

HŐSZIVATTYÚK ÉS A LÉGKONDITIONÁLÓ BERENDEZÉSEK KÜLTÉRI EGYSÉGEINEK KÖRNYEZETI LEVEGŐRE GYAKOROLT HATÁSA

IMPACT OF OUTDOOR UNITS OF HEAT PUMPS AND AIR CONDITIONING EQUIPMENT ON AMBIENT AIR

GELLAI LÁSZLÓ – GÉCZI GÁBOR
gellai.laszlo@mate.sz.hu

Összefoglalás

A hőszivattyúk (HP) és a légkondicionáló berendezések (AC) az energiafelhasználás és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése szempontjából kulcsfontosságú technológiává váltak. Hatékonyságukkal és komfortthatásukkal számos tanulmány foglalkozik, de talán kevésbé kimutatott a kültéri egységek környezeti levegőre gyakorolt hatása, környezetterhelése. A kültéri egységek ventilátorai lokális légáramlásokat idéznek elő, amelyek befolyásolják akár a hőmérséklet eloszlást, akár a légszennyező anyagok, elsősorban szállópor (PM) koncentrációját. Hosszútávú megfigyeléseket végeztünk kollégiumi szobákhoz tartozó erkélyek levegőminőségét illetően elsősorban a szállópor koncentráció megfigyelésével. Olyan esetekben amikor a légkondicionáló berendezés kültéri egysége az erkélyen került elhelyezésre kimutatható a tisztító hatása, illetve attól függően, hogy a berendezés milyen üzemmódban üzemel a hőmérsékletre gyakorolt hatása is.

Kulcsszavak: kültéri egység, ventilátor, levegőminőség, szállópor

JEL kód: Q53, Q55

Abstract

Heat pumps (HPs) and air conditioning (AC) systems have become key technologies in reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. Their efficiency and comfort-related benefits have been widely studied; however, the environmental impact of their outdoor units—particularly their effects on ambient air quality—has received less attention. The fans of outdoor units generate local airflows that can influence both temperature distribution and the concentration of air pollutants, primarily particulate matter (PM). We conducted long-term observations of air quality on balconies connected to dormitory rooms, focusing mainly on PM concentration. In cases where the outdoor unit of the air conditioner was installed on the balcony, a measurable “cleaning effect” was observed. Depending on the operating mode of the unit, its impact on the ambient temperature was also detectable.

Keywords: outdoor unit, fan, air quality, particulate matter (PM)

Bevezetés

A légkondicionáló berendezések és hőszivattyúk az épületenergetikai rendszerek meghatározó elemeivé váltak az elmúlt évtizedekben. Míg a légkondicionálók elsődlegesen a hűtési igényeket szolgálták ki, addig a hőszivattyúk a fűtési rendszerek alternatívájaként jelentek meg, kihasználva a környezeti levegő, a talaj vagy a víz hőjét. Azonban a technológiai fejlődés és az energiahatékonysági szempontok előtérbe kerülésével e két rendszer közötti határvonal egyre inkább elmosódott. A modern légkondicionálók és hőszivattyúk gyakran kombinált funkciókkal rendelkeznek, lehetővé téve a fűtést és a hűtést egyaránt, így mindkét rendszer környezeti hatásai összefonódnak.

A globális trendek is tükrözik ezt az elmozdulást. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) adatai szerint világszerte mintegy 2 milliárd légkondicionáló berendezés üzemel, és várhatóan 2050-re ez a szám 5,6 milliárdra nő, ami évente 10 új berendezés eladását jelenti másodpercenként (IEA, 2024). Az európai piacon a hőszivattyúk elterjedése is dinamikusan nőtt: 2022-ben 2,77 millió egységet értékesítettek, ami 39%-os növekedést jelentett az előző évhez képest (EHPA, 2023). Azonban 2023-ban a piac növekedése 5%-ra csökkent, részben a gazdasági bizonytalanságok és az energiaárak ingadozása miatt (IEA, 2024).

Magyarországon a hőszivattyúk piaca szintén fejlődött: 2022 végén mintegy 36 000 hőszivattyú üzemelt, és 15 000 új egységet értékesítettek, ami 9,5%-os piaci részesedést jelentett (JRC, 2023). Azonban az iparági adatok szerint 2024-ben a hőszivattyú-értékesítés 23%-kal csökkent, visszatérve a 2021-es szintre, ami a politikai bizonytalanságok és a támogatási rendszerek változásaival hozható összefüggésbe (NIRANJAN, 2025).

Ezek a trendek rávilágítanak arra, hogy a légkondicionálók és hőszivattyúk elterjedése nemcsak az energiafogyasztás növekedését, hanem a környezeti levegőre gyakorolt hatásokat is magával hozza. A kültéri egységek működése során kibocsátott hő és zaj jelentős hatással lehet a helyi mikroklimára és az élővilágra. Ezen hatások megértése és kezelése elengedhetetlen a fenntartható városi környezet kialakításában.

A technológiai fejlődés és a fenntarthatósági szempontok figyelembevételével számos tanulmány foglalkozik. A kutatások régóta keresik a választ arra, hogyan minimalizálhatók a rendszerek környezeti terhelései, miközben a hatékony működés a fő cél.

MEYER és munkatársai (2024) a levegő-levegő hőszivattyúk (*Air to Air Heat Pump*, AAHP) bevezetésének lehetőségét értékelte Toulouse-ban, Franciaországban, ahol a hagyományos térfűtés elektromos és gázforrásokra koncentrálódott. Megállapították, hogy az AAHP-k 57–76%-kal csökkentik a fűtési energiafogyasztást, az elektromos fűtési energiafogyasztás pedig 6–47%-kal csökken. A tanulmány kitér a kültéri levegő hőmérséklet megfigyelésekre és állítja, hogy a hideg időszakokban a felszínhez közeli levegő hőmérséklete legfeljebb 0,5°C-kal csökken, ami az érzékelhető hőáramlás csökkenésének tudható be, és ez jelentősen nem befolyásolja az AAHP-k működési hatékonyságát. Megállapítja azt is, hogy míg Toulouse fűtési energiamixe jelentős energiamegtakarítást tesz lehetővé, ugyanakkor egyes városokban az elektromos energiafogyasztás növekedhet. A tanulmány rávilágít a fűtés terén elért technológiai fejlődés és annak szélesebb körű környezeti és politikai következményei közötti bonyolult egyensúlyra, és fontos információkat nyújt a városi energiapolitika és a fenntarthatósági törekvések számára.

