

**INTELLIGENT VENTILATION
STRATEGIES IN HOME
AUTOMATION SYSTEMS****INTELLIGENS SZELLŐZTETÉSI
STRATÉGIÁK A DOMOTIKA
RENDSZERBEN**MÁRKOS Szilárd Attila¹**Abstract**

The development of home automation and intelligent building management has created new opportunities for automating ventilation, optimizing energy consumption, and harmonizing comfort and health considerations. The aim of this study is to provide a comprehensive and systematic perspective on the architectural structure of various ventilation technologies, from the technical characteristics of basic components to the development of complex demand-based ventilation strategies. Special focus is given to the measurement and derivation of occupancy levels, which is the most critical input parameter for control. The study describes predictive, artificial intelligence-based control, which is one of the most effective ventilation strategies based on system forecasts. The parameters that determine air quality (CO₂, relative humidity, PM, VOC) and their health and physiological risks are described in detail.

Keywords

Mechanical ventilation, predictive control, occupancy level, geo-fencing, air quality

Absztrakt

A domotika és az intelligens épületirányítás fejlődése új lehetőségeket teremtett a szellőztetés automatizálásában, az energiafelhasználás optimalizálásában, valamint a komfort és egészségügyi szempontok összehangolásában. A tanulmány célja, hogy átfogó és rendszerszintű perspektívát nyújtson a különböző szellőztetési technológiák architektúráis felépítéséről, az elemi komponensek műszaki sajátosságaitól kezdve egészen a komplex igényalapú szellőztetési stratégiák kialakításáig. Kiemelt fókuszot kap a foglaltsági szint mérése, származtatása, ami a szabályozás legkritikusabb bemeneti paramétere. A tanulmány ismerteti a prediktív, mesterséges intelligencián alapuló szabályozást, amely a rendszer előrejelzéseire támaszkodó egyik leghatékonyabb szellőztetési stratégia. Részletes ismertetésre kerülnek a levegő minőségét meghatározó paraméterek (CO₂, a relatív páratartalom, PM, VOC) valamint azok egészségügyi és élettani kockázatai.

Kulcsszavak

Gépi szellőztetés, prediktív szabályozás, foglaltsági szint, geo-fencing, levegőminőség

¹ markos.szilard@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0007-1044-6099 | university intern, Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering | egyetemi gyakornok, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

BEVEZETÉS

Életünk jelentős részét (60-90%) beltérben töltjük így a beltéri környezet minősége kiemelten fontos a mentális és a fizikális egészség megőrzése szempontjából. Számos terület hatással van a beltéri környezet minőségére, ilyenek például a beltéri levegő minőség, termikus komfort, akusztikai környezet, vizuális komfort, ergonómia, épületbiológiai tényezők és az okosotthon rendszerek. Ez a tanulmány a levegőminőségre és az azzal kapcsolatos rendszerek elemzésére korlátozódik. A beltér levegőminősége kiemelten fontos mivel közvetlenül hatással van az emberek egészségi állapotára és kognitív teljesítményére.

Az alacsony vagy zero energiaigényű épületek iránti kereslet és a különböző építési szabályozás megkövetelte az épületek filtrációs veszteségének minimalizálását. A légtömör épületek szellőztetése komoly kihívás elé állította az épületek üzemeltetőit. Ezen technológiai fejlődéssel jelentős energiamegtakarítás érhető el, különösen az alacsony energiaigényű épületek esetében, és egyúttal pontosabban szabályozható légcserét tesz lehetővé. Azonban a légtömör épületek megjelenése még jobban kiemeli a természetes szellőztetés korlátait, ezáltal a beltér levegő minőségére kedvezőtlenül hathat, elindulhatnak a penészesedési folyamatok és felhalmozódhatnak a különböző szennyezőanyagok, amik egészségügyi kockázatot jelentenének. Ezért az ilyen épületek légcseréjét, mesterséges szellőztetési rendszerek kiépítésével és szabályozási stratégiák kidolgozásával kell megoldani. Az USA-ban és több európai országban (Belgiumban, Franciaországban, Spanyolországban, Lengyelországban, Svájcban, Dániában, Svédországban, Hollandiában és Németországban) az építési szabályozások különböző irányelveket dolgoztak ki a mesterséges szellőztetés szabályozásával és a hozzá tartozó energetikai megtakarítások számításával kapcsolatban. A központi szellőztető rendszerrel ellátott épületek esetén az energiafogyasztásának számításakor csökkentés alkalmazható a készülék besorolásától függően 15% illetve 35%. [12]

Az épületek energiafelhasználásra vonatkozó szabályozások rendkívül szigorúak Dániában, Észtországban, Norvégiában, Svájcban és Svédországban. A közel nulla energia igényű épületek építési szabályozásánál, direkt módon nem térnek ki az eltérő szellőztetési megoldások alkalmazhatóságára, de egy ilyen alacsony energia felhasználású épület megvalósítása elképzelhetetlen igény alapú hőcserélős szellőztető rendszer üzemeltetése nélkül. [13]

A SZELLŐZTETÉS TECHNOLÓGIÁK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az épületek szellőztetésének megvalósítása két jól elkülönülő csoportra osztható, az egyik az ablaknyitós a másik a szellőztetőgépes. Az ablaknyitós csoport tovább bontható a hagyományos kézi ablaknyitás és a szabályozás által időzített aktuátoros ablaknyitós módszerre. A szellőztetőgépes csoporton belül megkülönböztetünk decentralizált (helyi) és centralizált (központi) szellőztetőgépes megoldásokat. [1][2] Az alábbiakban ezen technológiák műszaki sajátosságai kerülnek bemutatásra.

Kézi ablaknyitós szellőztetés

A legrégebbi formája a hagyományos (kézi) ablakokon keresztül történő szellőztetés, ilyenkor a légcseréje jelentős része az ablak nyitások alkalmával valósul meg, bár jellemzően az ilyen szellőztetési technikát alkalmazó épületeknél nem elhanyagolható a légzárási problémákból adódó természetes filtráció[3].

