



SZABADHŰTÉS-POTENCIÁL VIZSGÁLATA

ANALYSING FREE COOLING POTENTIAL

Béni Emese,¹ L. Szabó Gábor²

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék. Debrecen, Magyarország, emese.beni@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék. Debrecen, Magyarország, l.szabo.gabor@eng.unideb.hu

Abstract

Increasingly stringent energy directives of the European Union and growing cooling demands driven by climate change emphasize the need for research into energy-efficient cooling solutions. Free cooling is a promising technology for reducing energy consumption; however, its efficiency and potential application across various building types remain unclear. This article aims to minimize the cooling energy demand provided by HVAC systems through the use of direct active free cooling systems in office, residential, and small commercial buildings. The findings of this research are directly applicable to building operations, significantly contributing to enhanced energy efficiency in buildings and the development of cost-effective, sustainable cooling strategies.

Keywords: *free cooling, energy demand, free cooling resistance point.*

Összefoglalás

Az Európai Unió egyre szigorúbb energiaügyi előírásai és az éghajlatváltozás okozta növekvő hűtési igények szükségessé teszik az energiahatékony hűtési megoldások kutatását. A szabadhűtés ígéretes technológia az energiafogyasztás csökkentésére, azonban hatékonysága és alkalmazhatósága különböző épülettípusok esetében még nem teljesen tisztázott. Cikkünk célja a HVAC-rendszerek hűtési energiaigényének minimalizálása közvetlen, aktív szabadhűtési rendszerek alkalmazásával iroda-, lakó- és kisebb kereskedelmi épületekben. Eredményeink közvetlenül alkalmazhatók az épületüzemeltetésben, jelentősen hozzájárulva az épületek energiahatékonyágának növeléséhez és a költség-hatékony, fenntartható hűtési stratégiák kidolgozásához.

Kulcsszavak: *szabad hűtés, energiaigény.*

1. Bevezetés

Az energiafogyasztás visszafogása és a megújuló energia használata nemcsak a fenntarthatósági célok eléréséhez járul hozzá, hanem a politikai és gazdasági függetlenséget is erősíti. Az energiaigény csökkentése érdekében különösen fontos az épületek energiaigényének pontos felmérése, mivel ez alapján lehet a jövőbeli energiafelhasználást hatékonyan megtervezni. Az energiaigény mérsékléséhez számos megoldás áll rendelkezésre: például az épületek jobb hőszigetelése, természetes szellőztetési rendszerek alkalmazása, valamint hőtárolási és éjszakai szellőztetési megoldások bevezetése. Ezek a technikai újítások je-

lentősen hozzájárulhatnak az energiahatékony-ság növeléséhez. [1, 2, 3, 4]

A cikk során elsősorban bemutatom a korábbi tudományos munkából származó elméleti hátteret, majd ismertetem a szabadhűtést és létjogosultságát. Ezzel bemutatásra kerül egy új tényező, az ϵ , vagyis a hőfokhídarány, mellyel szemléltetem és leírom a szabadhűtési zónákat. Ezt követően a kapott tényező egyenletével érzékenységi vizsgálatot végeztem, mellyel megvizsgáltam, hogy a tényező egyenletében szereplő valamely paraméter változtatásával milyen mértékben változik a hőfokhídarány. Ezt követően bemutatom a vizsgálathoz használt épületet (helyiséget). [5, 6, 7, 8]

2. Az alkalmazott módszerek elméleti áttekintése

2.1. Hőfokgyakoriság, hőfokhíd, energiaigény

Ha egy adott év napjait és külső napi átlaghőmérséklet-értékeit úgy rendezzük, hogy az egyes külső hőmérsékleteket ahhoz viszonyítjuk, hogy mennyi olyan nap van, amely az adott külső hőmérsékletnél kisebb, akkor az úgy nevezett hőfokgyakorisági görbét kapjuk meg. A hőfokgyakorisági görbe, a határhőmérséklet és belső hőmérséklet ismeretében lehet meghatározni a hőfokhíd-értékeket (1. ábra). [9]

A határhőmérsékletet az alábbi módon tudjuk meghatározni [10]:

$$T_B = T_i - \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i}{H_{tr} + c \cdot \rho \cdot V \cdot n}; [K] \quad (1)$$

ahol:

T_i a belső hőmérséklet [K]-ben,

\dot{Q}_{rad} a sugárzásos hőnyereség, [W]-ban,

\dot{Q}_i a belső hőnyereségek, [W]-ban.

H_{tr} a transzmissziós hőveszteség-tényező [W/K]-ben.

c a levegő fajhője [J/(kg·K)]-ben,

ρ a levegő sűrűsége, [kg/m³]-ben,

V a helyiség térfogata, [m³]-ben,

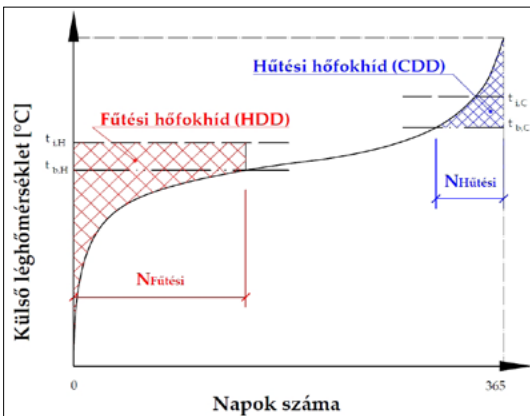
n a helyiség légcsereszám, [1/h]-ban. [9]

A (hűtési) hőfokhídértéket pedig az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni [9]:

$$CDD = \int_{j=N_{hűtési}}^{365} (\bar{T}_{ej} - T_B) \cdot dt; [hK] \quad (2)$$

ahol:

\bar{T}_{ej} a j -edig óra külső hőmérséklete



1. ábra. A hőfokhíd értelmezése [9]

T_B a határhőmérséklet értéke [K]-ben,

$N_{hűtési}$ a hűtési napok száma,

CDD a hűtési hőfokhíd értéke, melyet [°Cnap]-ban vagy [hK]-ben szokás megadni.