SAADI és HERMANUCZ (2022) átfogó képet nyújtott a légkondicionálók és hőszivattyúk elterjedésének globális, európai és magyarországi trendjeiről, valamint bemutatták a kültéri egységek környezeti levegőre gyakorolt hatásait. Bemutatták a hőszivattyúk alkalmasságát arra, hogy megfelelő alternatívát jelentsenek a lakóépületek fűtésére és hűtésére a gázválság idején, összehasonlítva az elmúlt tíz év primerenergia-felhasználását az európai piaci felhasználás volumenével, a CO₂-kibocsátással. Ezen túlmenően a gödöllői kutatócsoport vizsgálta a hűtőközegváltás hatását a hőszivattyú hatékonyságára (HERMANUCZ, 2022, SAADI et al.,

2025) illetve bizonyították a kültéri egység leolvasztási ciklusainak gyakoriságából adódó energetikai jellemzőket (HERMANUCZ et al, 2022).

Az energetikai jellemzők és hatékonyságot befolyásoló vizsgálatok mellett már megjelentek a beltéri levegőminőséggel foglalkozó tanulmányok. HANSEN és munkatársai (2008) nem találtak bizonyítékot arra, hogy a léghűtő berendezések rontanák a levegő minőségét. Kutatásaik során mérték a 0,5 és 5 μm közötti részecskéket, az ultrafinom részecskéket és a baktériumok számát 38 léghűtő berendezés kivezetése közelében, különböző munkahelyeken. Kontrollméréseket végeztek 17 léghűtő berendezéssel nem rendelkező helyiségben. A légkondicionálóval felszerelt munkahelyeken és a kontroll helyiségekben mért baktériumszámok között nem volt különbség. A részecskék és az ultrafinom részecskék koncentrációja a léghűtő berendezésekkel felszerelt helyiségekben alacsonyabb volt, mint a kontroll helyiségekben.

MAHFOUZ és munkatársai (2019) bizonyították, hogy a légkondicionáló berendezések belső szűrőiben visszatartott levegőben lévő porminták elemi összetétele a helyi por tipikus ásványi összetételét tükrözi, míg a nyomelemek összetétele a beltéri források hatását mutatja Katar állam, Doha városának 12 helyszínén. Az összegyűjtött AC szűrőpor minták jelentős mértékben tartalmaztak kültéri ásványi részecskéket, kipufogógázból származó közlekedési kibocsátást, ipari forrásokat, valamint beltéri tevékenységek, például dohányzás hatását.

MANGIN és munkatársai (2025) egyrészt bizonyították a rossz kültéri levegőminőségnek a beltéri levegőminőségre gyakorolt hatását, másrészt a különböző fűtési, szellőzési és légkondicionáló (HVAC) rendszerek hogyan befolyásolják a kültéri $\text{PM}_{2,5}$ behatolását a kereskedelmi épületekbe. Vizsgálataikat 18 hónapok keresztül végezték és a levegőminőség meghatározására az ún. low-cost szenzort használták 17 beltéri és 2 kültéri helyszínen kihelyezve.

PEI és SUN (2023) tanulmányukban a légkondicionálók által generált szagokra fókuszáltak, amelyek befolyásolják az épületekben érzékelt levegőminőséget. Azonosították a szagvegyületeket, és elemezzék a hűtési beállítási hőmérséklet hatását a kibocsátott szag intenzitására. Az eredmények azt mutatják, hogy az állandó frekvenciájú légkondicionáló használata során keletkező szag időszakos és erősebb, mint a változó frekvenciájú légkondicionáló használata során keletkező szag, ami a kompresszor eltérő működési stratégiájának köszönhető, amely befolyásolja a hűtőtekercs felületén lévő kondenzvíz párolgását. A magasabb hűtési beállítási hőmérséklet erősebb szagot eredményez, mivel a kondenzált vízből több hidofil szaganyag szabadul fel. Véleményük szerint a légkondicionálókban maradó kondenzált víz mennyiségének csökkentése lehet a kulcs a tisztítás előtti szagkibocsátás szabályozásához.

Szintén a szagokra való hatást mutatták ki RATHNAYAKE és munkatársai (2021) tanulmányukban, ahol elsősorban egy AAHP rendszer hűtőhatását vizsgálta sertésistállóban. A 19 hetes kísérleti időszak alatt az AAHP hűtőrendszerhez csatlakoztatott sertésistálló belső hőmérséklete, szén-dioxid (CO_2) és az áramfogyasztás is szignifikánsan ($p < 0,05$) csökkent a hagyományos istállóhoz képest. Az ammónia (NH_3) koncentrációja az elválasztási és hizlalási fázisban, valamint a hidrogén-szulfid (H_2S) koncentrációja az összes időszakban alacsonyabb volt az AAHP-vel felszerelt sertésistállóban. A első 19 héten nem volt szignifikáns különbség a két istállóban tartott sertések növekedési teljesítménye tekintetében. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az AAHP hűtőrendszer környezetbarát, megújuló energiaforrásként alkalmazható sertéstelepeken a fenntartható sertéstermelés és a jobb levegőminőség érdekében, anélkül, hogy kedvezőtlenül befolyásolná a termelékenységi paramétereket.

A legújabb kutatások azonban már kitérnek a kültéri egységek ventilátorai által okozott hatások vizsgálatára is. A klímaberendezések és hőszivattyúk ventilátorai elsősorban axiális vagy radiális típusúak, feladatuk a hőcserélőkön átáramló levegő keringtetése. Az általuk keltett légáramok sebessége a ventilátor közvetlen közelében 2-5 m/s is lehet, de 2-3 m távolságban

már 0,5-1 m/s-ra csökken (PARK et al., 2019). Az áramlások jellemzője a magas turbulenciaintenzitás (10-30%), ami fokozza a hő, és anyagtranszportot, ezáltal kedvez az allergének és a részecskék hosszabb távú (távolabbi) szállításának.

