

Válasz Prof. Bereczky Ákos, az MTA doktora bírálataira

Köszönöm szépen a részletes és alapos bírálatot, valamint a nagy számú megjegyzést és kérdést. Köszönöm, hogy elfogadja az 1., 5. és 6. téziseket, valamint a kérdések kielégítő megválaszolása esetén a 3., 7., 8., 9. és 10. téziseket. A 2. és 4. tézist nem fogadja el.

Az alábbiakban igyekszem megválaszolni a felmerült kérdéseket és észrevételeket.

A Disszertáció szerint a „szakirodalomban azonban hiányzik a karbonsemlegesség egységes definíciója”, valamint a „kibocsátásmentes” és a „közel nulla energiaigényű épület” pontos definíció meghatározása a tagállamok hatásköre és feladata. Kérem mutassa be, hogy ezek definíciói, fogalmak, illetve a hozzájuk tartozó határértékek jelenleg mennyire kidolgozottak Magyarországon, és mennyire kidolgozottak és egységesek az EU-ban.

A közel nulla energiaigényű épületekre az EU irányelv egy általános definíciót adott 2010-ben (European Union, 2010): „közel nulla energiaigényű épület: az I. melléklettel összhangban meghatározott, igen magas energiahatékonysággal rendelkező épület. A felhasznált közel nulla vagy nagyon alacsony mennyiségű energiának igen jelentős részben megújuló forrásokból kellene származnia, beleértve a helyszínen vagy a közelben előállított megújuló forrásokból származó energiát is”. A tagállamok a pontos definíciót ez alapján saját hatáskörben fogalmazták meg, ennek megfelelően jelentős különbségek vannak az ambíció szintjében. Magyarországon a követelmény megfogalmazása több körben történt, a 2011-es háttér tanulmány, valamint a 2023-ban bevezetett rendelet kidolgozásában és a követelményértékek meghatározásában is szerepem volt. A közel nulla energiaigényű épületekre jelenleg az általános követelményeken túl három külön követelmény vonatkozik (fajlagos hővesztésgtényező, összesített energetikai jellemző és fajlagos szén-dioxid kibocsátás). Ezek meghatározása az értekezésben bemutatott módszerrel történt, valamint költséghatékonysági vizsgálat is történt. A követelményeket rendszeresen, 5 évente felül kell vizsgálni költséghatékonysági szempontból.

A kibocsátásmentes épületek fogalmát az EPBD 2024-ben megjelent felülvizsgálata vezeti be (European Union, 2024): „kibocsátásmentes épület: az I. melléklettel összhangban meghatározott nagyon magas energiahatékonysággal rendelkező épület, amely nulla vagy nagyon alacsony energiamennyiséget igényel, nem okoz fosszilis tüzelőanyagokból származó helyszíni szén-dioxid-kibocsátást, az üzemeltetéshez kapcsolódó üvegházhatásúgáz-kibocsátásának mennyisége pedig nulla vagy nagyon alacsony, a II. cikkkel összhangban”. Előírás, hogy a kibocsátásmentes épület teljes primenergia-felhasználásának legalább 10%-kal alacsonyabbnak kell lennie a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó határértéknél. A pontos számszerű követelményeket és feltételeket azonban itt is a tagállamoknak kell meghatározni, ennek hazai implementációja a következő évek feladata lesz. Az EU célja a kibocsátásmentes épületállomány elérése 2050-re, ehhez az új épületeknek 2030-tól a kibocsátásmentesnek kell lennie és 2050-ig a meglévő épületállományt is fokozatosan erre a szintre kell felújítani. Ez a követelmény csak az üzemeltetésre vonatkozik, a beépített kibocsátásokra nem. Az irányelv azonban ezzel is foglalkozik, és előírja, hogy 2030-tól minden

új épület esetén ki kell számítani a teljes életciklusra vetített karbonlábnyomot és a tagállamok által megszabott határértékeknek is meg kell felelni.

A karbonsemleges épületekre az EU dokumentumok nem írnak elő célszámokat és ez a fogalom nem szerepel a stratégiákban sem. Az egy épületre vonatkozó karbonsemlegesség tehát nem cél az EU-s irányelvekben, csak a „kibocsátásmentesség”, azaz nagyon alacsony energiafelhasználású, helyszíni kibocsátással nem rendelkező épületeket kell megvalósítani, illetve a teljes életciklusra vetített karbonlábnyomot is csökkenteni kell.

A karbonsemlegesség ambíciózusabb, mint a kötelezően bevezetendő szintek. A Magyar Környezettudatos Építés Egyesületével közösen alkottuk meg a hazai Zéró Karbon Ajánlást, amely javaslatot tesz a zéró karbon épületek definíciójára (Beleznay et al., 2023): „*A nettó zéró karbon (NZK) épület olyan nagy energiahatékonyságú épület, amelynek működési energiaigényét a lehető legnagyobb mértékben helyszíni megújuló energia biztosítja, valamint az épület teljes életciklusa alatt keletkező ÜHG kibocsátása minimális, és a fennmaradó kibocsátása helyszíni vagy helyszínen kívüli megújuló vagy fosszilismentes energiaforrásokkal és ellentételezéssel kompenzálásra kerül.*”

Ez a definíció tehát a kibocsátásmentes épületekhez képest messzebb megy és a teljes életciklus figyelembevételével törekszik minimális kibocsátásra és ennek ellentételezését is célul tűzi ki. Nemzetközi szinten számos meghatározás létezik a nettó nulla kibocsátású épületekre, melyek különböző rendszerhatárokat (csak üzemeltetés vagy teljes életciklus), kibocsátásokat (csak CO₂ vagy üvegházhatású gázok) stb. vesznek figyelembe. A különböző szervezetek és országok által használt önkéntes és kötelező rendszereket összegyűjtöttük a Zéró Karbon Ajánlásban (Beleznay et al., 2023), valamint nemzetközi cikkek is összefoglalják a témát (Satola et al., 2021).

Kérem, mutassa be, miért fontos a „formatényező” és miért csak egy oldalt vesz figyelembe.

A formatényező az épületek alakját, tagoltságát figyelembe vevő tényező. Az épület lehűlő felületét befolyásolja az épület alakja, minél tagoltabb az épület, annál nagyobb a fajlagos hőveszteség. Az értekezésben a forma jellemzésére használt „egyenértékű téglalap” fogalmat én vezettem be, de a szakirodalomban is használnak hasonló tényezőket az alak leírására. Az „egyenértékű téglalap” egy, az épület általános alaprajzával azonos kerületű és területű téglalap. A számításokban változó paraméterként ennek csak egy oldalát vettem figyelembe, a másik oldalhosszat az alapterületből határoztam meg.

Kérem, pontosan definiálja a nem megújuló primerenergia-átalakítási tényezőt, hálózati gáz és villamos energia esetére, továbbá ebben a 4.2.3. fejezetben szereplő napkollektorok és napelemek esetén hogyan veszi figyelembe az LCA elveket, kitérve a vizsgálati időszakra?

A nem megújuló primerenergia átalakítási tényező földgáz esetén $f_{\text{nren}} = 1,1$, villamos energia esetén $f_{\text{nren}} = 2,3$ a 9/2023. ÉKM rendelet szerint (ÉKM, 2023). Ezeket az EU szabványok (MSZ EN ISO 52000-1, 2017) (MSZ EN 17243, 2021), illetve a hazai energiastatisztikák alapján a MEKH és a minisztériumok határozták meg.

