



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

Épületgépészet és eljárástechnika részprogram

**ENERGIATUDATOS KLIMATIZÁLÁS,
KÜLÖNÖS TEKINTETTEL ELTÉRŐ RENDELTETÉSŰ ZÁRT
TEREK KOMFORTJÁRA**

című PhD értekezés téziszülete

Írta:

Szabó János

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. habil Kajtár László

egyetemi docens

Budapest
2017

1. A KUTATÁSI TÉMA AKTUALITÁSA

Európában az energiafelhasználás 40%-át az épületek energiafelhasználása adja. Az energiafelhasználás és szén-dioxid kibocsátás csökkentése emiatt elsősorban az épületek energiafelhasználásának korlátozásával érhető el. Ezt a kezdeményezést indította el az Európai Parlament és Tanács 2002/91/EC direktívája, majd később ezt felülírta a 2010-ben elfogadott EPBD átdolgozott direktíva. Ez már további intézkedéseket is tartalmazott a „közel nulla energiaigényű épületek” követelményeinek 2018 és 2020-as bevezetésére vonatkozólag. Ezzel egyidőben a tagállamok – köztük Magyarország is – számítási módszert dolgoztak ki az épületek energiaigényének meghatározására (7/2006 (V.24) TNM rendelet), majd ennek felülvizsgálataként ez átdolgozott változatát (40/2012. (VIII. 13.) BM rendelet és a. 20/2014. (III. 7.) rendelet). Az érvényes nemzetközi és hazai szabályozás is indokolja, hogy az épületek energiafelhasználásának csökkentése a globális energiafelhasználás és emisszió miatt kiemelt terület.

Az épületek energiafelhasználásán belül a klimatizálás jelentős részarányt képvisel. Ugyanakkor egyre magasabb komfortszintet kell biztosítani az épületekben. Egyidejűleg jelentkezik az energiafelhasználás csökkentésének és a komfort növelésének igénye. Az energiafelhasználás csökkentése azonban nem mehet a komfort rovására. Emiatt megoldandó feladat a komfort folyamatos ellenőrzése a nemzetközi gyakorlatnak megfelelően.

Az energiafelhasználás csökkentésének sok technikai megoldását alkalmazzák napjainkban. Ezek részben a hőterhelés csökkentését szolgálják, illetve az eredő hőterhelés kompenzálásának lehetséges módjait tartalmazzák. Az energiafelhasználás csökkentésének lehetőségei:

- belső hőterhelés csökkentése,
- bejutó hőterhelés csökkentése (környezeti hatásoktól való védelem):
 - „passzív” védelem: tájolás, földalatti elhelyezés, stb.,
 - „aktív” védelem: épületszerkezet, árnyékolás, stb.,
- kisebb energiaigényű klimatizálás:
 - jobb energiahatékonyaságú berendezések, hővisszanyerés, szabadhűtés, entalpia-szabályozás, stb.,
- érezhető és totális hűtőteltjesítmény aránya,
- bevezetett frisslevegő szükséges mennyiségére csökkentése,
- távozólevegő visszakeverése.

2. A KUTATÁSI TÉMA ISMERTETÉSE, CÉLKITŰZÉSEK

Az energiafelhasználás csökkentése nagyszámú módszer vizsgálatát teszi lehetővé. Komfortterek esetében egyidejűleg jelentkezik az energiafelhasználás csökkentésének és a komfort növelésének igénye, emiatt az alábbi – két önálló csoportra elkülöníthető – feladat megoldását végeztem el:

- a komfortterek földfelszín alatti elhelyezkedésének hőtechnikai elemzése instacioner modell alapján,
- zárt terek hő- és levegőminőségi komfortjának elemzése, értékelése valószínűségelméleti alapon.

A földalatti tér esetében elsődleges cél meghatározni a beltér levegőjének, valamint a belső falfelület hőmérsékletének időbeli változását. Járulékos célként meghatározandó a falon áthaladó hőáramsűrűség időbeli változása is. Az energiamérleg alapján felírásra kerül a helyiségre vonatkozó hőegyensúlyi alapegyenlet. Az alapegyenlet differenciálegyenlet, amely tartalmazza a belső hőforrásokat és a helyiség hőkapacitását. A megoldáshoz kezdeti feltétel és időben változó harmadfajú peremfeltétel, valamint a Fourier-féle hővezetés differenciálegyenletének felhasználása szükséges. Az alapegyenletbe a hőmérsékletek és hőáramok visszahelyettesítésével kapott integro-differenciálegyenlet felhasználásával kapjuk a megoldásfüggvény konvolúciós integrálját. A fizikai modell új matematikai megoldását ezen követelmény alapján dolgoztam ki. A kapott egyenlet megoldása csak numerikusan történhet. A kapott eredményeket numerikus formában, mátrixba rendezve keresem, az értékelés megkönnyítése céljából pedig grafikusán is ábrázolom. A kidolgozott fizikai és matematikai modell alapján a földalatti tér fűtési és hűtési teljesítményigénye meghatározható, és a hőérzeti értékelés is elvégezhető. Így a legkisebb energiaigényű változat (szellőztetés, hűtés, fűtés) meghatározható. Elemeztem az egyes paraméterek hatását. Az instacioner modell és megoldása alapján több változatot értékeltem. A hőérzeti követelmények alapján az energetikailag legkedvezőbb változat így kiválasztható.

