



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

PhD értekezés

Szabó János
okleveles gépészmérnök

Témavezető:
Dr. habil Kajtár László
egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola
Épületgépészet és eljárás technika részprogram



Budapest
2017

NYILATKOZAT

Alulírott, Szabó János (D4EJXK), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a doktori disszertációt meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2017. október 7.

Szabó János

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítettek a kutatómunkám során. Mindenekelőtt köszönöm témavezetőmnek Dr. habil Kajtár Lászlónak az elmúlt évek során nyújtott segítséget és a türelmet.

A Tanszék munkatársainak köszönöm, hogy szakmai javaslataikkal, észrevételeikkel segítették munkámat. A mérések során nyújtott segítségért köszönettel tartozom Dr. Herczeg Leventének és Dr. Kassai Miklósnak.

Köszönetem fejezem ki közös publikációink társszerzőinek, különösen Prof. Dr. Bánhidi Lászlónak, Dr. Ketskemény Lászlónak és Bokor Balázsnek.

Köszönettel tartozom továbbá szeretteimnek, akik türelmükkel, megértésükkel és teljes támogatásukkal segítettek a munkám során.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés, célkitűzések.....	12
1.1	A téma aktualitása	12
1.2	Célkitűzések.....	12
2.	Az értekezésben megfogalmazott célkitűzésekhez kapcsolódó szakirodalmi áttekintés.....	14
2.1	Földalatti terek hőtechnikája	14
2.2	Zárt terek komfortjának vizsgálata.....	16
2.3	Szakirodalmi összefoglaló	23
3.	Komfortterek földfelszín alatti elhelyezkedésének hőtechnikai elemzése instacioner modell alapján	25
3.1	Elméleti alapok.....	25
3.2	Fizikai modell.....	25
3.2.1	A földalatti tér fala	26
3.2.2	A földalatti teret körülvevő talaj	26
3.2.3	A földalatti tér légellátása	27
3.2.4	A levegő nedvességtartalma	27
3.2.5	Egyértelműségi feltételek.....	27
3.3	Matematikai modell.....	28
3.3.1	Hőegyensúlyi alapegyenlet.....	29
3.3.2	A belső tér eredő hőterhelése.....	30
3.3.3	Konvektív hőátvitel a falon.....	30
3.3.4	Hőáram a földalatti tér falán	31
3.3.5	Feltételi egyenletek	31
3.4	A matematikai modell analitikus megoldása	32
3.4.1	Új változó bevezetése.....	32
3.4.2	A fal hőmérséklete	32
3.4.3	A földalatti tér differenciálegyenlete	33
3.5	Numerikus eljárás az integro-differenciálegyenlet megoldására	34
3.5.1	Az integro-differenciál egyenlet numerikus sémája.....	34
3.5.2	DP8(7): Nyolcadrendű beágyazott Dormand-Prince metódus	36
3.5.3	AM6: Hatodrendű Adams-Moulton formula	39
3.5.4	Optimális lépésköz meghatározás és hibabecslés	39
3.5.5	Komplementer hibafüggvény	40
3.5.6	M11: MacLaurin-formula	41
3.5.7	C8: Nyolcadfokú Chebyshev-féle aszimptotikus sor.....	42
3.5.8	C5: Ötödfokú Chebyshev-féle aszimptotikus sor	43
3.5.9	Konvolúciós integrál	43
3.6	Az eljárás validációja	44
3.6.1	Határérték vizsgálat	44
3.6.2	A megoldás konvergenciája és a hibája	44

