

Válasz Prof. Láng Péter, az MTA doktora bírálatára

Köszönöm szépen az alapos és részletes bírálatot. Köszönöm, hogy a 2. tézis kivételével valamennyi tézisemet elfogadja tudományos eredményként.

Az alábbiakban igyekszem a felmerült kérdésekre és észrevételekre válaszolni.

2. tézis

A villamos energia dekarbonizációjára vonatkozóan megállapítja, hogy „a villamos energia jövőben várható nagymértékű dekarbonizációja jelentősen befolyásolja a hőszivattyúk értékelését. A 2050-es klímacélokot 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.”

A tézist nem fogadom el mert csak kvalitatív és részben nyilvánvaló állításokat tartalmaz.

Köszönöm szépen, elfogadom a kritikát. Ezt a kérdést fontosnak tartottam kiemelni, hiszen alapvetően a villamos energia dekarbonizációja határozza meg, hogy teljesíthetőek lesznek-e a karbonsemlegességi célkitűzések. A tézisnek valóban tartalmaznia kellett volna kvantitatív állítást is, számításaim szerint a 2050-es dekarbonizált villamos energia összetétel feltételezésével a hőszivattyús rendszer kibocsátása csak 1-2 kg CO₂-eq/(m²év).

A kutatás részletesebb célkitűzései között első helyen szerepel: „Módszertani keretrendszer fejlesztése az épületek által okozott környezetterhelés számszerűsítéséhez.”. Mit ért módszertani keretrendszer alatt és hogy viszonyul ez a módszertanhoz (és a módszerhez)?

Módszertani keretrendszer alatt egy olyan átfogó struktúrát értettem, amely megadja, hogy a teljes életciklus számításokat hogyan lehet nagy mintára elvégezni. Azért használtam a „keretrendszer” kifejezést, mert a számítás több elemből áll, az üzemeltetési energiaigény számítása, a beépített környezeti hatások számítása is külön módszereket igényel. Ha az egyes részletek változnak is (pl. elérhető környezeti adatok pontosabbá válnak), a keretrendszer akkor is alkalmazható, a frissített adatokkal újrafuttathatóak a számítások.

A környezeti hatások (pl. GWP) számítása számos paramétert igényel, ezek egy részének értéke szubjektív. Meg tudná-e mondani, hogy mely paraméterek értéke meghatározó jelentőségű, esetleg végeztek-e érzékenységvizsgálatot?

Az LCA elemzésekben sokféle bizonytalanság van (pl. élettartam, termékadatok, a valós anyagmennyiségek, módszertani kérdések, használói szokások, jövőbeli forgatókönyvek stb.) (Warrier et al., 2024). Egy épület tervezési szakaszában ráadásul még sok a nem ismert, változó paraméter, amelyekre szintén feltételezéseket kell tenni.

A szakirodalomban jellemzően egy-egy esettanulmány elemzéséből vonnak le általános következtetéseket, az értekezésben viszont részletesen vizsgáltam az épületgeometria hatását. Szintén vizsgáltam néhány jövőre vonatkozó forgatókönyvet (pl. villamosenergia-dekarbonizáció). Jelentős lehet a termékadatok szórása is, ezt azonban nem elemeztem, mivel egy általános adatbázissal dolgoztam. Ez a tervezési szakaszban jó közelítés, amikor még nem ismertek a gyártóspecifikus termékek.

Az épületelemek élettartama által okozott bizonytalansággal egy, az irányítással készült TDK dolgozatban részletesen foglalkoztunk (Bayer, 2025). A szakirodalom alapján az átlagos élettartamok mellett egy minimális és egy maximális élettartam változatot is vizsgáltunk egy esettanulmányon. Megállapítottuk, hogy az átlagos felújítási gyakorisághoz képest a gyakoribb csere a teljes beépített GWP-t ~20%-kal növelte, míg a ritkább ~5%-kal csökkentette 50 éves számítási időszak alatt. A vizsgálati időszak hatását szintén elemeztük, az 50 évhez képest a 100 éves időszak az eredményeket 39%-kal növelte (de egy évre vetítve 30%-kal csökkentette) a nagyobb karbantartási igény miatt.