A napkollektorok és napelemek beépített környezeti hatását az ecoinvent adatbázisból vettem. Az adatbázis napelemek esetén különböző típusú napelem modulokra, valamint a szükséges rendszerelemekre (inverter, villamos szerelvények, rögzítések) tartalmaz gyártási adatokat. Napkollektorok esetén az adatbázis szintén egy teljes rendszerre tartalmaz adatokat, ennek felépítésére mutatok példát az alábbi ábrán. A bemenő áramok termékáramok, amelyek egy másik folyamategységből származnak (pl. tágulási tartály, szivattyú). A termékrendszer az anyag- és energiaáramok révén összekapcsolt folyamategységek összessége. Minden folyamategység bemenő- és kimenő áramokból áll. A környezeti hatás értékelésekor valamennyi összekapcsolt folyamat hatását számítjuk ki.

Inputs/Outputs: solar collector system installation, Cu flat plate collector, one-family house, hot water | solar collector system, Cu flat plate collector, one-family house, hot water | Cutoff, U - CH

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location
copper, cathode	242:Manufacture of ba...	8.00000	kg		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
drawing of pipe, steel	241:Manufacture of ba...	8.00000	kg		lognorma...		drawin...	(3; 5; 5; 1; ...	
expansion vessel, 25l	251:Manufacture of str...	1.00000	Item(s)		lognorma...		expans...	(3; 5; 5; 1; ...	
flat plate solar collector, Cu absorber	281:Manufacture of ge...	4.00000	m2		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
hot water tank, 600l	251:Manufacture of str...	0.95800	Item(s)		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
propylene glycol, liquid	201:Manufacture of ba...	13.10000	kg		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
pump, 40W	281:Manufacture of ge...	2.50000	Item(s)		lognorma...		pump ...	(3; 5; 5; 1; ...	
tube insulation, elastomere	221:Manufacture of rub...	4.00000	kg		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
water, completely softened	360:Water collection, tr...	18.00000	kg		lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location
solar collector system, Cu flat plate...	432:Electrical, plumb...	1.00000	Item(s)	2.16140...	none				
heat carrier liquid, 40% C3H8O2	370:Sewerage/3700:Se...	0.03110	m3	-0.03379 ...	lognorma...		market...	(3; 5; 5; 1; ...	
Water	Emission to air/unspec...	0.00270	m3		lognorma...			(2; 2; 5; 1; ...	
Water	Emission to water/unsp...	0.01530	m3		lognorma...			(2; 2; 5; 1; ...	

1. ábra: Napkollektoros rendszer bemenő és kimenő áramai az ecoinvent adatbázisban, OpenLCA környezetben

Napelemek esetén 30 éves várható élettartammal számoltam, az inverternél 15 évvel, napkollektor esetén 20 évvel az MSZ EN 15459 szabvány és az értekezésben megjelölt szakirodalmak alapján (4.3.6. fejezet). A vizsgálati időszak 50 év, a szükséges cserék számát ez alapján számoltam.

A felhasználói szokások meglátása szerint mennyire befolyásolják az eredményeket?

A felhasználói szokások nagyban befolyásolják az ererdményeket az egyes épületek szintjén, ezzel számos hazai és nemzetközi kutatás foglalkozik (Xu et al., 2023). Dinamikus szimuláció segítségével például kimutattuk, hogy lakóépületekben a belső hőmérséklet 1 °C-kal való csökkentése 8-9%-kal csökkenti a fűtési energiaigényt, míg a szakaszos, éjszakára le szabályozott hőmérsékletű fűtéssel 5-7% megtakarítás érhető el (Horváth et al., 2025). A felhasználói szokásoknak jelentős szerepe van abban is, hogy felújítások esetén a számított megtakarítások gyakran eltérnek a valóságban realizálthoz képest (rosszabb épületekben

gyakori az alulfűtés (prebound hatás), míg felújítás után a túlfűtés (rebound hatás) (Galvin & Sunikka-Blank, 2016)). A felhasználói szokások hatását vizsgáltuk a nyári túlmelegedésre is, például a megfelelő szellőztetési stratégia és árnyékolás nagy mértékben csökkenti a felmelegedés kockázatát (Szagri & Szalay, 2022).

Az értekezésben azonban a fő cél az épületállomány szintjén érvényes következtetések levonása volt, összhangban a hazai és nemzetközi épületenergetikai tanúsítási számítási módszertannal. Ez a módszer a „standard lakó”-val számol, azaz szabványos feltételek mellett érvényes, a fogyasztótól független eredményt ad (Csoknyai et al., 2024). Lakóépületek esetén például az elvárható komfortérzetet (20 °C) és a frisslevegő utánpótlás szempontjából minimálisan szükséges szellőzést (0,5 l/h légcserre) vesz figyelembe. 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.

Ma léteznek térképek, például „Budapest Szolár Térkép” a besugárzási adatokkal. Ezt figyelembe vette-e, ha nem, ez mekkora hibát okoz

Ezzel kapcsolatos, de általános kérdés: a hőveszteség jelentősen függ a környezeti hőmérséklettől. Milyen hőmérsékleti adatokat vett figyelembe, és ezeknek mi a forrása?

A Budapest Szolár Térkép számítási háttérét nem ismerem, a honlapon nyilvánosan elérhető információk alapján nem egyértelmű, hogy a digitális felszínmodell, a tető jellemzői, az elérhető tetőfelület, az árnyékhatások mellett figyelembe veszik-e a napsugárzási adatokban a városon belüli kisebb különbségeket.

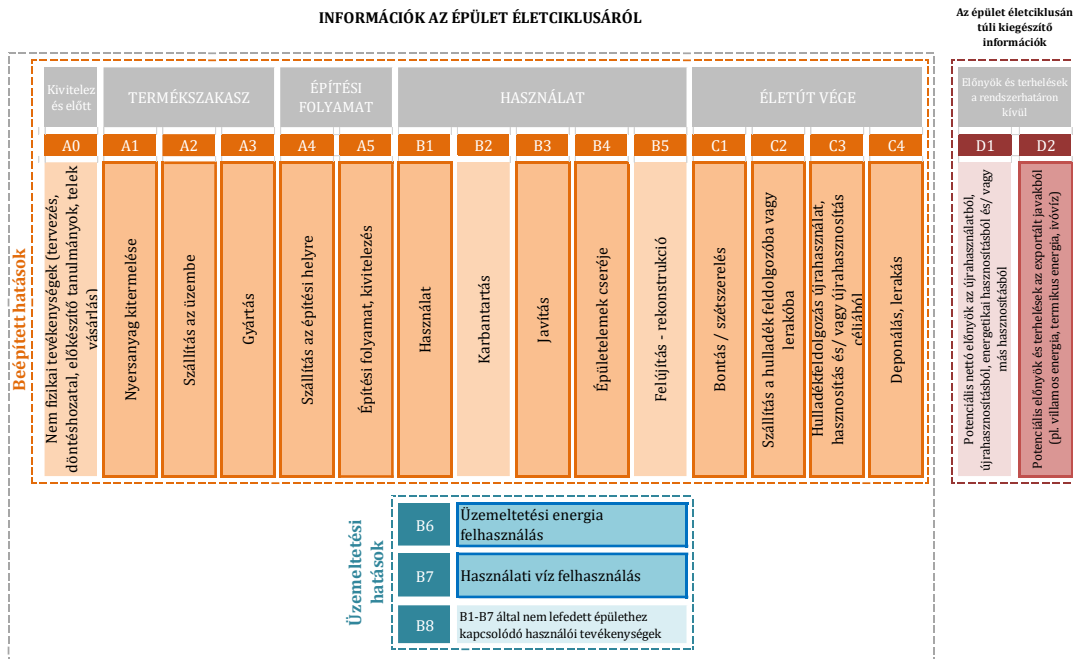
Más sugárzási térképek szerint az országon belül a napsugárzás területi eloszlásában nincsenek jelentős különbségek, az eltérés az egyes országrészek között 8% alatt van (Naplopó Kft., n.d.). A napenergia termelés számításakor és a külső hőmérséklet esetén is a hazai épületenergetikai rendelet szerinti módszert alkalmaztam, amely az ország kis mérete és a kis területi különbségek miatt Magyarország éghajlatát egy adatsorral jellemzi, a 2007-2016 közötti adatokból szerkesztett ún. tipikus meteorológiai évvel (Joint Research Centre, 2019). Ez hőmérséklet, napsugárzás intenzitás és energiahozam, páratartalom, szélsebesség és irány adatokat tartalmaz óras bontásban.

