció közül a dinamikus energetikai szimuláció mutatkozott a legalkalmasabbnak arra, hogy részletes számítási eredményeket használhassak fel az elemzésben.

Egy nemzetközi együttműködés keretében áttekintettem számos vizualizációs technikát, és kiválasztottam a több célfüggvény szerinti optimalizálás eredményeinek vizsgálatára legalkalmasabbakat. A pontdiagrammok és a párhuzamos koordinátadiagrammok bizonyultak a legmegfelelőbbnek nagyszámú megoldás egyidejű megjelenítésére és elemzésére, míg a részegész összehasonlításokhoz (pl. az egyes életciklus fázisok közti megoszlás vizsgálatára) elsősorban kördiagramokat szokás használni. Megoldás opciók egymással való összehasonlítására leginkább oszlopdigrammokat használnak.

Áttekintettem a több célfüggvényt figyelembe venni képes, épületek teljesítményének optimalizálására alkalmas technikákat, és megállapítottam, hogy az NSGA-II algoritmus [84] a legerjedtebb és egyúttal a legmegfelelőbb is az én céljaimnak. Az NSGA-II legfontosabb tulajdonságai közé tartozik, hogy igen hatékonyan tudja a nemdomináns megoldásokat sorba rendezni egy több célfüggvény szerinti optimalizálás során, nagyon hamar konvergál az „elitizmus” módszerének használata miatt, és a Pareto-fronton egyenletesen elosztott Pareto-optimalis megoldásokat ad eredményül. Az NSGA-II algoritmuson kívül két további eljárást, a Direct Multi-Search (DMS) [85] és a Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2) [86] algoritmusokat is teszteltem. Míg az első nem volt alkalmas az optimalis megoldások körét kiszélesíteni néhány megtalált lokális gócponton túl, addig a második szignifikánsan lassabb volt az NSGA-II-nél, elsősorban a párhuzamos szálon futtatott számítás lehetőségének hiánya miatt.

Végül, a keretrendszert egy „szolgáltatás-alapú” konténerizált számítási környezetben implementáltam, melyhez meglévő szoftvereket is felhasználtam, úgymint a DesignBuildert, az EnergyPlust és az OpenLCA-t a számításokhoz; Jupytert, Pandas, Matplotlib, Seaborn és Plotly könyvtárakat az eredmények elemzéséhez; PostgreSQL és Redis adatbáziskezelőket az adatok tárolására; Flask és Docker megoldásokat a konténerizációhoz. A párhuzamos számításra alkalmas implementáció segítségével jelentős nyereséget értem el a számítási idő tekintetében az egy szálon történő számítási folyamatokhoz képest.

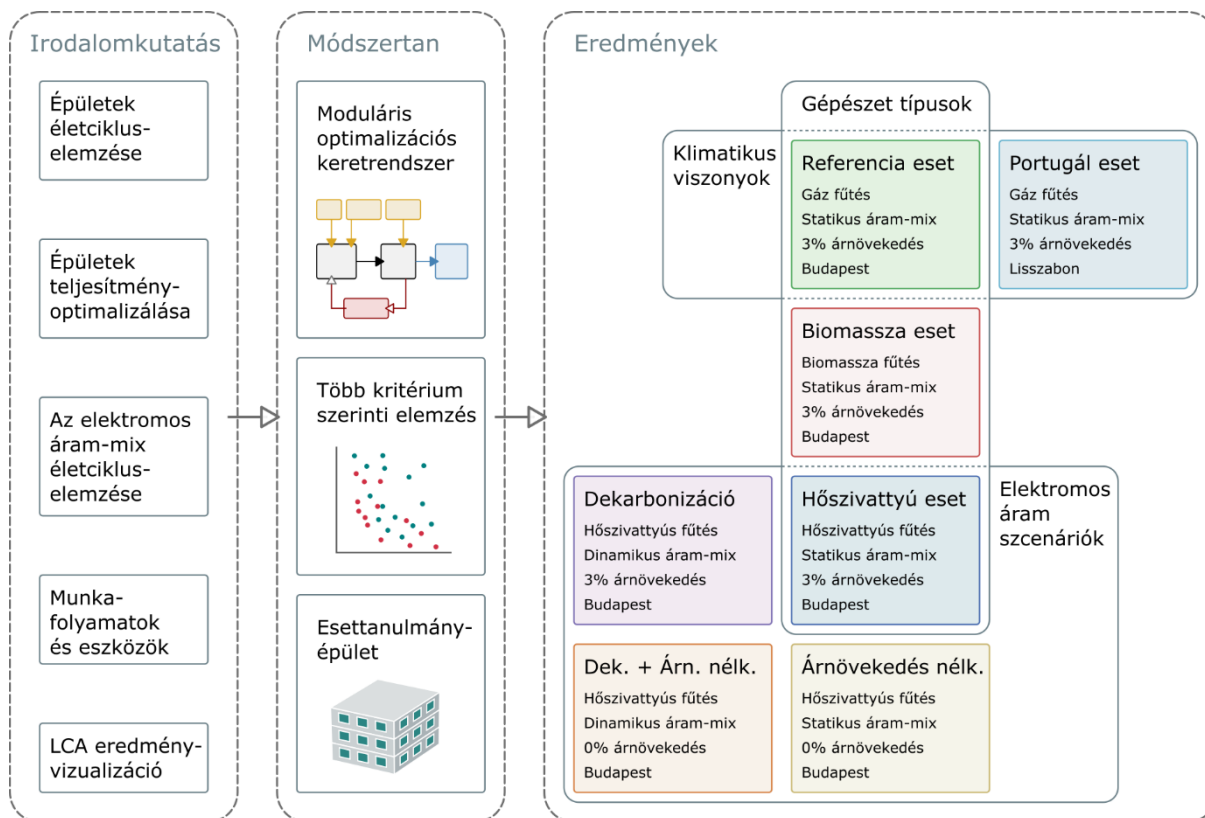
1. táblázat – Az optimalizálás változóiként alkalmazott tervezési paraméterek a hozzájuk tartozó határértékkel és opciókkal, valamint a „szokványos” (BAU) tervezési paramétereknek megfelelő értékek.

Tervezési paraméter		Értékhatárok / opciók	„Szokványos” érték (BAU)
Ablakarány	É	1 - 80 %	13 - 24 %
	Ny	1 - 80 %	23 - 34 %
	D	1 - 80 %	33 - 44 %
	K	1 - 80 %	23 - 34 %
Üvegezés	É		
	Ny	2 rtg. / 3 rtg.	2 rtg. / 3 rtg.
	D		
	K		
Árnyékolás	É		
	Ny	van / nincs	van / nincs
	D		
	K		
Ablakkeret		műanyag / fa	műanyag / fa
Roof insulation	anyag vtg.	fehér EPS / grafit EPS / PUR / kőzetgyapot / fagyapot / parafa / XPS	fehér EPS / grafit EPS / PUR / kőzetgyapot 20 - 25 cm
Wall insulation	anyag vtg.		fehér EPS / grafit EPS 10 - 15 cm
Floor insulation	anyag vtg.	1 - 80 cm	fehér EPS / grafit EPS / kőzetgyapot 4 - 10 cm

Létrehoztam egy, a hazai épületállomány jellemző társasházi épületének parametrikus modelljét. A tervezési paraméterek elsősorban az épületburok jellemzőit írják le, úgymint az ablakarány, üvegezés és keret típusa, árnyékolás, hőszigetelés anyaga és vastagsága. Ez a 19 tervezési paraméter adja az optimalizálás változóit. Ahhoz, hogy meghatározható legyen a költségben és a környezeti hatásban elért javulás, meghatároztam a tervezési paraméterek „szokványos” (Business as Usual – BAU) értékét is, melyek segítségével előállítottam a referenciamegoldásokat. Ebben az esetben a parametrikus épületmodell ugyanaz, mint az optimalizálások során, de a paraméterek értékei szűkebb tartományban mozognak, ami így megfelel a hazai építési gyakorlatnak (1. táblázat).

5. A disszertáció felépítése

A kutatás lépéseit és az egyes vizsgálati eseteket, melyeken keresztül választ kívánok adni a kutatási kérdésekre a 2. ábra foglalja össze. Az irodalmi áttekintés 5 témakör köré épül, úgymint az épületek életciklus-elemzése; épületek teljesítményoptimalizációja; az elektromos áram mix életciklus-elemzése (és annak épületekre gyakorolt hatása); tervezési eljárások és eszközök; valamint az életciklus-elemzés eredményeinek vizualizációja.



2. ábra – A kutatás felépítése és a vizsgált esetek egymással való összefüggései.

A módszertani fejezet többek között a kifejlesztett keretrendszer ismertetését és tudományos alátámasztását, az LCA és LCC számítások lépéseit, és a rendszer implementációjának leírását foglalja magában (**I. Tézis**). Ezen túlmenően a több célfüggvény szerinti optimalizálás eredményeinek elemzési módszertanát és a hozzá tartozó mérőszámok definiálását (**II. Tézis**), majd pedig az optimalizálni kívánt esettanulmány-épület ismertetését is tartalmazza. Az optimalizálás egyes aspektusait a keretrendszer és a módszertan esettanulmány-épületen történő alkalmazásával mutatom be. A *Referencia eset* az összehasonlítások alapjaként (**IV. Tézis**) és a módszertan igazolásaként (**III. Tézis**) is szolgál. A *Biomassza* és *Hőszivattyú* esetek referenciával történő összehasonlításával a különböző fűtési energiahordozók hatását vizsgáltam meg (**V. Tézis**). A különböző elektromos áram mix szenáriók segítségével a *dekarbonizáció*, illetve a jövőbeli *árnövekedés* optimális eredményekre gyakorolt hatását elemeztem (**VI. Tézis**). Végül pedig egy a *portugál* gazdasági és környezeti viszonyoknak megfelelő eset és a referencia összehasonlításával az eredmények lokációtól való függését vizsgáltam meg (**VII. Tézis**).