- A módszer előnyei közé sorolható, hogy nincs szükség többlet beruházásra, üzemeltetésének sem költség, sem energia vonzata sincs.
- Hátrányok közé sorolható, az, hogy folyamatos odafigyelést igényel a felhasználók részéről, ami miatt a tervezett szellőztetések megvalósítása esetlegessé válhat, ebből adódóan jelentős kockázata van a penész kialakulásának. A légcseré szakaszos, ezért a beltér levegő minősége nagy szórást mutat. Mivel nincs hőcserélő, ezért a nem kívánt hőkülönbség tiszta fűtési/hűtési veszteségnek tekinthető. A légcseré során az épületbe jutó levegő kezeletlenül érkezik, így a por és pollen terheltsége a helyi adottságoktól függ. Nem kívánt huzat-hatás léphet fel a szellőztetések időtartama alatt.[4]

Aktuátoros ablaknyitós szellőztetés

A kézi szellőztetés tovább fejlesztése a gépi ablaknyitós módszer. Az ablakokat aktuátorok nyitják, melyeket időzítést, nyitási mértékét és nyitvatartási idejét egy központi vezérlő szabályozza. A módszer az alábbi eltéréseket mutatja a kézi ablaknyitós szellőztetéshez képest.[5]

- A módszer előnye, hogy részben automatizált légcserével elkerülhető az alul vagy túlszellőztetés. A mennyeiben a rendszer érzékelőkkel felszerelt, akkor a pára- és szagcsok kezelhetők ezzel a penészedési kockázat csökkenthető, és a CO₂ és a VOC koncentráció bizonyos keretek között kordában tartható. Független a felhasználók külső beavatkozásaitól, így az ütemezett légcseré minden esetben megvalósul.[6]
- A módszer hátránya, hogy jelentős beruházási költsége van, mint például az ablaknyitó aktuátorok, különböző érzékelők, vezérlő, telepítési költségek mellett megjelennek az üzemeltetésének költsége is.[14]

Decentralizált gépi szellőztetés

A decentralizált rendszerben helységenként telepített berendezések működnek. A készülék a fali átvezetésben helyezkedik el, légcserét ezen keresztül végez. Jellemzően ellenáramú hőcserélővel rendelkeznek, az elszívás és a befűtés ideje megegyezik, ezalatt az átáramló levegő a hőmérsékletét egy kerámia hőcserélőnek adja át, ami ezt az ellenáramú működtetés során visszatáplálja a levegőbe.[14]

- A módszer előnye, hogy viszonylag alacsony beruházási költséggel kiépíthető, telepítése nem igényel jelentős átalakításokat, ami felújításoknál különösen előnyös. A berendezés része a vezérlés és a levegő minőség elemző szenzorok, így komplett légkezelő egységet kapunk. Hőviszanyerési hatásfoka magas 75-85%. Rendelkezik levegőszűréssel (osztály F5-F7), így ezzel csökkenthető a beszívott levegő pollen és szállópor koncentrációja. [15]
- A módszer hátránya, hogy egyrészt a helyi ventilátor működéséből eredő, másrészt a kültérből beszűrődő zajterhelése viszonylag magas. A helységenként beépített egységek megfelelő működését könnyen felboríthatja az egymásra kifejtett hatásuk, vagyis, a kialakult légnyomás különbségek miatt egységenként számottevően eltérhet a beszívott és a kifűjt levegő aránya, ami drasztikusan ronthatja a hőcserélési hatásfokot.[16]

Centralizált gépi szellőztetés

A rendszer egy központi légkezelő berendezésből, kiterjedt légcsatorna rendszerből, vezérlőből és levegőminőség szenzorokból áll. Általában egy zónás felépítésű, azonban motoros pillangószelepek beépítésével több zóna is kialakítható. Dedikált befűvási pontokat a száraz helyiségekben helyezik el, mint például a nappali vagy a hálósobák, az elszívási pontokat a nedves helyiségekben, konyha, fürdőszoba és a wc-ben alakítják ki. A légcsatorna rendszer tervezésekor kiemelt jelentőséggel bír a végpontok helyiségeken belüli elhelyezése. Csak abban az esetben biztosítható a beltér levegőjének teljes átöblítése, ha a légáramlás az egész helységen áthalad.

- A módszer előnye, hogy biztosítható a teljes légcseré, tartható a konstans, egészséges levegő összetétel. Hővisszanyerési hatásfoka rendkívül magas 80-90% entalpiás hőcserélővel. Szűrési teljesítménye rendkívül magas (F9 vagy HEPA). [17] Könnyen integrálható összetett domotika rendszerekbe. Zajterhelése alacsony, ami egyrészt abból ered, hogy a ventilátor egy távolabbi átmeneti tartózkodásra kijelölt helységben üzemel, másrészt a megfelelően méretezett légtechnikai hangcsillapító beépítése tovább csökkenti a ventilátor zajának terjedését.
- A módszer hátránya, hogy kifejezetten költségigényes, a légcsatorna hálózat helyigénye miatt, kiépítése a legtöbb esetben csak új építésű épületek esetén valósítható meg.[18]

INTELLIGENS SZELLŐZTETÉSI TECHNOLOGIÁK

Az intelligens szellőztetés célja a beltéri levegőminőség folyamatos biztosítása a lehető legalacsonyabb energia-felhasználás mellett. A korszerű rendszerek a valós idejű környezeti és használati adatokra alapozott automatizált vezérléssel működnek, amely az optimális légcseré, hőkomfort és energiahatékonyság együttes megvalósítását támogatja. Ezen technológiák szerepe az épületenergetikai követelmények szigorodásával, valamint a légtömörebb épületszerkezetek terjedésével párhuzamosan egyre inkább felértékelődik.

Beltéri terhelés és szennyezőanyag-koncentráció

A szenzor vezérelt rendszerek mérésből, vezérlésből és visszacsatolásból állnak. A beltér levegőminőségét számos levegőminőségszenzor figyel és a vezérlő a beérkezett adatok kiértékelése után az előzetesen beállított forgatókönyvet követi. A beltéri levegőminőséget befolyásoló tényezők a kémiai komponensek (pl. CO₂, VOC) a páratartalom, valamint a szálló por tartalom (PM_{2.5}, PM₁₀). Ahhoz, hogy kontextusba lehessen helyezni a különböző levegőminőségre befolyásoló komponensek jelentőségét, az alábbiakban ezeket és a megemelkedett jelenlétükből eredő egészségügyi kockázatokat ismertetem.