A szakirodalomban sok egyéb érzékenységvizsgálatot is végeztek. Hoxha et al. például az élettartam, a termékadatok és az anyagmennyiség meghatározásának bizonytalanságát vizsgálta és 10-14% variációs együtthatót (CV) állapított meg (Hoxha et al., 2017). Konklúziójuk szerint az életciklus-elemzés módszere ennek ellenére is jól alkalmazható a környezeti hatás becslésére és alternatívák összehasonlítására. A nagy mennyiségben alkalmazott anyagok, pl. beton esetén azonban különösen fontos a megfelelő adatok használata és a bizonytalanságok csökkentése. Egy esettanulmányban például kimutattuk, hogy alacsony karbontartalmú beton használatával épületszinten átlagosan kb. 24% GWP csökkenést lehet elérni (Z. V. Nagy & Szalay, 2026).

Az értekezés fő célja az épületállomány szintjén érvényes következtetések levonása volt. Az üzemeltetési energiaigény meghatározására alkalmazott hazai épületenergetikai módszertan is sok feltételezést tartalmaz, nem veszi figyelembe például a használói szokásokat. Ehelyett a „standard lakó”-val számol, azaz szabványos feltételek mellett érvényes, a fogyasztótól független eredményt ad (Csoknyai et al., 2024). Több érték (pl. belső hőnyereség, használati melegvíz fogyasztás) a hazai statisztikai adatokon alapul, amelyben nagy eltérések lehetnek az egyes lakások szintjén, de az értékek állomány szinten megfelelőek.

20. o.:” A német DGNB rendszerben a fenntarthatóság három pillére, a környezeti, gazdasági és társadalmi szempontok azonos, 22,5%-os súlyt kapnak...” Jó lett volna közölni, hogy még mi kap és milyen súlyt, hogy kijöjjön a 100%.

A DGNB minősítés három fő kategóriája a fenntarthatóság három pillérét jellemzi, amelyek egyenlő súlyt kapnak új épületek esetén: a környezeti minőség (természet védelme, erőforrások) 22,5%, a gazdasági minőség (életciklus költség, kiadhatóság) 22,5%, a szociokulturális és funkcionális minőség (pl. emberi egészség, komfortérzet, társadalmi és kulturális értékek) 22,5% (DGNB, n.d.). Ezen kívül 15% az épület műszaki minősége (pl. tűzvédelem, akusztika, karbantarthatóság), 12,5% a folyamat minősége (tervezés és kivitelezés folyamata) és 5% a helyszín minősége (pl. helyi környezet, közlekedési kapcsolatok). A DGNB különböző épületfunkciókra adaptálja a rendszerét, egyes funkciók esetén a súlyok az alapsúlyozástól kis mértékben eltérhetnek.

20.-21. o: Az egyes életciklusszakaszok (A1-A5, B1-B5) leírása nem teljesen pontos, az 1. ábrával összevetve. Az 1. ábrát már itt be lehetett volna mutatni.

A 20-21. oldal leírása a jelenleg hatályos MSZ EN 15978 szabványra alapoz, amelyet 2012-ben adtak ki és 2020-ban kiegészítettek. A szabvány azonban jelenleg felülvizsgálat alatt áll. Az 1. ábra viszont már a prEN előszabványból származik, amit várhatóan rövid időn belül elfogadnak. A táblázat a felülvizsgált verzióban kiegészült új modulokkal (pl. A0, a D modul kétfelé van osztva). Az ábrát valóban hasznos lett volna már a 3.3. fejezetben közölni, de a korlátozott hely miatt inkább a módszertannál helyeztem el, ahol már azt is be tudtam mutatni, hogy a saját módszerem mely modulokat tartalmazza.

A (3) egyenlet felírt formája nem precíz. Helyesebb lett volna kétféle $f_{nren,i}$ tényezőt szerepeltetni benne, például $f_{nrenQ,i}$ és $f_{nrenW,i}$.