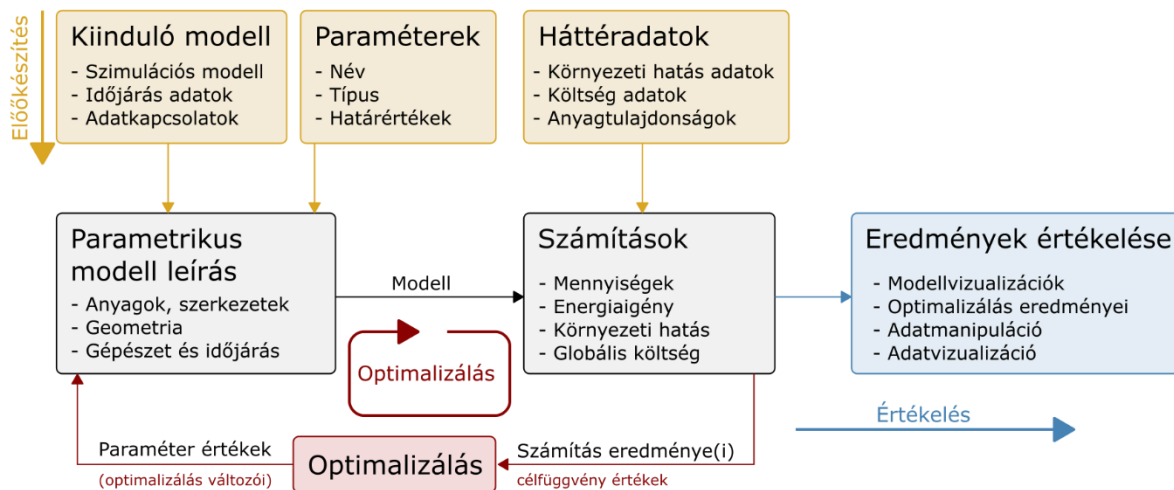
6. Tézisek

I. Tézis

az épületek életciklus-elemzés alapú optimalizálására alkalmas moduláris keretrendszer kifejlesztéséről

Az LCA alapú épületoptimalizálás tudományos szakirodalma és az elérhető tervezéstámogató eszközök elemzése alapján megállapítottam, hogy nincs jelenleg olyan platform, mely képes modulárisan befogadni meglévő szoftveres megoldásokat és egyúttal az életciklus-környezeti hatásokat és költségeket automatizált folyamatban kiszámítani.

Létrehoztam egy moduláris keretrendszert, mely képes a környezetre gyakorolt hatás és a költségek szempontjából legfontosabb épületparaméterek vizsgálatára, úgymint a geometria, anyaghasználat és a hőtechnikai jellemzők; lefedi a teljes életciklust a „bölcsőtől a sírig”; a teljes épületet figyelembe veszi a számítás során, nem csak egyes szerkezeteket; és alkalmas az algoritmikus optimalizálásra, tehát az alapjául szolgáló épületmodell automatikusan módosítható és a teljes számítási folyamat beavatkozás nélkül végrehajtható (3. ábra).



3. ábra – A számítási keretrendszer felépítése és a munkafolyamat lépései.

A tézist alátámasztó publikációk: [P1, P2, P3]

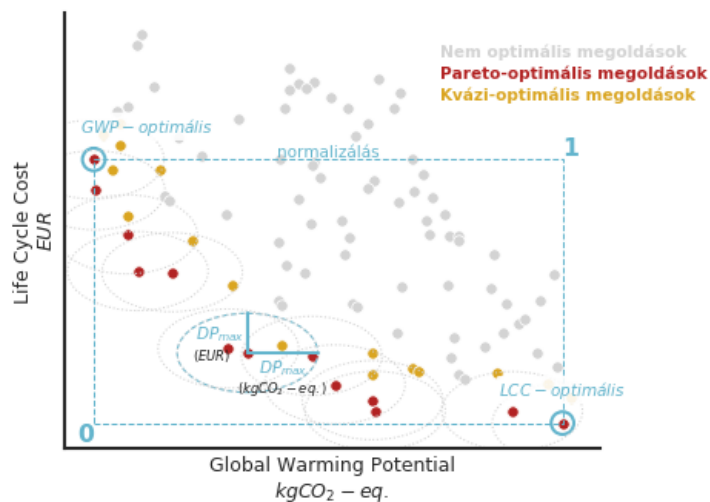
II. Tézis

a tervezés optimalizálást segítő több célfüggvény szerinti optimalizálás eredményein alapuló új mérőszámok definiálásáról

Áttekintettem a több célfüggvény szerinti optimalizálás eredményeinek elemzésével foglalkozó szakirodalmat. A Pareto-optimális megoldások nagy száma a tervezési folyamatban résztvevőknek megnehezíti a megfelelő következtetések levonását anélkül, hogy kifejezetten megfogalmaznák a célváltozókkal szembeni preferenciáikat. Az optimalizálás eredményeinek tervezési döntéstámogatásban való felhasználhatóságának érdekében új mérőszámokat definiáltam egy két célváltozós probléma teljes Pareto-optimális megoldásainak elemzésére. A mérőszámok segítik az optimális tervezési paraméterek mérnöki szemszögből történő megértését a célváltozók közötti fontossági sorrend felállítása nélkül.

II.1 Pareto fronttól mért távolság

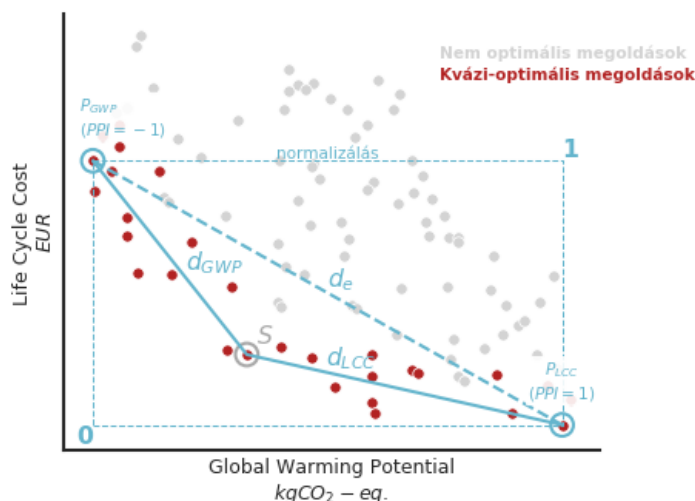
Bevezettem a *Pareto-fronttól mért távolság (DP)* mérőszámát a célfüggvény-térben értelmezve a kvázi-optimális megoldások meghatározásához (4. ábra). DP_{max} segítségével meghatároztam minden optimalizálási esetben a kvázi-optimális megoldásokat. A közel-optimális megoldások elemzésében történő felhasználása egyaránt növeli a tervezés rugalmasságát és az optimalizált megoldások megbízhatóságát anélkül, hogy a célváltozók értékeiben a potenciális javulás értékét jelentősen csökkenteni kellene.



4. ábra – A kvázi-optimális megoldások meghatározása a Pareto-fronttól mért távolság (DP_{max}) segítségével.

DP_{max} értékét az egyes esetekben külön-külön úgy választottam meg, hogy a Pareto-optimális (nemdominált) megoldások teljes GWP és LCC értékének hozzávetőlegesen 1%-át tegye ki.

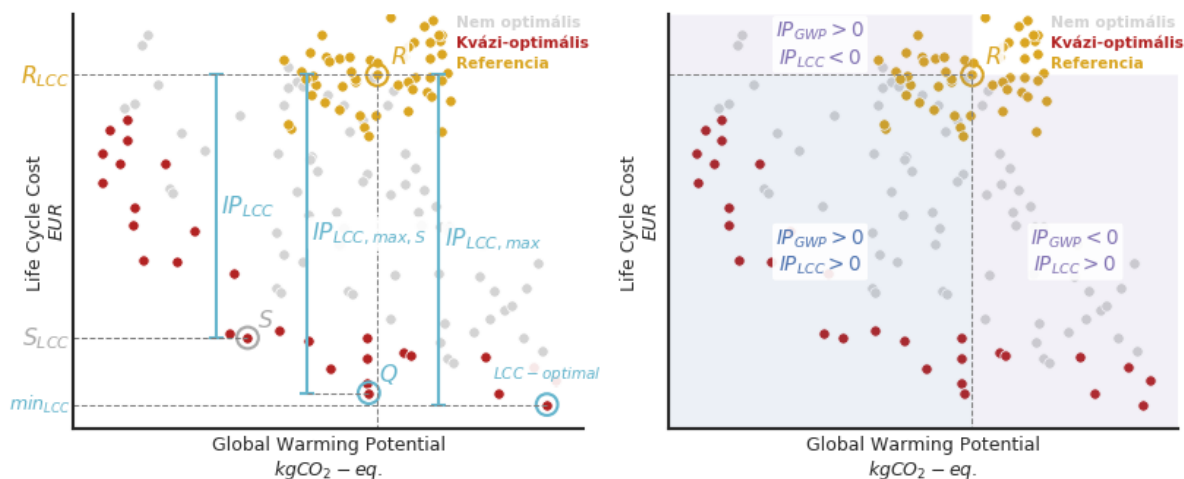
II.2. Pareto pozíciós index, javulási potenciál és Pareto-kiterjedtség indikátor



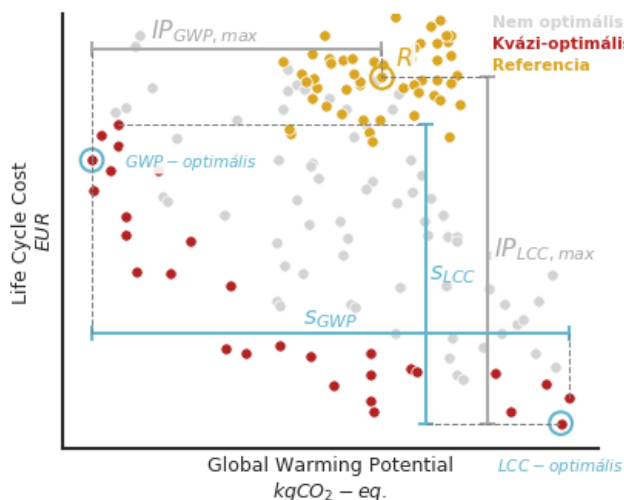
5. ábra – A Pareto pozíciós index számítása a célfüggvény térben egy adott pont (S) esetén: $PPI(S) = \frac{d_{GWP} - d_{LCC}}{d_e}$.