Az éghajlati adatok esetén is az egyes helyszíneken, egyes épületekben a területi különbségek és a mikroklimatikus hatások miatt lehetnek különbségek az energiaigényben, ezért energetikai audit esetén ezeket érdemes figyelembe venni. Energetikai tanúsítás, valamint épületállomány szintű vizsgálatok céljára azonban az ország területét jól jellemző, átlagos adatok is megfelelőek.

Megjegyzés: az 1. ábra D modulja hiányos.

Sajnos az ábra egy bennmaradt tabulátor miatt elcsúszott és a jobb oldalából egy darab le van vágva. A helyes ábra a következő:

INFORMÁCIÓK AZ ÉPÜLET ÉLETCIKLUSARÓL



2. ábra: Az épület életútjának szakaszai, a figyelembe vett modulok kiemelésével

Kérem, becsülje meg, hogy az A0, B2, B5, B8 és D1 szakaszok, valamint a mesterséges hűtés figyelembe nem vétele milyen mértékben befolyásolja az eredményeket, továbbá a pontosított részek – például szállítás –, illetve a hőszivattyúk hűtőközegének szivárgása mekkora növekedést jelent.

A B2 szakasz figyelembevétele mennyire módosítaná az eredményeket?

Miért vette figyelembe B3 és B4 kategóriákat és nem vette figyelembe a B2-t?

Az A0 az előkészítési, tervezési szakasz, ahol nincs jelentős kibocsátás, hiszen főleg emberi munkát és számítógép használatot igényel. A prEN 15978 előszabvány szerint ez a szakasz nem kötelező, épületek esetén nem releváns, csak az egyéb szabványokkal való konzisztencia érdekében szerepel.

A B2 karbantartási szakasz a mindennapos tisztítást (pl. ablak, padló), a gépészeti elemek éves felülvizsgálatát, a kisebb karbantartási munkákat tartalmazza. Ennek környezeti hatása nem jelentős, a szakirodalomban is általában elhanyagolják és nehezen számszerűsíthető, ezért elhanyagoltam.

A B5 szakasz az előre tervezett nagyobb felújítás (pl. egy épületet eleve úgy terveznek meg, hogy néhány év múlva jelentősen átalakítják), ami lakóépületek esetén nem szokásos. A periodikus cserék nem ide tartoznak, hanem a B4 modulba.

A B8 - egyéb használói tevékenységek közé tartozik a személyi közlekedés, az elektromos autók töltése, valamint az ingóságok (pl. mozgatható bútorok). Ez a modul nem kötelező és amennyiben készül rá számítás, annak eredményét külön kell jelenteni. A szakirodalomban ezt általában nem veszik figyelembe, de a svájci nemzeti módszertanban például igen. A

közlekedés hatása igen jelentős lehet, de mivel ez nem kötődik szorosan az épülethez (hanem a lokációhoz), nem vettem figyelembe.

A D1 modult az általam alkalmazott adatbázis nem tartalmazza, de más adatbázisok, illetve az újabb környezetvédelmi terméknnyilatkozatok (EPD-k) igen. A nagy újrafelhasználási, újrahasznosítási potenciállal rendelkező anyagok (pl. fa, fémek) esetén jelentős lehet a hatása. Ez környezeti előnyt jelent, a jövőbeli hasznosítással kiváltott anyag/energia környezeti hatása számolható el (pl. újrahasznosított adalékanyag természetes adalékanyagot vált ki), ezért az eredményeket csökkenti.

A felsorolt modulok elhanyagolásának hatása becslésem szerint 1% alatti (kivéve a B8 közlekedést).

Az A4-A5 szállítás hatása a teljes életciklus GWP-ben 1-2%, tehát a pontosításnak a jellemző szállítási távolságok esetén viszonylag kis hatása van.

A B1 modul (pl. hűtőközeg szivárgás) eredményeim szerint a teljes GWP 2-5%-áért felel (R134a közeg) és bár sokszor elhanyagolják, a szakirodalom és a zöld minősítő rendszerek szerint is fontos a figyelembevétele. Ezzel a kérdéssel részletesebben is foglalkoztunk egy cikkben (Gergely et al., 2025), ahol a hőszivattyús rendszer beépített hatásának több, mint harmada a hűtőközezből származott (R32 közeg). Ez a hatás jelentősen csökkenthető alternatív anyagok használatával, pl. R290 hűtőközeggel, amelynek alacsony a GWP tényezője.

Ide kapcsolódik, hogy a mesterséges hűtés figyelembe nem vétele mekkora hibát okoz?

Ha figyelembe vennék a mesterséges hűtést, mennyire befolyásolná az eredményeket?

A statisztikák szerint a lakóépületek energiafelhasználásának kb. 0,2%-a fordítódik hűtésre (*Odyssee Database*, n.d.), bár ennek az adatnak a pontossága megkérdőjelezhető, mivel a felhasználási célok szerinti bontás a jelenleg elterjedt éves leolvasású mérők mellett bizonytalan. A gépi hűtéssel ellátott épületek száma egyre növekszik, de még mindig nem jelentős. Egy reprezentatív felmérés szerint a felmért lakóegységek 6,7%-ában fordult elő, az újabb épületekben viszont 20 % körül van (Csoknyai, 2022).

Társasházakra végzett számításaim szerint a nettó hűtési energiaigény $Q_{H,net} = 0-20$ kWh/m²év között mozgott, egy split klímára jellemző SEER= 2,5 szezonális hatásfokkal számítva ez végenergiaigényben $Q_{H,vég} = 0-8$ kWh/m²év körül alakul (Szalay & Kiss, 2017a) (Szalay & Kiss, 2017b). Ebben a mintában azonban külső árnyékolóval nem rendelkező épületek is szerepeltek. Egy új épületben elvárt a külső árnyékoló telepítése, valamint jobb hatásfokú hűtés kialakítása. Másrészt viszont a klímaváltozás miatt várható a hóhullámok számának és intenzitásának növekedése, ami hosszabb távon a gépi hűtés jelentősebb elterjedésével és a hűtési energiaigény növekedésével járhat.

A fejezet az LCA szerinti globális hatásokat vizsgálja, a lokális légszennyezést nem elemzi, ezért érdemes tisztázni, hogy a faelgázosító kazán emissziója hogyan jelenik meg az értékelésben.

A faelgázosító kazán lokális emissziói is szerepelnek az elemzésben az ecoinvent adatbázis alapján. A szálló por kibocsátás (PM) nem kötelező hatáskategória, de ezt is vizsgáltam az

egyéb hatáskategóriák között (5.3. fejezet) és itt a faelgázosító kazán opciónak voltak a legmagasabb kibocsátásai.

Viszont felmerül a kérdés, hogy az összesített energetikai jellemző napelem esetén miért csökkent ilyen jelentősen, ha az EPBD-vel összhangban nem veszi figyelembe a háztartási villamosenergia-felhasználást?

Az 5. fejezetben (Üzemeltetési energiaigény) a háztartási berendezések energiaigénye az EPBD-vel összhangban nincsen figyelembe véve. A hazai számítási módszer jelenleg azonban megengedi a helyszínen felhasznált, illetve a rendelet által nem szabályozott fogyasztóknak átadott vagy a hálózatba exportált napelemek által megtermelt energia figyelembevételét az összesített energetikai jellemzőben (azaz a teljes megtermelt érték levonható, mivel ez hálózati villamos energiát vált ki vagy az épületben vagy máshol). Ezért fordulhatnak elő negatív értékek az összesített energetikai jellemzőben.