A képlet a hatályos épületenergetikai rendeletről származik (melynek kidolgozásában részt vettem). A képletet valóban a bíráló által javasolt formában is fel lehet írni és kettéválasztani a csak hő-, illetve csak villamos energia előállítására alkalmas energiahordozókat, de a rendelet ezt nem teszi meg és egy minden energiahordozót összesítő táblázatot közöl (ÉKM, 2023).

Az f átalakítási tényező a felhasznált energiahordozóra vonatkozik, amely hő- és villamos energia esetén lehet eltérő, de akár meg is egyezhet. Hőenergia előállítható pl. biomasszából, földgázból, de villamos energiából is hőszivattyúk esetén.

Nem világos számomra a 12. táblázat és 15. ábra viszonya. Az ábrán a hővisszanyerős szellőzés, napkollektor és napelem a kondenzációs kazánnal kombinálva, míg a faelgázosító és hőszivattyú önállóan szerepel. Hogyan kell értelmezni ez utóbbiaknál a táblázatban évben megadott megtérülési időt a kondenzációs rendszerhez képest?

A megtérülési időt a rendszer megépítéséhez szükséges többlet kibocsátás és az éves kibocsátás megtakarítás hányadosaként számítottam, a v1 kondenzációs gázkazános alaprendszerhez képest. Azaz a faelgázosító és hőszivattyú esetén ezen rendszerek beépített GWP-jéből kivontam a kondenzációs gázkazán rendszer GWP-jét és ezt osztottam az üzemeltetési kibocsátás megtakarítással.

Az 51. ábra két egymásba ágyazott optimalizációs ciklust mutat. Számomra nem világos, hogy mi változik a belsőben?

Az ábra valóban nem elég szabatos, a nyíl csak a vizualizáció kedvéért került oda. Valójában egy optimalizációs ciklus van, amely a célfüggvény értékeit minimalizálja bizonyos bemenő paraméterek változtatása mellett.

A dolgozatban több adatbázist is használ, azonban ezek nem Magyarországra vonatkozó adatokat tartalmaznak, mivel indokolja ezek használatát, milyen bizonytalanságot ad ez az eredményeket tekintve?

Magyarországon egyelőre nincsen hazai környezeti termékadatbázis. A termékekre vonatkozó specifikus adatok (EPD) száma is kevés, bár az utóbbi években számuk látványosan emelkedni kezdett. Ezért az értekezésben az ecoinvent nemzetközi adatbázist alkalmaztam, ami szakmailag általánosan elfogadott, főként Nyugat- és Közép-Európai adatokat tartalmazó adatbázis. Korábbi vizsgálataink alapján az országok között jelentős eltérést a gyártási folyamatokban használt villamos energia környezeti hatása okoz, ezért az ecoinventnek korábban elkészítettük egy hazai körülményekre adaptált változatát, ahol a villamos energia adatsorokat hazaira cseréltük (Tiderenczl et al., 2006). Az értekezésben azonban az ecoinventet módosítás nélkül alkalmaztam, mert a villamos energia összetétele Magyarországon jelentősen javult az utóbbi években és kibocsátása már az EU átlag közelében vagy alatta van.

A következő években várható, hogy az adatok elérhetősége javulni fog az Európai Unióban és Magyarországon egyaránt. A felülvizsgált Építési Termék Rendelet (CPR) új előírásai szerint pár éven belül kötelezővé válik a karbonlábnyom szerepeltetése a termékjellemzők között (Európai Unió, 2024).

Az épületekre vonatkozó karbonlábnyom számítási kötelezettség miatt Magyarországon is szükséges lesz egy hazai adatbázis létrehozása, mivel sok építőanyagra, termékre még nem érhetőek el specifikus adatok, illetve a tervezés korai szakaszában, az építési engedélykérelem időpontjában még nem feltétlenül ismertek a konkrét termékek. Ez az adatbázis alapulhat az ecoinvent vagy a német Ökobaudat adatbázison (pl. a témában úttörőnek számító Dániában is a német adatbázist használják).