Bevezettem három további mérőszámot a kvázi-optimális megoldások teljes sorának jellemzésére és összehasonlítására: a *Pareto pozíciós index (PPI)* a célfüggvények súlyát fejezi ki az egyes megoldások esetén (5. ábra); a *javulási potenciál (IP)* azt mutatja meg, hogy az egyes megoldások milyen mértékű javulást eredményeznek egy referenciaponthoz képest

az optimalizálás eredményeképpen; a *szigorú javulási potenciál* ($IP_{max,S}$) az egyes célfüggvények szerinti javulási potenciál maximális értékét fejezi ki azzal a feltétellel, hogy a másik célfüggvény értéke nem lehet rosszabb, mint a referenciapont (6. ábra); végül a Pareto-kiterjedtség indikátor (PSI) a célfüggvények közötti ellentmondásosságot fejezi ki egy adott sereg kvázi-optimális megoldás esetén (7. ábra). IP_{max} , IP_{min} , $IP_{max,S}$ és PSI értékek segítségével össze tudtam hasonlítani az egyes többcélváltozós optimalizálási eseteket, és jellemezni tudtam őket a különböző feltételezések függvényében.



6. ábra – A javulási potenciál (IP) illusztrációja LCC esetén (bal), és az IP különböző előjelekkel jellemezhető régiói (jobb).



7. ábra – A Pareto-kiterjedtség indikátor számítása az egyes célfüggvények (o) esetén: $PSI_o(s) = \frac{S_o}{IP_{o,max}}$

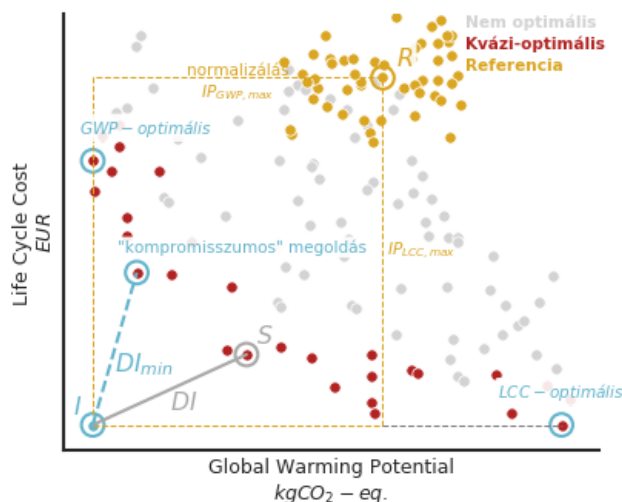
II.3. Ideális ponttól mért távolság

Bevezettem az *ideális ponttól mért távolság* (DI) normalizált értékét annak kifejezésére, hogy az egyes megoldások milyen közel helyezkednek el ahhoz a ponthoz, amit az egy célfüggvény szerinti optimális (szélső) megoldások koordinátáinak kombinációjával kaphatunk. DI normalizálásához IP_{max} értékét használva DI_{min} segítségével meghatároztam minden optimalizálási esethez a „kompromisszumos” megoldást (8. ábra).

Ennek a módszernek az előnye más a szakirodalomban előforduló kiválasztási metódusokkal szemben az, hogy a célfüggvények mértékegysége nem kell, hogy kompatibilis (összemérhető)

legyen, ugyanakkor a javulási potenciált mindkét célváltozó esetében azonos súllyal vesszük figyelembe.

A tézist alátámasztó publikációk: [P7]



8. ábra – A "kompromisszumos" megoldás meghatározása DI_{min} segítségével

III. Tézis

a tervezési változók és az optimalizálás célváltozóinak vizsgálatáról

A parametrikus épületmodell tervezési változóinak igazolására részletesebben elemeztem a falhőszigeteléshez kiválasztott anyagokat, valamint a többi változóval egyetemben azok önálló hatását a célfüggvény-értékekre és a célfüggvények ellentmondásosságát is.

III.1 Hőszigetelő anyagok egységnyi környezeti hatás és költség értéke

Bevezettem az egységnyi környezeti hatás és költség értékek fogalmát a hőszigetelő anyagokra vonatkoztatva. A mérőszám a különböző hőszigetelő anyagok gyors előzetes összehasonlítását teszi lehetővé a környezeti- és a költségtulajdonságokat is figyelembe véve a legfontosabb termofizikai jellemzőkön túl.

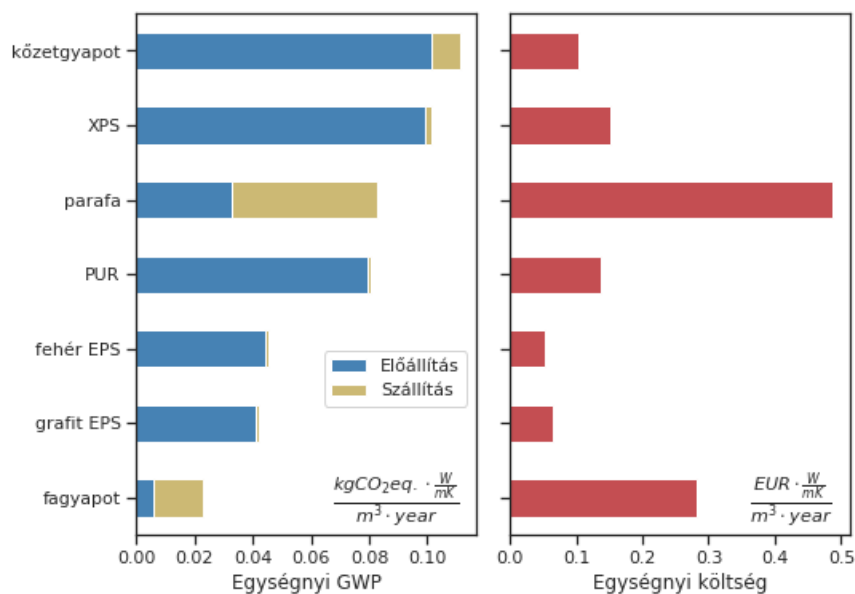
A mérőszámot a következő egyenletek segítségével lehet számítani:

$$\hat{I}_m = \frac{I_m \cdot \rho_m \cdot \lambda_m}{t_m}$$

$$\hat{C}_m = \frac{C_m \cdot \lambda_m}{t_m}$$

ahol \hat{I}_m az m anyag egységnyi környezeti hatása $\left[\frac{\text{kgCO}_2 \text{eq} \cdot \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{\text{m}^3 \cdot \text{év}} \right]$ -ben kifejezve GWP esetén, \hat{C}_m az m anyag egységnyi költségértéke $\left[\frac{\text{EUR} \cdot \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{\text{m}^3 \cdot \text{év}} \right]$ -ben kifejezve, I_m az m anyag környezeti hatása $\left[\frac{\text{kgCO}_2 \text{eq}}{\text{kg}} \right]$ -ban kifejezve az életciklus-adatbázis szerint, C_m az m anyag költsége $\left[\frac{\text{EUR}}{\text{m}^3} \right]$ -ben kifejezve a költség-adatbázis szerint, ρ_m az m anyag sűrűsége $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ -ban, λ_m az m anyag hővezetési tényezője $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$ -ben, és t_m az m anyag elvárt élettartama évben kifejezve,

Az egységnyi GWP és költségértékek hazai feltételeknek megfelelő kiszámításával hét, hőszigetelő rendszerű vakolatban alkalmazható hőszigetelő anyagot hasonlítottam össze. Megállapítottam, hogy a fehér és grafit EPS hőszigetelő anyagok a kőzetgyapot, XPS, parafa és PUR anyagoknál jobban teljesítenek mind egységnyi GWP és egységnyi költség tekintetében. Egységnyi GWP érték szempontjából a fagyapot bizonyult a legjobbnak, míg egységnyi költség szempontjából a fehér EPS (9. ábra).



9. ábra – Hőszigetelő rendszerű vakolatban alkalmazható hőszigetelő anyagok egységnyi GWP és költség értékei

Ezeket az eredményeket a hazai viszonyokra vonatkozó optimalizálási esetekben tapasztaltak is alátámasztják. A hét hőszigetelő anyag közül csak a fehér és grafit EPS valamint a fagyapot volt megtalálható a kvázi-optimális megoldások paraméterértékei között.

III.2 Az optimalizálás változóinak függőségei

Az optimalizálás változóinak teljes kombinációját felölelő Monte-Carlo szimuláció segítségével létrehoztam egy 20 000 megoldást tartalmazó halmazt a teljes keresési tér lefedésére. A megoldások minden változó minden lehetséges értékére történő szűrése mellett összehasonlítottam a szűrt megoldáshalmaz célfüggvény-értékeinek átlagát a teljes megoldáshalmaz átlagához képest. Megállapítottam, hogy egyik változó sem képes önállóan nagy eltérést okozni a célfüggvény-értékekben, tehát mindegyik változót együttesen kell optimalizálni.

III.3 Az épületek környezeti optimalizálásának ellentmondásos célfüggvényei

A Monte-Carlo szimuláció során kiszámítottam az EN 15978 szabvány [73] által megjelölt hét legfontosabb környezeti hatásindikátor értékét az esettanulmány-épületre vonatkozóan. A teljes megoldássereg tartománya, mint referencia mellett, a nemdominált megoldáshalmaz PSI értékeit kiszámítva kettesével összehasonlítottam az indikátorokat egymással. Ellentmondásos indikátorok magas PSI értékkel kell, hogy rendelkezzenek mindkét célfüggvény tekintetében a kétváltozós összehasonlítás során.