A 7. fejezetben (Teljes életciklus) azonban minden tételt figyelembe vettem, a háztartási villamosenergia-fogyasztást is (B6.3), ezért itt már nincsenek ilyen anomáliák.

Nem látható, hogy mit ért azon, hogy „2035-től a megújuló beruházások támogatása jelentősen növekszik”? Az évi villamos energia igény becsült növekedése, a 11. ábra szerint 32 év alatt, a feltételezés alapján 26%, ez kevesebb mint 1% évente, ez mennyire reális? Hogyan becsülik a villamos energia igény változását?

Az 5.4.1. fejezetben bemutatott eredmények esetén a villamos energia piaci modellezést a Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (REKK) készítette, tehát a termelési összetételt ők határozták meg a forgatókönyvek alapján, de mi tettük hozzá a környezeti hatások számítását. A modellben 2035 után fokozatosan megnő a szélenergia aránya, majd 2040 után teljesen kiszorul a földgáz. Az energiaigény növekedése a PRIMES adatokon alapszik, amely egy EU-s referencia forgatókönyv (Capros et al., 2016).

A disszertáció szerint „Paks 1 és Paks 2 egyes blokkjai 2030–2036 között párhuzamosan működnek”, ez hol látható a 11. ábrán?

A 11. ábra felső részén a nukleáris termelés megnövekedett mennyisége figyelhető meg 2030 és 2035 között, illetve a GWP is alacsonyabb.

Továbbá a cikk eredményei szerint mi indokolja a földgázfelhasználás 2035-től kezdődő növekedését 2040-ig?

Ez szintén a REKK modell eredménye, feltehetően a 2030-2035 között megnövekedett paksi termelés 2035 utáni visszaesése okozza a nagyobb földgázigényt, ez azonban a modellben 2040-től visszaszorul a földgáz emissziói és ára miatt.

Továbbá mi indokolja a 11. ábrán és a cikkben is a felsőrészen a „GWh” dimenziót?

A 11. ábra a teljes hazai villamos energiatermelés és kereskedelem összetételét mutatja, ezért GWh a dimenziója.

A 62. oldalon említett, hogy 2030-ig az értékelés csak az épületburokra vonatkozik. Meglátása szerint ennek milyen hatása várható?

A jelenlegi szabályozások még nem írják elő a teljes életciklus számítást, csak az üzemeltetési energiaigényt és kibocsátásokat kell számítani. Az üzemeltetési energiaigény számításában a határolószervezetek hőtechnikai jellemzői relevánsak (pl. hőátbocsátási tényező, hőkapacitás), a belső szerkezeteket csak hőtároló tömegként vesszük figyelembe. Az LCA számítás csak 2030-tól lesz kötelező, ennek minden épületszerkezetre ki kell majd terjednie. A 18. ábrán azt vizsgáltam, hogy mekkora hibát okozna, ha csak az energetikai tanúsításban jelenleg is rétegrendi szinten megadott határolószervezetekre készülne a számítás. Az ábra azonban azt mutatja, hogy ez nem fedné le megfelelően a beépített környezeti hatást, mivel a határolószervezeten kívüli „egyéb” szerkezetek környezeti hatása jelentős. Az értekezés megírása óta megjelentek a pontosabb EU-s irányelvek, amelyek már egyértelműen előírják, hogy az épületszerkezeti (és épülettechnikai) elemeket minél pontosabban modellezni kell egy megadott klasszifikáció szerint (European Commission, 2025).

Mit ért „részletes, dinamikus szimulációs modellek” alatt?

Az energiaigény számítási módszereit a 4.2. fejezetben jellemeztem. Az értekezésben havi módszeren alapuló számítást alkalmaztam. Léteznek azonban ennél pontosabb, dinamikus szimulációs módszerek, amelyek az épület viselkedését komplex módon írják le, a hőveszteségek, a hőnyereségek és a hőtárolás kölcsönhatását óránkénti vagy óránál rövidebb időbeli felbontással modellezik. Ezek figyelembe veszik például a napsugárzás, hőmérséklet órák változását, a használati profilokat, menetrendeket (pl. a lakók jelenlétét) stb. és az energiamérleg egyenleteket az év minden órájára (vagy akár minden 15 percre) oldják meg. Egy-egy épület nagy részletességű elemzése esetén a dinamikus szimuláció nagyobb pontosságot ad, de az épületállomány-szintű általános vizsgálatokban a havi módszer is megfelelőnek tekinthető.

A bírálónak meg kell jegyeznie, hogy nagyon kritikusán kell viszonyulni egy olyan megoldáshoz, amely csak az épület szintjén vizsgálja a semlegességet. Például a teljes tetőfelületű napelem telepítése éves szinten megoldást nyújthat, de egy ilyen rendszer hatása már az egész villamosenergia-rendszerre kiterjed, ezért annak modellezése elengedhetetlen lenne.

Egyetértek a bírálói véleménnyel, nem az egyes épületek szintjén kell törekedni a karbonsemlegesség elérésére, hanem rendszerszinten a teljes gazdaságban és épületállományban. Az értekezésben elméleti síkon vizsgáltam, hogy egy épület esetén mennyire vagyunk messze a karbonsemlegességtől.

A bíráló ezeket a megállapításokat elfogadja, ugyanakkor felhívja a figyelmet egy ellentmondásra: a 79. oldalon szerepel, hogy „A távhő kiépítésének azonban nagy infrastrukturális vonzata van és épületléptékben a tervezőnek nincs ráhatása a távhő elérhetőségére, illetve összetételére”, továbbá „Ezeknek a rendszereknek a milyensége, megújuló részaránya ... az épület tervezőjén kívül álló adottság, tehát... szabályozást nem lehet ezekre alapozni”. A szerző később azt állítja, hogy megújuló alapú távhő, illetve zöldáramszerződés révén is lehetőség nyílik megújuló energiaforrások figyelembevételére. Kérem, oldja fel ezt az ellentmondást, és mutassa be, hogyan valósítható meg a biomassza-alapú energiaellátás társasházi környezetben.

A zöldáram szerződés egy elvi lehetőség az emissziók kompenzálására, de sem az EU, sem Magyarország nem fogadja el ezt az épületszintű szabályozásokban és én sem javasoltam, hiszen viszonylag könnyen megváltoztatható és nincsen rá hosszútávú garancia, ráadásul felvetődik a dupla elszámolás kockázata is (villamos energia rendszer szinten és épület szinten).

A távhő dekarbonizációja kulcskérdés az épületállomány szempontjából, hiszen sűrű beépítésű városrészekben nagyon hatékony, bizonyos, nehezen felújítható (pl. műemlék jellegű) épületek esetén az egyetlen megoldás, illetve költséghatékonyabban és egyszerűbben állítható át megújuló energiaforrások hasznosítására, mint az egyedi fogyasztók. Mivel azonban épület léptékben a távhő megléte adottság és nem választható opció, ezért az épülettechnikai rendszerek esetén nem vizsgáltam. A nemzeti stratégiákban viszont mindenképpen fontos szerepe van.

A biomassza alapú energiaellátás társasházban Magyarországon nem szokványos technológia, de külföldön (pl. Ausztriában) gyakran alkalmazzák a magas hatásfokú, automatikus adagolású, házközponti pellet vagy apríték kazánokat, napkollektorral vagy hőszivattyúval kombinálva. A tüzelőanyag tárolása a nagy helyigény miatt meglévő épület átalakításakor utólag nehezen megvalósítható, de új épületben a tervezési programban rögzíthető és a logisztikai kihívások is kezelhetőek.

Milyen különbségek vannak a magyar és a dán építési gyakorlat, energiaellátás és szabályozási környezet között, amelyek befolyásolják az összehasonlíthatóságot?