A ventilátorok környezeti hatását bemutató cikkek leggyakrabban a zajterheléssel foglalkoznak. A ventilátorok működésével együtt jár a zajkibocsátás is, amelyet nemcsak az elektromos motor és a mechanikai komponensek okoznak, hanem az áramló levegő okozta aerodinamikai zaj (ún. "flow noise") következménye. A kültéri egységek zajkibocsátása nagymértékben függ a ventilátor nagyságától, teljesítményétől, fordulatszámától és az alkalmazott aerodinamikai kialakításuktól. A zajspektrum általában 100-800 Hz közötti tartományokban mutat csúcsokat. Egyébként a zajszint jellemzően 45-60 dB(A) (ZHANG, 2020), ami meghaladja az Egészségügyi Világ Szervezet (WHO) által éjszakára ajánlott 40 dB-es küszöböt (WHO, 2018). A tartós zajexpozíció alvászavart, kardiovaszkuláris zavarokat, stresszt és extrém esetekben csökkent életminőséget okozhat. Ezen zajhatások ökológiai következményeit sem lehet figyelem nélkül hagyni, mivel a folyamatos alacsony frekvenciájú zaj befolyásolhatja a madarak kommunikációját és a rovarok tájékozódást is. A mesterséges légmozgás befolyásolhatja a rovarok repülési mintázatát, a madarak táplálékszerző viselkedését és a növények mikroklímáját. (különösen jellemző ez zárt udvarok esetén) és városi környezetben. Ezen hatások hosszabb távon csökkenthetik a városi biodiverzitást, különösen abban az esetben amikor a légkondicionáló berendezések ventilátorai folyamatos üzemmódban működnek (DUQUETTE et al., 2021, CRALL et al., 2017).

Ugyanakkor a ventilátorok által mozgatott levegő és a hőszivattyúk által leadott hulladékhő nagyban hozzájárul a városi hőszigetelés (Urban Heat Island, UHI) erősödéséhez. Kutatások szerint a nagy sűrűségben telepített klímaberendezések és hőszivattyúk 0,5-1°C-kal emelhetik a környezeti hőmérsékletet (SALAMANCA, 2014). Ez lokális komfortcsökkenést és a hűtési energiaigény növekedését eredményezheti, továbbá fokozza az energiafogyasztást és terheli a környezetet. Ez a hatás kumulatív, és a kifejezetten a nyári hőhullámok idején veszélyes, amikor a városi lakások egyébként is hőstressznek vannak kitéve. Budapesten a melegebb nyári napokon a városi hőszigetelés elérheti a 4-6 °C-ot a belvárosi és a peremkerületek között (GÁL et al., 2016).

A gépek ventilátorai által keltett turbulens áramlások fokozzák a PM_{2,5} és a PM₁₀ részecskék és a pollen, valamint az egyéb allergének terjedését. A sűrűn lakott városi területen a AC rendszerek által gerjesztett áramlások jelentősen növelhetik a lebegő szennyeződések, mikroorganizmusok horizontális diszperzióját, így rontva a levegőminőséget. Ez a hatásuk különösen problémás lehet allergiás vagy asztmás embereknél, nem beszélve arról, hogy vannak olyan városrészek, ahol a levegőminőség alapból nem megfelelő. (ZHAO et al., 2004).

JIN és munkatársai (2020) tanulmánya a tanulmány a légkondicionáló rendszerekből származó antropogén hőemissziók hatását vizsgálja a levegő hőmérsékletére és a légkondicionáló energiafogyasztására Berlinben, Németországban. Szimulációkat végeztek a CCLM/DCEP-BEM modellező rendszer alkalmazásával, amely a COSMO-CLM (CCLM) mezoszkálájú éghajlati modell és a városi Double Canyon Effect Parameterization (DCEP-BEM) paraméterezési rendszer, valamint egy épületenergetikai modell összekapcsolt rendszere, a 2018-as nyári időszakra vonatkozóan. A DCEP-BEM modell úgy lett kialakítva, hogy kifejezetten kiszámítsa a városi épületekből származó antropogén hőemissziót és a hőáramlás átjutását az épületek és a légkör között. A 22 °C-os cél beltéri hőmérséklet mellett egy városi helyszín napi átlagos légkondicionáló energiafogyasztása egy szoba alapterületére vetítve 9,1 W m², ami 35%-kal több, mint egy külvárosi helyszín esetében. Ez az energiamegtakarítás a városi hősziget-hatásnak és a két helyszín közötti eltérő épületparamétereknek köszönhető. A légkondicionáló energiafogyasztás délután éri el a maximumot. A cél beltéri hőmérséklet emelkedésével a légkondicionáló energiafogyasztás körülbelül 16%-kal csökken minden 2 K-es beltéri hőmérséklet-változás esetén.

ZHONG és munkatársai (2023) EnergyPlus-Fluent modellezési megközelítést alkalmazva vizsgálták a kültéri egységek elhelyezésének viszonyát a hűtési terhelésre és a beltéri PM_{2.5}-expozícióra és a kültéri levegőminőségre. A tanulmányban kidolgozott légáramlási, energia- és szennyezésmo­dell pontosságának biztosításához szélsatorna-kísérletekből és terepi mérésekből származó adatokat használtak. A tanulmány bemutatta, hogyan lehet a külső árnyékoló eszközöket és a kültéri egységeket összekapcsolni az épületek energiahatékonyságának és a lakók egészségének javítása érdekében. HERMANUCZ és HOLLÓ (2024) módszertant dolgoztak ki a hőszivattyúk elhelyezésének körülményeit vizsgálva a lokális hőmérséklet viszonyok mérésére.

ASKARI és CHAN (2025) tanulmányukban azt a megállapítást tették, hogy az illékony kémiai termékek egyre nagyobb szerepet játszanak a városi légszennyezésben, mivel a közlekedés és az ipari kibocsátásokhoz hasonló, már ismert források hozzájárulása csökken. A beltéri kibocsátások a szerves gázok nagy részét teszik ki, így az épületek potenciálisan hozzájárulnak a környezeti légszennyezéshez. Ez a tanulmány egy torontói belvárosi vizsgálati sorozat eredményeinek bemutatásával szemlélteti az épületek kibocsátásait, elemezve a több egységből álló lakóépület (110 egység) mechanikus szellőzőrendszerének beszívott és kifűjt levegőáramában található illékony szerves vegyületeket (VOC-k). A beltéri kibocsátások miatt a VOC-okat gyakrabban és magasabb koncentrációban (a medián szint körülbelül 22%-kal magasabb) mutatták ki a kipufogóáramban, mint a beszívott levegőben, ami arra utal, hogy az épület nettó VOC-forrásként szolgál a környezeti levegő számára. Különösen a ragasztók, testápolási termékek és tisztítószer­ek kibocsátásához kapcsolódó illékony metil-sziloxánok és monoterpenoidok medián koncentrációja a kifűvott levegőben körülbelül 2–5 µg/m³ volt, míg a beszívott levegőben 0,2–0,5 µg/m³.