Megmutattam, hogy semelyik környezeti hatásindikátor nem áll komoly ellentmondásban egymással a hazai épületállomány jellemző társasházi épülete esetén. Továbbá magas pozitív korrelációt állapítottam meg a GWP, CED és ODP valamint az AP és EP indikátorok között.

A PSI értékeket a további kutatásban használt célváltozókra kiszámítva megállapítottam, hogy a GWP és az LCC valóban ellentmondásosak a megjelölt optimalizálási esetekben.

A PSI értékek ADP és ODP összehasonlítása során 29% és 11%-ra, ADP és GWP összehasonlítása során 29% és 6%-ra, illetve ADP és CED összehasonlítása során 26% és 6%-ra adódtak. A kutatásban használt célváltozók esetén (GWP-LCC) a PSI értékei 28% és 44%.

A tézist alátámasztó publikáció: [P4]

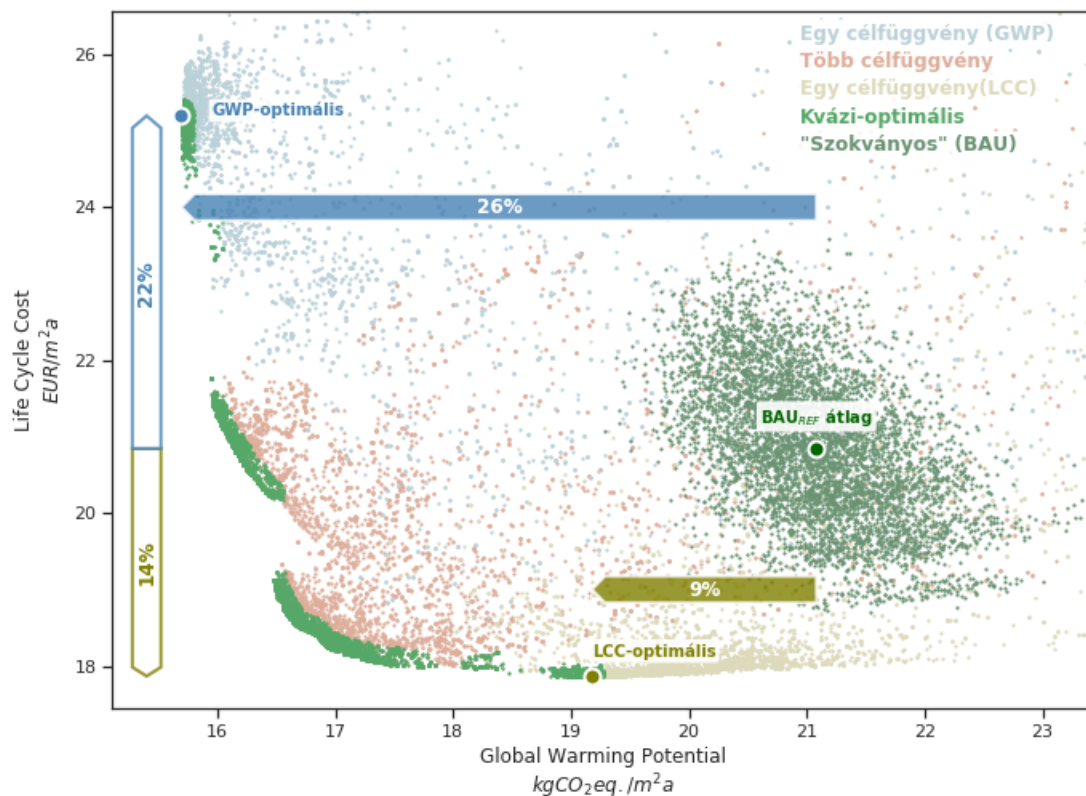
IV. Tézis

a hazai épületállomány egy jellemző társasházi épületének optimalizálásáról

Az NSGA-II több célváltozós optimalizálási algoritmus [84] alkalmazásával optimalizáltam az esettanulmány épület parametrikus modelljét. Ezen kívül a tervezési paraméterek „szokványos” (BAU) értékeknek megfelelő korlátaival, Monte-Carlo szimuláció segítségével előállítottam a mai gyakorlatnak megfelelő megoldások halmazát, melyek referenciaként szolgálnak az összehasonlításban.

IV.1 Javulási potenciál

A BAU megoldások átlagát az optimalizált megoldásokkal összehasonlítva megállapítottam, hogy az esettanulmány-épület GWP értéke minimum 9%-kal (LCC-optimális megoldás) és maximum 26%-kal (GWP-optimális megoldás) csökkenthető. LCC értékben maximum 14% javulás érhető el (LCC-optimális megoldás), azonban a GWP-optimális megoldás 22%-kal magasabb LCC értékkel rendelkezik, mint a BAU átlaga. A javulási potenciál maximuma 5.39 kgCO₂-eq./m²a-nek felel meg GWP esetén, míg 2.98 EUR/m²a-nek LCC esetén (10. ábra).



10. ábra – A Referencia eset optimalizálásának eredményei a célfüggvény-térben.

IV.2 Optimális tervezési paraméterek

Az optimalizálás változóit *szinergia*, *ellentmondásos* és *neutrális* kategóriákba osztályoztam a kvázi-optimális megoldások között mutatkozó ellentmondásosságuk alapján. A *szinergia* változók hasonló értékeket vesznek föl a kvázi-optimális megoldások között mindenhol, az *ellentmondásos* változók pedig a célváltozók közti preferencia függvényében vesznek fel jellemző értékeket. *Neutrális* változók bármilyen értéket felvehetnek a kvázi-optimális megoldások között függetlenül a célváltozók közti preferenciától. Bevezettem továbbá a *megkülönböztető* változó fogalmát azokra a változókra vonatkozóan, amik a vizuálisan legjobban elhatárolható csoportosulásokért felelnek a célfüggvényterben.

Az osztályozást a kvázi-optimális megoldásokra alkalmazva megmutattam, hogy az északi, keleti és nyugati homlokzatokon az ablakarány, valamint a déli homlokzaton az üvegezés típusa *szinergia* változók. Az északi, keleti és nyugati oldalon az ablakhoz köthető változók mind *neutrálisak*, míg a déli oldalon az ablakkeret típusa, az ablakarány és az árnyékolás, valamint a hőszigetelés anyaga és vastagsága is *ellentmondásos* változó a referenciaeset optimalizálása során. A kvázi-optimális megoldásokat a *megkülönböztető* változók (üvegezés típusa a déli homlokzaton, árnyékolás, keret típusa és fal hőszigetelő anyaga) segítségével csoportosítottam, majd mindegyik csoport tervezési paramétereinek jellemző értékeit elemeztem.

Megmutattam, hogy GWP-optimális esetben a hőszigetelés mértéke extrém értéket vesz fel ($U_{lapostető} = 0.06 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{fal} = 0.06 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $U_{padló} = 0.10 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$), a déli oldalon nagyméretű ($75 \pm 3 \%$), árnyékolt ablakok és alacsony környezeti hatással rendelkező anyagok (fa ablakkeret és fagyapot hőszigetelés) használata célszerű. Ugyanakkor LCC-optimális esetben az épületen EPS anyagú hőszigetelést érdemes alkalmazni $U_{fal} = 0.17 \pm 0.02 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{lapostető} = 0.19 \pm 0.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékeknek megfelelően és minimális vastagsággal a talajon fekvő padlóban ($U_{padló} = 0.79 \pm 0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$). Továbbá kisméretű ($23 \pm 3 \%$ ablakarány), árnyékolatlan, műanyag keretű és két rétegű üvegezéssel ellátott ablakok használata célszerű a déli homlokzaton. Ezek az értékek a hazai szabályozás követelményértékeihez közel állnak.

IV.3. Beépített környezeti hatások

Míg az üzemeltetéshez köthető GWP az épületenergetikai szabályozásokon keresztül korlátozva van, addig az épületek „beépített” GWP-je semmilyen módon nincs számításba véve a jelenlegi szabályozási környezetben. Az optimalizált épületparaméterek mellett a „beépített” GWP aránya figyelemreméltó, 60% GWP-optimális esetben és még az LCC-optimális megoldás esetében is 42%-ot tesz ki. Ugyanakkor az üzemeltetési költségek csupán 3-8%-ban járulnak hozzá a teljes életciklus költséghez, míg a beruházási költség akár 80-83%-ot is elérheti az optimalizált megoldások esetén.

A kvázi-optimális megoldások vizsgálatával megmutattam, hogy az LCC-optimális megoldás energetikai teljesítményének növelésével, optimális épületparaméterek mellett a „beépített” GWP aránya 42%-ról 60%-ra is növekedhet a teljes életciklusra vonatkozó GWP-ben. Ugyanakkor a magas beépített GWP arány ellenére a magasabb energetikai teljesítmény továbbra is előnyös a környezeti hatások tekintetében, és akár 16% többletjavulás is elérhető a GWP-t illetően az LCC-optimális megoldáshoz képest.