Dániában a villamos energia emissziói jóval alacsonyabbak az összetételnek köszönhetően. A villamosenergia-termelésben a 2024-es statisztikák szerint dominál a szélenergia (58%), valamint magas a biotüzelőanyagok, napelem és a hulladékhasznosításból származó energiamennyiség is, míg a fosszilis energiahordozók (szén, olaj, földgáz) együttes aránya csak 8% (IEA, 2025a). Ezzel szemben Magyarországon 25% a földgáz és szén aránya, 42% a nukleáris energia és az utóbbi években nagyon megnőtt a szoláris termelés aránya (24%) (IEA, 2025b).

Dániában az épületek hőellátásában nagyon elterjedt a távhő, ami szintén alacsony kibocsátású. A kis épületek között jelentős a favázás szerkezetek aránya.

Dánia világszinten úttörő, már 2023-ban kötelezően bevezették az 1000 m²-nél nagyobb épületek esetén az életciklus-elemzést, és a 12 kg/m²év határértéket (Social- og Boligstyrelsen, n.d.). Ezt 2025-ben szigorították és átlagosan 7,1 kg/m²év-re csökkentették, valamint a kötelezett épületek körét tágították (a különböző épülettípusokra más értékek vonatkoznak).

Érdekesség, hogy ez a szigorítás az ipari lobbis hatására következett be, több mint 600 cég támogatta a határértékek szigorítását.

A módszerek között is lehetnek eltérések, pl. a dán számítás nem vesz figyelembe minden életciklus szakaszt (A1-A3, B4, B6, C3-C4). Olyan egyszerű paraméterek is különbségeket okozhatnak, mint a nemzeti szinten használt referencia alapterület. Dániában például a bruttó szintterületre fajlagosítanak, ami a fűtött és fűtetlen tereket is magában foglalja, míg az értekezésben a nettó fűtött alapterületre vetítettem az eredményeket.

Ezek a különbségek is mutatják, hogy más országok követelményértékei nem vehetők át egy az egyben.

A jelölt 50 éves időszakra vonatkoztat, ez a meglátás szerint mennyire reprezentatív, a fejezet elején említi, hogy a teljes lakásállomány megújulása 159 évig tartana, ez a szám nem sokkal realitásosabb? Ha pl. 100 éves időszakra számolna mennyire lesz realitásos a bontás preferálása?

A 159 év csak példaként szerepelt annak illusztrálására, hogy az épületállomány megújulása nagyon lassú folyamat. Ez az érték nem szerepel a számításokban.

Az életciklus elemzésekben a szakirodalomban 50-100 éves vizsgálati időszakot (RSP) feltételeznek, az új EU-s irányelv 50 évet ír elő és én is ezzel számoltam. Az épületek valós élettartama azonban jellemzően ennél jóval hosszabb. Ezzel a kérdéssel részletesen foglalkoztunk egy irányítással készült TDK-dolgozatban (Bayer, 2025). Egy, bontási statisztikákon alapuló épületállomány modell szerint Dániában a családi házak átlagos várható élettartama 129 év, a társasházaké 227 év (Andersen & Negendahl, 2023).

Magyarországon az 50 évnél régebbi épületek száma több, mint 1 millió (European Commission, n.d.). Ez azt mutatja, hogy az épületek élettartama jóval meghaladhatja a vizsgálati időszakként kijelölt 50 évet. A vizsgálati időszak a szabvány szerint sem feltétlenül egyezik meg az épület élettartamával, az elvárt vagy a becsült élettartam lehet annál rövidebb vagy hosszabb is. A vizsgálati időszak egy konvenció, amelyet a számítás érdekében egységesítettek.

A 9.3 fejezet elején jelzi, hogy a beépített kibocsátások a múltban történtek és adatok hiányában nagy a bizonytalanság, ez a későbbi tézisként is megfogalmazott beépített kibocsátás arányánál mekkora hibát okoz? A vizsgálat kizárólag mélyfelújítást és bontás-új építést hasonlít össze. Nem lenne indokolt a részleges felújítások hatását is elemezni, tekintettel arra, hogy a gyakorlatban ezek a leggyakoribb beavatkozások?

Az értekezés nagy része az új épületek által okozott környezeti hatás csökkentésének lehetőségeivel foglalkozik. A meglévő épületekre azért tartottam fontosnak kitérni, mert a kibocsátások legnagyobb részéért a meglévő épületállomány felel, tehát ezek felújítása nélkül nem valósulhat meg az ország dekarbonizációja.

A tézisben is jeleztem, hogy meglévő épületek esetén a beépített kibocsátás egy megalapozott becslésnek tekinthető, mivel ezek a múltban történtek és korabeli adatok nem érhetőek el.

A részleges felújítást nem elemeztem, mert értekezésemnek nem a meglévő épületállomány vizsgálata volt a fő célja és erre már születtek átfogó elemzések a szakirodalomban (Csoknyai, 2022), bár ezek csak az üzemeltetési energia és emisszió megtakarítással foglalkoztak, nem teljes életciklus szemlélettel készültek. Ehelyett a szélsőséges eseteket vizsgáltam: nem történik felújítás vagy mélyfelújítás vagy bontás és új építés. A 10. fejezetben viszont külön vizsgáltam a hőszigetelés vastagságának optimalizálását. Ebből az a konklúzió vonható le, hogy a hőszigetelés kis gyártási környezetterhelése miatt minden esetben megéri az utólagos hőszigetelés, mert a megtakarítás jóval nagyobb arányú. Tehát a részleges, csak egy-egy épületszerkezetet érintő beavatkozások is megtérülnek energia és emisszió szempontjából. Hasonló a helyzet az épületgépészeti rendszer esetén (5.2.2. fejezet). A részleges felújításnak viszont vannak műszaki kockázatai, ezek nem álltak az értekezés fókuszában. Az új EPBD épületenergetikai irányelv azonban kötelezővé teszi a felújítási útlevél rendszerének bevezetését, amelynek célja a szakaszos felújítások ütemezése, a megfelelő műszaki megoldások megtalálása részleges felújítások esetén is.

A jelölt nem vette figyelembe a hőszigetelés hatását a világításra, ha figyelembe venné az önfogyasztást ez a meglátása szerint milyen mértékű hatását lenne?

Az utólagos hőszigetelés növelheti a külső ablakkáva vastagságot, ami befolyásolja az üvegezés benapozottságát. A téli szoláris hőnyereséget ez csökkenti, viszont a nyári szoláris hőterhelést is, tehát télen kedvezőtlen, nyáron kedvező a hatása. A bejutó látható fény mennyisége szintén csökkenhet, ami kedvezőtlen. A mai gyakorlatban szokásos, 1-15 cm körüli hőszigetelés vastagságok esetén ez a hatás nem jelentős. Az értekezésben viszont az optimumot kerestem, ezért extrém, 60 cm vastagságig vizsgáltam a hőszigetelést. Ahogy az értekezésben is hangsúlyoztam, ez egy eméleti maximum, ami műszaki, például rögzítéstechnikai problémák miatt a gyakorlatban nem minden szerkezetnél alkalmazható.

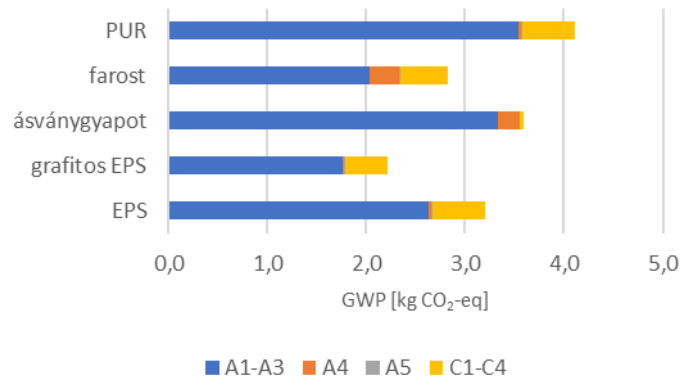
Épületszerkezeti szempontból, a hőhidak csökkentése érdekében a legkedvezőbb eset, ha a nyílászáró a külső hőszigetelő rétegben helyezkedik el, a hőszigetelés vagy ráta az ablaktokra vagy az ablaktok a hőszigetelés síkjába kerül konzolos rögzítéssel. Ezzel a megoldással a külső ablakkáva mélysége csökkenthető. Az utólagos hőszigetelést és a nyílászáró cserét érdemes összehangolni, hogy a nyílászáró a megfelelő síkra kerüljön.