A klímaberendezések és hőszivattyúk kültéri egységeinek környezeti hatásai kiemelhetően vizsgálhatók olyan közép-európai nagyvárosokban, ahol a telepítési sűrűség, az épület-állomány és az urbanisztikai elrendezés nagyon hasonló, de a klímapolitika, az energiahatékonysági intézkedések és a zöld infrastruktúra eltér. Ilyen szempontból Bécs-Budapest kiváló esettanulmányi párt alkotnak, hiszen hasonló éghajlati viszonyok mellett eltérő környezetpolitika és építészeti gyakorlat jellemzi őket. A vizsgált két városban elhelyezett klímaberendezések ventilátorai által generált zajterhelésre vonatkozó adatokat Bécsben a Környezetvédelmi Hivatal (Wiener Umweltanwaltschaft) és a Bécs városi környezetvédelmi hivatala (Magistratsabteilung 22 – Umweltschutz, MA22) közöl, Budapesten pedig az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer (OKIR). Mindkét városban a kültéri egységek által okozott zaj lokális forrásként jelenik meg, amelyek hatása jelentős, különösen lakóövezetekben. Budapesten jellemzően az elavult, nem vagy ritkán karbantartott egységek zajterhelése gyakran meghaladja a WHO által javasolt éjszakai határértéket. Bécsben ezzel szemben jól látható a zajszintek alacsonyabbak, köszönhetően az energia címkézési kötelezettségnek és az építési engedélyek szigorúbb feltételeinek.

Mindkét városban jellemző a városi hőszigetelés, amelyet az intenzív beépítés, a zöldfelületek hiánya és az antropogén hőleadás (pl. klímaberendezések működése) okoz. A Sentinel-3 műhold és a Copernicus Urban Atlas alapján készített UHI-térképek azt mutatják, hogy Budapesten a nyári éjszakai hőmérsékletkülönbség a belváros és a külső kerületek között elérheti a 6 °C-ot, a belső kerületekben pedig kimutatható az olyan épülettömbök lokális melegedése, ahol a klímaberendezések sűrűsége magas. Ezzel ellentétben Bécsben ez az érték jellemzően 3–4 °C, amit részben ellensúlyoz a zöldtetők, árnyékolás és zöldfelületek aránya.

A hőkamerás mérések Budapesten kimutatták, hogy a kültéri egységek működése lokálisan 0,8–1,3 °C-os hőmérséklet-emelkedést idézhet elő 2–4 méteres körzetben. Bécsben hasonló mérések 0,5–1,0 °C-os értékeket mutattak.

Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (European Environment Agency, EEA) légszennyezettségi adatbázisa alapján 2023-ban mindkét városban problémát jelentett a PM_{2.5}-

koncentráció, különösen fűtési időszakban és nyári hőhullámok idején. A klímaberendezések légáramai nem új szennyezést generálnak, de újraelosztóak és turbulens keveredés révén visszajuttatják a szennyező anyagokat a légterbe, különösen zárt udvarokban, belső kertekben, ahol a szellőzés gyenge. (BRUGGER et al., 2022; ÖSTERREICHER és SATTTLER, 2018, SALAMANCA, 2014; PONGRÁCZ et al., 2009; VUCKOVIC et al., 2015)

Az irodalmi áttekintésből egyértelműen kimutatható, hogy a hőszivattyúk és légkondicionáló berendezések terjedése már nem csak a hatékonyság és pozitív környezetvédelmi hatások kutatását eredményezik, de kiterjednek mind a beltéri, mind a kültéri egységek okozta környezetterhelése vizsgálatára. Kiemelhető a kültéri egységek vizsgálatánál, hogy a kutatások már nem kizárólag a zajterheléssel foglalkoznak, hanem gondot fordítanak a lokális léghőmérséklet változás kimutatására. A legújabb kutatások pedig már a légszennyező anyagok koncentrációjára gyakorolt hatásokat is keresik. Ezen területen szeretnénk mi is bemutatni eredményeinket, amely elsősorban a szállópor koncentráció alakulását mutatja be egyetemi területen található kollégiumi épületnél alkalmazott légkondicionáló berendezések alkalmazásánál.

Anyag és módszer

Kutatásaink során Gödöllőn a Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem kollégiumi épületében iroda jelleggel üzemeltetett szobáihoz kapcsolódóan végeztünk hosszútávú (12 hónap) és rövidtávú (1-2 nap) méréseket. Két egymás melletti szoba egyforma elrendezésű, de csak az egyik van ellátva (típusú) légkondicionáló berendezéssel (GREE Split Klíma, GWH12ACC-K6DNA1F/I, Gree Electric Corp., China). A légkondicionáló berendezés kültéri egysége a déli tájolású erkélyen került elhelyezésre. Értelmszerűen az AC nélküli iroda erkélye üres volt. Hipotézisünk szerint az AC kültéri egységének hatása van az erkély, mint mikrokörnyezet levegőjének a paramétereire, minőségére.

Mért paraméterek

Vizsgálataink során a Miskolci Egyetemen a LIFE IP HUNGAIKY project keretében kifejlesztett lézer abszorpciós levegő monitorokat alkalmaztunk, amely alkalmas szállópor koncentrációk ($PM_{2,5}$; PM_{10}); hőmérséklet (T , °C); relatív páratartalom (RH, %) és légköri nyomás (p , hPa) folyamatos mérésére és az adatok tárolására.

Az erkélyekre 2-2 db mérőegységet helyeztünk, amelyek percnként mintavételezést végeztek. Az egységek 401, 402, 404 és 405 jelzéssel vannak ellátva, mindegyik önálló wifi kapcsolattal a kiolvashatóság biztosítására. Az AC működését ALMEMO 2590 típusú (Ahlborn, Németország) 4 csatornás mérő és adattároló egységhez illesztett WIND-U típusú (HSTORE Hungary Kft. Magyarország) kanalas szélességhmérő szenzorral és TES-1350A típusú (TES Electrical Electronic Corp, Taiwan) zajmérővel detektáltuk, szintén percnként mintavételezéssel.

Hosszútávú mérések

A hosszútávú vizsgálatokat 2024. október 15-én kezdtük és jelenleg is folyamatban van. Célja, hogy a kültéri egységgel rendelkező erkély levegőminőségét össze tudjuk hasonlítani a referenciául szolgáló kültéri egység nélküli erkély levegőminőségével. Az egy éves periódus már lehetőséget biztosít mind a fűtési mind a hűtési céllal alkalmazott AC egység hatásának igazolására. A mért jellemzők tulajdonságait elsősorban az időjárási körülmények határozzák meg illetve szennyező forrásként tekinthető a kollégium előtti parkoló közlekedése, valamint a 30 méter és 250méter távolságban elhelyezkedő gázüzemű hőközpontok kibocsátása.