CO₂

A légkör CO₂-szintje jellemzően 400 ppm körül alakul. Jelenleg ezt tekintjük referenciának a beltéri levegő minőség kiértékelése során. Ez az érték elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok égetése miatt folyamatosan emelkedik. Az ipari forradalom előtt a légkör CO₂-szintje 280 ppm volt

A rosszul szellőztetett, nagy kihasználtságú terekben ez az érték 800-1000 ppm körül alakul. 1000 ppm koncentráció felett több tanulmány kimutatható negatív hatásokról számol be, így ez az érték tekinthető a kockázati küszöb határértékének.[7]

A megemelkedett CO₂-szint hatással van a következő képességekre/folyamatokra.:

- Kognitív teljesítmény és döntéshozatal: Lawrence Berkeley National Laboratory kutatói kimutatták, hogy 1000 ppm CO₂-szintnél a döntéshozatali teljesítmény több mérőskálán is szignifikánsan csökkent, és 2500 ppm körül drasztikusabb romlás jelentkezett. [8] Nicola Davis cikkében rámutatott arra, hogy 1400 ppm-nél egy csoportban az intelligencia- és problémamegoldási feladatok eredménye 50 %-kal rosszabb lett 550 ppm-hez viszonyítva. Tehát ha a CO₂-szint kis mértékkel meghaladja a kockázati küszöb értéket, akkor a kognitív képességeink drasztikusan csökkennek.[7]
- Komfortérzet, alvás: Wang és társai tanulmányukban azt vizsgálták, hogy különböző (680 ppm, 920 ppm és 1350 ppm) CO₂ koncentráció hogyan befolyásolja az alvásminőséget és a közérzetet. A kísérletben 10 ember vett részt és az eredmények azt mutatják, hogy a CO₂-koncentráció szintjének növekedésével az alanyok alvási nyugalma és elégedettsége fokozatosan csökkent.[9]
- Egészségügyi kockázat, fizikai tünetek: Rosszul szellőztetett helyiségekben a 100 ppm-enkénti CO₂-emelkedés +1.2–1.5-szeres eséllyel társulhat felső légúti irritációval például orr, torok vagy szemirritációval.[10] A CO₂ nagyobb koncentrációban növelheti a légzési frekvenciát, értágulatot válthat ki az agyi erekben.[11]

Relatív páratartalom

A relatív páratartalom hatással van az emberi komfortra az épületfizikai folyamatokra és a levegőminőségre.[19][20] A páratartalom befolyásolja a hőérzetünket a levegőben lévő kórokozók életképességét és penészesedési folyamatok kockázatát.[21] Emiatt a szellőztetési stratégiákban kiemelt figyelmet igényel.

Optimálisnak tekinthető páratartalom 40-60% között van, ez az tartomány biztosítja a nyálkahártyák megfelelő működését a hőérzet stabilitását és a kórokozók szaporodásának minimalizálását. Az ettől való eltérés pozitív vagy negatív irányba az alábbi problémákat veti fel.:

- Alacsony relatív páratartalom <40%: Szem és bőr irritáció jelenhet meg, növekszik a légúti kiszáradás kockázata, ami megkönnyíti a fertőzések terjedését. A hőérzet lecsökken, hidegebbnek érezzük a környezetünket a valós hőmérséklettől. Gyakoribb az elektrosztatikus feltöltődés. Az épületekben található természetes anyagok, mint például a fa érzékenyek az alacsony páratartamra, vetemednek az egyenetlen száradás miatt és repedések jelenhetnek meg rajtuk. [20]
- Magas relatív páratartalom >60%: Megemelkedik a penészgombák szaporodása különösen a 70%-os páratartalmat meghaladó környezetben. Továbbá allergiás és asztmatikus tünetek súlyosbodásához vezethet, és a diffúziós folyamatok révén az épületszerkezetbe jutva rontja a szerkezet hőszigetelő képességét.[21]

VOC (illékony szerves vegyületek)

Az illékony szerves vegyületek (VOC) a beltéri levegőminőség egyik legösszetettebb szennyezőanyag-csoportját alkotják. [22] Olyan anyagokról van szó, amelyek alacsony forráspontjuk következtében a szokásos beltéri hőmérsékleten is könnyen elpárolognak, így gázfázisban kerülnek a légkörbe.[23] A VOC-k esetében nem csak a közvetlen szennyezéssel kell számolni, hanem közvetett módon kémiai reakciók révén veszélyt jelenthetnek. A

főbb VOC források a következők: építőipari anyagok, bútorok, háztartási szerek, főzési folyamatok, dohányzás, emberi jelenlét anyagcsere, elektronikai eszközök.[24] Legveszélyesebb komponensek a formaldehid, benzol, toluol, xilolok, triklóretilén és egyéb oldószerek, ftalátok és égésgátlók származékai.[22]

PM2.5 / PM10 μm részecskék

A kis méretű részecskék vagy a direkt szellőztetés alkalmával, vagy a beltéri forrásokból kerülnek a levegőbe. [25] Ilyen forrás például a főzés, dohányzás, gyertya vagy kandalló használat. A levegőben ezek a részecskék mindig jelen vannak, csak a koncentráció a kérdés. Különböző irányelveket dolgoztak ki a szervezetek, mint például a WHO (World Health Organization), USA – EPA (Environmental Protection Agency) vagy az Európai Unió (EU). [26] A szervezetek megkülönböztetnek 24 órás átlagot és éves átlagot. A továbbiakban a földrajzi elhelyezkedés miatt csak a EU szabályozásával foglalkozom. Érdekes, hogy a EU szabályozása szerint a PM2.5 éves átlagának határértéke $25 \mu\text{m}/\text{m}^3$, ami 5-szöröse a WHO és 2-szerese a USA-EPA által elfogadott határértékeknek. A 24 órás átlag veszélyességi határérték értelemszerűen magasabb érték, hozzávetőlegesen 3-szorosa az éves átlagnak.

Egészségügyi hatások: A PM 2.5 μm -nél kisebb részecskék jelenléte jelentősebb egészségügyi kockázatot jelent, mint a PM 10 μm méretű részecskék, mivel a tüdő mélyebb részeibe tudnak hatolni, így a természetes kiürülés csak részlegesen valósul meg és a folyamat sokkal több időbe kerül a szervezetnek. Egészségügyi kockázatok közé tartoznak a különböző irritációk (nyálkahártya, szem), asztma és allergiás reakciók erősödése és krónikus légzőszervi betegségek is előfordulhatnak (hőrgyhurut, tüdőfunkciók csökkenése) [27]

A gépi szellőztetés során a kültéri szennyezők beltérbe jutása minimalizálható, a megfelelő HEPA szűrő alkalmazása mellett, a beltéri szennyezők esetében, kerülendő a dohányzás, nyílt láng használata és a főzésnél célszerű mindig konyhai elszívót használni.