Mivel emberi tartózkodásra alkalmas zárt terek energiatudatos tervezése csak a megfelelő komfortszint megtartásával történhet, ezért a másik megoldandó feladat mérési metodika és kiértékelési módszer kidolgozása volt klimatizált terek komfortjának értékelésére a valószínűségszámítás módszereivel.

3. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÁS

A célkitűzésekre vonatkozóan két önálló csoportra bontottam a tématerülethez kapcsolódó szakirodalmak tanulmányozását.

3.1 Földalatti terek hőtechnikája

A földalatti terek fontos sajátossága a külső időjárás hatásaival szembeni nagyobb védelem. A földalatti tér közel állandó hőmérsékletével biztos védelmet jelentett a hideg tél és a forró nyár ellen egyaránt [1], [2], [3]. A talaj hőmérséklete fáziskéséssel és jelentős csillapítással követi a külső hőmérséklet változását, ezért a fűtési és hűtési hőigényük lényegesen kisebb, így a földalatti terek építése a természeti hatásokkal szembeni védekezés mellett energetikai szempontból is előnyös [4], [5].

A talaj hőmérsékletváltozására vonatkozólag 1862-ben Lord Kelvin igen jó összefüggést adott, még napjainkban is használják. A leíró egyenlet egy magasabb rendű harmonikus modell [6]. Az elméleti modellhez kettős harmonikus modell szerint földrajzi elhelyezkedés és a földfelszín jellege szerint Xing doktori értekezésében találhatunk részletes adatsorokat, köztük Magyarországra vonatkozókat is [7].

Az 1950-es évektől kezdve találhatók szakirodalmak a földalatti terek méretezésének módszereiről. Kezdetben csak a stacioner modellezésre vonatkozólag találhatunk irodalmakat. A stacioner modellezésekre vonatkozólag átfogó és részletes szakirodalmi feldolgozást és tanulmányt Bogoszlovskij et. al. [8] és Macsinszkij [9] végeztek. Később már dinamikus folyamatokat közelítő módszerek is készültek, amelyek már alkalmasak voltak a felmelegedési periódus modellezésére. Ezek a méretezési eljárások már a hővezetés differenciálegyenletéhez tartozó időben változó peremfeltételeket első- és másodfajú peremfeltételként közelítették: Lakos [10], Barcs [11], Gráber [12], Kokits [13] és Straub [14]. A BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárastechnika Tanszékén Erdősi és Kajtár időben változó harmadfajú peremfeltételt alkalmaztak a földalatti tér hőtechnikai leírására [15]. A későbbi tanulmányok elsősorban a hőkomfort elemzését, összehasonlítását vizsgálták földalatti terek esetében. Yanqiang et. al. [16] kifejlesztettek egy hőkomfort értékelésére szolgáló hőérzeti mutatót (a Fanger-féle PMV jellemzőhöz hasonlóan) aluljárók, földalatti áruházak és földalatti szállodák esetére. Objektív és szubjektív vizsgálatokat végeztek műszeres méréssel és hőkomfort kérdőívek segítségével a PMV-PPD alapján. C. van Dronkelaar et. al. [5] elméleti úton vizsgálta a földalatti terek fűtési és hűtési energiaigényét.

3.2 Zárt terek komfortjának vizsgálata

A hőkomfort az egyénben kialakuló szubjektív érzet. Ennek a szubjektív képnek a megítélésére objektív módon méréstechnikai módszerek alkalmazásával van lehetőség. A műszaki gyakorlat számára is jól hasznosítható objektív módszeren alapuló, tudományos hőkomfort vizsgálatok kezdete a XX. század elejére tehető. Az egyik legkorábbi – a mai napig is alkalmazott – módszer a Kata-termometriás mérés az 1900-as évek elejére datálható. A módszert és a mérésekkel szerzett tapasztalatokat nagy részletességgel ismertette C. E. A. Winslow 1916-ban [17].

A Kata hőmérővel történő mérést a mai napig használják, azonban felhasználási korlátai miatt új módszerek alkalmazása vált szükségessé a mikroklímás mutatók vizsgálatára. Emiatt később kidolgozták az effektív, majd a korrigált effektív hőmérséklet mérésének módszerét, fogalmát [18], [19]. A modern komfortkutatások mindössze néhány évtizedes múltra tekintenek vissza, ekkor vált a komfortkutatás kiemelt kutatási területté. A mai modern módszer kidolgozása az 1970-es évekre tehető, amikor P. O. Fanger dán professzor és kutatócsoportja kidolgozták a hőkomfort objektív mérésének lehetőségét, ezzel őt tekintjük a mai modern komfortkutatás úttörőjének [20]. A kidolgozott módszer hat paramétert vett figyelembe, amelyek közül kettő az egyén adottságait veszi figyelembe, négy pedig a termikus környezet fizikai jellemzőit:

- a levegő hőmérséklete, annak térbeli, időbeli eloszlása, változása,
- a környező felületek közepes sugárzási hőmérséklete,
- a levegő relatív nedvességtartalma (a levegőben lévő vízgőz parciális nyomása),
- a levegő relatív sebessége,
- az emberi test hőtermelése, hőleadása, hőszabályozása:
 - az emberi test hőtermelése, amely elsősorban a végzett tevékenység függvénye, de belejártzik bizonyos fokig az egyén kora, neme stb.; tehát ez műszakilag nem változtatható,
 - az emberi test hőleadása, amely viszont nagymértékben függ a ruházkodástól, valamint az előzőekben említett műszaki paraméterek hatásától,
- a ruházat hőszigetelő képessége, párolgást befolyásoló hatása.

A módszer eredményeképp meghatározható a termikus környezetre jellemző mutatószám (PMV: Predicted Mean Vote), ezzel pedig a hőkönyezettel várható elégedetlenségi arány (PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied). A PMV-PPD módszer a termikus környezetre jellemző, emberi test egészére vonatkozó hőérzeti mutatószámot adja eredményül. Mivel az embert körülvevő környezet jellemzően

inhomogén, ezért további termikus környezetet jellemző módszer kidolgozása is szükségessé vált. Ehhez az úgynevezett helyi diszkomfort tényezők vizsgálatára és számszerűsítésére használatos módszert is kidolgozott Fanger és kutatócsoportja. A helyi diszkomfort tényezők az alábbiak:

- huzathatás,
- vertikális hőmérséklet-különbség,
- aszimmetrikus sugárzás,
- hideg és meleg padló.

Fanger módszereit később nemzetközi szabványok és előírások is rögzítették (pl.: ISO 7730, ASHRAE 55). Erre vonatkozólag követelményértékeket is meghatároztak a CEN CR 1752, EN 15251, stb szabványokban, előírásokban, ajánlásokban. A PMV módszert klimatizált terek esetében általánosan alkalmazhatóként fogadták el, ezért én is ezt választottam a zárt terek komfortjának vizsgálati módszereként.

3.3 Szakirodalmi összegzés

A kapcsolódó szakirodalomkutatás eredményeképp megállapíthatom, hogy földalatti terek méretezését időben változó első- és másodfajú peremfeltétellel közelítették, az erre vonatkozó szakirodalmak már jól ismertek. A valós hőtechnikai folyamatot azonban a harmadfajú, időben változó peremfeltétellel megadott hővezetés differenciálegyenlete írja le. Erre a Robin-peremfeltételi problémára csak korlátozottan találni szakirodalmi forrásokat. A témával emiatt részleteiben is foglalkozom a doktori értekezésben.

Helyszíni komfortmérésekkel foglalkozó szakirodalmak nagy számban megtalálhatók. Egy részük új hőkomfort elméletek, új hőérzeti mutatók meghatározásával foglalkozik, más részük az általánosan is elfogadott Fanger-féle PMV-PPD módszer létjogosultságát, adott földrajzi régióban való alkalmazhatóságát vizsgálja, harmad részük pedig helyszíni komfortmérések tudományos szempontból hasznos eredményeiről, tapasztalatairól számol be.

Komfort mérések vizsgálatával foglalkozó szakirodalmak a komfortjellemzők eloszlását egymódusú eloszlásként feltételezik, amely kutatások egy része ezen belül normál eloszlásúként kezeli. Célul tűzöm ki ezek után az eloszlás többmódusúságának, valamint az eloszlás típusának a vizsgálatát.

A komfortterek differenciált komfortkategóriák szerinti osztályozásával foglalkozó szakirodalmak túlnyomó többsége stacioner, vagy kvázistacioner folyamatokat

feltételezve minősítik a termikus környezetet. A valós komfortparaméterek időben folyamatosan változó fizikai mennyiségek, kiértékelésük valószínűségelméleti megközelítést igényel. Erre vonatkozó mérési metodika és kiértékelési módszer együttes meghatározására nem találtam szakirodalmat. Megfelelően felépített mérőrendszerrel és kiértékelési módszerrel van csak mód a környezet pontos komfortjellemzőinek a meghatározására. Ezért az elvárásoknak eleget tevő mérési metodika és kiértékelési módszer kidolgozását is célul tűzöm ki.

Szintén nem találtam szakirodalmat, amely a különböző klímatechnikai rendszerekkel elérhető komfortot vizsgálta volna. A helyszíni mérések megtervezését, lefolytatását, végül értékelését ezen szempontok figyelembe vételével tettem meg.

4. TÉZISEK

4.1 *Komfortterek földfelszín alatti elhelyezkedésének hőtechnikai elemzése instacioner modell alapján*

A földalatti terek hőtechnikai méretezésére szolgáló matematikai modelljének újszerű megoldására dolgoztam ki módszert. A 2. tézis a fal felületi hőmérsékletének és a falon áthaladó hőáram időbeli változásának leírására szolgáló összefüggést tartalmazza. Az 1. tézis a földalatti tér hőtechnikai méretezésére szolgáló matematikai modellt, annak numerikus megoldásának módszerét tartalmazza.