Rövidtávú mérések

2025 szeptemberében és októberében több alkalommal mesterséges szennyezőforrásokkal igazoltuk a kültéri egység hatásait. JFS-1 típusú (Jorge Fireworks, Lengyelország) füstszórót alkalmazva 40 másodpercig mesterséges porforrással terheltük mindkét erkély levegőjét és folyamatos mintavételezéssel figyeltük a tisztulási időszakot. A füstbombák alkalmanként 2000-2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2.5}$ koncentrációt idéztek elő (ez a 24 órás egészségügyi határérték többszöröse), amely pár perc alatt felhígult és az erkély levegőminősége ismét kiválónak volt mondható. Az időbeli lefutás alakulása nyújt lehetőséget a kültéri egység hatásának vizsgálatára.

Mérésekhez a szenzorokat az 1. ábrán látható elrendezésben helyeztük el. A szélső sebesség és zajmérőt a kültéri egység ventilátora elé helyeztük az üzemidő meghatározásához. A kültéri levegő paramétereinek méréséhez az erkélyeken egymástól 1 méter távolságban 90 centiméter magasságban helyeztük el a szenzorokat. A füstszóró az erkély padlózatán kerültek elhelyezésre. A kültéri klímaegység korábban telepítve, a faltól fél méter távolságra az erkély szélén volt található. A kültéri egységgel rendelkező erkély szenzoraira OU (Outdoor Unit), míg a kültéri egységgel nem rendelkező erkélyt EB (Empty Balcony) jelzéssel hivatkozunk.



**1. ábra A kültéri egységgel rendelkező erkély (OU) a mérőszensorokkal /
Figure 1. Balcony equipped with an outdoor unit (OU) and measurement sensors**

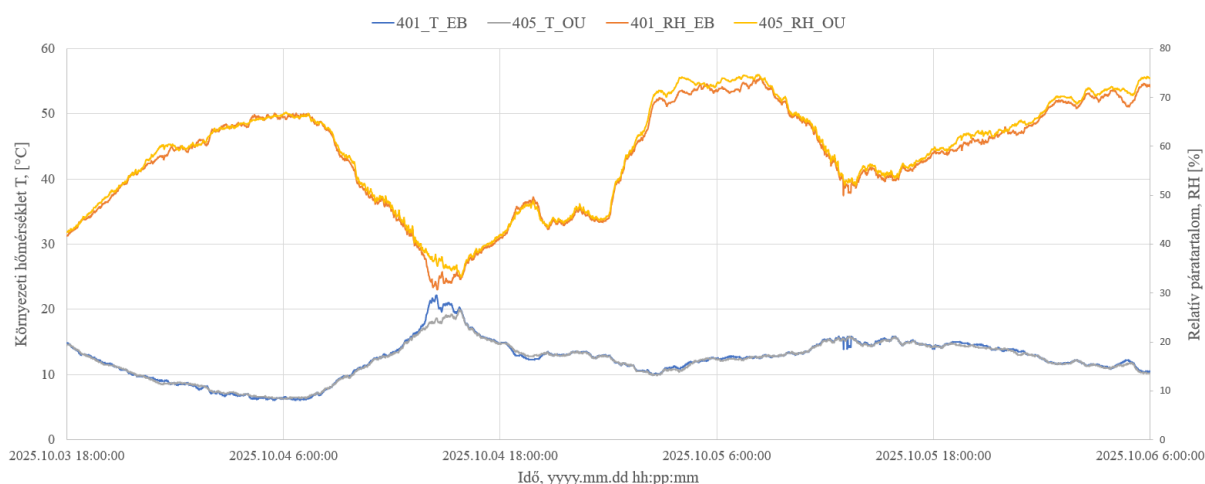
Adatok feldolgozása

Mind a hosszútávú, mind a rövidtávú mérések eredményeit Microsoft Excel táblázatkezelő program segítségével jelenítettük meg és segítségével készítettünk diagrammokat és adatelemzést. Statisztikai elemzéshez az erkélyek levegőminőségi paramétereit Pearson-féle korreláció (r_i) analízissel hasonlítottuk össze, meghatároztuk a négyzetes középérték hibát (Root Mean Squared Error) (RMSE_i) a paraméter párokra, illetve rövidebb intervallumokon az átlagokat kétmintás t-próbával hasonlítottuk össze, a szórásnégyzetek egyenlőségét F-próbával ellenőriztük.

Eredmények és következtetések

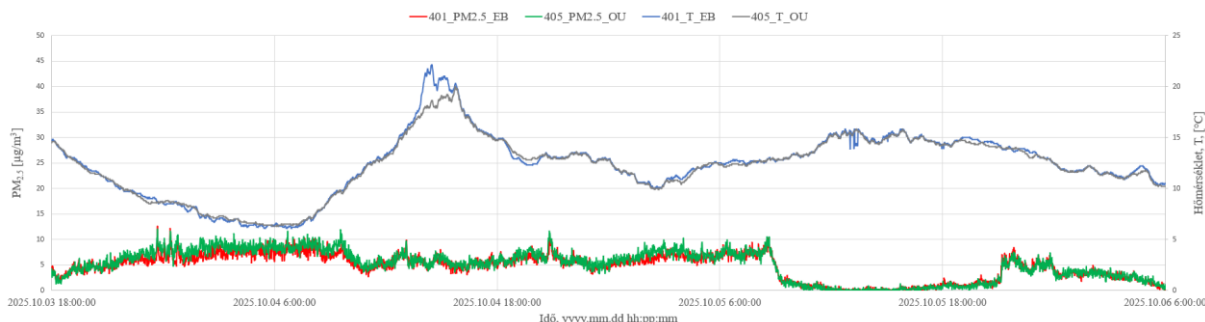
Hosszútávú mérések eredményei

Az alábbi diagrammok a hosszútávú mérési sorozatból kiragadott időszakok, amelyek jól illusztrálják a mért paramétereket az idő függvényében. Az OU paraméterek a kültéri egységgel (Outdoor Unit) telepített erkély hőmérsékletét és relatív páratartalmát, illetve szállópor koncentrációját mutatja. Az EB paraméterek az üres erkély (Empty Balcony) vagyis a légkondicionálóval nem rendelkező szoba erkélyén mért eredményeket ábrázolja. Több hetes intervallumot ábrázolva, a felbontás miatt a két erkély eredményei szinte letakarják egymást azonos mért jellemzők esetén, ezért pár napos időszakot ragadtunk ki, ahol már látszanak a különbségek. Olyan periódusokat választottunk, amelyek során a légkondicionáló berendezés hűtési vagy fűtési feladatot látott el.