3.7	Hőtechnikai és komfort eredmények.....	45
3.7.1	A vizsgált esetek.....	45
3.7.2	Léghőmérséklet.....	48
3.7.3	Fal hőmérséklet.....	49
3.7.4	Hőátvitel a falon.....	50
3.8	Eredmények elemzése	51
4.	Zárt terek hő- és levegőminőségi komfortjának értékelése, minősítése valószínűségelméleti alapon.....	55
4.1	Elméleti alapok.....	55
4.2	Klímarendszerekkel elérhető komfort elemzése	55
4.2.1	Mérési metodika, mérési módszer.....	56
4.2.2	Kiértékelés valószínűségelméleti alapon.....	59
4.3	Különböző rendszerek vizsgálata.....	63
4.4	Parapet fan-coil rendszer	63
4.4.1	Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése	64
4.4.2	Helyszíni mérések eredményei.....	66
4.4.3	Kiértékelés és következtetések.....	68
4.5	Légcsatornázzható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)	68
4.5.1	Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése	68
4.5.2	Helyszíni mérések eredményei.....	71
4.5.3	Kiértékelés és következtetések.....	74
4.6	Légcsatornázzható fan-coil rendszer (diffúz LVR)	75
4.6.1	Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése	75
4.6.2	Helyszíni mérések eredményei.....	78
4.6.3	Kiértékelés és következtetések.....	80
4.7	Aktív klímagerenda rendszer.....	81
4.7.1	Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése	81
4.7.2	Helyszíni mérések eredményei.....	84
4.7.3	Kiértékelés és következtetések.....	87
4.8	Komfort értékelése, összefoglalás.....	87
4.8.1	Komfort kategóriaszintek alapján	91
4.8.2	Komfort jellemzők szerint	92
5.	Új tudományos eredmények, tézisek.....	93
5.1	Komfortterek földfelszín alatti elhelyezkedésének hőtechnikai elemzése instacioner modell alapján.....	93
1.	tézis	93
2.	tézis	94
5.2	Zárt terek hő- és levegőminőségi komfortjának értékelése, minősítése valószínűségelméleti alapon	95
3.	tézis	95

4. tézis	96
5. tézis	97
6. tézis	97
5.3 Az elért eredmények hasznosítása	99
Irodalomjegyzék	100
A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk	107
Melléletek.....	110

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

A [m ²]	földalatti tér falának felülete,
\mathbf{A} [-]	Runge-Kutta mátrix,
a [m ² /s]	hőmérséklet-vezetési tényező,
\mathbf{b} [-]	s -edrendű vektor együttható a DP8(7) eljárás során,
$\hat{\mathbf{b}}$ [-]	$(s+1)$ -edrendű vektor együttható a DP8(7) eljárás során,
\mathbf{c} [-]	vektor együttható a DP8(7) eljárás során,
C [-]	hiba állandó a DP8(7) eljárás során,
c_{so} [kJ/kg K]	talaj fajhője,
$c_{p,a}$ [kJ/kg K]	száraz levegő állandó nyomáson vett fajhője,
$c_{p,s}$ [kJ/kg K]	vízgőz állandó nyomáson vett fajhője,
$h_a(\tau)$ [kJ/kg]	földalatti tér levegőjének entalpiája,
h_s [kJ/kg]	szellőzőlevegő entalpiája,
k [-]	lépések száma,
\dot{m}_s [kg/s]	szellőzőlevegő tömegárama,
\dot{m}_m [kg/s]	földalatti tér eredő nedvességterhelése,
n [1/h]	légcsereszám,
PMV [-]	hőérzeti szavazati érték (Predicted Mean Vote),
PPD [%]	várható elégedetlenségi arány a termikus környezettel (Predicted Percentage of Dissatisfied),
$\sum \dot{Q}_i$ [kW]	belső eredő hőterhelés,
$\dot{Q}_s(\tau)$ [kW]	szellőzőlevegő teljesítményigénye,
$\dot{Q}_w(\tau)$ [kW]	falon keresztüli hőáram,
\dot{Q}_h [kW]	fűtési teljesítmény (e.g.: radiátor),
$\dot{q}_w(\tau)$ [kW/m ²]	hőáramsűrűség a földalatti tér falán,
p [-]	hatványsor tagjainak indexe,
R_p [-]	Rieman-féle maradék tag,
r_0 [kJ/kg]	vízgőz latens hője,
s [-]	módszer rendje,

t_s [°C]	szellőzőlevegő hőmérséklete,
$t_a(\tau)$ [°C]	földalatti tér levegőjének hőmérséklete,
$t'_a(\tau)$ [°C]	földalatti tér levegőjének transzformált hőmérséklete,
t_a^* [°C]	földalatti tér levegőjének határhőmérséklete,
$t(x, \tau)$ [°C]	talajhőmérséklet,
$t'(x, \tau)$ [°C]	transzformált talajhőmérséklet,
V [m ³]	földalatti tér térfogata,
x [m]	földalatti tér falától vett távolság a talajban,
x_a [kg/kg]	földalatti tér levegőjének abszolút nedvességtartalma,
x_s [kg/kg]	szellőzőlevegő abszolút nedvességtartalma,
u [sec]	(konvolúció során alkalmazott) segédváltozó,