A tézist alátámasztó publikációk: [P4, P5]

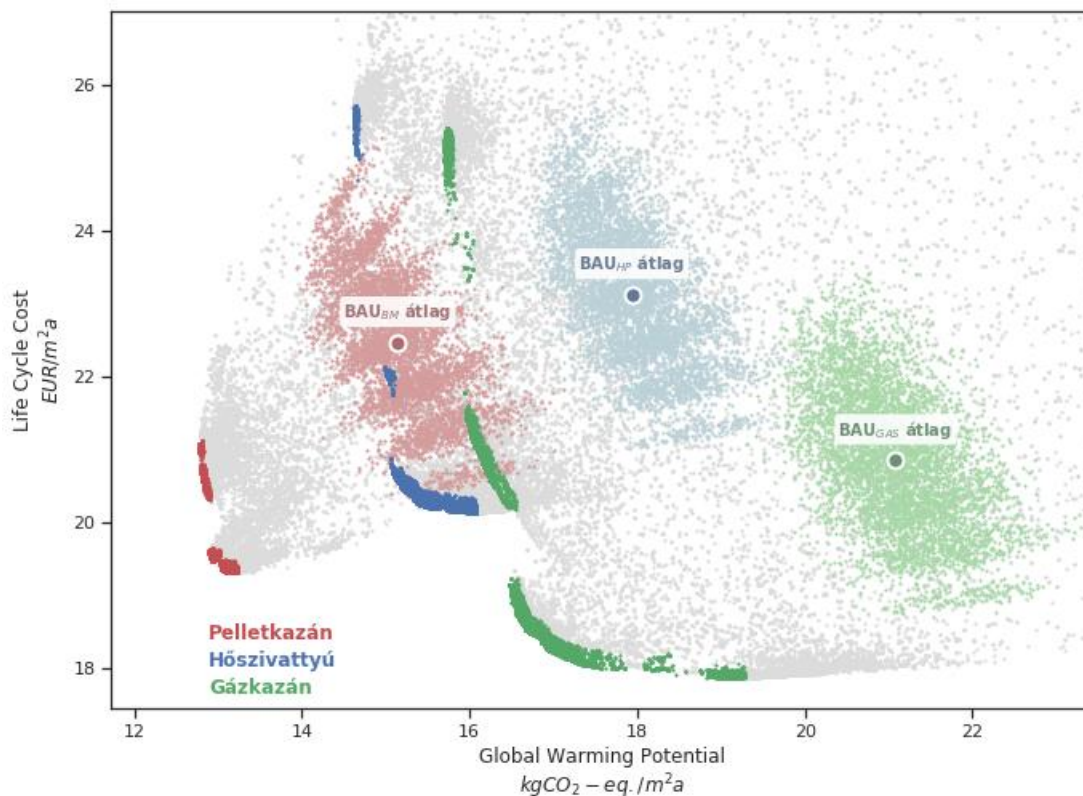
V. Tézis

a fűtési energiahordozó optimális tervezési paraméterekre gyakorolt hatásáról

Annak érdekében, hogy megállapíthassam mekkora a fűtési energiahordozó kiválasztásának hatása az optimális épületparaméterekre és a javulási potenciálra, az optimalizálási eljárást három esetben is elvégeztem különböző fűtési rendszereket feltételezve: gázkazánnal, pelletkazánnal és levegő-víz hőszivattyúval.

V.1 Optimumok különböző fűtési rendszerek alkalmazásával

Megmutattam, hogy a pelletkazános eset mindkét másik esetnél jobb eredményeket mutat GWP tekintetében, átlagosan 15%-kal alacsonyabb érték érhető el a hőszivattyús esethez képest és 22%-kal alacsonyabb a gázkazános esethez képest. LCC tekintetében a pelletkazános eset átlagosan 7%-kal jobb, mint a hőszivattyús és közel megegyezik a gázkazános esettel (11. ábra). Megmutattam továbbá, hogy pelletkazán esetén a GWP és az LCC sokkal kevésbé ellentmondásos célváltozók optimális épületparaméterek mellett.



11. ábra – A három gépészeti megoldásnak megfelelő eset optimalizálásának eredményei a célfüggvény-térben. A kvázi-optimális megoldások élénk színnel, míg a BAU esetek halvány színnel vannak jelölve. A BAU esetek átlaga szolgál referenciaként mindhárom esetben külön-külön.

Az ellentmondásosságot PSI értékekkel számszerűsítettem. Hőszivattyús ($PSI_{GWP} = 0.67$, $PSI_{LCC} = 2.53$) és gázkazános ($PSI_{GWP} = 0.44$, $PSI_{LCC} = 1.87$) esetben a GWP és LCC közti ellentmondás nagyobb, míg pelletkazán esetén jóval kisebb a másik kettőnél ($PSI_{GWP} = 0.19$, $PSI_{LCC} = 0.57$).

V.2 Optimalizált megoldások a jogszabályok szemszögéből

Az optimalizált megoldások épületburokra vonatkozó hőátbocsátási tényezőinek (U érték) összehasonlításával megmutattam, hogy a hőszigetelés optimális mértéke függ a fűtési rendszer típusától. Ugyanakkor a hazai energetika szabályozás szerint az U-értékek követelményértéke a fűtési rendszertől függetlenül kerül meghatározásra. Továbbá megmutattam, hogy az épületburok energetikai teljesítményének extrém szintre történő növelése helyett megfelelőbb döntést jelent a fűtési rendszer gázkazánról pelletkazánra történő váltása, amennyiben az optimalizálás során a GWP-t is figyelembe szeretnénk venni.

A költségoptimumhoz tartozó U-értékek a gázkazán és hőszivattyú esetén magasabbak ($0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ a külső falon és $0.20 - 0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$ a lapostetőn), míg pelletkazán esetén alacsonyabbak ($0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ a külső falon $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ a lapostetőn). GWP-optimális U-értékek $0.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gázkazán) és $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$ (pelletkazán) között adódtak a külső falon, és $0.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gázkazán) és $0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$ (pelletkazán) között adódtak a lapostetőn. Az U-érték jelenlegi követelményértékei $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ a külső falra és $0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$ a lapostetőre.

A tézist alátámasztó publikáció: [P4]

VI. Tézis

az elektromos áram dekarbonizációjának optimális épületparaméterekre gyakorolt hatásáról

A South East Europe Electricity Roadmap (SEERMAP) project [87] során kifejlesztett European Electricity Market Model (EEMM) „Decarbon” scenáriójának segítségével három további optimalizálási esetet is létrehoztam, melyekben hőszivattyús fűtést feltételeztem. Ezek segítségével megvizsgáltam az elektromos áram mix jövőbeli dekarbonizációjának optimális épületparaméterekre gyakorolt hatását. Habár a villamos energiatermelés dekarbonizációja az üzemeltetéshez köthető és a beépített hatásokat is csökkenti, a vizsgálatban csak az üzemeltetésben történő változásokat vettem figyelembe, mivel a beépített hatások az életciklus kezdeti fázisában érvényesülnek, amikor a dekarbonizáció hatása még elhanyagolható.

VI.1

Megmutattam, hogy az elektromos áram mix dekarbonizációja kulcsfontosságú az optimális épületparaméterek és az épületek életciklusra vonatkozó kibocsátásai tekintetében is. Az EEMM alapján dinamikus (2050-ig folyamatos fejlődést feltételező) elektromos áram-mix segítségével megmutattam, hogy a statikus mixhez képest 25 – 26% GWP csökkenés is elérhető az optimális megoldások átlagára nézve.

Amíg a GWP-t illetően a különbség abszolútértékben jelentős, a javulási potenciál dinamikus mix alkalmazása mellett alacsonyabb, 10% ($1.2 \text{ kgCO}_2\text{-eq./m}^2\text{a}$) a statikus mixszel elérhető 18%-hoz ($3.3 \text{ kgCO}_2\text{-eq./m}^2\text{a}$) képest. LCC tekintetében a legkisebb javulás immár pozitív értéket (5 – 6%) vesz föl dinamikus mix esetén a statikus mix használata mellett tapasztalt negatív (-11 – -14%) értékekkel ellentétben.

VI.2

Megállapítottam, hogy az elektromos áram mix dekarbonizációja mellett a GWP és az LCC sokkal kevésbé ellentmondásosak, mint anélkül. Megmutattam, hogy dinamikus áram mix esetén meghatározható egy optimális energetikai teljesítményszint ($U_{\text{lapostető}} = 0.19 \pm 0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{fal}} = 0.18 \pm 0.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $23 \pm 4\%$ ablakarány a déli homlokzaton

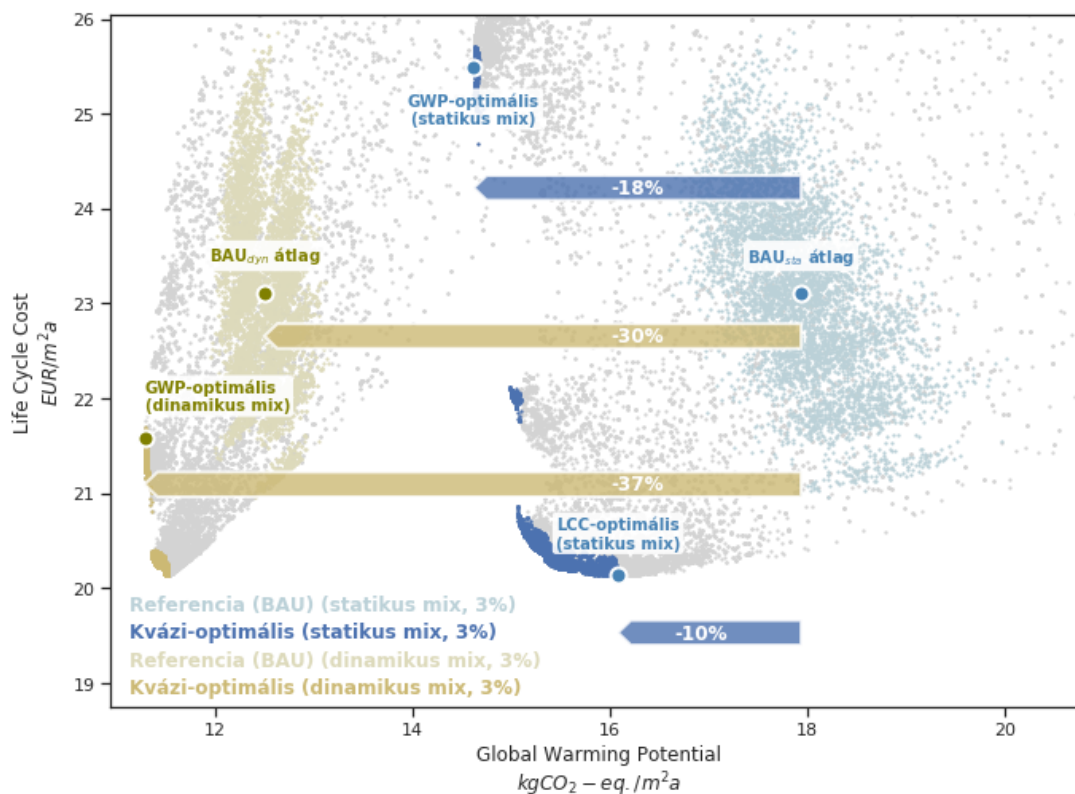
kétrétegű üvegezéssel és árnyékolás nélkül) az esettanulmány-épület vonatkozásában a GWP és LCC közti preferenciától függetlenül.