2. ábra Összehasonlító eredmények a környezeti levegő hőmérsékletére és relatív páratartalmára vonatkozólag / Figure 2. Comparative results of ambient air temperature and relative humidity

A 2. ábrán egy 2025 októberi hétvége látszik, amikor egyik szobában sem tartózkodtak személyek és a légkondicionálóval ellátott szoba hőmérsékletét 20°-ra szabályoztuk. Ezáltal az AC berendezés többször is fűtési üzemmódba kapcsol. Jól látható például, hogy 2025 október 4-én a késő délutáni órákban több fokos hőmérséklet különbség alakult ki a két erkélyen mérhető környezeti levegő hőmérsékletében és a különbség a relatív páratartalomban is kimutatható.



3. ábra Összehasonlító eredmények a környezeti levegő hőmérsékletére és a szállópor koncentrációra PM_{2.5} / Figure 3. Comparative results of ambient air temperature and PM_{2.5} particulate matter concentration

A 3. ábrán ugyan ezen időszakot vizsgálva a két erkélyen mért $PM_{2.5}$ szállópor koncentrációt hasonlítottuk össze, megmutatva a hőmérsékleti értékeket is. A $PM_{2.5}$ tekintetében érdekes jelenség, hogy 2025. október 5-én 10:00ótól a $PM_{2.5}$ koncentráció gyakorlatilag nullára csökkent, amely a megélénkült szélnek, a gyakori szellőzéseknak volt köszönhető. Annak ellenére, hogy mind a hőmérséklet, mind a relatív páratartalom és a szállópor koncentrációt ábrázoló görbék lefutása hasonló a Pearson-féle korrelációs együtthatók is magas értéket mutatnak a hőmérsékletre ($r_T = 0,9913$) és a $PM_{2.5}$ koncentrációra ($r_{PM} = 0,9441$) is a teljes ábrázolt intervallumra. Ugyanakkor két mintás t-próbával igazoltuk, hogy 95%-os konfidencia szint mellett egyik paraméter esetében sem tekinthető a sokaság átlaga azonosnak. A 1. sz. táblázatban a vizsgált paraméterek tekintetében mutatjuk be példaként az egy napos eredmények statisztikai igazolását. A szórásnégyzetek egyenlőségét minden esetben F-próbával igazoltuk.

1. számú táblázat Kétmintás t-próba nem-egyenlő szórásnégyzeteknél a szállópor koncentrációkra alkalmazva / Table 1. Two-sample t-test for unequal variances applied to particulate matter concentrations

	$PM_{2.5_EB}$	$PM_{2.5_OU}$	PM_{10_EB}	PM_{10_OU}
Várható érték	6,319	6,910	19,594	20,015
Variancia	2,038	2,891	19,987	23,307
Megfigyelések	1440	1440	1440	1440
t-érték	-10,110		-2,427	
P(T<=t) egyszélű	6,29434E-24		0,007633838	
t kritikus egyszélű	1,6453		1,6453	
Eredmény	$ t_{érték} > t_{kritikus\ egyszélű}$		$ t_{érték} > t_{kritikus\ egyszélű}$	

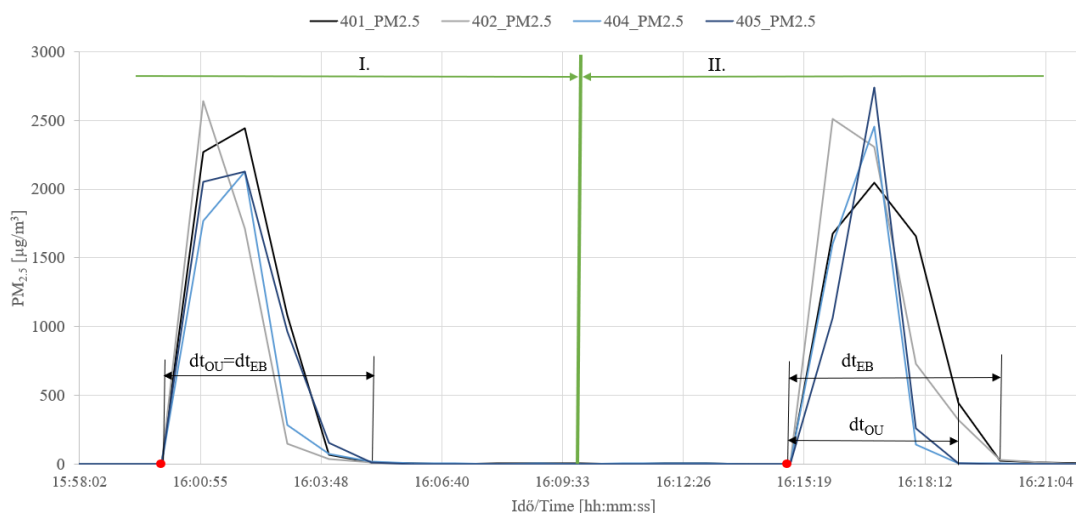
További statisztikai elemzéssel megállapítható, hogy a kültéri egységgel rendelkező erkély mikro környezetében a levegő hőmérséklete átlagosan 2,1 °C kal alacsonyabb, mint a referencia erkély levegőhőmérséklete a fűtési üzemmódban működő AC egység esetén. Hűtési üzemmódban a kültéri egység által leadott hőmennyiség átlagosan 1,6°C-kal emeli az erkély hőmérsékletét.

A négyzetes középérték hibák (RMSE) a kültéri egység működését jól mutatták. A hőmérsékleti értékek összehasonlítása során amikor nem működött a kültéri egység az értéke alacsony $RMSE_T = 0,835$, működés következtében a $RMSE_T = 3,067$ értékre változik. Hasonló különbséget a szállópor koncentrációra is kimutattunk a mesterséges porterhelés nélküli időszakban, kültéri egység működése nélkül $RMSE_{PM} = 1,173$, amely $RMSE_T = 7,572$ re változott a kültéri egység működése közben.