Az épület funkciója ismeretében, az épület energiaigényének meghatározásához célszerű figyelembe venni a heti funkciófüggő hatásfokot is (2. ábra) [9]:

$$\eta_{U,C} = \frac{A_C + (168 - A) \cdot \phi_C}{168} \cdot 100; [\%] \quad (3)$$

ahol:

A_C az emberi használat heti aktív órái száma (hűtési üzemmódban),

ϕ a passzív időszakban mennyire szabályozunk vissza az aktív időszakhoz képest [-]. [9]

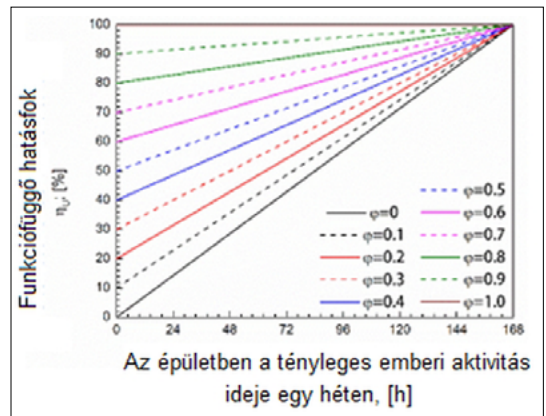
Ezeket figyelembe véve az épület energiaigénye a következő összefüggéssel határozható meg [9]:

$$E_C = \frac{\eta_{U,H}}{100} \cdot (H_{tr} + c \cdot \rho \cdot V \cdot n) \cdot CDD; [Wh] \quad (4)$$

Az itt leírt összefüggéseket egy évre vonatkoztatva szoktuk használni, de egy napra is lehet adaptálni őket. A különbség annyi, hogy a hőfokgyakorisági görbe és a határhőmérséklet-görbe darabosabb lesz, mivel kevesebb mért értékből (pl. csak órai hőmérsékletértékek ismertek) lehet megajzolni őket.

2.2. A szabadhűtés fogalma, jelentése, jelentősége

A szabadhűtés olyan technológia, amely a külső környezeti levegő alacsony hőmérsékletét használja hűtési célokra, csökkentve vagy kizárva a hagyományos kompresszoros hűtés szükségességét. Ennek köszönhetően jelentős energia-



2. ábra. A funkciófüggő hatásfok meghatározása [9]

megtakarítást érhetünk el, hiszen a szabadhűtés működtetése kevesebb energiát igényel, mint a kompresszorral történő hűtés. Jellemzően azon időszakokban alkalmazhatjuk a szabadhűtést, amikor a külső hőmérséklet alacsonyabb, mint a hűtendő tér hőmérséklete, ilyen például az átmeneti időszak. [6, 11, 12]

A szabadhűtési rendszerek két fő típusa különíthető el, melyek az aktív és a passzív szabadhűtés. [12, 13]

Aktív szabadhűtés esetén a külső levegő közvetlenül kerül az épület hűtendő tereibe, általában ventilátorokkal jut be a friss levegő a helyiségbe szellőztetéssel. Ez a módszer nagyfokú légseregés lehetőségét biztosítja, ugyanakkor a külső levegő szennyezettsége befolyásolhatja a hatékonyságát. [8, 12]

Passzív szabadhűtés során hőcserélők segítségével történik a hőátadás. Ilyenkor a hűtési folyamat közvetítő közege, például a víz vagy egy másik hűtőközeg veszi át a hőt, amelyet egy hőcserélőn keresztül ad át az épület levegőjének. Ez a módszer különösen hatékony lehet, ha a rendszer részeként folyadékűtő vagy vízűtő toronyok vannak alkalmazva. [8, 12]

Az épületgépészetben a szabadhűtés-technológia egyre nagyobb jelentőséget nyer, főként az energiahatékonyságra vonatkozó előírások és a környezettudatos tervezés előtérbe kerülésével. Számos előnye van mind környezeti, mind gazdasági szempontból. [11]

A szabadhűtés alkalmazása jelentősen csökkenti az épületek hűtési energiaigényét, mivel nem szükséges a hűtési berendezéshez szükséges gépek működtetése. Környezeti szempontot érint, hogy a csökkenő energiafogyasztással kisebb szén-dioxid-kibocsátást eredményez. Gazdasági hatékonyságát tekintve az energiamegtakarítással csökken az üzemeltetési költség, amely a beruházás megtérülését gyorsítja. Szabadhűtés alkalmazásával a hűtőberendezések élettartama is növelhető, mivel kevesebb időn keresztül kell működtetni nagy terhelés alatt. [11, 12]

A szabadhűtés ideális megoldást nyújt olyan létesítmények számára, amelyek folyamatos hűtést igényelnek, például irodaházak, adatközpontok vagy ipari létesítmények. Az ipari létesítmények esetében, ahol technológiai folyamatok miatt szükséges állandó hűtés, szintén kiváló megoldás. [11, 12]

A szabadhűtés technológiai alkalmazása egyre népszerűbbé válik az épületgépészet területén, különösen az energiahatékonyság és a fenntarthatóság iránti igények növekedésével. Az épüle-

tek hűtési igénye az időjárási változások, az urbanizáció és az építési normák fejlődésével fokozatosan növekszik, így a szabadhűtés alkalmazása komoly lehetőséget kínál a fenntartható hűtési megoldások terén. [12, 13]

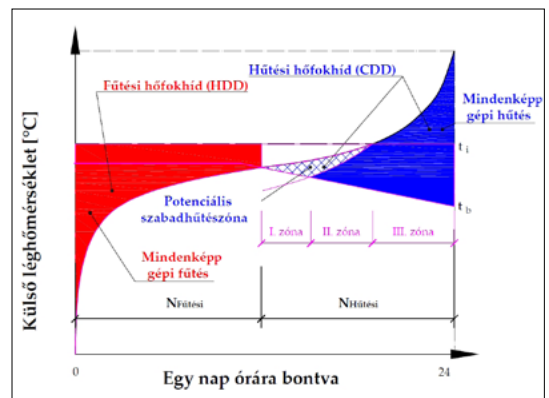
Az innovatív szabadhűtési megoldások fejlesztése és a szabályozási környezet bővülése elősegítheti a szabadhűtés további elterjedését. A jövőben olyan intelligens rendszerek várhatók, amelyek a szabadhűtést más hűtési technológiákkal együtt alkalmazzák, automatikusan szabályozva a rendszert a külső és belső környezeti viszonyokhoz igazítva. A szabadhűtés tehát nemcsak költséghatékony megoldást kínál az épületgépészek számára, hanem jelentős hozzájárulást nyújthat a környezeti fenntarthatósághoz is. [12, 14]

3. Eredmények

3.1. A szabadhűtés létjogosultsága

A szabadhűtés, mint láttuk, az év átmeneti és hűtést igénylő szakaszában jelentkezhet. A szabadhűtés-potenciál mértékét célszerű napi szinten vizsgálni. Vegyük egy tetszőleges, olyan nap külsőhőmérséklet-értékeit, melynél felmerülhet a szabadhűtés lehetősége. Rendezzük úgy, hogy az adott nap külső hőmérsékleteit ahhoz viszonyítjuk, hogy mennyi olyan óra van, amikor az adott külső hőmérsékletnél kisebb, akkor az adott nap hőfokgyakorisági görbéjét kapjuk. Ebbe a görbébe be tudjuk rajzolni a napi határhőmérséklet görbéjét is. Ezt mutatja a 3. ábra.