FOGLALTSÁGI SZINT

Jelenlét érzékelés

Az igény alapú szellőztetés egyik kulcs tényezője a foglaltsági szint, amely meghatározza az épületen belüli személyek számát, térbeli elhelyezkedésüket és jelenlétük időbeli eloszlását.[28] Ez azért kiemelten fontos, mert a legtöbb nem kívánatos anyag felhalmozódása az emberi jelenléttel köthető össze. Ilyen például a légzési folyamatok terméke a CO_2 a különböző kozmetikumok/takarítószer használat során kipárolgó VOC és főzéssel, fürdéssel, mosással, lélegzéssel a levegőbe juttatott páratartalom és a főzés során felszabaduló PM2.5/10.[29]

Az igény alapú szellőztetés célja, hogy úgy szabályozza a légcserét, hogy ezzel a helység levegőjének különböző összetevőinek arányát az egészségügyi határértéken belül tartsa, a lehető legkevesebb energia felhasználásával.[30]

A foglaltsági adatok a rendszer bemeneti paramétereit képezik, amelyek alapján akár zónánként szabályozni képes a légcserét.

A jelenlét érzékelés adatai a következő szenzorokból érkehetnek.:

- Passzív infravörös érzékelő: Ezek az eszközök az emberi test által kibocsátott infravörös sugárzás változását képesek észlelni, így statikus jelenlétet nem képesek érzékelni. A technológia előnye, hogy ezek az eszközök rendkívül költséghatékonyak.[31]
- Radaralapú érzékelők: A radar érzékelők Doppler eltolódást mérnek a visszaverődő mikrohullámokban, ezzel lehetővé válik a mozdulatlan személyek jelenlétének érzékelése. A szenzorok képesek mikrórezgéseket detektálni, mint például amilyet a légzés okoz és ebből megbízhatóbban következtet az emberi jelenlétére.[32][33]
- Ultrahangos kombinált érzékelők: Ezek a szenzorok az emberi fül számára nem érzékelhető tartományba eső hanghullámokat bocsátanak ki és különböző tárgyakról érkező visszaverődő jelekből következtetnek az emberi jelenlétre. A megbízhatóbb azonosítás érdekében PIR érzékelőkkel kombinálják.[34]
- Kamerás rendszerek: Az anonimizált képfeldolgozáson alapuló kamerás rendszerek képesek valós idejű személyszámlálásra. Két féle anonimizálási technikát alkalmaznak. Az egyiknél mesterséges intelligencia dolgozza fel a képi felvételeket, miközben személyazonosságot nem rögzíti. Az AI az esetek túlnyomó részében felhőalapú szolgáltatás alatt üzemel, ezért biztonsági kockázatot jelent, hogy szenzitív információk szivárognak ki. [35] A másik módszer, ami fizikailag szabotázs védett az, hogy olyan alacsony felbontású érzékelőket alkalmazunk, ami nem teszi lehetővé az érzékelt személyek azonosítását. Egy ilyen szenzort dolgozott ki a Panasonic, Grid-EYE elnevezéssel, ami egy 8x8-as raszterű pontmátrix (64 pixel) hőérzékelő, ami az emberi alakokról csak egy elmosódott hőtérképet állít elő. Ezzel a szenzorral nem csak a jelenlét állapítható meg, hanem a mozgás közbeni haladási irány, vagy egy karlendítés, amihez megfelelően kialakított okosotthon rendszerben egy tetszőlegesen kiválasztott folyamatot indíthat el (Tipikus példa a világítás vezérlés, de bármilyen folyamatot indíthat, amit a rendszer kezelni képes.).

INDIREKT FOGLALTSÁG MÉRÉS

Szenzor-alapú indirekt foglaltság mérés

CO₂-vezérelt rendszerek

A CO₂-vezérlés az egyik legelterjedtebb mód a beltéri szellőztetés optimalizálására, a humán jelenlét indikátorának tekintik.[28] Számos egyéb tényező befolyásolja az optimális szellőztetési volument a korábban említett szennyezőkön felül, ilyen például az OLF („1 OLF = az a szagmennyiség, amelyet egy „standard ember” bocsát ki, tiszta ruhában, 21 °C és 50% relatív páratartalom mellett, ülő helyzetben, irodai aktivitással.”) Ez az érték fizikai munka esetén 2-3 OLF, de erős izzadás esetén akár 6 OLF is lehet. Az OLF egység a szagérzeti szennyezés érzékszervi megfelelője. Mivel a fizikai terhelés megnövekedésével a humán légcseres szám is növekszik, ezért a két érték erősen korrelál egymással. Ezen szerencsés összefüggésnek köszönhető, hogy ha a rendszer CO₂-vezérlést végez, akkor azzal egy időben az emberi kibocsátásból adódó szagterhelés kellemetlenségét is kiküszöböli. Természetesen rendelkezésre állnak a megfelelő összefüggések, amelyek alapján kalkulálható az OLF érték alapján a szükséges légcseres szám, de a tényleges megvalósítás szempontjából több problémába ütközünk. Az egyik az OLF érték meghatározása egy előzetes foglaltsági

becslésen alapszik, ami nem veszi figyelembe az emberi különbségeket és tisztálkodási szokásokat, nem számol a valós jelenléttel és a koncentráció szenzorokkal nem mérhető. Mérésére van kidolgozott módszer, de az az emberi szagláson alapszik, ezért az adatok közvetlenül nem építhetők be jelfeldolgozó rendszerekbe.

A CO₂-vezérlés előnye, hogy valós időben reagál a tényleges emberi jelenlétre, így biztosítja az megfelelő mennyiségű friss levegőt anélkül, hogy a túlszellőztetés állna fenn. [36] Ezzel a vezérléssel egy megfelelően méretezett központi szellőztető berendezéssel a CO₂ szint 700 ppm alatt tartható, ami jóval az egészségügyi határérték alatt van. [29]

A CO₂- vezérlés legnagyobb hiányossága, hogy bár az emberi jelenlét és a pára kibocsátás összefüggésben áll, de nincs összefüggésben a VOC kipárolgással. A VOC kibocsátás időarányos, a hőmérséklet emelkedéssel fokozódik. [39] Ezért, ha beltér kihasznált-sága alacsony és CO₂ koncentrációra szabályozunk akkor a VOC koncentráció meghaladhatja az egészségügyileg elfogadható határértéket.