1. tézis

Instacioner matematikai modellt dolgoztam ki a földalatti tér hőtechnikai vizsgálatához. A modell az időben közel állandósult (kvázistacioner) hőmérsékletű talajmélység tartományában értelmezett. Ez a mérnöki gyakorlat szempontjából a felszíntől számítva 8-10 m mélységtől kezdődik (földrajzi elhelyezkedés és talajtípus függvényében), ahol a hőmérsékletingadozás amplitúdója 0,2-0,6°C. A földalatti tér levegőjének hőmérsékletváltozását leíró integro-differenciálegyenlet:

$$\frac{dt_a(\tau)}{d\tau} + k_1 t_a(\tau) + k_2 \cdot \left[\int_0^\tau [t_a(\tau - u) - t_a(0)] \cdot g(u)|_{x=0} du + t(x, \tau)|_{\tau=0, x=0} \right] + k_3 = 0$$

ahol:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{A\alpha + \dot{m}_s(c_{p,a} + x_a \cdot c_{p,s})}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}, \\
 k_2 &= -\frac{A\alpha}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}, \\
 k_3 &= \frac{\dot{Q} - \dot{m}_s(x_a \cdot r_0 - h_s)}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}, \\
 x_a(\tau) &= Z_1 + x_s - e^{-Z_2\tau \cdot (Z_1 + x_s - x_a|_{\tau=0})}, \\
 Z_1 &= \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_s}, \\
 Z_2 &= \frac{\dot{m}_s}{V \cdot \rho_a}, \\
 a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c}.
 \end{aligned}$$

Kezdeti feltétel:

$$\tau = 0 : t_a(0) = t(x, 0) = const.$$

Az integro-differenciálegyenlet megoldása nem fejezhető ki zárt alakban, mivel a megoldásfüggvényt nem lehet analitikusan előállítani. A megoldáshoz ezért numerikus módszereket alkalmaztam. **A diszkrét megoldás lineáris többlépéses séma implicit eljárásával történt. A numerikus eljárást Dormand-Prince metódussal és Adams-Moulton integrátorokkal végeztem a numerikus séma különböző fázisaiban. Az indító lépésekben (negyedik lépésig) nyolcadrendűbe ágyazott hetedrendű Dormand-Prince metódust, míg a számítások további részeiben hatodrendű Adams-Moulton formulát alkalmaztam. Így az ötödik lépés után a keresett $t_a(\tau)$ változóra (levegőhőmérséklet) nézve már hatodrendű a közelítés.**

A konvolúciós integrál diszkrét megoldását a fokozott pontosság érdekében elemi interpolációs kvadratura képlettel határoztam meg. A numerikus kvadratura számításához a kompozit Simpson-formulát alkalmaztam, melynek illeszkedése negyedrendű.

A numerikus számítási lépések csökkentése érdekében a komplementer hibafüggvény argumentumát több intervallumra bontottam fel nem egyenletes módon. A fizikai folyamatból adódóan elegendő mindezt a pozitív valós számok

halmazán elvégezni, azonban a módszer a teljes valós számok halmazára is alkalmas. **Minden egyes intervallumon különböző közelítő eljárást alkalmaztam, tizenegyedfokú MacLaurin-formulával, valamint nyolcad- és ötödfokú Chebyshev-féle aszimptotikus sorral.**

Kapcsolódó publikációk: [S4], [S5], [S21], [S22], [S30].

2. tézis

Meghatároztam földalatti tér esetében a fal felületi hőmérsékletének és a falon áthaladó hőáram időbeli változását instacioner modell alapján.

A földalatti teret határoló fal hőmérséklete:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = \int_0^\tau [t_a(\tau - u) - t_a(0)] \cdot \left\{ H \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} - aH^2 e^{aH^2 u} \cdot \operatorname{erfc}[H \sqrt{au}] \right\} du + t(x, \tau)|_{\tau=0, x=0}$$

Hőátvitel a falon keresztül:

$$\dot{Q}_w(\tau) = \int_A \alpha [t_a(\tau) - t(x, \tau)|_{x=0}] dA$$

ahol

α [W/m ² K]	hőátadási tényező
$t_a(\tau)$ [°C]	földalatti tér levegőjének hőmérséklete,
$t(x, \tau) _{x=0}$ [°C]	földalatti teret határoló fal hőmérséklete.

Kapcsolódó publikációk: [S4], [S5], [S10], [S21], [S22].

4.2 Zárt terek hő- és levegőminőségi komfortjának értékelése, minősítése valószínűségelméleti alapon

Helyszíni mérések során alkalmazható mérési metodikát és kiértékelési módszert dolgoztam ki az időben változó komfort minősítéséhez. A mérési módszert és mérési metodikát a 3. tézis írja le. Az időben változó komfort értékelését és minősítését a 4. tézis tartalmazza. Az 5. tézis a helyszíni mérés eredményei alapján az időben változó komfortjellemzők eloszlásának jellemzését, valamint az eloszlások identifikációját részletezi. A 6. tézis helyszíni mérések alapján tesz összehasonlító megállapításokat különböző klimatechnikai rendszerekkel üzemelő komfortterekre.