A GWP és az LCC közti preferencia csupán az anyaghasználatban tükröződik, vagyis drágább, de kisebb környezetre gyakorolt hatással rendelkező anyagok alkalmazandóak a GWP súlyának növekedésével.

VI.3

Kimutattam, hogy az elektromos áram mix dekarbonizációja 30% átlagos javulást eredményez GWP tekintetében az épületparaméterek optimalizálása nélkül is, ami magasabb annál a 18%-nál, amit az optimalizálással egyedül el lehet érni. A dekarbonizált szcenárió esetén az optimalizálás eredményeképpen további 7% javulást lehet elérni a statikus mixszel és hőszivattyúval számított BAU esetek átlagához képest (12. ábra).

A tézist alátámasztó publikációk: [P6, P7]



12. ábra – A javulási potenciál mértéke GWP tekintetében, melyet az optimalizálással, az elektromos áram-mix dekarbonizációjával, illetve a kettő kombinációjával el lehet érni.

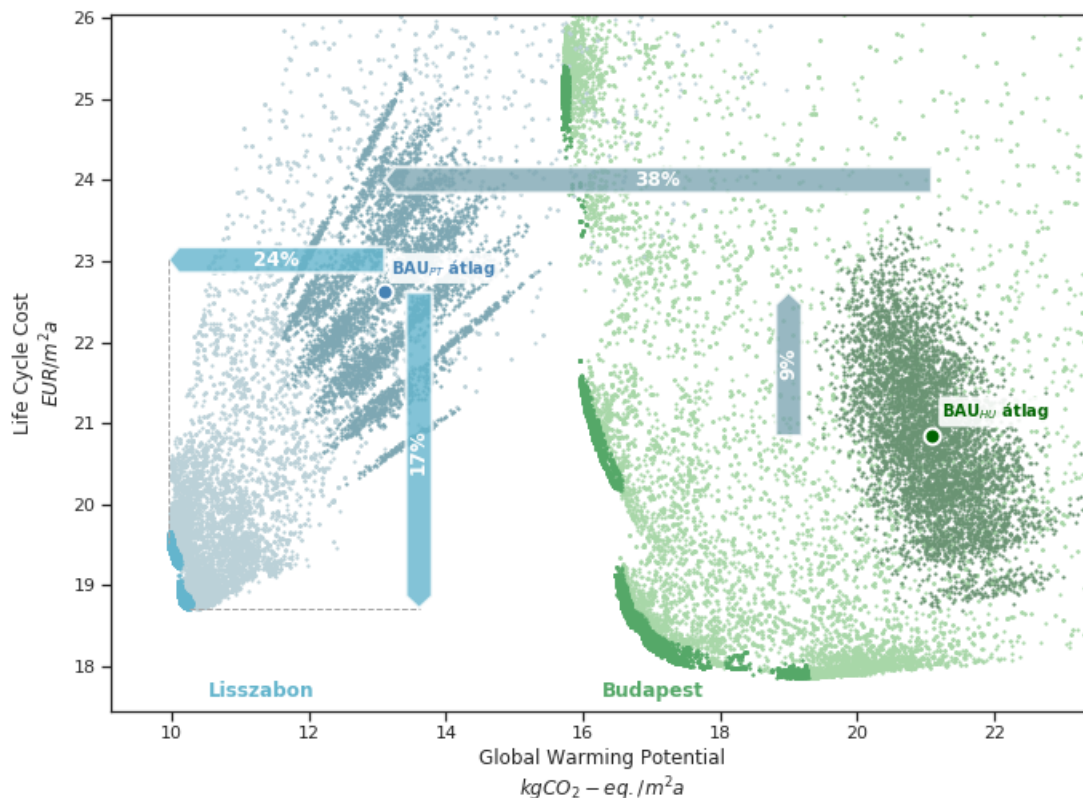
VII. Tézis

az éghajlati és gazdasági környezet optimális épületparaméterekre gyakorolt hatásáról

Portugália jó példa egy olyan gazdaságra, ahol az energia- és munkadíjak magasabbak, míg a fűtési energiaigény alacsonyabb, mint Magyarországon. Ezért létrehoztam egy, a portugál éghajlati és gazdasági viszonyoknak megfelelő optimalizálási esetet a környezeti hatásokra és a költségekre vonatkozó háttéradatok módosításával, az időjárásadatokat lisszaboni viszonyoknak megfelelőre cserélésével és a portugál épületenergetikai szabályozásnak és a helyi gyakorlatnak megfelelő BAU paraméterek meghatározásával.

VII.1

Megmutattam, hogy Portugáliában a „szokványos” esetben az esettanulmányépület életciklusra vonatkozó GWP értéke átlagosan 37,8%-kal alacsonyabb, míg az LCC értéke 8,5%-kal magasabb Magyarországhoz képest. Optimalizálás segítségével a GWP értékét akár 24%-kal, az LCC értékét pedig 17%-kal csökkenteni lehet. Továbbá egy „kompromisszumos” megoldás esetén 23% és 17% javulás is elérhető GWP és LCC tekintetében egyidejűleg a portugál viszonyok esetén (13. ábra).



13. ábra – Az optimalizálás eredménye és a BAU esetek a magyar és a portugál kontextusban, valamint a BAU esetek összehasonlítása és a legnagyobb javulási potenciál a portugál esetben.

Az optimalizált esetek sokkal kisebb területen helyezkednek el a célfüggvényterben a portugál esetben. A kiterjedtséget a PSI értékekkel kifejezve megmutattam, hogy a célváltozók közti ellentmondás sokkal jelentősebb a magyarországi esetben ($PSI_{GWP} = 0.67$, $PSI_{LCC} = 2.53$), mint a portugálban ($PSI_{GWP} = 0.11$, $PSI_{LCC} = 0.24$).

VII.2

Megállapítottam, hogy a legtöbb tervezési paraméter *szinergia* kategóriába sorolható és a hőszigetelés mértéke $U_{lapostető} = 0.26 \pm 0.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $U_{fal} = 0.33 \pm 0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$ mellett, míg az ablakarány $22 \pm 2\%$ mellett optimálisnak mondható Lisszabonban a célváltozók közti preferenciától függetlenül. Az optimalizálás megmutatta továbbá, hogy a talajon fekvő padló szerkezetébe hőszigetelés nem szükséges, és az ablakok árnyékolása sem, amennyiben az optimális ablakarányt alkalmazzuk.

VII.3

Megmutattam, hogy az optimalizált megoldások üzemeltetéshez köthető GWP aránya a „beépített” GWP-hez képest jóval kisebb (19%) a portugál esetben, mint a magyarban (40-58%). Végül megmutattam, hogy míg Portugáliában az optimalizált esetekben a világítás energiaigénye adja a nettó energiaigény legnagyobb részét (54-66%), addig Magyarországon a fűtés járul hozzá a legtöbbet (58-79%-kal).

Ez az eredmény – az üzemeltetési költségek optimalizált esetben csupán 4%-os részarányával egyidejűleg – magyarázatot ad arra, hogy miért ennyivel kisebb az LCC és GWP közti ellentmondás Portugáliában, mint Magyarországon. A portugál esetben az üzemeltetési energiában történő megtakarítás sokkal kisebb hatással van az életciklus környezeti hatásokra és a költségekre is.

A tézist alátámasztó publikáció: [P8, P9]

7. Összegzés, további kutatási irányok

Jelen tézisfüzetben összefoglalt PhD kutatásommal átfogó képet nyújtottam arról, hogy a több célváltozós optimalizálás hogyan képes támogatni az alacsony környezeti hatással rendelkező és észszerű költségek mellett megvalósítható épületek tervezését. A szakirodalomban fellelhető kutatási eredményekre építve olyan új kérdésekre tudtam választ adni, melyekkel érdemben hozzájárultam a szakterület fejlődéséhez.

Kifejlesztettem egy parametrikus épületmodellen, illetve részletes energia-, LCA és LCC számításra alapuló optimalizációs keretrendszert. Bevezettem egy átfogó módszertant a több-célváltozós optimalizálás eredményeinek értékelésére, ideértve új mérőszámok definiálását is, melyek az ilyen jellegű mérnöki problémák megértését segítik. Egy társasházi esettanulmány-épület optimalizálásán keresztül megmutattam hogyan támogatják az eredményeim a tervezési döntéshozatalt és azt is, hogy mennyivel lehetséges az adott épület ÜHG kibocsátását és globális költségét csökkenteni. Végül különböző módszertani feltételek, úgymint a fűtési rendszer típusa, a villamos energiatermelés dekarbonizációja, vagy a különböző klíma- és gazdasági viszonyok optimális épületekre gyakorolt hatását is megvizsgáltam.

A kutatásom eredményei a környezetre gyakorolt hatások épületek tervezése során történő figyelembevételét kétféleképpen is segíteni tudja. Egyrészt az optimalizálási eljárás könnyen alkalmazható más épületekre is, különösen a korai tervezési fázisokban, amikor az épület fő paraméterei még nem véglegesek. Másrészt a paraméterek optimalizált értékei iránymutatást adhatnak a nemzeti épületenergetikai szabályozás követelményértékeinek fejlesztéséhez.

A kutatás további irányai közül kettőt szeretnék külön kiemelni. Az optimalizálást más épülettípusokon is érdemes lenne elvégezni, ideértve a lakó-, ipari és középületeket is. Egy adott tipológia szerinti, jellemző épülettípusok optimalizálásával akár egy egész épületállomány környezeti hatását, illetve az abban történő potenciális javulást is számszerűsíteni lehet. Továbbá érdemes lenne az épületekbe integrált (megújuló) energiatermelő rendszerek lehetőségével kiegészíteni az optimalizálást, amivel további lehetőségek tárulnának fel a kis környezeti hatással rendelkező épületek tervezésére.