Az értekezés egyik fő célja a jellemző hazai referenciaértékek és határértékek meghatározása volt. Bár a termékspecifikus adatok pontosabbak, az általános konklúziók és értékek levezetésére az általános adatok alkalmasabbak. Hasonló megközelítést alkalmaztunk az épületenergetikai rendelet kidolgozásakor. Az egyszerűsített módszer lehetővé teszi a táblázatokban megadott konzervatív alapértékek használatát (pl. nyílászárók hőátbocsátási tényezője, kazánok hatásfoka), de ha a pontos termék már ismert, akkor figyelembe vehetőek a konkrét termékjellemzők. A karbonlábnyom esetén is megfelelő lehet a tervezési szakaszban általános adatokkal dolgozni, amelyek a piaci átlagot tükrözik vagy akár biztonsági tényezővel megnövelt értékek, de ezek kiválthatóak egy adott termék specifikus adataival, ha ismert a beépítendő termék. Ezzel is ösztönözhető, hogy a termékgyártók elkészítsék a termékre vonatkozó életciklus-elemzéseket, EPD-eket.

A dolgozatban levont következtetések mennyire általánosíthatóak, a számszerű eredményeket lehet-e más országokra alkalmazni, vagy esetleg a vizsgálat kiterjeszhető-e?

A módszertan kiterjeszhető más országokra is, ezért is publikáltam az eredményeket nemzetközi folyóiratokban (Szalay & Zöld, 2014) (Szalay, 2024). A számszerű eredmények hasonló adottságú és építési kultúrájú országokra érvényesek. A jellemző épülettípusokban lehetnek nemzeti különbségek (pl. sorházak nem jellemzőek Magyarországon, erre nem készültek vizsgálatok). Az üzemeltetési kibocsátások esetén a legfőbb különbséget a klimatikus viszonyok és a villamos energia összetétele okozhatja. A beépített környezeti hatásoknál

nemzetközi építőanyag adatokat alkalmaztam, de az építéstechnológiában, épületszerkezeti és tartószerkezeti kialakításban (pl. földrengés követelmények) lehetnek különbségek.

A dolgozat eredményei mennyire időtállóak, a jövőbeni hatásokat mennyire vette figyelembe?

Az értekezésben jövőbeni forgatókönyvet is feldolgoztam a villamos energia dekarbonizációjára, amely alapvetően meghatározza pl. a hőszivattyúk környezeti hatását. A villamos energia „zöldülése” a gyártási folyamatokra is kihat majd és ezzel összefüggésben sok területen várható az elektrifikáció (pl. jelenleg földgázzal működő kemencék átállítása villamos energiára). Az építőanyagok esetén a jelenlegi adatokkal számoltam, a jövőben várható javulást nem vettem figyelembe. Egy, az értekezés beadása óta megírt cikkben azonban foglalkoztunk néhány jelentős mennyiségben használt építőanyag (beton, acél, tégl) karboncsökkenési potenciáljával (Z. V. Nagy & Szalay, 2026).

Ahogy az értekezés lehatárolásában is szerepelt, a klímaváltozás hatását nem vettem figyelembe az energiaigény számításában. Más kutatásokban azonban részletes elemzéseket végeztünk különböző épülettípusokra (Szagri & Szalay, 2022).

A dolgozat számszerű eredményei tehát a dekarbonizáció és a téma jelentőségének növekedése, az adatminőség javulása miatt változni fognak, azonban a kidolgozott módszertan segítségével az eredmények aktualizálhatóak. Az EU-s irányelvek is elvárják a nemzeti útitervek készítését, részint a meglévő épületállomány mélyfelújítására, másrészt az új épületekre vonatkozó követelmények fokozatos szigorítására vonatkozóan. Az épületenergetikai követelményekre vonatkozó számításokat például már többször frissítettem a szigorodó elvárások miatt. A beépített környezeti hatás tekintetében is várható, hogy a 2030-as bevezetés után a határértékeket a jövőben fokozatosan szigorítani kell majd.