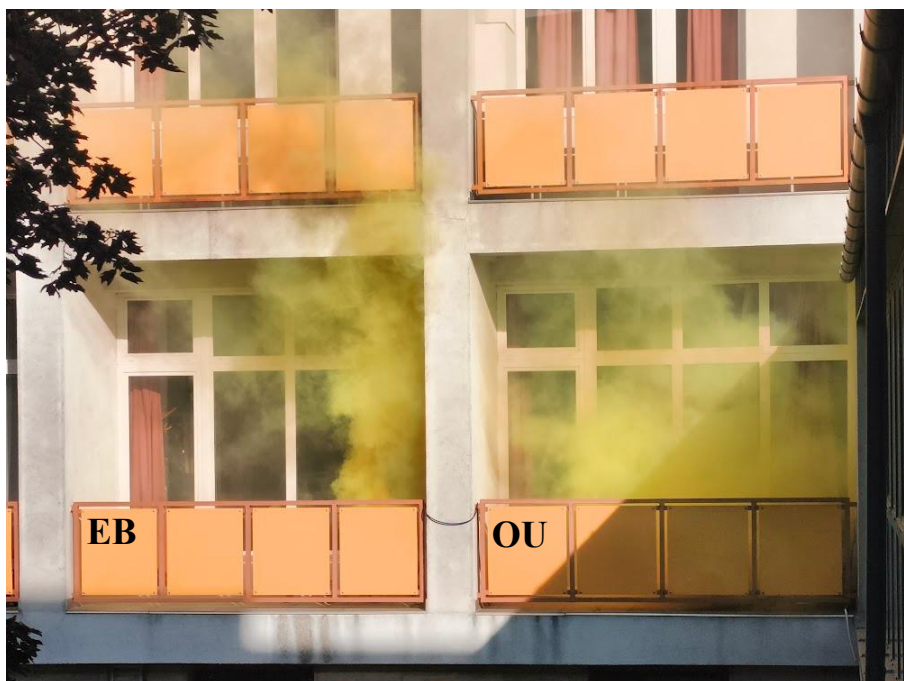
Rövidtávú mérési eredmények

2025 szeptember és október hónapban mesterséges környezetterhelést hoztunk létre füstbombák segítségével. A füstbombák kibocsátása rövid időre (40 sec) nagyon magas porkoncentrációt eredményezett, amely tisztulását a légkondicionáló berendezés kültéri egységének ventilátora gyorsította. A 4. ábrán bemutatjuk az október 03-án végzett mérési sorozatot, ahol az erkélyek porkoncentrációját mutatjuk be az idő függvényében 2 különböző rendeltetésű szakaszban. Az I. szakaszban az AC egység le volt kapcsolva, ennek értelmében a kültéri egység nem működött. A II. szakaszban a légkondicionáló fűtési üzemen volt és a kültéri egység ventilátora működött, közvetlenül a kültéri egység előtt 4,5 m/s légsebességet detektáltunk.

Látható, hogy a füstbombák által terhelt (szennyezett levegő minősége a ventilátor működése nélkül is 3-4 perc alatt letisztul és visszaáll az eredeti koncentrációs szintre és tisztulási idő azonos $dt_{OU} = dt_{EB}$. Ugyanakkor a II. szakasz bizonyítja, hogy a kültéri egység ventilátora segít a légszennyezők eltávolításában/ felhígításában $dt_{OU} < dt_{EB}$. A 5. ábra fényképe jól illusztrálja a füstszóró működésének pillanatában a kültéri egység jobban szétteríti a szállópor részecskéket.



4. ábra Mesterséges porterhelés következtében a szállópor koncentráció változás az idő függvényében a különböző üzemeltetési szakaszokban / Figure 4. Changes in particulate matter concentration as a function of time under artificial dust loading during different operational phases



5. ábra A mesterséges füstterhelés során kialakuló füstkép / Figure 5. Smoke pattern formed during artificial smoke loading

Az erkélyek közötti különbséget az öt perces erősen szennyezett időtartamot kiragadva a Pearson-féle korreláció analízis is mutatja a különbséget ($r_{PM}=0,8723$).

Következtetések

Mind a hosszútávú, mind a rövidtávú mérésekkel igazoltuk hipotézisünket, amely szerint a AC berendezés kültéri egységének hatása van a levegő minőségét meghatározó paraméterekre. Ezt elsősorban a hőmérséklet, a páratartalom és a szállópor koncentrációk időben változásával bizonyítottuk. Esetünkben az erkélyen elhelyezett légkondicionáló berendezés kültéri egysége üzemelés (fűtés vagy hűtés) során az erkély mikrokörnyezet szállópor koncentrációját hatékonyan csökkenti. Ezt elsősorban a mesterséges terhelés alkalmazásával tudtuk bizonyítani, a közlekedés eredetű szennyező források nem jelentenek jelentős terhelést a vizsgált környezetre. A lokális hatás bizonyítása után érdemes foglalkozni a létesítmény egészére jellemző kültéri egységek elhelyezésével és hatásával.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Kutatási Kiválósági Program 2025 (KKP 2025) támogatásával valósult meg.

Hivatkozott források

- ASKARI, A. – CHAN, A.W.H. (2025): Volatile organic compound emissions from a multi-unit residential building to ambient air *Environmental Sciences: Processes Impacts*, 2025, 27, 1714–1730 <https://doi.org/10.1039/D4EM00689E>
- BRUGGER, K. – SCHMIDT, A.E. – DELCOUR, J. (2022): Krankenhausaufenthalte im direkten Zusammenhang mit Hitze und Sonnenlicht in Österreich (2002–2020). Factsheet. 8p. <https://jasmin.goeg.at/id/eprint/2279/>
- CRALL, J.D. – CHANG, J.J. – OPPENHEIMER, R.L. – COMBES, S.A. (2017): Foraging in an unsteady world: Bumblebee flight performance in field-realistic turbulence. *Interface Focus*, 7(1), 20160086. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2016.0086>
- DUQUETTE, C.A. – LOSS, S.R. – HOVICK, T.J. (2021): A meta-analysis of the influence of anthropogenic noise on terrestrial wildlife communication strategies. *Journal of Applied Ecology*, 58(6), 1112–1121. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13880>
- EUROPEAN HEAT PUMP ASSOCIATION (EHPA) (2023): Heat Pumps in Europe - Key Facts & Figures. 61p. https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/11/November-2023_HP-Key-Facts_compressed.pdf
- EUROPEAN HEAT PUMP ASSOCIATION (EHPA) (2024): European Heat Pump Market and Statistics Report 2024, 16p. https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf
- GÁL, T. – SKARBIT, N. – UNGER, J. (2016): Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network *Hungarian Geographical Bulletin* 65 (2) 105–116. <http://doi.org/10.15201/hungeobull.65.2.2>
- HANSEN, D. – HILGENHÖNER, M. – BENNER, D. – POPP, W. (2008): Influence of air cooling units on air quality – A pilot project, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211, (3–4), 258–262, <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.06.009>
- HERMANUCZ P. – HOLLÓ G., (2024): Módszertan hőszivattyú kültéri egységének hőmérsékleti viszonyainak mérésére *Journal of Central European Green Innovation* 12 (1–2). 101–109. <https://doi.org/10.33038/jcegi.6370>
- HERMANUCZ, P. (2022): A hűtőközeg váltás hatása a hőszivattyú energetikai jellemzőire *Journal of Central European Green Innovation* 10: Suppl 1. 123–134. <https://doi.org/10.33038/jcegi.3505>