3. tézis

Mérési módszert és mérési metodikát dolgoztam ki az időben változó komfort értékelésére. A hőkomfort értékeléséhez a PMV modellt alkalmaztam, amely hat paramétert vesz figyelembe, amelyek közül kettő az egyén adottságait veszi figyelembe (emberi test hőtermelése, ruházat hőszigetelő képessége), négy pedig a termikus környezet fizikai jellemzőit (levegő hőmérséklete, környező felületek közepes sugárzási hőmérséklete, levegő relatív nedvességtartalma, levegő relatív sebessége). A termikus környezet jellemzői időben folyamatosan változó paraméterek. A kidolgozott módszer folyamatos mintavételezésen alapszik, melynél a levegő hőmérsékletét, környező felületek közepes sugárzási hőmérsékletét és a levegő relatív nedvességtartalmát 5 perces mintavételi gyakorisággal határoztam meg. A turbulenciafok és átlagos relatív légsebesség meghatározása érdekében a relatív légsebesség mérésének mintavételezését ennél nagyobb gyakorisággal szükséges elvégezni. Mérési eredményeim kiértékelései azt igazolták, hogy a javasolt mintavételezési időköz a légsebesség mérésére vonatkozólag 2 másodperc. Amennyiben 5 másodpercnél magasabb ez az érték, abban az esetben a mért értékek nem jellemzik megfelelően a légsebesség változását a térben, valamint a mérési sokaság száma alapján már nem adható megfelelő statisztikai becslés a turbulenciaintenzitás számszerű adataira. A szén-dioxid koncentráció mérésének mintavételezési időközét 5 percben állapítottam meg. Az alábbi táblázat tartalmazza a helyszíni komfortmérő-rendszerekkel szemben támasztott követelményeket a kidolgozott mérési metodika alapján:

Mért fizikai jellemző	Mérési tartomány	Pontosság	Válaszidő	Minta-vételezési időköz	Megjegyzés
Szén-dioxid koncentráció	0 - 3 000 ppm 0 - 0,2 V/V%	$\pm [50 + 0,05 k_{CO_2}]$ ppm	3 min (t90)	5 min	-
Levegőhőmérséklet	10 - +40°C	$\pm 0,3$ °C	3 min (t90)	5 min	érzékelőt sugárzástól védett kialakítás
Relatív páratartalom <i>Parciális vízgőznyomás</i>	10 - 90% 150 - 6 500 Pa	± 3 %RH ± 150 Pa *abban az esetben, ha $ t_{ts}-t_a \leq 4$ °C	3 min (t90)	5 min	-
Gömbhőmérséklet	5 - 50°C	$\pm 0,5$ °C	20 min (t90)	30 min	-
Légsebesség	0,02 - 1,0 m/s	$\pm (0,02 + 0,07 v_a)$ m/s * $\geq 3 \pi$ sr térszögtartományban	0,5 s (t63)	2 s	amennyiben a szenzor nem irányfüggetlen, abban az esetben a levegő áramlási irányának megfelelően helyezendő az érzékelő

Kapcsolódó publikációk: [S3], [S7] [S11], [S23].

4. tézis

Matematikai modellt és PC programot fejlesztettem ki az időben változó komfort értékelésére és minősítésére. A vizsgált jellemzők valószínűségi változókként kezeltem, így a mért értékek statisztikailag jellemezhetők. Az idősorok értékeiből tapasztalati sűrűségfüggvények, vagyis hisztogramok képezhetők. Komfortterek vizsgálatakor a mért adathalmazok kiértékelését követően a statisztikai jellemzők meghatározásával kaphatunk reprezentatív kvantitatív képet az adott komfortterről. A mérési eredmények feldolgoása és kiértékelése a 95%-os konfidenciaintervallum alapján történt, összevetve a komfortkategóriák követelményeivel.

Kapcsolódó publikációk: [S2], [S12], [S16], [S17], [S18], [S19], [S26], [S27], [S28], [S29].

5. tézis

Helyszíni méréseim kiértékelései azt igazolták, hogy a vizsgált komfortparaméterek eloszlása jellemzően többmódusú eloszlást követ. Az eloszlás a műszaki gyakorlat számára jól értelmezhető és kezelhető normális eloszlások keverékeként előállítható. Megállapítom, hogy az optimálisan meghatározott kettős kevert normális eloszlás jó illeszkedést mutatott a mérési adatsorokra, tehát a mért jellemzők kettős kevert normál eloszlást követnek.

$$p(x) = \sum_{k=1}^2 [n_k \cdot \mathcal{N}(x|\mu_k, \sigma_k)]$$

ahol

$n_k \in [0; 1]$ az egyes normális eloszlás komponensek részaránya,

$$\sum_{k=1}^2 n_k = 1$$

$$\mathcal{N}(x|\mu_k, \sigma_k) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}}$$

A legjobban illeszkedő eloszlás optimális paramétereinek meghatározására előállítottam a maximum-likelihood függvény segítségével a célfüggvényt. A célfüggvény maximumának tekinthetjük optimálisnak az eloszlás paramétereit. Erre az ötváltozós maximumkeresési feladatra vonatkozólag megadtam a javasolt algoritmust (EM: expectation-maximization és GA: genetikus algoritmus).