A rendkívül nagy számú irodalmat -valószínűleg terjedelmi okokból- csak sorszámmal hivatkozva, ami azok megjelenési idejét (és első szerzőjét) nem tartalmazza, ami pedig e fontos információ megszerzését kényelmetlenné teszi. Több hivatkozás hiányos, például

- [22] Z. Szalay, *Life cycle environmental impacts of residential buildings*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.

- [137] É. Beleznay, H. Budai, D. Huszár, A. Jenei, P. Márkus, A. Schmidt, Z. Szalay, G. Szarvas, *Zéró Karbon Ajánlás*, 2023.
https://www.hugbc.hu/resources/docs/HuGBC_Ajanlas_ZeroKarbon_Nagy.pdf

- [268] T. Csoknyai, Z. Szalay, B. Nagy, M. Horváth, *Alkalmazott épületenergetika*, Budapest, 2024.

A [163] és [164] hivatkozásoknál ugyanazok az oldalszámok szerepelnek.

A pontos hivatkozások a következők:

[22] Z. Szalay, *Life cycle environmental impacts of residential buildings*, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.

[137] É. Beleznay, H. Budai, D. Huszár, A. Jenei, P. Márkus, A. Schmidt, Z. Szalay, G. Szarvas, Zéró Karbon Ajánlás, 2023, Magyar Környezettudatos Építés Egyesülete, https://www.hugbc.hu/resources/docs/HuGBC_Ajanlas_ZeroKarbon_Nagy.pdf (letöltés 2025.12.17.)

[268] T. Csoknyai, Z. Szalay, B. Nagy, M. Horváth, Alkalmazott épületenergetika, Segédlet, Budapest, 2024. ISBN 978-615-81965-9-8, <https://www.e-gepesz.hu/letoltes/alkalmazott-epuletenergetika-isbn.pdf> (letöltés 2025.12.17.)

[163] Z. Szalay, B. Kiss, Az épületekben felhasznált energiahordozók primerenergia-tényezője: mennyi az annyi? – 1. rész, Magyar Épületgépészet LXVII. 9 (2018) 3–7.

[164] Z. Szalay, B. Kiss, Az épületekben felhasznált energiahordozók primerenergia-tényezője: mennyi az annyi? – 2. rész, Magyar Épületgépészet LXVII. 10 (2018) 3–7.

Utóbbi két cikk két egymást követő lapszám első cikke volt, mindkettő a 3-7. oldalakon.

A két (csak) benyújtott publikációnál jó lett volna megadni, hogy hová nyújtották be (és hány oldalas). (Remélem, hogy azok azóta már meg is jelentek színvonalas folyóiratokban.)

A cikkek az értekezés beadása óta megjelentek:

Gergely, L. Z., Barna, E., Horváth, M., & Szalay, Z. (2025). Assessing embodied and operational carbon of residential HVAC systems: Baselines for life-cycle sustainability. *Building and Environment*, 269(112442), pp.1-20. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112442>

Dacic, A., Mester-Szabó, E., Fenyvesi, O., & Szalay, Z. (2024). Life cycle assessment of concrete incorporating all concrete recycling products. *Case Studies in Construction Materials*, 21(e03910), pp.1-20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03910>

Formai és stílust illető észrevételeim, sajtóhibák:

Meglepőek a 3. és 4. magyar nyelvű táblázatokban mutatott hosszú, angol nyelvű „rövidítések”: pl. ratio_window_to_wall. A 15. táblázat szövege is részben magyar, részben angol nyelvű.

Köszönöm az észrevételt, ez valóban zavaró lehet. Az értekezés nagyrészt angol nyelvű cikkeken alapul. A paraméterek nevét magyarra fordítottam, de a rövidítések valóban megmaradtak angol nyelven. A 15. táblázatban véletlenül maradt néhány angol megnevezés.

A (2) egyenletben szereplő jelölésekben is az indexek egy része a magyar szóból (F, átlag), másik része az angolból (i, e) származik.

A képlet a hatályos épületenergetikai rendeletből származik, a mennyiségek rövidítései a nemzetközi szabványnak megfelelőek, de az indexek a hazai rendeletben magyarul szerepelnek.