- HERMANUCZ, P. – BENÉCS, J. – BARÓTFI, I. (2022): Levegő hőforrású hőszivattyú leolvasztási ciklusának energetikai vizsgálata *Magyar Épületgépészet* 1-2. 7–12.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2024): World Energy Outlook 2024: Cooling drives electricity demand, especially in developing countries. <https://iifir.org/en/news/world-energy-outlook-2024-cooling-drives-electricity-demand-especially-in-developing-countries>
- JIN, L. – SCHUBERT, S. – HEFNY SALIM, M. – SCHNEIDER, C. (2020): Impact of Air Conditioning Systems on the Outdoor Thermal Environment during Summer in Berlin, Germany. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4645. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134645>
- JOINT RESEARCH CENTRE (JRC) (2023): Hungary: Status of the Heat Pump Market. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC137131/JRC137131_013.pdf
- MAHFOUZ, M.M. – YIGITERHAN, O. – ELNAIEM, A.E. – HASSAN, H.M. – ALFOLDY, B. (2019): Elemental compositions of particulate matter retained on air condition unit's filters at Greater Doha, Qatar. *Environ Geochem Health* 41, 2533–2548. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00304-8>
- MANGIN, T. – BARRETT, Z. – PALMER, Z. – TANG, D. – NIELSON, S. – SLEETH, D. – KELLY, K. (2025): Understanding the effect of outdoor pollution episodes and HVAC type on indoor air quality, *Building and Environment*, 278, 112978. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112978>
- MEYER, D. – SCHOETTER, R. – van REEUWIJK, M. (2024): Energy and environmental impacts of air-to-air heat pumps in a mid-latitude city. *Nat Commun* 15, 5474. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49836-3>
- NIRANJAN, A. (2025): Heat pump sales in Europe fall 23% to pre-Ukraine war levels *The Guardian*. (2025, February 18). <https://www.theguardian.com/environment/2025/feb/18/heat-pump-sales-in-europe-fall-23-to-pre-ukraine-war-levels>
- ÖSTERREICHER, D. – SATTLER, S. (2018): Maintaining Comfortable Summertime Indoor Temperatures by Means of Passive Design Measures to Mitigate the Urban Heat Island Effect—A Sensitivity Analysis for Residential Buildings in the City of Vienna. *Urban Science*, 2(3), 66. <https://doi.org/10.3390/urbansci2030066>
- PARK, S.M. – RYU, S.Y. – CHEONG, C. – KIM, J.W. – PARK, B.I. – AHN, Y.C. – OH, S.K. (2019): Optimization of the Orifice Shape of Cooling Fan Units for High Flow Rate and Low-Level Noise in Outdoor Air Conditioning Units. *Applied Sciences*, 9(23), 5207. <https://doi.org/10.3390/app9235207>
- PEI, J. – SUN, L. (2023). Odor from Building Air Conditioners: Emission Characteristics, Odor Compounds and Influencing Factors. *Sustainability*, 15(2), 1495. <https://doi.org/10.3390/su15021495>
- PONGRÁCZ, R. – BARTHOLY, J. – DEZSŐ, ZS. – LELOVICS, E. (2009): Urban Heat Island Effect of Large Central European Cities Using Satellite Measurements of Surface Temperature. In: *The 89th American Meteorological Society Annual Meeting: 8th Symposium on the Urban Environment*. 11–15.
- RATHNAYAKE, D. – MUN, H.S. – DILAWAR, M.A. – CHUNG, I.B. – PARK, K.W. – LEE, S.R. – YANG, C.J. (2021): Effect of Air Heat Pump Cooling System as a Greener Energy Source on the Air Quality, Housing Environment and Growth Performance in Pig House. *Atmosphere*, 12(11), 1474. <https://doi.org/10.3390/atmos12111474>
- SAADI, H. – HERMANUCZ, P. (2022): Penetration and environmental impact of heat pump systems in Europe *Mechanical Engineering Letters* 23, 145–156.
- SAADI, H. – KORZENSZKY, P. – HERMANUCZ, P. (2022): Optimizing cooling efficiency: A statistical comparison of modified PVT and conventional PV panels under variable water flow rates *Mechanical Engineering Letters* 26. 26–38.

- SALAMANCA, F. – GEORGESCU, M. – MAHALOV, A. – MOUSTAOU, M. – WANG, M. (2014): Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10), 5949–5965. <https://doi.org/10.1002/2013JD021225>
- VUCKOVIC, M. – MALEKI, A. – KIESEL, K. – MAHDAVI, A. (2015): Simulation-Based Assessment of UHI Mitigation Measures in Central European Cities. *SIMULATION*. 8p. 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, 8p. BS2015, Hyderabad, India, December 7–9, 2015
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2018): *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. 181p. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/f53c45ba-11d3-4502-a424-c1cf49f5a053/content>
- ZHANG, X. – HU, Y. – GENG, S. – HU, Q. – WANG, H. (2020): Research on noise reduction scheme of heat pump unit in a square. *Journal of Chemistry*, 2020, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2020/1237034>
- ZHAO, B. – ZHANG, Y. – LI, X. – YANG, X. – HUANG, D. (2004): Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms. *Atmospheric Environment*, 39(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.002>
- ZHONG, X. – ZHANG, Z. – ZHANG, R. – WU, Z. (2023): Combined Effects of Exterior Shading and A/C Heat Rejection on Building Energy Consumption and Indoor Air Pollution Exposure. *Buildings*, 13(10), 2440. <https://doi.org/10.3390/buildings13102440>

Szerzők

Gellai László

PhD hallgató

Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem

Környezettudományi Doktori Iskola

gellai.laszlo@mate-sz.hu

Dr. Géczi Gábor PhD.

habilitált egyetemi docens

Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem

Környezettudományi Intézet

Környezetanalitika és Környezettechnológia Tanszék

geczi.gabor@uni-mate.hu

A műre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik: [CC-BY-NC-ND-4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