8. Hivatkozások

8.1 A téziseket alátámasztó saját publikációk

- [P1] B. Kiss, Z. Szalay, The applicability of different energy performance calculation methods for building life cycle environmental optimization, *INTERNATIONAL REVIEW OF APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING* 9 (2018) 115–121. doi:10.1556/1848.2018.9.2.6.
- [P2] B. Kiss, M. Röck, A. Passer, Z. Szalay, A cross-platform modular framework for building Life Cycle Assessment, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. doi:10.1088/1755-1315/323/1/012103.
- [P3] A. Hollberg, B. Kiss, M. Röck, B. Soust-Verdaguer, A.H. Wiberg, S. Lasvaux, A. Galimshina, G. Habert, Review of visualising LCA results in the design process of buildings, *BUILDING AND ENVIRONMENT* 190 (2021) 107530. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530. (IF = 6.456)
- [P4] B. Kiss, Z. Szalay, Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings, *AUTOMATION IN CONSTRUCTION* 111 (2020). doi:10.1016/j.autcon.2019.103044. (IF = 7.700)
- [P5] Z. Szalay, B. Kiss, Modular Methodology for Building Life Cycle Assessment for a Building Stock Model, in: R. Caspeele, L. Taerwe, D.M. Frangopol (Eds.), *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*, CRC Press, London, 2019: pp. 855–861.
- [P6] B. Kiss, E. Kácsor, Z. Szalay, Environmental assessment of future electricity mix – Linking an hourly economic model with LCA, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 264 (2020). doi:10.1016/j.jclepro.2020.121536. (IF = 9.297)
- [P7] B. Kiss, Z. Szalay, Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization - a life cycle based multi-objective optimization approach, *The International Journal of Life Cycle Assessment* (2021). (IF = 4.141) – *under review*
- [P8] B. Kiss, J.D. Silvestre, J.F.A. Madeira, R.A. Santos, Z. Szalay, Environmental and economic optimisation of buildings for different climates, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 588 (2020) 32033. doi:10.1088/1755-1315/588/3/032033.
- [P9] B. Kiss, J.D. Silvestre, R. Andrade Santos, Z. Szalay, Environmental and Economic Optimisation of Buildings in Portugal and Hungary, *SUSTAINABILITY*. 13 (2021). doi:10.3390/su132413531. (IF = 3.251)

8.2 Egyéb idézett saját publikációk

- [P10] B. Kiss, Z. Szalay, A Visual Method for Detailed Analysis of Building Life Cycle Assessment Results, *APPLIED MECHANICS AND MATERIALS* 887 (2019) 319–326. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.887.319.
- [P11] B. Kiss, Z. Szalay, The Impact of Decisions Made in Various Architectural Design Stages on Life Cycle Assessment Results, *APPLIED MECHANICS AND MATERIALS* 861 (2016) 593–600. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.861.593.
- [P12] B. Kiss, Z. Szalay, E. Kácsor, Environmental Impacts of Future Electricity Production in Hungary with Reflect on Building Operational Energy Use, in: R. Caspeele, L. Taerwe, D.M. Frangopol (Eds.), *Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*, CRC Press, London, 2019: pp. 847–853.
- [P13] F. Montana, S. Longo, H. Birgisdottir, M. Cellura, R. Frischknecht, F. Guarino, B. Kiss, B. Peuportier, T. Recht, E. Riva Sanseverino, Z. Szalay, Multicriteria-Oriented Optimization of Building Energy Performances: The Annex 72 IEA-EBC Experience, in: J. Ren (Ed.), *Energy Systems Evaluation (Volume 2)*, Springer International Publishing, Cham, 2021: pp. 239–260.

8.3 Egyéb források

- [1] International Energy Agency, Global Status Report for Buildings and Construction 2019, Paris, 2019. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
- [2] BPIE, Europe's buildings under the microscope, Buildings Performance Institute Europe, 2011. http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf.
- [3] P. Hawken, Foreword, in: Mendler, S. F., Odell, W., Lazarus, M. A., (2005). HOK Guideb. to Sustain. Des., 2nd ed., Wiley, 2005.
- [4] N. Sajn, Energy efficiency of buildings: A nearly zero-energy future?, Eur. Parliam. Res. Serv. (2016) 10. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/582022/EPRS_BRI\(2016\)582022_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/582022/EPRS_BRI(2016)582022_EN.pdf) (accessed September 23, 2019).
- [5] EPBD, Directive 2002/65/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, Off. J. Eur. Communities. (2002) 65–71. doi:10.5040/9781782258674.0021.
- [6] EPBD, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Off. J. Eur. Union. 53 (2010) 13–35. doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
- [7] M. Röck, M. Ruschi Mendes Saade, M. Balouktsi, F. Nygaard, H. Birgisdottir, R. Frischknecht, G. Habert, T. Lützkendorf, Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation, Appl. Energy. (2019) 114107. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114107.
- [8] 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. doi:10.1016/j.buildenv.2017.12.032.
- [9] 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. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.026.
- [10] O. Lucon, D. Üрге-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, M.V. Vilariño, IPCC 5th Assessment Report, Working Group III Chapter 9 Buildings, Clim. Chang. 2014 Mitigation Clim. Chang. Contrib. Work. Gr. III to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang. (2014) 1–68. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf (accessed October 18, 2019).
- [11] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, M. Mistretta, Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits, Renew. Sustain. Energy Rev. 27 (2013) 283–293. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.040.
- [12] Z. Szalay, A. Zöld, What is missing from the concept of the new European Building Directive?, Build. Environ. 42 (2007) 1761–1769. doi:10.1016/j.buildenv.2005.12.003.
- [13] A. Hollberg, J. Ruth, LCA in architectural design—a parametric approach, Int. J. Life Cycle Assess. 21 (2016) 943–960. doi:10.1007/s11367-016-1065-1.
- [14] 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. doi:10.1016/j.rser.2015.04.062.
- [15] M. Bahramian, K. Yetilmezsoy, Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018), Energy Build. 219 (2020) 109917. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109917.
- [16] M.N. Nwodo, C.J. Anumba, A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach, Build. Environ. 162 (2019) 106290. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106290.
- [17] S. Longo, F. Montana, E. Riva Sanseverino, A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations, Sustain. Cities Soc. 45 (2019) 87–104. doi:10.1016/j.scs.2018.11.027.
- [18] I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : A review article, Energy Build. 39 (2007) 249–257. doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001.
- [19] T. Ramesh, R. Prakash, K.K. Shukla, Life cycle energy analysis of buildings : An overview, Energy Build. 42 (2010) 1592–1600. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007.

- [20] C.K. Anand, B. Amor, Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 408–416. doi:10.1016/J.RSER.2016.09.058.
- [21] S. Bandyopadhyay, S. Saha, Some Single- and Multiobjective Optimization Techniques, in: *Unsupervised Classif. Similarity Meas. Class. Metaheuristic Approaches, Appl.*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013: pp. 17–58. doi:10.1007/978-3-642-32451-2_2.
- [22] K. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.
- [23] R.T. Marler, J.S. Arora, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Struct. Multidiscip. Optim.* 26 (2004) 369–395. doi:10.1007/s00158-003-0368-6.
- [24] A. Jafari, V. Valentin, An optimization framework for building energy retrofits decision-making, *Build. Environ.* 115 (2017) 118–129. doi:10.1016/j.buildenv.2017.01.020.
- [25] F. Asdrubali, C. Baldassarri, V. Fthenakis, Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings, *Energy Build.* 64 (2013) 73–89. doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.018.
- [26] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela, J. Neila, Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting - A case study of the Spanish housing stock, *Energy Build.* 116 (2016) 384–394. doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.019.
- [27] D. Jato-Espino, E. Castillo-Lopez, J. Rodriguez-Hernandez, J.C. Canteras-Jordana, A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, *Autom. Constr.* 45 (2014) 151–162. doi:10.1016/j.autcon.2014.05.013.
- [28] R. Evins, A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22 (2013) 230–245. doi:10.1016/j.rser.2013.02.004.
- [29] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, K. Axarli, Algorithms for optimization of building design: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31 (2014) 101–112. doi:10.1016/j.rser.2013.11.036.
- [30] P. Aparicio Ruiz, J. Guadix Martín, J.M. Salmerón Lissén, F.J. Sánchez de la Flor, An integrated optimisation method for residential building design: A case study in Spain, *Energy Build.* 80 (2014) 158–168. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.020.
- [31] M. Hamdy, A. Hasan, K. Siren, A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy Build.* 56 (2013) 189–203. doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.023.
- [32] S.K. Pal, A. Takano, K. Alanne, K. Siren, A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building, *Build. Environ.* 123 (2017) 146–162. doi:10.1016/j.buildenv.2017.06.051.
- [33] A. Hasan, M. Vuolle, K. Sirén, Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation, *Build. Environ.* 43 (2008) 2022–2034. doi:10.1016/j.buildenv.2007.12.003.
- [34] C. Baglivo, P.M. Congedo, A. Fazio, D. Laforgia, Multi-objective optimization analysis for high efficiency external walls of zero energy buildings (ZEB) in the Mediterranean climate, *Energy Build.* 84 (2014) 483–492. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.043.
- [35] F. Ascione, N. Bianco, R. De Masi, G. Mauro, G. Vanoli, Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort, *Sustainability*. 7 (2015) 10809–10836. doi:10.3390/su70810809.
- [36] F. Gilles, S. Bernard, A. Ioannis, R. Simon, Decision-making based on network visualization applied to building life cycle optimization, *Sustain. Cities Soc.* 35 (2017) 565–573. doi:10.1016/j.scs.2017.09.006.
- [37] S. Carlucci, G. Cattarin, F. Causone, L. Pagliano, Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), *Energy Build.* 104 (2015) 378–394. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.064.
- [38] F. Kheiri, A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 92 (2018) 897–920. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080.
- [39] B. Nagy, Numerical geometry optimization and modelling of insulation filled masonry blocks, *Lect. Notes Civ. Eng.* 20 (2019) 1–13. doi:10.1007/978-981-13-2405-5_1.
- [40] M.J. Mayer, A. Szilágyi, G. Gróf, Environmental and economic multi-objective optimization of a