Az (1) egyenlet összefüggése alapján, mivel az adott sugárzási nyereség más lesz az egyes órákban, emiatt ez nem egy vízszintes egyenes lesz, hanem a napsugárzásmentes időszakokban egyenes, míg napközben egy csökkenő trendű egyenes, kisebb kiugrásokkal (az eltérő sugárzás miatt).



3. ábra. A szabadhűtési zóna értelmezése

A potenciális szabadhűtési zónát a **3. ábra** alapján értelmezhetjük. A szabadhűtés „motorja” a külső és belső hőmérséklet közötti különbség lesz, ezért a szabadhűtést jellemző hőfokhíd ábrázolható hőfokgyakorisági görbén. Ez a határhőmérséklet, a külső hőmérséklet és egy segédgörbe által határolt terület lesz. Ezt a segédgörbét úgy kapjuk meg, hogy az adott óránál megnézzük a külső és belső hőmérséklet közötti különbséget, és a külső hőmérsékletből kiindulva lefelé vetítjük. A hűtési hőfokhidat ez a görbe három zónára osztja. Adott légcsereszám mellett, az I. zónában tisztán megvalósítható a szabadhűtés, a II. zónában a szabadhűtés mellett gépi hűtés alkalmazása is szükséges, míg a harmadik zónában már lehetetlen a szabadhűtés.

Az ipar részéről a cél, hogy minél kisebb legyen a ténylegesen beépítendő gépi hűtési teljesítmény. Az ábra alapján ez a szabadhűtési zóna minimalizálásával érhető el. A szabadhűtési zóna megszüntetéséhez a T_i és a T_b értéke meg kell, hogy egyezzen. Vagyis vagy a belső hőmérsékletet, vagy a határhőmérsékletet kell változtatni. A belső hőmérséklet értéke közvetlen hatást gyakorol az emberi komfortérzetre. Így megfelelő értékét pontos vizsgálatokkal, számos szempont figyelembevételével lehet megállapítani. Ezért a tervezéshez a megfelelő értékeket szabványok rögzítik, melyektől eltérni csak rendkívül átgondoltan szabad. Így a továbbiakban ettől eltekintünk.

A másik lehetőség a határhőmérséklet változtatása. Ennek változtatásával akkor tudjuk elérni a potenciális szabadhűtési zóna megszüntetését (az (1) egyenlet alapján), ha a $n = \infty$ [1/h]. A légcsereszám növelésével növekszik a határhőmérséklet, és így csökken a gépi hűtési órák száma. A problémát az okozza, hogy a légcsereszám növelésének vannak technológiai és gazdasági korlátjai.

Technológiailag nem tudunk végtelen nagy légcserét létrehozni, mert ehhez végtelen nagy térfogatárammal kellene tudnunk bejuttatni a levegőt a helyiségbe, ehhez pedig végtelen nagy méretű ventilátorlapátok és/vagy végtelen nagy tengelyfordulatszámot kellene biztosítanunk.

Gazdasági szempontból pedig a probléma az, hogy ilyen légcsereszám-növekedést csak gépi szellőzéssel lehet előállítani. Előáll(hat) egy olyan légcsereszámérték, melynél a gépi szellőzés teljesítményigénye már nagyobb, mint a gépi hűtési teljesítményigénye. Ennek vizsgálatáról szól a cikk.

3.2. A hőfokhídarány

3.2.1. A hőfokhídarány definiálása

Vezessük be a **3. ábrán** szereplő, szabadhűtéssel érintett zónák (I. és II. zónák, vagyis ahol a $T_i > T_e$) jellemzésére az alábbi tényezőt:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{(T_i - T_B)^2 - (T_B - T_e)^2}{(T_i - T_e)^2 + \varepsilon} \\ &\approx \frac{(T_i - T_B)^2 - (T_B - T_e)^2}{(T_i - T_e)^2} \\ &= \frac{T_i^2 - T_e^2}{(T_i - T_e)^2} - \frac{2}{(T_i - T_e)} \cdot T_B \quad ; [-] \end{aligned} \quad (5)$$

ahol ε egy végtelenül kis mennyiség, hogy ne lehessen a nevezőben nulla.

Ha $(-1) < \varepsilon < 0$, akkor az I. zónába (100%-ban szabadhűtés) van, ha $0 \leq \varepsilon$, akkor a II. zónában (szabadhűtés és gépi hűtés kombinációja), ha pedig $\varepsilon \leq (-1)$, akkor pedig a III. zónában (100%-ban gépi hűtés).

A jelzőszám későbbi hasznosíthatóságára javasolt két további összefüggést megadni. Az elsőt az adott pillanatban, rögzített légcsereszámmal írhatjuk fel az összefüggést:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_i^2 - T_e^2}{(T_i - T_e)^2 + \varepsilon} - 2 \cdot \frac{(T_i - T_e)}{(T_i - T_e)^2 + \varepsilon} \cdot T_i \\ &+ 2 \cdot \frac{(T_i - T_e)}{(T_i - T_e)^2 + \varepsilon} \cdot \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i}{H_{tr} + c \cdot \rho \cdot V \cdot n} \\ \varepsilon &= \frac{T_i^2 - T_e^2}{(T_i - T_e)^2} - \frac{2 \cdot T_i}{T_i - T_e} \\ &+ \frac{2 \cdot (\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i)}{(T_i - T_e) \cdot (H_{tr} + c \cdot \rho \cdot V \cdot n)} \quad ; [-] \end{aligned} \quad (6)$$

ahol:

- T_i a belső hőmérséklet [K]-ben,
- T_e külső hőmérséklet [K]-ben,
- \dot{Q}_{rad} a sugárzásos hőnyereség [W]-ban,
- \dot{Q}_i belső hőnyereségek [W]-ban,
- H_{tr} a transzmissziós hővesztesség-tényező [W/K]-ben,
- c a levegő fajhője [J/(kg·K)]-ben,
- ρ a levegő sűrűsége, [kg/m³]-ben,
- V a helyiség térfogata, [m³]-ben,
- n a helyiség légcsereszáma, [1/h]-ben.