Görög jelölések

α [W/m ² K]	hőátadási tényező,
α' [W/m ² K]	módosított hőátadási tényező,
β [-]	biztonsági tényező,
δ [m]	hőszigetelés vastagsága,
ε [-]	becsült hiba,
ε_0 [-]	elvárt pontosság,
λ [W/m K]	hővezetési tényező,
\mathcal{O} [-]	Landau szimbólum a becsült hibára,
ρ_a [kg/m ³]	levegő sűrűsége,
τ [sec]	idő,
$\Delta\tau$ [sec]	időlépés.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A PMV és PPD kapcsolata	20
2. ábra: Földalatti tér fizikai modellje.....	26
3. ábra: Földalatti tér hőegyensúlya	28
4. ábra: A talaj, fal és levegő hőmérséklet-változása	32
5. ábra: A komplementer hibafüggvény formulák ábrázolása	41
6. ábra: Az alapváltozat eredménye („No.0 Alapváltozat”)	47
7. ábra: A léghőmérséklet változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében .	48
8. ábra: A falhőmérséklet változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében ..	49
9. ábra: A falon átáramló hőáramsűrűség változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében.....	50
10. ábra: A hőszigetelés hatása a falon átáramló hőáramsűrűsége	51
11. ábra: Hőmérsékletmérés gyakorisági hisztogramja.....	61
12. ábra: Hőmérsékletmérés kumulált relatív gyakorisági hisztogramja	62
13. ábra: Hőmérsékletmérés a) P – P és b) Q – Q plot ábrája	62
14. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júni. 15 – 28.)	67
15. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 8-17., júl. 23-27.).....	72
16. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: téli időszak (jan. 26 – febr. 22.).....	73
17. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (okt. 20 - nov. 4.).....	74
18. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 22 - 26.)	79
19. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júl. 24 - 26.).....	80
20. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 3 – aug. 27.).....	85
21. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 10 – jún. 2., aug. 28 – szept. 30.)	86
22. ábra: Hőkomfort kategóriák eloszlása: nyári időszak	88
23. ábra: Levegőhőmérséklet kategóriák eloszlása: nyári időszak.....	89
24. ábra: Huzatérzeti kategóriák eloszlása: nyári időszak	90
25. ábra: Levegőminőségi (CO ₂ -koncentráció) kategóriák eloszlása: nyári időszak	91
26. ábra: A termoelem sémája.....	111
27. ábra: A kapacitív páraérzékelők szerkezeti típusai [83]	113
28. ábra: A forró drótos anemométer szerkezeti rajza.....	115

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: Az alkalmazott differenciaséma formulák.....	36
2. táblázat: A DP8(7) eljárás Butcher táblázata [77]	38
3. táblázat: A komplementer hibafüggvény közelítő formulái.....	40
4. táblázat: A vizsgált változatok bemenő alapadatai.....	46
5. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 72 óra eltelte után	52
6. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 168 óra eltelte után..	53
7. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 1 000 óra eltelte után	53
8. táblázat: A vizsgált változatok hőkomfort és energetikai eredményei.....	54
9. táblázat: A fizikai jellemzők mérésének követelménye az MSZ EN ISO 7726:2003 szerint	56
10. táblázat: A komfortjellemzők követelménye az MSZ CR 1752:2000 szerint.....	57
11. táblázat: A kutatómunka során felhasznált műszerek mérési paraméterei	57
12. táblázat: A mérési metodika szerint támasztott követelmények	58
13. táblázat: Hőmérsékletmérésre optimalizálva illesztett kettős kevert normál eloszlás paraméterei (az ábrákkal megegyező színjelölést alkalmazva).....	61
14. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei.....	66
15. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei	66
16. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei.....	66
17. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei.....	67
18. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júni. 15 – 28.)	67
19. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei.....	71
20. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 8-17., júl. 23-27.).....	72
21. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: téli időszak (jan. 26 – febr. 22.).....	73
22. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (okt. 20 - nov. 4.).....	74
23. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei.....	78
24. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei	78
25. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei.....	78
26. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei.....	79
27. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 22 - 26.)	79
28. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júl. 24 - 26.).....	80
29. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei.....	84
30. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei	84
31. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei.....	85
32. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei.....	85
33. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 3 – aug. 27.).....	86
34. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 10 – jún. 2., aug. 28 – szept. 30.).....	87
35. táblázat: Hőkomfort kategóriák eloszlása: nyári időszak.....	88
36. táblázat: Levegőhőmérséklet kategóriák eloszlása: nyári időszak.....	89
37. táblázat: Huzatérzeti kategóriák eloszlása: nyári időszak	90

38. táblázat: Levegőminőségi (CO₂-koncentráció) kategóriák eloszlása: nyári időszak .. 91

1. Bevezetés, célkitűzések

1.1 A 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 módzatait 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 energiahatékonyságú berendezések, hővisszanyerés, szabadhűtés, entalpia-szabályozás, stb.,
- érezhető és totális hűtőteltjesítmény aránya,
- bevezetett frisslevegő szükséges mennyiségre csökkentése,
- távozó levegő visszakeverése.