VOC-vezérelt rendszerek

A VOC vezérlés a kémiai szennyeződések arányát figyeli, ezek lehetnek építőipari anyagok, bútorok, háztartási szerek, főzési folyamatok, dohányzás, emberi jelenlétből származó kibocsátás. [37] A VOC szint közvetlen indikátora az egészség károsító vegyületek túlzott felhalmozódásának.

A vezérlés előnye, hogy közvetlenül képes reagálni a kémiai szennyeződésekre, ami különösen olyan esetekben lehet hasznos, ha ezek feldúsulása nem hozható közvetlen összefüggésbe az emberi jelenléttel. Ilyen tipikus alkalmazás lehet a például a vegyi laborok, festő üzemek, legcseréjének szabályozása, de ide sorolható akár az új építésű lakásoknál megfigyelhető építőanyagokból származó fokozott kipárolgás eredményeként megjelenő magas VOC koncentráció. [38]

A rendszer korlátjai közé tartozik, hogy a VOC mérés a szennyezőanyagok változatossága miatt rendkívül bonyolult feladat, külön-külön kalibrálni kell a szenzorokat anyag fajtánként, ami figyelembe véve azt, hogy több mint 200 féle szennyező létezik túlságosan nagy komplexitást jelent. Ezért el kell fogadnunk azt, hogy a mérési pontosság alacsony lesz. A másik hátránya a VOC szint szerinti vezérlésnek, hogy nem képes figyelembe venni az emberi jelenlétet ezért, ha az adott környezetben éppen alacsony a levegő szennyezettsége, akkor a CO₂ szint megemelkedik, mivel nem követi le a friss levegő igényt. [39]

PM-vezérelt rendszerek

A PM szint vezérlés a levegőben megtalálható PM_{2.5} és PM₁₀ részecskék koncentrációja alapján hozza meg a szükséges beavatkozásokat. [40][41] Elsősorban olyan környezetekbe megfelelő, ahol a szálló por koncentráció kifejezetten magas, ilyen például, a dohányzásra kijelölt helység. Ebben az esetben, ha a CO₂ koncentrációra szabályoznánk, akkor a PM koncentráció bőven meghaladná az egészségügyi határértéket.

A rendszer előnye, hogy szálló por koncentráció jól mérhető mennyiség, így a vezérlés valós időben le tudja követni a szellőztetési igényeket. [42]

Alkalmazási korlátok közé sorolható, hogy nem képes figyelembe venni a CO₂ és a VOC koncentráció egészségügyi határértéket meghaladó koncentrációját. [42]

Relatív páratartalom-vezérelt rendszerek

A CO₂, VOC és a PM vezérlés egy előre beállított küszöbérték alatt tartja a szennyezők mértéket, ezzel szemben a páratartalom vezérlés esetében általában 40-60% -között tartja a levegő nedvesség tartalmát. 60% feletti páratartalom esetén légcserét hajt végre, vagy kondenzáció segítségével nedvességet von el a levegőből, vagyis szárítja. 40% alatti páratartalom esetében nedvesíti a levegőt. Télen amikor a kinti levegő hőmérséklete és ezáltal a nedvesség felvételképessége alacsony, akkor központi szellőztető berendezések hagyományos hőcserélővel hajlamosak túlszáritani a beltéri levegőt, ez azonban elkerülhető az entalpiás hőcserélő használatával, ahol a léghőmérséklet cserével egyidőben a légnedvesség csere is megtörténik.[45]

A szabályozás előnye, hogy megakadályozza a légzőszervi irritációkat, szemszárazságot, csökkenti a penészgombák szaporodását, megóvjva a porózus anyagok szerkezeti épségét, növeli a hőérzetet.[43][44]

Alkalmazásának hátrányai közé sorolható, hogy nem érzékeli a levegőminőség többi szennyezőjének feldúsulása.

Integrált megoldások

A tudományos és a gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a leghatékonyabb beltéri levegőminőség rendszerek működése több paraméter együttes monitorozásán alapul.[46][47][48]

Csak egy ilyen rendszerrel érhető el az, hogy ha a használati mintáktól eltérő módon kihasznált terekben sem dúsul fel a levegőben egyik nem kívánt komponens sem.[49]

Geo-fencing

A geo-fencing olyan helyalapú vezérlési technológia, amely előre kijelölt zónákat monitoroz, és képes detektálni a zónába az emberi jelenlétet.[50] Ezt oly módon valósítja meg, hogy a mobilkészülékek helyzetinformációira támaszkodva képes megállapítani a zónába be és kilépést időbélyeggel ellátva, és ezek alapján az előzetesen meghatározott eseményeket indítja. Tipikus példa a fűtés, hűtés, szellőztetés, ami a felhasználó közeledésével aktiválódik és mire megérkezik, addigra az elvárt paramétereket produkálja a rendszer.[51] A technológia felhasználási köre egyre bővül, már az okos-zárak is használják a technológiát, bár ott nem a mobilkészülék helyzetadataira támaszkodik a helymeghatározásnál, hanem a bluetooth kapcsolódással indítja el az ajtó nyitást- zárást. Ez egy kis hatótávolságú technológia (néhány tíz méter) ami ezen célnak tökéletesen megfelel. [52][55]

A technika elsődleges célja a felhasználói komfort megtartása melletti energia megtakarítás. Akát 10-20% energia megtakarítás érhető el az egyszerű direkt működésű jelenlét érzékelőkhöz képest. Ennek oka, hogy a rendszer csak akkor tartja az elvárt paramétereket amikor arra valóban szükség van, ezzel jobban leköveti a tényleges használati mintázatot.

Például a gépi szellőztetés esetében az emberi jelenlétől függetlenül a természetes kipárolgás hatására az egészségügyi határértéket meghaladó VOC szint koncentrációja elfogadható, abban az esetben, ha a felhasználó megérkezésnek pillanatában már az egészségügyi határértéken belül helyezkedik el. [53] Ennek megvalósításához az geo-fencing, mint vezérlési technológia alkalmazása elengedhetetlen.