A másodiknál megadhatjuk azt a légcsereszám-értéket, melynél az adott ε érték eléréséhez szükséges légcsereszámot kapjuk meg adott pillanatban:

$$n = \frac{2}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i}{2 \cdot T_i + \left[\frac{(T_i - T_e)^2 + \epsilon}{T_i - T_e} \right] \cdot \epsilon - \frac{T_i^2 - T_e^2}{T_i - T_e}} - \frac{H_{tr}}{c \cdot \rho \cdot V}; [-]$$

$$n = \frac{2}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i}{2 \cdot T_i + (T_i - T_e) \cdot \epsilon - \frac{T_i^2 - T_e^2}{T_i - T_e}} - \frac{H_{tr}}{c \cdot \rho \cdot V}; [-]$$

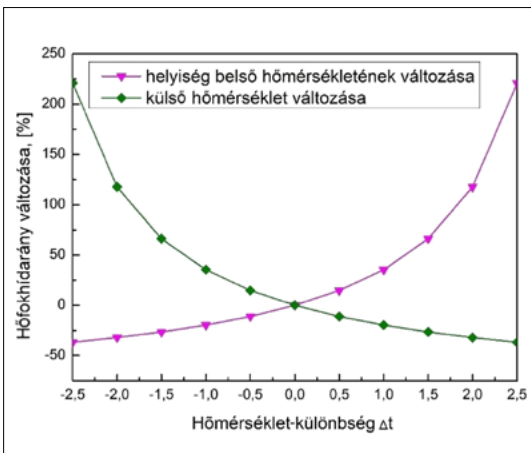
3.2.2. A hőfokhídarány érzékenységvizsgálata

Az előzőekben leírt hőfokhídarány tényező érzékenységvizsgálatát mutatom be. Az érzékenységvizsgálatot a (6) egyenlet alapján végeztem el. A vizsgálat lényege, hogy szemléltetem, milyen mértékben változik a tényező értéke, ha valamely tagját változtatom. Minden tényező változtatásakor ugyanazon kiindulási adatsorból indultam ki, majd a kiemelt tényező értékét százalékosan változtattam.

A 4. ábrán látható a (6) egyenlet által meghatározott hőfokhídarány-érték változása a belső és külső hőmérséklet változtatásával.

A vízszintes tengelyen látható a hőmérséklet-különbség (Δt), a függőleges tengelyen pedig a hőfokhídarány százalékos változtatása a hőmérséklet egységnyi változtatásával. A belső hőmérséklet (T_i) 22 °C-ról 27 °C-ra félfokenként növeljük, míg a külső hőmérsékletet (T_e) 25,5 és 30,5 °C között változtatjuk félfokenként.

Az 5. ábrán látható a légcsereszám, a transzmissziós hőveszteség-tényező és a helyiségtér-fogat százalékos változtatásának hatása a hőfokhídarány-értékre a (6) egyenlet alapján.



4. ábra. A hőfokhídarány változása a belső és külső hőmérséklet függvényében

A vízszintes tengelyen látható a tényezők százalékos változtatása, a függőleges tengelyen pedig a hőfokhídarány változása. A légcsereszám százalékos változtatása látható, de az alapegyenesen 0,5 1/h volt a kiindulási pont. A vizsgált légcsereszámok a 0; 0,125; 0,25; 0,375; 0,5; 0,625; 0,74; 0,875 és 1 [1/h].

A transzmissziós hőveszteség-tényező az alapegyenesen 16,49 W/K, melynek 0–32 közötti változása látható az ábrán.

A helyiség térfogatának változtatásakor 174,35 m³ volt a kiindulási érték, mely egységként 25% csökkentéssel, illetve növeléssel látható a diagramon.

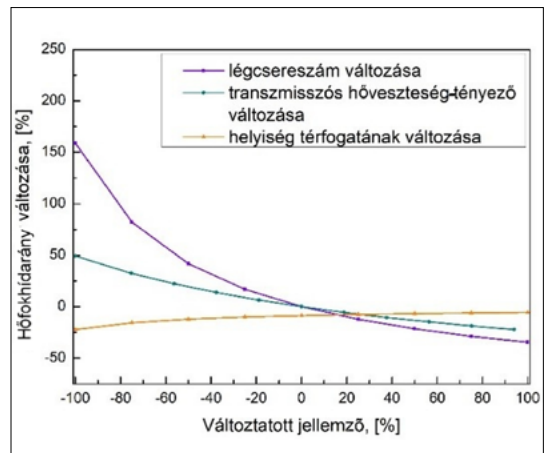
3.3. A szabadhűtés alkalmazási határa – a teljesítményoldalról

A következőkben azt vizsgálom, hogy a légcsereszám Δn értékkel megnövelése mit eredményez. Tekintsük a továbbiakban kiindulásnak azt a légcsereszámot n_{min} -nak, mely a természetes filtráció miatt kialakul. Az ehhez tartozó hűtési határhőmérséklet a következő összefüggéssel határozható meg [10]:

$$T_{B,min} = T_i - \frac{\dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_i}{H_{tr} + c \cdot \rho \cdot V \cdot n_{min}} \tag{8}$$

Ha ezen a légcsereszám n_{min} értékét Δn értékkel megnöveljük, az a hűtési határhőmérsékletben is változást eredményez. A változás mértéke:

$$\Delta T_B = \frac{T_i - T_{B,min}}{1 + \frac{n_{min}}{\Delta n} + \frac{H_{tr}}{c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta n}} \tag{9}$$



5. ábra. A hőfokhídarány változása a légcsereszám, transzmissziós hőveszteség-tényező és a helyiség térfogat-változtatásának függvényében

A megnövelt légcsereszám miatt a ventilátor által igényelt nagyobb villamos munka mennyisége [15]:

$$\begin{aligned} \Delta W_{ve} &= \frac{\Delta P_{hasznos}}{\eta_{ve}} \cdot \Delta \tau_{ve} = \frac{\Delta p_0 \cdot V \cdot \Delta n}{\eta_{ve}} \cdot \Delta \tau_{ve} \quad (10) \\ &= \left(\frac{\Delta p_0 \cdot V}{\eta_{ve}} \right) \cdot \Delta n \cdot \Delta \tau_{ve} \end{aligned}$$

A zárójeles tag a ventilátor nyomásfokozását, hatásfokát és a helyiség térfogatát jelenti. Elvileg ezek a ventilátor légcsereszámának növelésekor állandónak tekinthetők. A $\Delta \tau_{ve}$ a ventilátor működési ideje lesz.