Az utólagos hőszigetelés érdekes példája a bolzanoi volt postaépület passzív ház szintű felújítása, ahol a homlokzatra 35 cm hőszigetelés került (Troi et al., 2008). A kisméretű nyílászárókkal rendelkező lyukarchitektúrás homlokzatnál az optimális bevilágítás érdekében a hőszigetelést az ablakkávánál elvékonyították és ezzel izgalmas homlokzati játékot hoztak létre. A hőszigetelő képesség ezzel kis mértékben csökkent, de így is átlagosan 28 cm vastagsággal egyenértékű.

A megvizsgált hőszigetelő anyagok között valóban nem tapasztalható jelentős eltérés (49. ábra)?

A hőszigetelő anyagok között nagyon kis különbségek vannak, ha a beépített hatást és az üzemeltetési energiamegtakarítást együtt vizsgáljuk egy teljes épület esetén, mint a 49. ábrán. Ha csak a beépített GWP-t tekintjük (ld. alábbi ábra), nagyobb különbségek mutatkoznak. A

funkcionális (vonatkoztatási) egység az alábbi ábrán azonos, 1 m^2 felületű $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ hővezetési ellenállású anyag, amelynek tömege a hővezetési tényező és a testsűrűség alapján számítható. A farost alacsonyabb értékei nem meglepőek, mivel ez egy természetes anyag. A grafitos expandált polisztirol (EPS) alacsony értéke a viszonylag jó hővezetési tényezőnek és a nagyon alacsony testsűrűségnek köszönhető (kb. 15 kg/m^3 , míg ásványgyapot esetén kb. 80 kg/m^3 , farost esetén kb. 110 kg/m^3).



3. ábra: Különböző homlokzati hőszigetelő anyagok beépített GWP-je (A és C szakaszok), 1 m^2 felületű és $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ hővezetési ellenállású anyag esetén

Milyen élettartamot feltételezett a hőszigetelő anyagokra és épületelemekre, és ez hogyan hatott a B3–B4 szakaszok jelentőségére?

Az épületelemek élettartamát több szakirodalmi forrás összevetése alapján feltételeztem (4.3.6. fejezet), valamint az M3 mellékletben rétegrendenként is megadtam. A homlokzati hőszigetelő rendszerre (THR) például 50 évet feltételeztem. A hőszigetelés érdekes kérdés, mert a ma alkalmazott polisztirolhab hőszigetelő rendszereket a világban az 1960-as évek óta használják, szélesebb körben csak az 1970-es, 1980-as évek óta. Ezért még nagyon kevés az elérhető statisztikai adat ezen rendszerek élettartamáról. Főként két német útmutatóra támaszkodtam (Kompetenzzentrum “Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen,” 2006) (BBSR, 2017). Az adatok bizonytalanságát jól mutatja, hogy az egyik, a német fenntarthatósági minősítésekhez (DGNB) alkalmazott útmutató 2017-es kiadásában 40 év volt a THR élettartama (ami 50 év alatt egy cserét jelent), míg az útmutató 2025-ös felülvizsgálatban 50 évre emelték (azaz 50 év alatt nincs csere). Az élettartam okozta bizonytalansággal egy irányítással készült TDK dolgozatban részletesen foglalkoztunk (Bayer, 2025) és 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 tézisekkel kapcsolatban a következő válaszokat adom:

Köszönöm szépen, hogy elfogadja az 1., 5. és 6. téziseket, valamint a kérdések kielégítő megválaszolása esetén a 3., 7., 8., 9. és 10. téziseket. A 2. és 4. tézist nem fogadja el.

2. tézis

A dolgozatban hivatkozott modell pontos működése az energiatárolás kezelése, a villamosenergia-termelő egységek azonosíthatósága nem került részletesen bemutatásra, továbbá bírálatban szereplő bizonytalanságok miatt a módszertani megalapozottság nem ellenőrizhető. Továbbá a következtetés, miszerint a hőszivattyúk jövőbeli GWP-je csökkenni fog a villamosenergia dekarbonizációja miatt, bár helyes irányba mutat, jelen formájában triviálisnak tekinthető, és nem nyújt új tudományos eredményt. A fentiek alapján az eredményeket ebben a formában nem tudom tudományos szempontból elfogadni.

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 modellben valóban nagy a bizonytalanság, hiszen bár a 2050-es klímacélok rögzítettek, de az odavezető út nem. A tézisnek valóban tartalmaznia kellett volna kvantitív állítást is, számításaim szerint 2050-es dekarbonizált villamos energia összetétel feltételezésével a hőszivattyús rendszer kibocsátása csak 1-2 kg CO₂-eq/(m²év).

3. tézis

*A tézis újszerűnek tartom, mivel nemcsak az üzemeltetési hatásokat vizsgálja, hanem a beépített hatások szerepét és megtérülését és számszerűen meghatározza a megtérülési időt különböző rendszerekre. A tézis egy MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET-ben 2024-ben és egy BUILDING AND ENVIRONMENT-ben 2025-ben D1-es publikációval támasztja alá. **Kérem a jelöltet határozza meg, hogy a megadott megtérülési évek milyen pontosak, azaz mekkora a hiba és az épülettechnikai rendszer beépített hatásának elhanyagolása mekkora hibát okoz? Az eredmények pontosságát hogyan lehet ellenőrizni? A feltett kérdések megválaszolása után a tézis el tudom fogadni.***

A környezeti hatásban kifejezett megtérülési idők számításakor a rendszereket a rendelkezésre álló adatok mellett igyekeztem minél teljesebben figyelembe venni. A szakirodalomban az épületgépészeti rendszer beépített hatását általában elhanyagolják, de számításaim egy olyan kutatás alapján készültek, ahol részletesen meghatároztuk a fűtési- és melegvíz rendszerbe beépített anyagmennyiségeket kondenzációs gázkazán, hőszivattyú és biomassza kazán esetén (Gergely et al., 2025) (4.3.5. fejezet). 20 családi ház mintáépületre számítottuk ki tételesen az anyagmennyiségeket (hőtermelők, hőleadók, elosztó hálózat, szerelvények) a fűtési kapcsolási tervek és alaprajzok alapján. Bizonyos feltételezéseket azonban kénytelen voltam tenni az adathiány miatt, pl. a hőtermelők beépített környezeti hatását egy adatsor alapján arányosítással határoztam meg a hőszükséglet függvényében. Ezen túl több termékre az anyagösszetétel alapján becsültem a környezeti hatásokat. A napelemek, napkollektorok, szellőzőrendszer esetén azecoinvent adatsorokkal számoltam. A jövőben a gyártóknak az épülettechnikai rendszerrelemekre is kötelező lesz majd a karbonlábnyom megadása, tehát pontosabb számításokat lehet majd végezni specifikus rendszerekre is.

A 12. táblázatban tizedes jegy pontosságra adtam meg a megtérülési időket, ez a minta átlagértékére vonatkozott, de ha a teljes mintát nézzük, kb. $\pm 0,5$ év a szórás. A megtérülési idők az elérhető általános adatokkal jó közelítésnek tekinthetők.

Az épülettechnikai rendszer beépített hatásának elhanyagolása által okozott hiba az M6.4. mellékletben látható különböző rendszerek esetén. Kondenzációs gázkazán esetén csak $\sim 0,5$ kg CO₂-eq/(m²év) a beépített GWP, de napelem alkalmazásával már 2-2,5 kg CO₂-eq/(m²év) is lehet. Az egyéb hatáskategóriákban (pl. ADP-e) még jelentősebb az elhanyagolás hibája.