- household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm, *Appl. Energy*. 269 (2020) 115058. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115058.
- [41] M. Röck, A. Hollberg, G. Habert, A. Passer, LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages, *Build. Environ.* 140 (2018) 153–161. doi:10.1016/j.buildenv.2018.05.006.
- [42] M. Najjar, K. Figueiredo, M. Palumbo, A. Haddad, Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building, *J. Build. Eng.* 14 (2017) 115–126. doi:10.1016/j.jobe.2017.10.005.
- [43] R. Santos, A. Aguiar Costa, J.D. Silvestre, L. Pyl, Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment tool, *J. Clean. Prod.* 265 (2020) 121705. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.121705.
- [44] B. Soust-verdager, C. Llatas, A. García-martínez, J. Carlos, G. De Cózar, BIM-Based LCA Method to Analyze Envelope Alternatives of Single-Family Houses : Case Study in Uruguay, 24 (2018) 1–15. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000303.
- [45] Q. Tushar, M.A. Bhuiyan, G. Zhang, T. Maqsood, An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development, *J. Clean. Prod.* 289 (2021) 125622. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125622.
- [46] F. Shadram, J. Mukkavaara, An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy, *Energy Build.* 158 (2018) 1189–1205. doi:10.1016/j.enbuild.2017.11.017.
- [47] M. Najjar, K. Figueiredo, A.W.A. Hammad, A. Haddad, Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings, *Appl. Energy*. 250 (2019) 1366–1382. doi:10.1016/j.apenergy.2019.05.101.
- [48] S. Abbasi, E. Noorzai, The BIM-Based multi-optimization approach in order to determine the trade-off between embodied and operation energy focused on renewable energy use, *J. Clean. Prod.* 281 (2021) 125359. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125359.
- [49] M. Manni, G. Lobaccaro, N. Lolli, R.A. Bohne, Parametric Design to Maximize Solar Irradiation and Minimize the Embodied GHG Emissions for a ZEB in Nordic and Mediterranean Climate Zones, *Energies*. 13 (2020). doi:10.3390/en13184981.
- [50] F. Bre, V.D. Fachinotti, A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings, *Energy Build.* 154 (2017) 283–294. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002.
- [51] N. Amani, E. Kiaee, Developing a two-criteria framework to rank thermal insulation materials in nearly zero energy buildings using multi-objective optimization approach, *J. Clean. Prod.* 276 (2020) 122592. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122592.
- [52] E. Meex, A. Hollberg, E. Knäpen, L. Hildebrand, G. Verbeeck, Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design, *Build. Environ.* 133 (2018) 228–236. doi:10.1016/j.buildenv.2018.02.016.
- [53] F. Cerdas, A. Kaluza, S. Erkisi-Arici, S. Böhme, C. Herrmann, Improved Visualization in LCA Through the Application of Cluster Heat Maps, *Procedia CIRP*. 61 (2017) 732–737. doi:10.1016/j.procir.2016.11.160.
- [54] H.E. Otto, K.G. Mueller, F. Kimura, Efficient information visualization in LCA: approach and examples, *Int. J. Life Cycle Assess.* 8 (2003) 259–265. doi:10.1007/BF02978917.
- [55] S. Sala, J. Andreasson, Improving Interpretation, Presentation and Visualisation of LCA Studies for Decision Making Support, in: E. Benetto, K. Gericke, M. Guiton (Eds.), *Des. Sustain. Technol. Prod. Policies*, Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 337–342. doi:10.1007/978-3-319-66981-6_37.
- [56] J.P. Basbagill, F. Flager, M. Lepech, Measuring the impact of dynamic life cycle performance feedback on conceptual building design, *J. Clean. Prod.* 164 (2017) 726–735. doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.231.
- [57] M. Landgren, S.S. Jakobsen, B. Wohlenberg, L.B. Jensen, Informing sustainable building design, *Archnet-IJAR Int. J. Archit. Res.* 13 (2019) 194–203. doi:10.1108/ARCH-12-2018-0025.
- [58] G. Thomaßen, K. Kavvadias, J.P. Jiménez Navarro, The decarbonisation of the EU heating sector through electrification: A parametric analysis, *Energy Policy*. 148 (2021). doi:10.1016/j.enpol.2020.111929.

- [59] E.H. Eriksen, L.J. Schwenk-Nebbe, B. Tranberg, T. Brown, M. Greiner, Optimal heterogeneity in a simplified highly renewable European electricity system, *Energy*. 133 (2017) 913–928. doi:10.1016/j.energy.2017.05.170.
- [60] D.P. Schlachtberger, T. Brown, S. Schramm, M. Greiner, The benefits of cooperation in a highly renewable European electricity network, *Energy*. 134 (2017) 469–481. doi:10.1016/j.energy.2017.06.004.
- [61] T. Brown, D. Schlachtberger, A. Kies, S. Schramm, M. Greiner, Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system, *Energy*. 160 (2018) 720–739. doi:10.1016/j.energy.2018.06.222.
- [62] H.C. Gils, Y. Scholz, T. Pregger, D. Luca de Tena, D. Heide, Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe, *Energy*. 123 (2017) 173–188. doi:10.1016/j.energy.2017.01.115.
- [63] G. Krajačić, N. Duić, M. da G. Carvalho, How to achieve a 100% RES electricity supply for Portugal?, *Appl. Energy*. 88 (2011) 508–517. doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.006.
- [64] M. Erlandsson, P. Levin, Environmental assessment of rebuilding and possible performance improvements effect on a national scale, *Build. Environ.* 40 (2005) 1459–1471. doi:10.1016/j.buildenv.2003.05.001.
- [65] I. Blom, L. Itard, A. Meijer, Environmental impact of building-related and user-related energy consumption in dwellings, *Build. Environ.* 46 (2011) 1657–1669. doi:10.1016/j.buildenv.2011.02.002.
- [66] A. Passer, C. Ouellet-Plamondon, P. Kenneally, V. John, G. Habert, The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings, *Energy Build.* 124 (2016) 153–163. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.008.
- [67] F. Rasmussen, H. Birgisdóttir, M. Birkved, System and scenario choices in the life cycle assessment of a building – changing impacts of the environmental profile, *Proc. Sustain. Build. Conf. 2013 - Constr. Prod. Technol.* (2013) 994–1003.
- [68] M. Fouquet, A. Levasseur, M. Margni, A. Lebert, S. Lasvaux, B. Souyri, C. Buhé, M. Woloszyn, Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment, *Build. Environ.* 90 (2015) 51–59. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.022.
- [69] C. Roux, P. Schallbart, E. Assoumou, B. Peuportier, Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts, *Appl. Energy*. 184 (2016) 619–629. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.043.
- [70] D. Vuarnoz, E. Hoxha, J. Nembrini, T. Jusselme, S. Cozza, Assessing the gap between a normative and a reality-based model of building LCA, *J. Build. Eng.* 31 (2020) 101454. doi:10.1016/j.job.2020.101454.
- [71] ISO 14040, ISO 14040:2006 Environmental management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework, (2006).
- [72] ISO 14044, ISO 14044:2006 Environmental management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines, (2006).
- [73] EN 15978, EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, (2011).
https://standards.cen.eu/dyn/www/?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:31325&cs=16BA443169318FC086C4652D797E50C47 (accessed October 18, 2019).
- [74] R. Heijungs, J. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. Goede, *Environmental Life Cycle Assessment of Products—Backgrounds*, (1992).
- [75] EC, Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating, *Off. J. Eur. Union.* (2012) 28. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2012/244/oj (accessed September 23, 2019).
- [76] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, B. Weidema, The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *Int. J. Life Cycle Assess.* 21 (2016) 1218–1230. doi:10.1007/s11367-016-1087-8.
- [77] Építésügyi Tájékoztatási Központ Kft., *Építőipari költségbeclési segédlet 2019*, Budapest, 2019.
- [78] TERC Kft, TERC-ETALON, (2020). <https://www.etalon.terc.hu> (accessed November 3, 2020).
- [79] Eurostat, Gas prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards), (2019).

- <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/9c5a2d87-054a-4809-96a3-d8fe5b894d92?lang=en> (accessed April 25, 2021).
- [80] Eurostat, Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards), (2019). <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/b524f095-0148-414e-8adb-8be34f201682?lang=en> (accessed April 25, 2021).
- [81] National Renewable Energy Laboratory, EnergyPlus, (2018). <https://energyplus.net/>.
- [82] ISO 52016, ISO 52016-1:2017 Energy performance of buildings -- Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads -- Part 1: Calculation procedures, (2017). <https://www.iso.org/standard/65696.html> (accessed October 18, 2019).
- [83] TNM, TNM 7/2006. (V.24.) hungarian government decree on the energy performance of buildings, (2006). http://njt.hu/cgi_bin/njt_doc.cgi?docid=101820.352718 (accessed September 23, 2019).
- [84] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6 (2002) 182–197. doi:10.1109/4235.996017.
- [85] A.L. Custódio, J.F.A. Madeira, A.I.F. Vaz, L.N. Vicente, Direct Multisearch for Multiobjective Optimization, *SIAM J. Optim.* 21 (2011) 1109–1140. doi:10.1137/10079731X.
- [86] E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele, SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, 2001. doi:10.3929/ethz-a-004284029.
- [87] L. Szabó, A. Mezösi, Z. Pató, Á. Kelemen, Á. Beöthy, E. Kácsor, P. Kaderják, G. Resch, L. Liebmann, A. Hiesl, M. Kovács, C. Köber, S. Marković, D. Todorović, SEERMAP: South East Europe Electricity Roadmap South East Europe Regional report 2017, 2017.