A szabadhűtés alkalmazásával a hűtőgép működtetéséhez szükséges villamos munkát spórolunk meg. A megspórolt villamos munka:

$$\Delta W_{HG} = \frac{\Delta E_c}{SCOP_R} \quad (11)$$

A megnövelt légcseré (Δn) miatt megváltozik a határhőmérséklet (ΔT_B), emiatt pedig változik a hűtési órák száma ($\Delta N_{c,max}$ -ról ΔN_C -re csökken, vagyis pontosan $\Delta \tau_{ve}$ -vel csökken!). A határhőmérséklet változása és a hűtési órák száma között nincs kidolgozott matematikai összefüggés, a pontos kapcsolatot egyedi napok esetén kell megvizsgálni. [16]

A szabadhűtés alkalmazásának akkor van létjogosultsága, ha a megnövelt ventilációs munka kevesebb, csak egy előre meghatározott értékkel több, mint a megspórolt villamos munka (ezzel lehet figyelembe venni pl. az egyszerűbb technológiai kivitel).

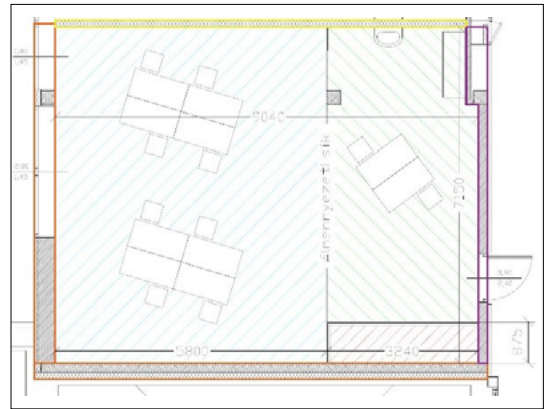
$$\Delta W_{ve} \leq z \cdot \Delta W_{HG} \quad (12)$$

Mint látható, a szabadhűtés alkalmazhatóságát célszerű egy esettanulmányon keresztül megvizsgálni.

4 Esettanulmány

4.1. A vizsgált épület bemutatása

A vizsgálatok során egy olyan helyiséget vizsgáltam (6. ábra), mely egy négyszintes (földszint és rajta 3 emelet) épület harmadik szintjén található. Az épület kialakításából adódóan a helyiség két külső fallal rendelkezik ($U=0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), melynek egy része üvegezett ($U_{üveg}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Ezek az értékek megfelelnek a magyarországi ÉKM-rendeletben rögzített írásoknak. A helyiség $61,45 \text{ m}^2$ alapterületű és $174,35 \text{ m}^3$ légtérfogatú. A helyiségben az üvegezett felület közelében 3 m belmagasság jellemző, míg az ajtóhoz közelebb 2,5 m. A 6. ábrán zöld területi jelöléssel látható



6. ábra. A vizsgált helyiség kialakítása: narancs – külső fal, citrom – belső fal a terem felől, lila – belső fal a folyosó felől, kék – belmagasság, 3 m, zöld – belmagasság, 2,5 m.

az álmennyezet miatti belmagassági különbség területe. A helyiség szerkezeteiből származó hővesztés tényezője (H_u) $16,49 \text{ W}/\text{m}^2$. A helyiség méretei az alábbi ábrán láthatóak [16, 17]:

A helyiséget kialakítása, tulajdonságai alapján három funkció szerint vizsgáltam meg: a kereskedelmi (pl.: vegyes kereskedésű kisbolt), irodai és lakossági (nappali). A 6. ábrán jelenleg az irodai funkciónak megfelelő belső kialakítással látható. Lakossági és kereskedelmi használat esetén a bútorok kialakítása és elrendezése változhat.

A helyiség vizsgálata során változtatott paraméterek:

- tájolás (észak, kelet, nyugat, dél);
- üvegezési arány 0–100% (40%);
- épületfunkció: iroda, kereskedelmi, lakossági;
- meteorológiai: extrém nyári nap, extrém hőségnap, extrém forró nap.

A vizsgált esetekben a belső hőmérsékletet egyenesen $24,5 \text{ °C}$ -kal vettem figyelembe, az MSZ CR 1752 ajánlása alapján. A hűtéssel potenciálisan érintett időszak külső állapotát három meteorológiai nappal (extrém forrónap, extrém hőségnap és extrém nyári nap) jellemeztem. A kiválasztás során a 2009–2019-es debreceni adatbázist használtam. Elsőnek elkülönítettem minden évből a háromféle meteorológiai napot. Ezután mindegyik vizsgált évben kiválasztottam a legnagyobb napi hőmérséklet-ingadozású napokat, mindhárom hőmérsékleti csoportból. Végül a harmadik körben a három hőmérsékleti csoportból mindig azt az évet választottam, ahol a legkisebb a napi hőmérséklet-ingadozás. A második körrel a cél az volt, hogy azokat a napokat találjam meg, ahol

várhatóan a legnagyobb az energiamegtakarítás, a harmadikkal pedig az, hogy a hirtelen időjárás-változásokat (pl. délelőtt süt a nap, délután esik az eső) kiszűrjem. [18, 19, 20]

A belső hőnyereségeket (emberek, gépek stb. hőleadása) az MSZ EN ISO 13790 szerint vettem fel. Az energiaigény-számításnál a kiinduló légcsereszám $n_0 = 0,5$ [1/h] értékét vettem figyelembe, melyet a természetes filtrációt jellemző értéknek vettem. Az adott funkcióhoz megállapítottam egy minimális légcsereszámot is, a benntartózkodók száma és az egy főre eső frisslevegő-igény alapján. A mesterséges szellőztetésnél és a gépi hűtésnél figyelembe vettem gépi jellemző értékeket az ÉKM ajánlásai alapján vettem figyelembe. Ezeket az értékeket az 1. táblázat foglalja össze. [17, 21]

1. táblázat. A gépészettel kapcsolatosan figyelembe vett adatok

	Jele	Értéke
Közös	η_{ve} : [%]	80%
	A_{p0} : [Pa]	500 Pa
	SEER: [-]	4
Iroda	n_{min} : [1/h]	1.0324
	A_C : [h]	7:00–17:00 (10 h)
	φ : [%]	30%
Kereskedelmi	n_{min} : [1/h]	4.3017
	A_C : [h]	7:00–19:00 (12h)
	φ : [%]	0%
Lakossági	n_{min} : [1/h]	0.6883
	A_C : [h]	0:00–24:00 (24h)
	φ : [%]	0%

4.2. Előzetes elemzések az energiaigény-számítás előtt

A potenciális energiamegtakarítások vizsgálata előtt célszerű kétféle előzetes elemzést is elvégezni. Az egyik a hőterhelés és a hűtési határhőmérséklet elemzése, míg a másik az újonnan bevezetett hőfokhid arányának vizsgálata.