Kapcsolódó publikációk: [S1], [S6], [S8], [S9], [S13], [S14], [S20], [S25].

6. tézis

Helyszíni méréseket végeztem különböző irodaépületekben, melyek parapet fan-coil, légszarnázható fan-coil és aktív klímagerenda rendszerrel üzemeltek. A jellemző nyári időszakban végeztem valamennyi rendszerre vonatkozólag komfort vizsgálatokat. A mérést és a mérések kiértékelését az általam kidolgozott módszer szerint végeztem. A komfortkategória-szinteket az MSZ CR 1752:2000 differenciált komfortkövetelményei alapján állapítottam meg. Az összehasonlítást is ezen eredmények alapján teszem meg, mely összehasonlítási szempontjait két részre bontottam: rendszertípusok, valamint kategóriák szerinti összehasonlítás.

Komfortkategória-szintek alapján

„A” kategória:

Megállapítható, hogy hőkomfort szempontjából legnehezebb biztosítani az „A” legmagasabb kategóriaszint elvárásait (0-22,2%). Ennél kedvezőbb a helyzet a levegőhőmérséklet szempontjából („A” kategória 6,1-38,6%), még jobb a

huzatérzet szempontjából („A” kategória 33,3-90,3%), legkedvezőbb a helyzet CO₂-koncentráció szempontjából („A” kategória 73,7-100%).

„>C” kategória:

A „C”-nél rosszabb kategória estében az alábbi trendek állapíthatók meg. A hőkomfort biztosítása a legnehezebb („>C” kategória 11,1-55,6%). Kedvezőbb a helyzet a levegőhőmérséklet szempontjából („>C” kategória 15,7-33,3%), még kedvezőbb huzatérzeti szempontból („>C” kategória 0-5,6%), a legkedvezőbb pedig CO₂-koncentráció szempontjából, mivel a „>C” kategóriába egyik rendszer esetében sem tartozott mérési eredmény.

„B” és „C” kategória:

A „B” és „C” kategóriába az alábbi mérési eredmények kerültek:

- hőkomfort: 16,7-38,9%,
- levegőhőmérséklet: 18,2-42,4%,
- huzatérzet: 0-66,7%,
- CO₂-koncentráció: 0-15,8%.

Komfortjellemzők szerint

Hőkomfort:

Hőkomfort szempontjából a legjobb eredményt az érintőleges légvezetési rendszerrel kiépített légszűrő nélküli fan-coil adja, míg a legrosszabb eredményt a parapet fan-coil rendszer adja.

Levegőhőmérséklet:

Levegőhőmérséklet szempontjából a legjobb eredményt az aktív klímagerenda rendszer adja („A” kategória 38,6%).

Huzatérzet:

Huzatérzet szempontjából a legjobb eredményt az aktív klímagerenda rendszer adja („A” kategória 90,3%).

Szén-dioxid koncentráció:

A komfortvizsgálatok igazolták, hogy a szén-dioxid koncentráció szempontjából lényegesen jobb komfortkategóriák érhetők el, mint hőkomfort, huzatérzet és levegőhőmérséklet esetén. Az egyes rendszerek közti eltérés kismértékű. Ez adódik abból, hogy a CO₂ koncentráció alapvetően a frisslevegő mennyiségétől függ, kevésbé

a klimatechnikai rendszer fajtájától. **A kapott eredmények az „A” kategóriára vonatkozólag 73,7-100% közé estek.**

Kapcsolódó publikációk: [S3], [S7], [S9], [S11], [S13] [S14], [S15], [S23], [S24], [S26], [S28], [S29].

5. AZ ELÉRT EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

A földalatti terek hőtechnikai méretezésére kidolgozott módszer a mérnöki gyakorlat számára jól alkalmazható. A megadott eljárással jól becsülhető a hiba mértéke, ezzel a szükséges mértékű pontossággal végezhető el a hőtechnikai méretezés. A földalatti tér falán keresztül áthaladó hőáram, valamint a tér falának hőmérséklete ismeretében további energetikai és hőérzeti optimalizáció végezhető.

Az időben változó komfort mérésére és értékelésére kidolgozott módszer jól alkalmazható komfortterek minősítésére. A kapott eredmények segítséget nyújtanak az üzemelő klimatechnikai rendszerek optimális üzemi paramétereinek beállítása során.