4. tézis

A tézis a váz kerámias építési rendszerek esetén egy tól-ig tartományt ad meg a beépített GWPre, amely egy közel kétszeres tartomány. Nem adja meg a széles tartomány okait csak egy példát a társasházak nagyobb terhelés miatti nagyobb szerkezeti igénybevételt. A fentiek alapján az eredményeket ebben a formában nem tudom tudományos szempontból elfogadni.

A tézisben valóban elég széles tartományt jelöltem meg (8,9- 17,7 kg CO₂-eq/m²év). A 6.1.1. fejezetben épülettípusokra is megadtam az értékeket: „Az egyszintes családi házak tartománya 11,3-16,7 kg CO₂-eq/m²év között mozog. A kétszintes családi házak fajlagos értékei alacsonyabbak (8,9-12 kg CO₂-eq/m²év), ami egyrészt az épületek kompaktabb formájával magyarázható, másrészt a feltételezett könnyűszerkezetes tetőtér kialakítással, melynek köszönhetően a beépített anyagok mennyisége nem nő jelentősen, de a fajlagos érték csökken. Társasházak esetén a tartomány 10,5-17,7 kg CO₂-eq/m²év, mivel a pince/ garázsszintek és a nagyobb szerkezeti igénybevételek miatt nagyobb az anyagfelhasználás.”

6. tézis:

*A 6. tézis egy nagyon fontos kérdést vizsgál mennyire és hogyan valósítható meg karbonsemlegesség épületeknél. Megállapítása szerint a karbonsemlegesség eléréséhez nem elegendő csak az üzemeltetési vagy a beépített hatások csökkentése, hanem a teljes életciklusra vetített kibocsátásokat kell mérsékelni. Egyetlen helyszíni megújuló energiaforrás nem biztosítja a karbonsemlegességet, de több megújuló rendszer kombinációja jelentős csökkentést eredményez, bár a teljes életciklusra vetített nettó nulla mérleg még így sem érhető el minden épület típusnál, a leírtakkal egyetértek. **Egy kérdés merült fel, nem családi házak esetén hogyan valósítható meg a teljes életciklusra vetített nettó nulla mérleg?** A tézist egy ENERGY REPORTS-ban 2022-ben megjelent többtársszerzős, de elsőszerzős 27 oldalas cikkel támaszt alá. A tézist ezért elfogadom.*

Ebben a fejezetben és tézisben azt vizsgáltam, hogy elméleti síkon, nettó mérlegben teljesíthető-e a karbonsemlegesség egy épület esetén. Azonban ahogy a korábbi válaszokban is jeleztem, egyetértek bírálónak azon felvetésével, hogy a karbonsemlegesség elérését nem feltétlen egy épület szintjén kell teljesíteni, hanem a teljes gazdaság, az építőipar, a villamos energia hálózat dekarbonizációja szükséges ehhez. A villamos energia dekarbonizációja az építőanyag gyártási folyamatokra is ki fog hatni, de bizonyos iparágakban pl. cementgyártás esetén szén-dioxid megkötő és tároló (CCS) vagy hasonló technológiák alkalmazása is szükséges lesz a kibocsátások csökkentéséhez. Azonban az épületszintű vizsgálatok is fontosak, mivel nem elég a termelési oldalon csökkentést elérni, a felhasználói oldalon is minimalizálni kell a

kibocsátásokat. Ez a beépített karbonban a megelőzéssel (pl. meglévő épületek újrahasználata, kevesebb új építés), anyaghasználat csökkentéssel- optimalizálással, az anyagok körforgásban tartásával érhető el, míg a használati oldalon az energiaigény csökkentése, a fosszilis energiahordozók kivezetése és megújuló energiaforrások minél nagyobb arányú hasznosítása szükséges. A karbonsemlegesség célkitűzése minden iparágra kiterjedő jelentős erőfeszítések révén teljesíthető.

7. tézis

A 7. tézist a közel nulla energiaigényű lakóépületekhez javasolható referencia- és határértékek meghatározásával foglalkozik, meghatározza módszertanával az összesített energetikai jellemzőre $76 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{év})$, az üzemeltetési GWP-re $20 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{év})$, valamint a teljes életciklusra vetített GWP-re $35 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \cdot \text{év})$ határértékeket. A tézist egy ENERGY POLICY 2014-es D1-es, és egy INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT 2024-es Q1-es cikkel támaszt alá, a jelölt mind a két cikkben első vagy egyedüli szerző. A disszertációban a vonatkozó fejezetre számos kérdést tettem fel, azok megválaszolása után a tézis el tudom fogadni.

A fejezetre vonatkozó kérdéseket fentebb igyekeztem megválaszolni, bízom benne, hogy válaszaim kielégítőek.

8. tézis:

A nyolcadik tézis a kilencedik fejezet alapján a meglévő épületállomány ötven éves időtartamára vizsgálja a karbantartás, a bontás és a mélyfelújítás hatását az üvegházhatású gázkibocsátás (GWP) alakulására. A tézis második része a vizsgált minták alapján megállapításokat fogalmaz meg a beépített, az újjáépítés és a mélyfelújítás CO_2 -egyenértékű kibocsátására vonatkozóan, és megerősíti, hogy a mélyfelújítás a legkedvezőbb megoldás. A tézis a Sustainable Buildings – Construction Products & Technologies: Proceedings of the International Sustainable Building Conference, Graz 2013 konferencia-kiadványra, valamint az Environmental Engineering and Management Journal (Q3, 2014) cikkekre támaszkodik. A tézis alapjául szolgáló kilencedik fejezettel kapcsolatban számos kérdést fogalmaztam meg; azok kielégítő megválaszolása esetén a tézist elfogadhatónak tartom.

A fejezetre vonatkozó kérdéseket fentebb igyekeztem megválaszolni, bízom benne, hogy válaszaim kielégítőek.

9. tézis:

A kilencedik tézis a kilencedik fejezet alapján meghatározza a beépített és az üzemeltetési kibocsátások arányát meglévő és új épületek esetén, ötven éves vizsgálati időszakra. Megállapítja, hogy gyenge energiahatékonyságú épületeknél a beépített hatások a teljes életciklus 10–15%, jobb energiahatékonyságú épületeknél 20–25%, míg új épületeknél 40–50% között alakulnak az anyaghasználat és az energiahatékonyság javulása miatt. A tézis hangsúlyozza, hogy a meglévő épületállomány környezeti hatásának csökkentése érdekében a

mélyfelújítás a legfontosabb feladat, míg új építések esetén a beépített hatások mérséklésére is törekedni kell. A tézis a DENZERO International Conference 2013 konferenciaanyagára, valamint az Environmental Engineering and Management Journal (Q3, 2014) cikkre támaszkodik. A tézis alapjául szolgáló kilencedik fejezettel kapcsolatban számos kérdést fogalmaztam meg; azok kielégítő megválaszolása, továbbá a számszerű adatok hibáinak bemutatása után a tézist elfogadhatónak tartom.

A fejezetre vonatkozó kérdéseket fentebb igyekeztem megválaszolni, bízom benne, hogy válaszaim kielégítőek.

10. tézis:

A tézis megállapítja, hogy a vizsgált tartományban a hőszigetelés vastagságának növelése általában csökkenti az összesített GWP-t, és környezeti szempontból nincs felső korlátja, de a határhaszon 20 cm után jelentősen csökken; ugyanakkor biomassza-fűtés esetén bizonyos vastagság felett a kibocsátás növekedhet. Ez egy fontos eredmény, de a 10. fejezetben – amely fejezet az alapja a tézisnek – az szerepel, hogy „Biomassza-fűtés esetén 0,15 m hőszigetelésvastagság esetén minimumpont alakul ki az 5. típusnál, az ennél nagyobb vastagságok kis mértékben már növelik az összesített kibocsátást (50. ábra). Jó energiahatékonyságú épület esetén biomassza-fűtéssel a hőszigetelés növelése egyáltalán nem bizonyul kedvezőnek (M10 melléklet).” Kérem, ezt az ellentmondást feloldani.