4.2.1. Az üvegezési arány, a funkció és a tájolás hatása a hőterhelésre és a hűtési határhőmérsékletre

Az energiaigények elemzése előtt megvizsgáltam az üvegezési arány, a funkció és a tájolás hatását a hűtési határhőmérsékletre és a hőterhelés értékére. Az egyszerűsítés érdekében csak az extrém hőszénapot vettem figyelembe. Így összesen 36 esetet alakítottam ki az alábbiak szerint:

- 4 tájolás: észak, kelet, dél és nyugat;
- 3 funkció: iroda, lakóépület és kereskedelmi;
- 3 üvegezési arány: 20%, 40% és 80%.

A vizsgált eseteknél a belső hőmérsékletet az MSZ CR 1752 ajánlása alapján 24,5 °-on rögzítettem. A belső hőnyereségeket (emberek, gépek stb. hőleadása) az MSZ EN ISO 13790 szabvány szerint határoztam meg, amelyek a funkciótól függően változtak: labor esetén 5 W/m², irodánál 7,4 W/m², üzletben 10 W/m², míg nappalinál 9 W/m². [18, 21, 22]

A légcseréértékek (természetes és mesterséges) meghatározásánál az MSZ CR 1752 szabvány „A” komfortkategóriájának szellőző levegőigényeit vettem alapul, így irodánál 2,50 1/h, üzletben 5,3 1/h, nappaliban pedig 9,00 1/h értékkel számoltam. [18]

A következő ábrán láthatjuk a hűtési határhőmérséklet értékét (7.a ábra), illetve a hőterhelés értékét a 36 vizsgált esetben, különböző szempontok szerint csoportosítva (7. b,c,d ábra).

A 7a ábra alapján látható, hogy a hűtési határhőmérséklet értékét számos tényező jelentős mértékben befolyásolja, és az épület funkciója nem tekinthető az egyetlen vagy legmeghatározóbb szempontnak. Az ábrán megfigyelhető, hogy minél nagyobb az üvegezési arány (adott funkción belül a magasabb esetsorszámokhoz tartozik nagyobb üvegezési arány), annál alacsonyabb a hűtési határhőmérséklet. A vizsgált 48 esetben a hűtési határhőmérséklet értéke 17,53 °C és 23,66 °C között változik.

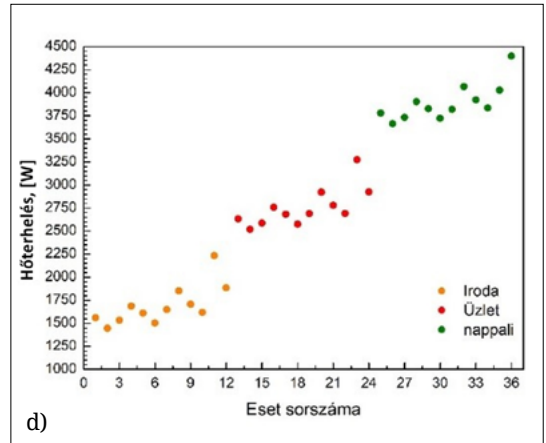
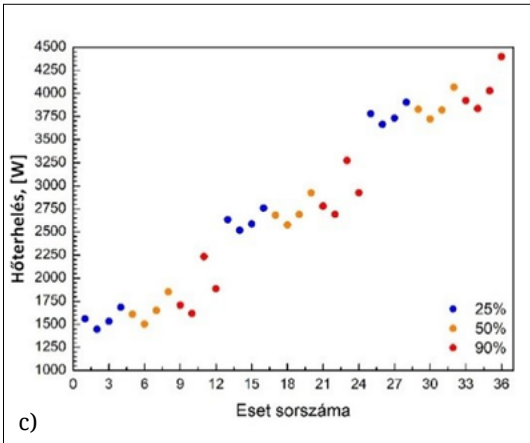
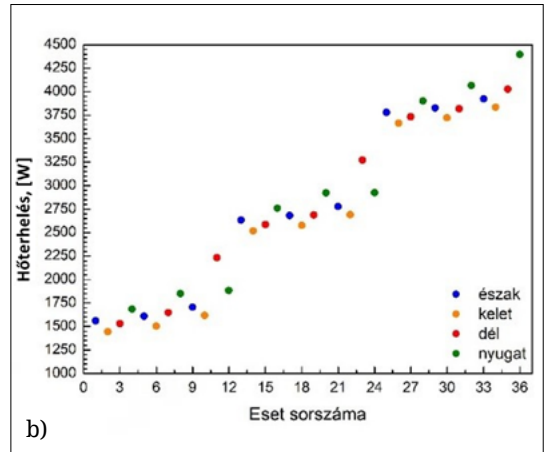
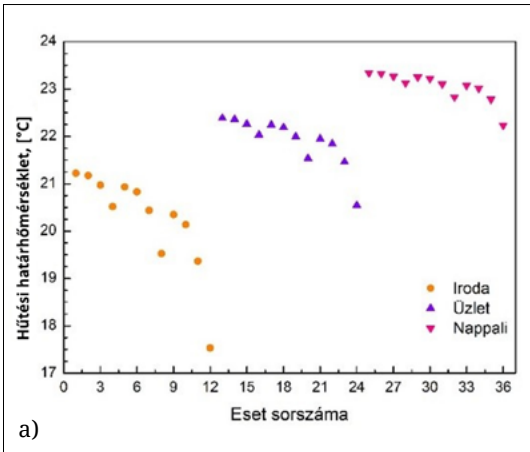
A hőterhelés vizsgálatánál a 7.b ábrán az azonos tájolású esetek, a 7.c ábrán az azonos üvegezési arányú esetek, míg az 7.d ábrán az azonos funkciójú esetek vannak egy színnel jelölve. Az ábrák alapján megállapítható, hogy egy adott funkció esetén a nyugati tájolású, illetve másodsorban a déli tájolású, nagy üvegfelületű helyiségeknél lesz nagyobb a hőterhelés értéke.

Úgy vélem, hogy ez az előzetes vizsgálat nem biztosított elegendő információt a domináns szempontok egyértelmű azonosításához, emiatt célszerű további vizsgálatok elvégzése is.