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Kajtár L, Nyers J, Szabó J, Ketskeméty L, Herczeg L, Leitner A, Bokor B: Objective and subjective thermal comfort evaluation in Hungary, **THERMAL SCIENCE** (ISSN 0354-9836), 12 p. (2017) Vol. 21, No. 3, pp. 1409 - 1418. (2017)
- [S2] Bánhidi L, Barna E, Szabó J, András B: Hőérzeti méretezési kérdések, **MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET** (ISSN: 1215-9913) LXVI:(10) pp. 11-13. (2017)
- [S3] Kajtár L , Szabó J: Differenciált hőkomfort elemzése klimatizált terekben, **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 27:(10) pp. 30-32. (2017)
- [S4] Szabó J, Kajtár L, Nyers J, Bokor B: A new approach and results of wall and air temperature dynamic analysis in underground spaces, **ENERGY** (ISSN: 0360-5442) 106: pp. 520-527. (2016)
- [S5] Kajtár L, Nyers J, Szabó J: Dynamic thermal dimensioning of underground spaces; **ENERGY** (ISSN: 0360-5442) 87: pp. 361-368. (2015)
- [S6] Kajtár L, Ketskeméty L, Szabó J, Herczeg L, Leitner A: A PMV modell alkalmazásának tapasztalatai Magyarországon, **MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET** (ISSN: 1215-9913) LXIV:(12) pp. 3-8. (2015)
- [S7] Szabó J, Kajtár L: Comfort measurements in offices; **POLLACK PERIODICA: an International Journal for Engineering and Information Sciences** (ISSN: 1788-1994) 9: pp. 81-90. (2014)
- [S8] Kajtár L, Szabó J: Klimatizálás energiatakarékosan, gazdaságosan; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 24:(5) pp. 28-29. (2014)
- [S9] Kajtár L, Szabó J: Intelligens épületek komfortja; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 24:(11-12) pp. 25-27. (2014)
- [S10] Kajtár L , Szekeres G , Szabó J: Energiatakarékos klimatizálás; **MÉRNÖK ÚJSÁG** (ISSN: 1218-5450) XX:(11) pp. 34-35. (2013)
- [S11] Szabó J: Komfort elemzése valószínűség-elméleti alapon; **MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET** (ISSN: 1215-9913) 62:(3) pp. 13-16. (2013)
- [S12] Kajtár L, Szabó J: Vplyv zasklených fasád na spotrebu energie: The Influence of Glass Facades on Energy Consumption; **TZB HAUSTECHNIK** (ISSN: 1210-356X) XXI:(3) pp. 12-15. (2013)

- [S13] Kajtár L, Szabó J: Klimatizált terek komfortjának minősítése; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 22:(5) pp. 20-21. (2012)
- [S14] Kajtár L, Szabó J: Klimatizált terek komfortjának minősítése II.; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 22:(6-7) pp. 34-35. (2012)
- [S15] Kajtár L, Szabó J: Komfort - intelligens épületek; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 22:(11-12) pp. 26-27. (2012)
- [S16] Kajtár L, Szabó J: Oktatási épület energetikai elemzése, 1. rész; **MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET** (ISSN: 1215-9913) LIX:(4) pp. 3-7. (2010)
- [S17] Kajtár L, Szabó J: Oktatási épület energetikai elemzése, 2. rész; **MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET** (ISSN: 1215-9913) LIX:(5) pp. 3-5. (2010)
- [S18] Kajtár L, Szabó J: Az üvegfelület hatása az épület energiaigényére I.; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 20:(5) pp. 20-21. (2010)
- [S19] Kajtár L, Szabó J: Az üvegfelület hatása az épület energiaigényére II.; **MAGYAR INSTALLATEUR** (ISSN: 0866-6024) 20:(6-7) pp. 46-47. (2010)
- [S20] Szabó J, Kajtár L: Experiences of the PMV Model in Hungary, **EXPRES** 2017 (ISBN: 978-86-919769-1-0): 8th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency. Szabadka, Szerbia, 2016. pp. 76-80.
- [S21] Szabó J, Kajtár L: Thermal comfort of underground spaces, **VYKUROVANIE** 2017 (ISBN: 978-80-89878-06-2) Podbanské, Szlovákia, 2017.03.06-2017.03.08. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, pp. 360-371.
- [S22] Szabó J, Kajtár L: Expected thermal comfort in underground spaces, **EXPRES** 2016 (ISBN: 978-86-919769-0-3): 8th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency. Szabadka, Szerbia, 2016. pp. 76-80.
- [S23] Szabó J, Kajtár L: Comfort Analyzing Based On Probability Theory In Office Building; **EXPRES** 2015 (ISBN: 978-86-82621-15-7): 7th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency . Szabadka , Szerbia, pp. 40-45.
- [S24] Kajtár L, Szabó J: The impact of the energy requirements for buildings on the thermal comfort; **EXPRES** 2014 (ISBN: 978-86-85409-96-7): 6th International Symposium of Renewable Energy Sources and Effectiveness . Szabadka , Szerbia, 2014. pp. 129-131.