Biztonsági és adatvédelmi kockázatok csökkentésének érdekében a rendszer a beérkező helyzetadatokhoz nem konkrét személyt társít, hanem egy kódot, ami alapján külső

megfigyelőként a személyazonosság nem visszakövethető.[54] A helyadatokat nem továbbítja a felhőbe, hanem helyileg kezeli. Döntéseket a helyi vezérlőn hozza meg.

A geo-fencing egy rendkívül hatékony és jól integrálható igényalapú szellőztetési stratégia különösen a lakóépületek vonatkozásában. Egy munkahely esetében, ahol az érkezés és a távozás egy jól ütemezhető folyamat, ami pontosan leírja a foglaltsági szintet nincs valós hozadéka ennek a vezérlésnek, nem beszélve a magas számú felhasználó helyadatainak kezelési és felhasználási nehézségeiről. Minél sztochasztikusabb egy terület/zóna foglaltsága annál jelentősebb energetikai megtakarítások érhetők el geo-fencing alapú jelenlét érzékeléssel.

PREDIKTÍV SZABÁLYOZÁS

A prediktív szabályozás a korszerű épületautomatizálás egyik legfejlettebb irányítási stratégiája, amely a rendszer jövőbeli előrejelzéseire alapul. Alkalmazása a mesterséges intelligencián alapuló gépi szellőztetés területén is kiemelten fontossá vált. Egyszerre képes a termikus komfort, energiahatékonyság és a beltéri levegőminőség optimalizálására.

A hagyományos, szenzor alapú visszacsatoláson alapuló szabályozással szemben nemcsak a jelenlegi állapotokra tud reagálni, hanem képes az AI különböző szenzor adatokból következtetéseket levonni és előre jelezni a jövőben történő paraméter változásokat. Ez lehetőséget biztosít arra, hogy az esemény bekövetkezése előtt felkészülhessen, és megelőző intézkedéseket hozzon. A prediktív szabályozás egy optimalizálási feladatra épít, amit minden szabályozási lépés során megold.

Dinamika-modell alapjául szolgáló épületgépészeti modell olyan rendszerleírás, amely fizikai vagy empirikusan megalapozott módon leírja a szellőztetési rendszer és az épület időben változó, dinamikus viselkedését. A modellezés történhet fizikai alapú megközelítéssel hő- és anyagáramok precíz leírásával, ahol az eredmények pontosságának érdekében figyelembe veszi az összes létező paramétert, mint például a szerkezeti rétegek hőkapacitását, légcsera térfogatáramát, szellőztető berendezés válaszfalát, beltéri levegő hőmérsékletét és összetételét. Előnye, hogy egy jól paraméterezett rendszer felépítése, logikája könnyen értelmezhető, és jól reprodukálható egy másik rendszer kialakításánál. Hátránya, hogy a részletes paraméterezés időigényes feladat, valamint az eredmények nemlinearitása miatt kezelése komplexitásokat képez.

Predikciós horizont azon időintervallum, amire a rendszer előrejelzéseket készít a várható állapotváltozásokról, a szellőztetéstechikában ez jellemzően 0,5-3 órás időtartam.

A predikciós horizont hosszának meghatározásával orientáljuk a modellt, rövidebb horizont gyorsabb reakciót, hosszabb horizont fejlett optimalizációt eredményez. A szimuláció során használt bemeneti paramétere a belső hő és szennyezőanyag terhelés, illetve a külső klimatikus hatások ismerete, ez alapján építi fel a rendszer dinamikájának modelljét. A modellezés során kapott különböző kimenetek közül az energetikailag legkedvezőbb megoldást választja.

A rendszer figyelembe veszi az üzemi korlátokat, mint például a maximális ventilátor fordulatszám, ami esti órákban a komfort érdekében akár egy csökkentett érték is lehet. A rendszer aktívan szabályozza az egyes levegőösszetételi paramétereket. A hőcserélési veszteség csökkentésének érdekében a szükséges légcsera jelentős részét a kisebb hőmérséklet különbségű órákra időzíti. A prediktív szabályozás a meteorológiai előrejelzési ada-

tok (kültéri hőmérséklet, páratartalom) felhasználásával, a mért levegőösszetételi paraméterek (CO₂, VOC, PM, relatív páratartalom) és a mért vagy származtatott foglaltsági minták alapján, figyelembe véve az épületfizikai modelleket (hőtárolás, filtráció) hozza meg és hajtja végre az optimalizálási folyamatot. [56] Az optimalizálási folyamatban a számos paraméter közül, jellemzően az energiafelhasználás csökkentése áll a középpontban, de lehet CO₂, VOC, PM és relatív páratartalom koncentrációra is szabályozni. Az energetikai optimalizáció során nagy jelentőséggel bír a központi szellőztető gépek bypass funkciója, melynek használatánál ahogy a megnevezés is leírja a hőcserélő megkerülésével a levegőszűrőn keresztül a légsere során megvalósul a hőtranszport. Ezt akkor alkalmazzák amikor nyáron a kültéri levegő hőmérséklet az esti órákban lecsökken és ezzel a levegővel direkt módon tudják hűteni a belteret amivel energiát takarítanak meg.

Park tanulmányában nyolc gépi tanulási algoritmus segítségével vizsgálta a természetes szellőztetési-ráta (NVR) prediktív modelljeit, amelyek alkalmasak a mért beltéri és kültéri környezeti változók közötti nemlineáris kapcsolatok értelmezésére. Az összes algoritmus közül a mély neurális hálózat biztosította a legjobb predikciós teljesítményt az NVR esetében. A Shapley-féle additív magyarázat alapján megvizsgálták a prediktív modellek eredményeit leginkább befolyásoló tényezőket, a legtöbb gépi tanulás alapú megközelítés hasonló jellemzőkkel rendelkezett (nyomáskülönbség, kültéri hőmérséklet, szélesebbesség, beltéri relatív páratartalom, napsugárzás, beltéri/kültéri relatív páratartalom különbsége és szélirány). Az összes jellemző közötti korrelációs elemzés során az NVR-rel leginkább pozitívan korreláló változók a szélesebbesség, a kültéri hőmérséklet és a napsugárzás voltak, míg a nyomáskülönbség negatívan korrelált az NVR-rel. Ezenkívül a kültéri hőmérséklet és a napsugárzás szorosan összefüggött a szélesebbesség változásával. A tanulmány eredményei javíthatják az NVR előrejelzési teljesítményét, és ez hozzájárulhat egy intelligens természetes szellőztetési-rendszer fejlesztéséhez.[57]