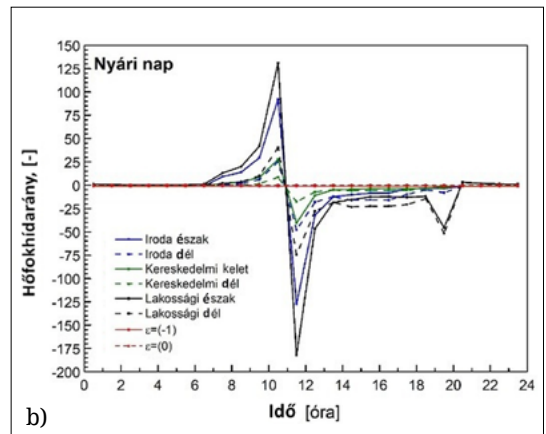
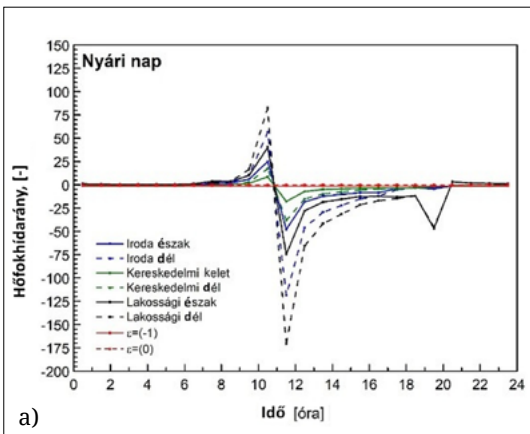
4.2.2. Előzetes elemzés a hőfokhidarány használatával

A szabadhűtés alkalmazásával megtakarítható energia meghatározása előtt vizsgáljuk meg azt, hogy a nap melyik időszakában, milyen tájolás és milyen külső meteorológiai állapotok mellett várható jelentős energiamegtakarítás.

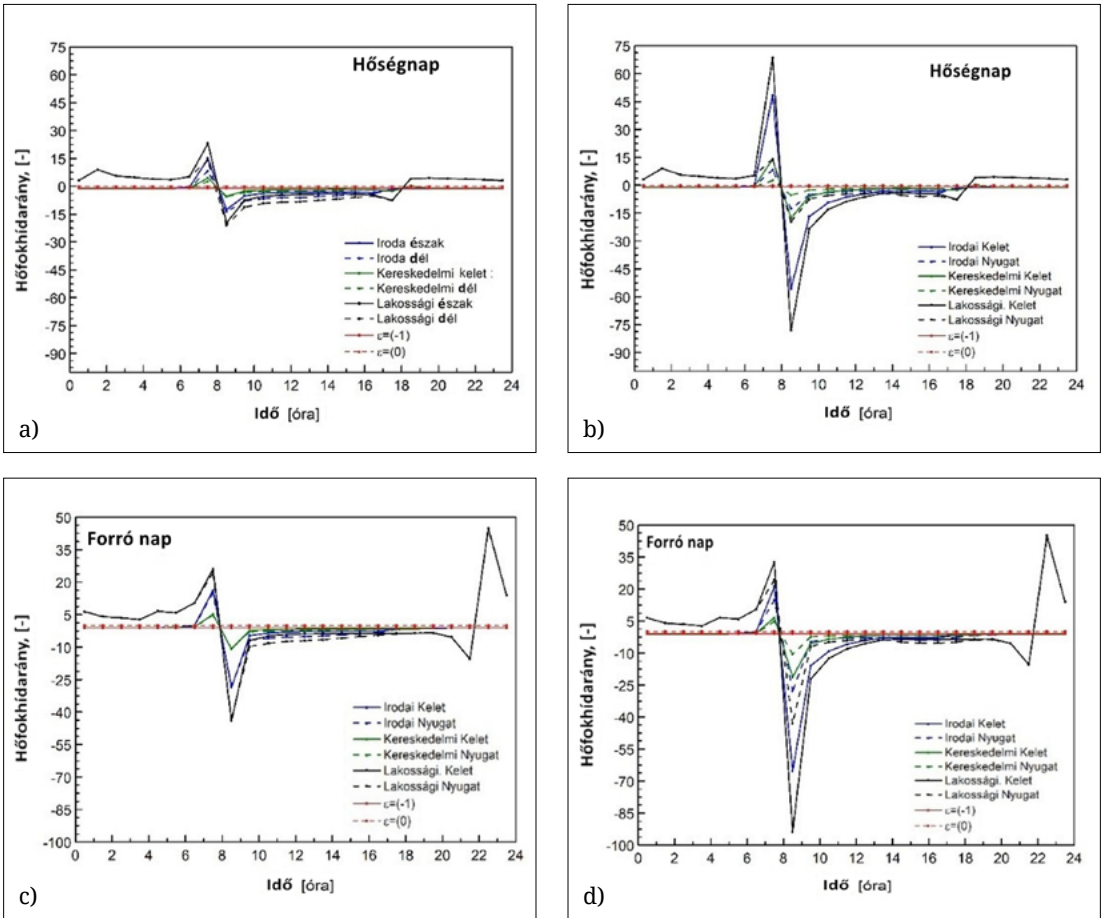
Ehhez rögzíteni kellett pár paramétert. Az első ilyen, hogy az üvegezést egységesen 40%-osnak



7. ábra. a) A hűtési határhőmérséklet, b) a nyári hőterhelés értéke, azonos tájolású esetek egy színnel, c) a nyári hőterhelés értéke, üvegezési arányú esetek egy színnel, d) a nyári hőterhelés értéke, azonos funkciójú esetek egy színnel



8. ábra. A hőfokhídarány értékének alakulása 40% üvegezés és n_{min} légcsereszám mellett. a) Nyári nap, É- és D-tájolás; b) nyári nap, K- és NY-tájolás



9. ábra. A hőfokhídarány értékének alakulása 40% üvegezés és n_{min} légcsereszám mellett. a) Hőségnap, É- és D-tájolás; b) Hőségnap, K- és NY-tájolás; c) Forró nap, É- és D-tájolás; d) Forró nap, K- és NY-tájolás

vettem, a másik pedig, hogy adott funkció mellett a légcsereszám értékénél a minimálisan (n_{min}) vettem figyelembe.

A könnyebb áttekinthetőség és az eredmények hangsúlyozása érdekében a nyári napok adatait külön ábrán tüntetem fel.

Az eredményeket a nyári nap esetén mutatja a 8. ábra.