1.2 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 és hőérzeti 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.

2. Az értekezésben megfogalmazott célkitűzésekhez kapcsolódó szakirodalmi áttekintés

A célkitűzésekre vonatkozóan két önálló csoportra bontottam a tématerülethez kapcsolódó szakirodalmak tanulmányozását. Ezen két csoport irodalomkutatását a következő két fejezetrész tartalmazza.

2.1 Földalatti terek hőtechnikája

Az emberiség történetével egyidős az emberi tartózkodásra alkalmas földalatti terek létrehozása. Ezek a földalatti lakóhelyek biztonságot adtak a nagy hőséggel, nagy hideggel és szélviharokkal szemben. Szinte minden földrészen találunk erre vonatkozólag a történelem során példákat: Tunéziában, Kínában, Ghánában, Amerikában, Törökországban, stb.

A mai városépítés elképzelhetetlen földalatti terek nélkül. A parkolókon kívül például bevásárlóközpontokat, kiszolgálótereket építenek a földfelszín alatt, továbbá az irodaépületek, üzletházak szintén földalatti épületszintekkel épülnek [1], [2], [3].

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 [4], [5], [6], [7]. 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 [8], [9], [10], [11]. A mai műszaki gyakorlatban mérésekkel és méretezésekkel is alátámasztották, hogy a földalatti terekben a kellemes hőkomfort kevesebb energiával biztosítható [12], [13], [14], [15], [16].

A talaj hőmérsékletváltozására vonatkozólag 1862-ben Lord Kelvin¹ igen jó összefüggést adott, még napjainkban is használják. A leíró egyenlet egy magasabb rendű harmonikus modell az alábbi formában [17]:

$$T_s(z, t) = T_{s,avg} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha_s \cdot t_p}}} \cdot T_{s,ampl,n} \cdot \cos \left[\frac{2\pi n}{t_p} (t - PL_n) - z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha_s \cdot t_p}} \right] \quad (1)$$

ahol: $T_s(z, t)$ talajhőmérséklet t időben és z mélységben [°C],
 z talajszinttől mért mélység [m],

¹ Lord Kelvin egyes publikációi születési nevén, William Thomson néven váltak ismertté.

t	idő (január 1-vel kezdődően) [nap],
t_p	éves periódusidő (= 365 nap) [nap],
α_s	hőmérséklet-vezetési tényező [m^2 /nap],
$T_{s,avg}$	talajfelszín hőmérsékletének éves átlaga [$^{\circ}C$],
$T_{s,ampl,n}$	n-edik hőmérsékletamplitúdó [$^{\circ}C$],
PL_n	n-edik hőmérsékleti fáziseltolás [nap].

Az elméleti modellhez kettős harmonikus modell szerint földrajzi elhelyezkedés és a földfelszín jellege szerint Xing doktori értekezésében található részletes adatsorokat, köztük Magyarországra vonatkozókat is [18].

A földalatti tér határoló falai valójában félvégtelen terek, a fizikai modellt ennek figyelembe vételével kell kidolgozni. A talaj hőmérséklete az éves periódusoknak megfelelően változik. A fizikai és matematikai modell kidolgozása szükségszerűen egyszerűsítéseket igényel. A nemzetközi szakirodalomban találunk megoldásokat a különböző egyszerűsítéseket használó földalatti terek hőtechnikai méretezésére, továbbá hőérzeti mérési eredmények is rendelkezésre állnak.

A talaj és épület közötti hőtranszportot több hazai és nemzetközi szakirodalom is taglalja. Ezek közül kiemelném Hagentoft munkásságát [19]. Könyvében a közvetlen talajon fekvő tér, a földbe süllyesztett tér, valamint a talajon fekvő kiszellőztetett tér hőegyensúlyának modelljét és számítását ismerteti nagy részletességgel. Általánosságban elmondható, hogy a talajon fekvő épületek méretezéséhez szükséges módszerek jól ismertek már. Ezek a módszerek azonban csak korlátozottan alkalmazhatók, ez a korlát pedig a talajfelszín közelében való alkalmazhatóság. Tehát a módszer csak a talajfelszín közelében érvényes, nem használható tetszőleges mélység esetén. A földalatti terek méretezéséhez viszont éppen a nagyobb mélységekben lejátszódó hőtechnikai folyamatok ismeretére van szükség.