Az 52. ábra aláírása túl hosszú, helyesebb lett volna annak egy részét a szövegben, az ábrára hivatkozás előtt leírni.

Köszönöm, valóban túl hosszú a szövegezés. Itt arra törekedtem, hogy az ábra aláírása önmagában is értelmezhető legyen.

A dolgozat szövegezése világos, csak pár kisebb (nem értelemzavaró) elírást, pontatlan fogalmazást találtam, például:

-8. o.: "... meghatározható az új épületek várható energiaigénye" (inkább: megbecsülhető új épületek energiaigénye).

-36. o.: „A számítások rendeltetésszerű használatot feltételeznek.”

-96. o.: „A célfüggvény a GWP-re, illetve 5 egyéb hatáskategória voltak.”

-97. o.: „... a villamos energia dinamikus jövőbeli modellezése (ld. 5.4.1. fejezet) hogyan befolyásolja az épület optimális kialakítását”

Köszönöm az észrevételeket, ezek sajnos valóban kissé pontatlan megfogalmazások.

A sajtóhibák száma is csekély (például):

-19. o.: „összesen több, mint 20.000 folyamat leltárelemzési és környezeti hatás adatait tartalmazza...”

Köszönöm az észrevételt.

-33. o.: „A statisztikai mutatók szerint az alapterület és az ablakarány jó egyezést mutat az 1. táblázatban szereplő értékekkel.” (Az 1. táblázatban nincsenek számok.)

A helyes hivatkozás a 3. táblázat.

Még egyszer köszönöm szépen a pozitív bírálatot és bízom benne, hogy kérdéseire és felvetéseire kielégítő válaszokat adtam.

Budapest, 2026.01.19.



.....
Dr. Szalay Zsuzsa

Irodalomjegyzék:

- Bayer, B. (2025). *A hosszú távú szemlélet integrálása az épületek életciklus-elemzés számításaiba*, TDK dolgozat, BME. <https://tdk.bme.hu/ConferenceFiles/EMK/2025/Paper/A-hosszu-tavu-szemlelet-integralasa-az-20251105-195901.pdf?paperId=16850>
- Csoknyai, T., Szalay, Z., Nagy, B., & Horváth, M. (2024). *Alkalmazott épületenergetika, Segédlet*. <https://www.e-gepesz.hu/letoltes/alkalmazott-epuletenergetika-isbn.pdf> (letöltés 2025.12.17.)
- DGNB. (n.d.). *DGNB system for new construction*. Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen. <https://www.dgnb.de/en/certification/buildings/new-construction> (2025.12.15.)
- ÉKM. (2023). *9/2023. (V.25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról*. <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>
- Európai Unió. (2024). *Az Európai Parlament of a Tanács (EU) 2024/3110 rendelete az építési termékek forgalmazására vonatkozó harmonizált szabályok megállapításáról és a 305/2011/EU rendelet hatályon kívül helyezéséről*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403110
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>
- Szagri, D., & Szalay, Z. (2022). Theoretical fragility curves – A novel approach to assess heat vulnerability of residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103969. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103969>
- Szalay, Z. (2024). A parametric approach for developing embodied environmental benchmark values for buildings. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(9), 1563–1581. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02322-w>
- Szalay, Z., & Zöld, A. (2014). Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample. *Energy Policy*, 74(C). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.001>
- Tiderenczl, G., Medgyasszay, P., Szalay, Z., & Zorkóczy, Z. (2006). *Épületszerkezetek építésökológiai és -biológiai értékelő rendszerének összeállítása az építési anyagok hazai gyártási/előállítási adatai alapján*. OTKA jelentés.
- V. Nagy, Z., & Szalay, Z. (2026). Assessment of upfront carbon level of different design options for a mid-rise multi-story residential building considering low-carbon solutions. In B. Nagy & Z. Szalay (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of CESBP 2025*. Springer.
- Warrier, G. A., Palaniappan, S., & Habert, G. (2024). Energy & Buildings Classification of sources of uncertainty in building LCA. *Energy & Buildings*, 305(January), 113892. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113892>