A hőségnapok és forró napok esetén a 9. ábrán láthatóak:

Az ábrán a jobb átláthatóság miatt külön szemléltetem az É-D- és a K-NY- tájolásokat. Segítségként szerepelnek az $\varepsilon=0$ és az $\varepsilon=(-1)$ vonalak is. Ha az ε értéke kisebb, mint -1 , akkor kizárólag gépi hűtés jöhet szóba. Ha nullánál nagyobb pedig, akkor lehetőség van csökkentett gépi hűtés mellett szabadhűtést is használni.

Az eredmények alapján várhatóan a meteorológiai napok közül a nyári napoknál, utána a

hőségnapoknál, végül a forró napoknál várható jelentős megtakarítás. A tájolások esetén a keleti, a déli-, a nyugati- és az északitájolás-sorrend lesz megfigyelhető. Funkció esetén a lakóépület-, az iroda-, és a kereskedelmiépítmény-sorrend várható.

5. Következtetések

A jövőbeli energiaválságok lehetősége egyre inkább előtérbe helyezi az épületek várható energiaigényének minél pontosabb meghatározására irányuló törekvéseket. E dolgozat olyan újszerű megközelítéseket mutat be, amelyek jelentős mértékben hozzájárulhatnak a cél eléréséhez. Az elméleti elképzelések mellett egy konkrét esettanulmányon keresztül szemléltetem alkalmazhatóságát is.

Az első fejezetben bemutatam az alkalmazott módszerek elméleti hátterét. Bemutattam a hő-

fokgyakorisági görbét, a határhőmérséklet meghatározását, valamint a korábbi tudományos munka keretein belül kutatott funkciófüggő hatásfokot. Ezt követően ismertettem a szabadhűtés fogalmát, jelentőségét.

A második fejezetben a szabadhűtés létjogosultságát mutattam be. A hőfokgyakorisági görbén szemléltettem a szabadhűtési zóna értelmezését, majd ebből következően a hőfokhídarány-tényezőt is. A tényező egyenlet általi bemutatását követően érzékenységvizsgálatot végeztem el, mely szerint az alapegyenletből kiindulva, valamely tag értékét változtatva milyen mértékben változik a tényező értéke.

Ugyanebben a fejezetben foglalkoztam a szabadhűtés alkalmazási határával, mely során megvizsgáltam, hogy a légcsereszám egységnyi növelésével mit eredményez.

A következő fejezetben bemutatom az esettanulmányt. Elsősorban bemutatom a vizsgálat során használt épület tulajdonságait, számítások értékeit. Ezt követően diagramokkal szemléltetem az ϵ változtatás (pl.: nyári nap, hőségnap, forró nap) számításával kapott eredményeket.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Szabó G. L.: *Épületek sugárzó hűtési rendszereinek energetikai és exergetikai vizsgálata*. Doktori disszertáció. Debreceni Egyetem, 2020.
- [2] Development, Hungarian Ministry of National, *National Energy Strategy 2030*. 2012.
- [3] Béni E., Szabó G. L.: *A belső léghőmérséklet változtatásának hatása az energiaigényekre*. Magyar Épületgépészet, 72/7–8. (2023) 1–5.
- [4] T. Abergel és C. Delmastro: *Is Cooling the Future of Heating?* International Energy Agency, 2020. <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>
- [5] C. Fan, B. Zou, Y. Liao, X. Zhou: *Evaluation of Energy Performance and Ecological Benefit of Free-Cooling System for Data Centers in World-wide Climates*. Sustainable Cities and Society, 108. (2024) 105509. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105509>
- [6] A. Aili, W. Long, Z. Cao, Y. Wen: *Radiative Free Cooling for Energy and Water Saving in Data Centers*. Applied Energy, 359. (2024) 122672. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122672>
- [7] R. Mi, X. Bai, X. Xu, F. Ren: *Energy Performance Evaluation in a Data Center with Water-Side Free Cooling*. Energy and Buildings, 295. (2023) 113278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113278>
- [8] H. M. Ljungvist, M. Risberg, A. Toffolo, M. Vesterlund: *A Realistic View on Heat Reuse from Direct Free Air-Cooled Data Centres*. Energy Conversion and Management: X, 20. (2023) 100473. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100473>
- [9] B. Bodó, E. Béni, G. L. Szabó: *A Facility's Energy Demand Analysis for Different Building Functions*. Buildings, 13/8. (2023) 1905. <https://doi.org/10.3390/buildings13081905>
- [10] Z. Verbai, I. Csáky, F. Kalmár: *Balance Point Temperature for Heating as a Function of Glazing Orientation and Room Time Constant*. Energy and Buildings, 135. (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.024>
- [11] Y. Yang, B. Wang, Q. Zhou: *Air Conditioning System Design Using Free Cooling Technology and Running Mode of a Data Center in Jinan*. Procedia Engineering, 205. (2017) 3545–3549. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.924>
- [12] J. Mahan: *What Is Free Cooling? Free Cooling HVAC Chillers Guide*. [Hozzáférés: 28 10 2024]. <https://cc-techgroup.com/free-cooling/>.
- [13] W. Zhao, H. Li, S. Wang: *A Generic Design Optimization Framework for Semiconductor Cleanroom Air-Conditioning Systems Integrating Heat Recovery and Free Cooling for Enhanced Energy Performance*. Energy, 286. (2024) 129600. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129600>
- [14] Y. Zhou, S. Li, Q. Li, F. Wei, D. Yang, J. Liu, D. Yu: *Energy Savings in Direct Air-Side Free Cooling Data Centers: A Cross-System Modeling and Optimization Framework*. Energy and Buildings, 308. (2024) 114003. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114003>
- [15] I. Soltész, G. Szakács: *Az épületek energiahatékonyasága. Uniós és hazai szabályozás*. Wolters Kluwer Hungary Kft., 2019.
- [16] A. Zöld, T. Csoknyai, M. Horváth, Z. Szalay: *Az épületenergetika alapjai*. Akadémiai Kiadó, 2019.
- [17] 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet, 2023.
- [18] MSZ-CR-1752:2000, 2000.
- [19] G. L. Szabó: *Hűtési igények*. [Performance]. 2022.
- [20] Országos Meteorológiai Szolgálat, [Online]. https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/homerseklet/?fbclid=IwAR35blrUrrPZCC1YSSkqpXhMuSuyHtLEkPp2gVuAqv4HwcZHFp4zTGkKouY.
- [21] MSZ EN ISO 13790:2008, 2008.
- [22] MSZ 04-140-4:1978, 1978.
- [23] Z. Yang: *Building Thermal Energy Efficiency Modeling Based on Light Image Inspection and Super Resolution Algorithm in Interior Landscape Design*. Thermal Science and Engineering Progress, 54. (2024) 102818. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102818>