- [S25] Bánhidi L, Szabó J: Mathematical model for thermal comfort and IAQ design - Hőkomfort és levegőminőség méretezésének matematikai modellje, In: Proceedings of **DENZERO** International Conference: Sustainable energy by optimal integration of renewable energy sources (ISBN: 978-963-473-624-0) Debrecen, Magyarország , 2013.10.10 - 11. Paper 25, pp. 220-227.
- [S26] Kajtár L, Szabó J: Comfort measurements in office buildings, In: Gvozdkov A N (szerk.), **10th International Scientific Conference** – Indoor Air and Environmental Quality (ISBN: 978-5-98276-492-8) Budapest, 2012.05.13-20. Volgograd: [s. n.], 2012. pp. 132-139.
- [S27] Kajtár L, Szabó J: Effect of Large Window Surfaces in Office Buildings; 10th International Conference on **Healthy Buildings**, Brisbane (ISBN: 978-162748075-8), Ausztrália, 2012. pp. 977-982.
- [S28] Szabó J, Kajtár L: Thermal Comfort Measurements In Large Window Offices, **EXPRES** 2012: 4th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (ISBN: 978-86-85-85409-70-7) Subotica , Szerbia , 2012.03.09 - 10. Subotica: Subotica Technical College of Applied Sciences, 2012. pp. 79-82.
- [S29] Kajtár L, Szabó J: Thermal Comfort In Office Buildings With Large Window Surfaces; 12 th International Conference on Indoor Air Quality and Climate: **INDOOR AIR** 2011 (ISBN: 978-162748272-1) Austin, Amerikai Egyesült Államok , pp. 1356-1361.
- [S30] Kassai M, Kajtár L, Gräff J, Szabó J: New Calculation Method for Energy Consumption of Air Handling Units, 12 th International Conference on Indoor Air Quality and Climate: **INDOOR AIR** 2011 (ISBN: 978-162748272-1) Austin, Amerikai Egyesült Államok, 2011.06.05 - 10. pp. 247-252.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Labs, K.: The use of Earth covered Buildings through History. Forth Worth, Texas, The Use of Earth covered Buildings, 1975.
- [2] Kusuda, T.: The Effect of Ground covered on Earth Temperature. Forth Worth, Texas, The Use of Earth covered Buildings, 1975.

- [3] F. Allard, J. Brau, C. Inard, J.M. Pallier, Thermal experiments of full-scale dwelling cells in artificial climatic conditions, *Energy and Buildings*, Volume 10, Issue 1, February 1987, pp. 49–58.
- [4] A. A. Al-Temeemi, D. J. Harris, A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates. *Energy and Buildings* 36 (2004) 251-260.
- [5] C. van Dronkelaar, D. Cóstola, R. Mangkuto, J.L.M. Hensen: Heating and cooling energy demand in underground buildings: potential for saving compared to aboveground buildings for various climates and building functions. *Energy and Buildings*, December 2013, pp. 251–265. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.12.004
- [6] Thomson, W. 1862. On the Reduction of Observations of Underground Temperature, with applications to Professor Forbes' Edinburgh Observations and the continued Calton Hill Series. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. IV: pp. 342-346.
- [7] Xing, L. 2014. Estimations of Undisturbed Ground Temperatures using Numerical and Analytical Modeling. Ph.D. Diss. Oklahoma State University, Stillwater
- [8] Bogoszlovskij, V. N., Razumov, N. N.: *Otoplenije i ventilacija*. Moskov, Sztrojizdat, 1980.
- [9] Macsinszkij V. D.: *Teplotehnicoseszkie oszнови sztroitelsztva*, Moskov, Sztrojizdat, 1980.
- [10] Lakos A.: *Földalatti helyiségek szellőztetése ,klimatizálása és hűtése*. Budapest, 1968.
- [11] Bares V.: *Padlók hőtechnikai minősége*. *Épületgépészet*, X. 1961. pp. 216-220.
- [12] Gráber J.: *Földalatti terek hőtani vizsgálata*. *Épületgépészet*, XIV. 1964. pp. 15-19.
- [13] Kokits Zs.: *Közelítő eljárás végtelen vastag falakban kialakuló hőmérséklet eloszlás meghatározására*. *Épületgépészet*, VII. 1958. pp. 203-206.
- [14] Straub Gy.: *Földalatti terek hőtani vizsgálata*. *Épületgépészet*, XIII. 1964. pp. 71-73.

- [15] I. Erdősi, L. Kajtár, Non stationary Dimensioning of Thermal Comfort and Energetical Optimalization of Underground Space, Bp. 2000. Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering 2000. 44/2, pp. 237–248
- [16] Yanqiang Di; Qian Xie; Yu Zhao; Miao Zhang: Thermal Comfort Index and Comprehensive Evaluation of Micro-Climate Environment. Bioinformatics and Biomedical Engineering , ICBBE 2009. pp. 1-4. ISBN: 978-1-4244-2901-1, 2009.
- [17] C.-E. A. Winslow: The Kata Thermometer as a Measure of the Effect of Atmospheric Conditions upon Bodily Comfort, Science, Vol. 43, No. 1116 (May 19, 1916), pp. 716-719
- [18] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y., 1970: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulator response. ASHRAE Trans.70 (I), 247–257.
- [19] Gagge, A. P., 1980: The new effective temperature ET an index of human adaptation to warm environments. In:Environmental Physiology: Aging, Heat and Altitude. Amsterdam: Elsevier, 59–77.
- [20] Fanger, P. O.: Thermal Comfort McGraw Hill 1970
- [21] de Dear RJ, Brager GS (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings 34: pp. 549-561.