A jelölt három cikket mutat be a tézis igazolására: Advanced Materials Research (2014, Q4), Automation in Construction (2020, D1) és International Journal of Life Cycle Assessment (2023, Q1). A bemutatott ellentmondás feloldása után a tézist el tudom fogadni.

A 10. tézis fő megállapítása gázkazán és hőszivattyú esetén érvényes. A tézis kifejtésében viszont hozzátettem: „Alacsony ÜHG kibocsátású hőtermelő esetén (pl. biomassza) az üzemeltetési kibocsátások jelentősen csökkennek, **ezért a hőszigetelés kevésbé befolyásolja a teljes életciklusra vetített GWP-t, akár növelheti is.** Más hatáskategóriákat is figyelembe véve azonban a súlyozott eredmények ebben az esetben is 30-60 cm optimális vastagságot mutatnak.”

Tehát kiemeltem, hogy a hőszigetelés alacsony kibocsátású energiahordozó esetén növelheti a teljes GWP-t. Biomassza esetén a GWP hatáskategóriában 0,15 m, illetve 0 cm mutatott optimumot az 5. és 23. típusnál. Az üzemeltetési kibocsátások annyira alacsonyak, hogy a hőszigetelés vastagsága érdemben nem csökkenti az üzemeltetési kibocsátást. Ahogy az 50. ábrán is látszik, a különbségek az életciklus GWP-ben nagyon kicsik, az 5. típusnál 0 cm esetén 7,44 kg CO₂-eq/(m²év), az optimális 15 cm-es vastagság esetén 6,05 kg CO₂-eq/(m²év), míg 30 cm vastagságnál 6,2 kg CO₂-eq/(m²év) a GWP. Az eleve jó energiahatékonyságú 23. típusnál a hőszigetelés vastagság növelése egyáltalán nem előnyös, a legalacsonyabb kibocsátások a 0 cm-hez tartoznak.

Alacsony kibocsátású energiahordozó esetén is érdemes azonban hőszigetelni, mert más hatáskategóriákban, pl. biomassza esetén a PM (szálló por) kategóriában a maximális vastagságnál van a minimális környezeti hatás (M10.1. táblázat).

Még egyszer nagyon köszönöm a rendkívül alapos bírálatot és konstruktív kérdéseket, megjegyzéseket. Bízom benne, hogy kérdéseire és felvetéseire kielégítő válaszokat adtam.

Budapest, 2026.01.19.

.....
Dr. Szalay Zsuzsa

Irodalomjegyzék:

- Andersen, R., & Negendahl, K. (2023). Lifespan prediction of existing building typologies. *Journal of Building Engineering*, 65(December 2022), 105696. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105696>
- 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>
- BBSR. (2017). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>
- Beleznay, É., Budai, H., Huszár, D., Jenei, A., Márkus, P., Schmidt, A., Szalay, Z., & Szarvas, G. (2023). *Zéró Karbon Ajánlás*. https://www.hugbc.hu/resources/docs/HuGBC_Ajanlas_ZeroKarbon_Nagy.pdf (letöltés 2025.12.17.)
- Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulou, D., Nakos et al., C., Paroussos, L., Fragiadakis, K., Tsani, S., Karkatsoulis et al., P., Fragkos, P., Kouvaritakis et al., N., Höglund-Isaksson, L., Winiwarter, W., Purohit, P., ... Kesting, M. (2016). EU Reference Scenario 2016: Energy, Transport and GHG emissions trends to 2050. In *European Commission*. <https://doi.org/10.2833/9127>
- Csoknyai, T. (2022). *A magyarországi lakóépület-állomány energetikai modellezése, a korszerűsítés lehetőségei*. MTA doktori értekezés. https://real-d.mtak.hu/1472/7/dc_2011_22_doktori_mu.pdf
- 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.)
- ÉKM. (2023). *9/2023. (V.25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról*. <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>
- European Commission. (n.d.). *EU Building Stock Observatory*. <https://building-stock-observatory.energy.ec.europa.eu/database/> (2026.01.10)

- European Commission. (2025). *Commission Delegated Regulation (EU) of 16.12.2025. amending Annex III to Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council as regards the Union framework for the national calculation of life-cycle global warming potential*. https://energy.ec.europa.eu/document/download/a13f9997-fe46-40ec-b158-86149e978624_en?filename=C_2025_8723_1_EN_ACT_part1_v5.pdf (2026.01.10.)
- European Union. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. In *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. In *Official Journal of the European Union* (Vol. 1275, pp. 1–68). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive
- Galvin, R., & Sunikka-Blank, M. (2016). Quantification of (p)rebound effects in retrofit policies - Why does it matter? *Energy*, 95, 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.034>
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112442>
- Horváth, M., Gergely, L. Z., Takács, Z., Szagri, D., Szalay, Z., & Csoknyai, T. (2025). High saving potential at low cost: Decreasing heating demand by operation in the existing building stock. *Journal of Building Engineering*, 111(113153). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113153>
- IEA. (2025a). *IEA Energy mix Denmark*. <https://www.iea.org/countries/denmark/energy-mix> (2026.01.12)
- IEA. (2025b). *IEA Energy mix Hungary*. <https://www.iea.org/countries/hungary/energy-mix> (2026.01.12)
- Joint Research Centre. (2019). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*.
- Kompetenzzentrum “Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen.” (2006). *Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten. Info-Blatt Nr. 4.2*.
- MSZ EN 17243. (2021). *Épületek energetikai teljesítőképessége. A primerenergia-tényezők (PEF) és CO₂-kibocsátási együtthatók meghatározása és megadása*.
- MSZ EN ISO 52000-1. (2017). *Épületek energetikai teljesítőképessége. Átfogó kiértékelés*.
- Naplopó Kft. (n.d.). *A napenergia kimeríthetetlen, tiszta és ingyenes*. <https://www.naplopo.hu/miert-napenergia/kimerithetetlen-tiszta-es-ingyenes> (letöltés 20205.12.21.)
- Odyssee database*. (n.d.). <https://www.indicators.odyssee-mure.eu/energy-efficiency-database.html> (2025.12.19)
- Satola, D., Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Wiberg, A. H., & Gustavsen, A. (2021). How to define (net) zero greenhouse gas emissions buildings: The results of an international survey as part of IEA EBC annex 72. *Building and Environment*, 192(January), 107619.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107619>

- Social- og Boligstyrelsen. (n.d.). *Bygningsreglementet (BR18)*. <https://www.bygningsreglementet.dk/> (2026.01.12.)
- 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., & Kiss, B. (2017a). Dinamikus paraméterek az energiaigény számításában. 1. rész: Nettó fűtési energiaigény avagy szorozzuk-e hasznosítási tényezővel? *Magyar Épületgépészet*, LXVI.(9), 20–27.
- Szalay, Z., & Kiss, B. (2017b). Dinamikus paraméterek az energiaigény számításában. 2. rész: Nettó hűtési energiaigény. *Magyar Épületgépészet*, LXVI.(11), 12–18.
- Troi, A., Tribus, M., Costa, A., Haberer, W., Parisi, D., & Sparber, W. (2008). Towards Zero Energy Renovation: Ex-Post Building in Bolzano/Italy. *PLEA 2008, October*, 22–24.
- Xu, X., Yu, H., Sun, Q., & Tam, V. W. Y. (2023). A critical review of occupant energy consumption behavior in buildings : How we got here , where we are , and where we are headed. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182(May), 113396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113396>