ÖSSZEFOGLALÓ

A domotika és az intelligens épületirányítási rendszerek fejlődése új lehetőségeket teremt a szellőztetési rendszerek automatizálásában, és az energiafogyasztás és az egészség finom egyensúlyának megteremtésében. A tanulmány átfogó képet ad a különböző szellőztetési technológiákról, a legegyszerűbb kézi ablaknyitós módszertől egészen az igényalapú és prediktív mesterséges intelligenciával támogatott komplex hő-visszanyeréses központi szellőztető rendszerekre át. Kiemelt szerepet kapott a foglaltsági szint (direkt-indirekt) megállapítása és annak technikai és szabályozástechnikai ismertetése, hiszen a legtöbb beltéri szennyező megjelenése közvetlenül az emberi jelenlétből követhető. A tanulmány részletesen ismerteti a beltéri levegőminőséget meghatározó komponenseket, és ezek egészségügyi és fiziológiai hatásait, kockázatait. A tanulmány bemutatja a geo-fencing azaz helyalapú foglaltság mérésben rejlő lehetőségeket és a prediktív szabályozási rendszert. A prediktív, mesterséges intelligencia alapú szabályozási rendszer a rendelkezésére álló kültéri és beltéri körülményeket leíró paraméterek alapján képes magas valószínűségű előrejelzést készíteni, amit az esemény bekövetkezése előtt a modellterben több alternatív megoldással szimulál és a legkedvezőbb paraméterekkel rendelkezőt kiválasztva, elindítja a megelőző, felkészülő folyamatokat. Jelenleg ez a legfejlettebb szabályozási rendszer, amely jelentős energia megtakarítási potenciállal rendelkezik különösen a beltér hűtése, fűtése és szellőztetésének területén.

Összességében a tanulmány rámutat arra, hogy a szellőztetés korszerű megközelítése csak egy komplex domotika rendszerben működtethető energiatakarékos módon, miközben figyelembe veszi a beltéri levegő egészségességét és aktívan hozzájárul a felhasználók komfortjához.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022, *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE, 2022. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2025, *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*. ASHRAE, 2025. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>
- [3] F. L. Rashid *et al.*, “Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A Comprehensive Review of Climate Management, Indoor Air Quality, and Energy Efficiency,” *Buildings*, vol. 15, no. 14, p. 2579, Jul. 2025. doi: 10.3390/buildings15142579
- [4] A. Sporr, G. Zucker, and R. Hofmann, “Automated HVAC Control Creation based on Building Information Modeling (BIM): Ventilation System,” *IEEE Access*, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919262
- [5] X. Zhang *et al.*, “Decentralized and Distributed Temperature Control via HVAC Systems in Energy Efficient Buildings,” in *Proc. IEEE Global Conf. on Signal and Information Processing*, Arlington, VA, USA, Dec. 2016.
- [6] S. Lindvall, “Comparison of centralized and decentralized ventilation in a multifamily building in Stockholm: An LCA-study,” Master’s thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2018.
- [7] https://www.theguardian.com/environment/2019/jul/08/indoor-carbon-dioxide-levels-could-be-a-health-hazard-scientists-warn?CMP=share_btn_url
- [8] Usha Satish, Mark J. Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, and William J. Fisk 2012 Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance Environmental Health Perspectives 120:12 CID: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- [9] Wang, R.; Li, W.; Gao, J.; Zhao, C.; Zhang, J.; Bie, Q.; Zhang, M.; Chen, X. The Influence of Bedroom CO₂ Concentration on Sleep Quality. *Buildings* **2023**, *13*, 2768. <https://doi.org/10.3390/buildings13112768>
- [10] [Mold Remediation in Schools and Commercial Buildings EPA 402-K-01-001, September 2008](#)
- [11] Özgür Küçüküseyin 01/2021 The REHVA European HVAC Journal 54-59 URL [REHVA Journal CO₂ monitoring and indoor air quality](#)
- [12] Gaëlle Guyot, Max Sherman, Iain Walker, Jordan D Clark. Residential smart ventilation: a review. [Research Report] LBNL-2001056, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. 2017. fhal-01670527f
- [13] Jarek Kurnitski 06/2019 The REHVA European HVAC Journal 8-12 URL [REHVA Journal NZEB requirements in Nordic countries](#)

- [14] B. Gulai *et al.*, “Modelling of Innovative Energy-Efficient Decentralized Ventilation Systems to Reduce the Carbon Footprint,” in *Proc. CEE 2025*, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 781, Springer, 2025.
- [15] F. Tolvaly-Roşca, A.-Z. Fekete, and Z. Forgó, “Investigation of the Real Efficiency of a Decentralized Heat Recovery Ventilation System,” *Műszaki Tudományos Közlemények*, vol. 20, pp. 78–82, 2024. doi: 10.33894/mtk-2024.20.15
- [16] S. K. Chowdary, “Evaluation of Decentralized Ventilation System with Heat Recovery,” Master’s thesis, Lund University, Sweden, 2020.
- [17] J. Zemitis and A. Borodinets, “Energy Saving Potential of Ventilation Systems with Exhaust Air Heat Recovery,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 660, p. 012019, 2019. doi: [10.1088/1757-899X/660/1/012019](https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012019).
- [18] M. Kremer, K. Rewitz, and D. Müller, “Introducing an Optimization Approach for Enthalpy Exchangers for Residential Ventilation,” *International Journal of Ventilation*, vol. 24, no. 1, pp. 17–33, 2025. doi: [10.1080/14733315.2024.2380626](https://doi.org/10.1080/14733315.2024.2380626).
- [19] K. Rewitz, P. Seiwert, and D. Müller, “Influence of humidity on humans and their health,” RWTH-EBC White Paper 2024-008, Aachen, 2024. doi: 10.18154/RWTH-2024-08075.
- [20] D. Amaripadath *et al.*, “A systematic review on role of humidity as an indoor thermal comfort parameter in humid climates,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, p. 106039, 2023. doi: 10.1016/j.jobee.2023.106039.
- [21] E. R. Jones *et al.*, “Indoor humidity levels and associations with reported symptoms in office buildings,” *Indoor Air*, vol. 32, no. 1, e12961, 2022. doi: 10.1111/ina.12961.
- [22] T. Horvat, G. Pehneć, and I. Jakovljević, “Volatile Organic Compounds in Indoor Air: Sampling, Determination, Sources, Health Risk, and Regulatory Insights,” *Toxics*, vol. 13, no. 5, p. 344, Apr. 2025. doi: 10.3390/toxics13050344.
- [23] D. Kotzias, “Built environment and indoor air quality: The case of volatile organic compounds,” *AIMS Environmental Science*, vol. 8, no. 2, pp. 135–147, Mar. 2021. doi: 10.3934/environsci.2021010.
- [24] M. Piasecki *et al.*, “The Approach of Including TVOCs Concentration in the Indoor Environmental Quality Model (IEQ)—Case Studies of BREEAM Certified Office Buildings,” *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 3902, Oct. 2018. doi: 10.3390/su10113902
- [25] WHO, *Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*, Geneva: World Health Organization, 2021.
- [26] European Commission, *EU Air Quality Standards*, Directive 2008/50/EC and updates, Brussels, 2024.
- [27] W. R. W. Mahiyuddin *et al.*, “Cardiovascular and Respiratory Health Effects of Fine Particulate Matters (PM_{2.5}): A Review,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 5, p. 856, May 2023. doi: 10.3390/atmos14050856.
- [28] B. Chenari, S. Saadatian, and M. G. da Silva, “Experimental Assessment of Demand-Controlled Ventilation Strategies for Energy Efficiency and Indoor Air Quality in Office Spaces,” *Air*, vol. 3, no. 2, p. 17, Jun. 2025. doi: 10.3390/air3020017.
- [29] G. Rojas, “Assessing demand-controlled ventilation strategies based on one CO₂ sensor,” *AIVC Proceedings*, 2022.

- [30] S. Azimi and W. O'Brien, "Analysis of energy and cost savings potential of occupancy detection for commercial building operations," *IBPSA Proceedings*, 2022.
- [31] Texas Instruments, "Occupancy Detection Using Passive Infrared-Based Technology," Application Note, 2023.
- [32] M. Abedia and F. Jazizadeh, "Deep-learning for Occupancy Detection Using Doppler Radar and Infrared Thermal Array Sensors," *Proc. ISARC*, 2019.
- [33] IEEE, "Doppler Radar Occupancy Sensing and Monitoring for Smart Buildings," *TELSIKS Conf.*, Oct. 2023. doi: 10.1109/TELSIKS.2023.10316022.
- [34] I. Ciuffreda *et al.*, "A Multi-Sensor Fusion Approach Based on PIR and Ultrasonic Sensors Installed on a Robot to Localise People in Indoor Environments," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6963, Aug. 2023. doi: 10.3390/s23156963.
- [35] H. Ochiai *et al.*, "Logic-Free Building Automation: Learning the Control of Room Facilities with Wall Switches and Ceiling Camera," *arXiv preprint*, Oct. 2024.
- [36] Trane, "CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation with ASHRAE Standard 62.1," Technical Report, 2024.
- [37] M. Großklos, "Use of VOC sensors for air quality control of building ventilation systems," *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 4, pp. 159–168, 2015.
- [38] J. Kolarik *et al.*, "Metal Oxide Semiconductor sensors to measure VOCs for ventilation control," AIVC Webinar Report, 2018.
- [39] S. Li, "Review of Engineering Controls for Indoor Air Quality: A Systems Design Perspective," *Sustainability*, vol. 15, no. 19, p. 14232, Sep. 2023.
- [40] J.-H. Kim *et al.*, "Ventilation and Filtration Control Strategy Considering PM_{2.5}, IAQ, and System Energy," *Atmosphere*, vol. 11, no. 11, p. 1140, Oct. 2020.
- [41] J. Vasquez Cubas *et al.*, "PM₁₀ and PM_{2.5} Particulate Matter Monitoring Systems: A Systematic Review," *Proc. CSEI Conf.*, Springer LNNS, vol. 797, pp. 281–295, Dec. 2024.
- [42] AESG, "Control of Particulates and Indoor Air Quality," Technical Report, 2023.
- [43] D. Mallay, "Advanced HVAC Humidity Control for Hot-Humid Climates," NREL Report, 2024.
- [44] ASHRAE, *Humidity Control Resources*, 2019.
- [45] Condair, "Humidity Control Planning Guidelines," Technical Guide, 2024.
- [46] H.-C. Zhu *et al.*, "Fast prediction for multi-parameters of indoor environment towards online HVAC control," *Building Simulation*, vol. 14, pp. 649–665, 2021.
- [47] Y. Yang *et al.*, "Distributed Control of Multi-zone HVAC Systems Considering Indoor Air Quality," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 2020.
- [48] C. Laughman *et al.*, "Integrated Control of Multi-Zone Buildings with Ventilation and VRF Systems," *Proc. IHPBC*, 2018.
- [49] X. Zhu and H. Li, "HVAC Temperature and Humidity Control Optimization Based on Large Language Models," *Energies*, vol. 18, no. 7, p. 1813, Apr. 2025.
- [50] L. Yu *et al.*, "Distributed Real-Time HVAC Control for Cost-Efficient Commercial Buildings Under Smart Grid Environment," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 545–556, Feb. 2018. doi: 10.1109/JIOT.2017.2768558.
- [51] B. T. Smith-Cortez, "Demonstrations of Geo-Fencing Occupancy-Based Control in Smart and Connected Homes," M.S. thesis, Texas A&M Univ., 2023.
- [52] US Patent US10516965B2, "HVAC Control Using Geofencing," Dec. 2019.

- [53] T. Horvat *et al.*, “VOC Management in Smart Ventilation Systems,” *Indoor Air Quality Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 225–239, 2024.
- [54] U. Matchi Aïvodji *et al.*, “IOTFLA: A Secured and Privacy-Preserving Smart Home Architecture Implementing Federated Learning,” *IEEE Security and Privacy Workshops*, 2019.
- [55] S. Kumbhar *et al.*, “B-Lock: A Smart Door Lock System Using Bluetooth Technology,” *IJARST*, vol. 12, no. 11, pp. 1046–1055, 2025.
- [56] M. Shin, S. Lee, J. Kim, and H. Park, “Development of an HVAC System Control Method Using Weather Forecasting Data with Deep Reinforcement Learning Algorithms,” *Building and Environment*, vol. 111069, Nov. 2023. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.111069.
- [57] H. Park and D. Y. Park, “Comparative analysis on predictability of natural ventilation rate based on machine learning algorithms,” *Building and Environment*, vol. 197, p. 107744, 2021. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107744.