Az 1950-es évektől kezdve található szakirodalmak a földalatti terek méretezésének módszereiről. Kezdetben csak a stacioner modellezésre vonatkozólag található irodalmakat. A stacioner modellezésekre vonatkozólag átfogó és részletes szakirodalmi feldolgozást és tanulmányt Bogoszlovskij et. al. [20] és Macsinszkij [21] 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 [22], Barcs [23], Gráber [24], Kokits [25] és Straub [26]. A BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás Technika Tanszékén Erdősi és Kajtár időben változó harmadfajú peremfeltételt alkalmaztak a földalatti tér hőtechnikai leírására [27]. A későbbi tanulmányok elsősorban a hőkomfort elemzését, összehasonlítását vizsgálták földalatti terek esetében. Yanqiang et. al. [28] kifejlesztettek egy hőkomfort értékelésre szolgáló hőérzeti mutatót (a Fanger-féle *PMV* mutatóhoz

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. [16] elméleti úton vizsgálta a földalatti terek fűtési és hűtési energiaigényét.

2.2 Zárt terek komfortjának vizsgálata

A hőkomfort az egyénben kialakuló szubjektív érzet. Ennek a szubjektív képnek a megítélésére objektív módon mérés technikai 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 [29]. A Kata-termométer egy egyedi kialakítású bothőmérő, tartálya higannyal, vagy borszesszel van töltve. Az emberi test és környezete közötti fajlagos hőáramot modellezhetjük segítségével oly módon, hogy a felmelegített hőmérő 38°C-ról (meniszkusz a skála „2” jelzésétől) 35°C-ra („1” jelzésig) történő lehűlésének idejét (z) mérjük. Mivel a lehűlési idő alatt a hőmérő közel állandó hőmennyiséget ad le, az egységre vonatkoztatott hőleadás állandó értéke (F) az adott hőmérőre jellemző egyedi kalibrációs állandó. Ha elhanyagoljuk a mérési idő alatt az edényből a szár felé való hőáramlást és a hőleadást a vékony üvegfalon át, a leadott hő és a mérési idő hányadosa a Kata-érték (A), amely jellemző a termikus környezetre. Az összefüggést a (2) egyenlet írja le.

$$A = \frac{F}{z} \quad [-] \quad (2)$$

ahol: A Kata-érték [$\text{mcal}/\text{cm}^2\text{s}$],
 F Kata-állandó [mcal/cm^2],
 z lehűlési idő [s].

A gyakorlatban három Kata-hőmérő fajtát alkalmazunk:

- száraz Kata-hőmérő, azonos az előzőekben ismertetett formával,
- nedves Kata-hőmérő, amikor a hőmérő tartályát nedves gőzbe burkolják,
- ezüstözött Kata-hőmérő, a hőmérő tartálya kívülről ezüstözött.

A hőérzet jellemzésére alkalmas az alábbi táblázat a száraz és nedves Kata érték figyelembevételével:

Hőérzet	Kata-érték; –	
	Száraz	Nedves
Nagyon meleg	3	10
Meleg	3 – 4	10 – 12
Kellemes	4 – 6	12 – 18
Hűvös	6 – 9,5	18 – 20
Hideg	> 9,5	> 20

A Kata-hőmérő mindezek mellett alkalmas a Kata-érték során mért jellemzőkből származtathatóan a levegő átlagos sebességének meghatározására is. A számítási eljárás során az a és b konstansokat a légsebesség-tatomány függvényében különböző értéketket vehetnek fel. Feltételezéseként mindegyik légsebesség-tatományra elvégezzük a légsebesség számítását a (3) egyenlet szerint, majd azt fogadjuk el tényleges légsebesség értéknek, amely kielégíti a hozzá tartozó légsebesség-tatomány kritériumát [30].

$$v = \left(\frac{a \cdot F}{z \cdot (\overline{t_K} - t_l)} - b \right)^2 \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

ahol: $\overline{t_K}$ Kata-hőmérő közepes hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],

t_l levegő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],

F Kata-állandó [mcal/cm^2],

z lehülési idő [s],

a, b konstansok:

Kata-hőmérő hőmérséklet-tartománya	$\overline{t_K}$	$v < 1 \text{ m/s}$		$v \geq 1 \text{ m/s}$	
		a	b	a	b
35 – 38 $^{\circ}\text{C}$	36,5 $^{\circ}\text{C}$	2,49	0,497	1,95	0,206

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 [31], [32]. Mindezek mellett a szakirodalmakban számos hőérzeti méretezésre, ellenőrzésre alkalmas hőérzeti mutatót is definiáltak, mint pl.: *WCI*: Wind

Chill Index, *THI*: hőmérséklet nedvesség index, effektív huzathőmérséklet, ekvivalens hőmérséklet, *WBGT*-index: Wet Bulb Globe Temperature, *HSI*: hőstresszindex, *ITS*: termikusstressz-index, *P4SR*: várható 4 órás verejtékezési érték, *RSI*: relatív hőterhelési index [33]. Ezek jelentős része a szélsőséges hőérzeti viszonyokra vonatkozik, komfortterek jellemzésére nem alkalmas.

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 [34]. 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 belejátszik 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.

PMV: „Predicted Mean Vote”, a várható hőérzeti érték;

$$PMV = f\left(\frac{H}{F_{du}}, I_{cl}, v, t_l, t_{ks}, p_{vg}\right)^2 \quad [-] \quad (4)$$

ahol: $\frac{H}{F_{du}}$ a test felületegységre eső belső hőtermelése [met],

I_{cl} az ember ruházatának hőszigetelő képessége [clo],

v a relatív légsebesség [m/s],

t_l levegő hőmérséklete [°C],

t_{ks} közepes sugárzási hőmérséklet [°C],

$$t_{ks} = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v^{0,6} \cdot (t_g - t_l)} - 273$$

t_g fekete gömbhőmérséklet (Vernon-féle glóbusz hőmérő) [°C],

p_{vg} parciális vízgőznyomás [Pa].

Érvényességi tartománya:

M	46 – 232 [W/m ²] (0,8 – 4 met),
I_{cl}	0 – 0,31 [m ² ·K/W] (0 – 2 clo),
t_l	10 – 30 [°C],
t_{ks}	10 – 40 [°C],
p_{vg}	0 – 2 600 [Pa],
v	0 – 1 [m/s].

$$PMV = \left[0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028 \right] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_{vg}] - \\ - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_{vg}) - \\ - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_l) - \\ - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{ks} + 273)^4] - f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (t_{cl} - t_l) \end{array} \right\} \quad [-] \quad (5)$$

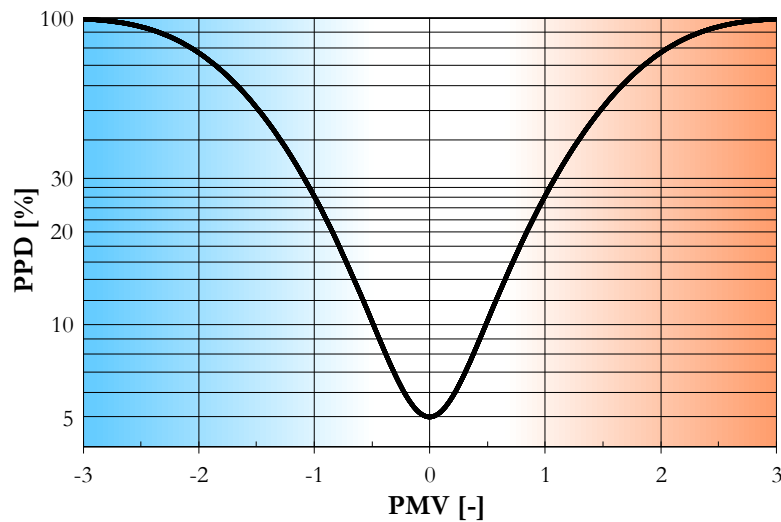
ahol:	M	metabolikus hőtermelés [W/m ²], 1 [met] = 58,15 [W/m ²],	/ISO 8996
	W	külső mechanikai munka [W/m ²],	/ISO 8996
	p_{vg}	parciális vízgőznyomás [Pa],	/ISO 7726
	t_l	levegő hőmérséklete [°C],	/ISO 7726
	I_{cl}	az ember ruházatának hőszigetelése [m ² ·K/W], 1 [clo] = 0,155 [m ² ·K/W],	/ISO 9920
	f_{cl}	a ruházat felületnövelő hatása [-], $f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl}$ ha $I_{cl} \leq 0,078$ [m ² ·K/W], $f_{cl} = 1,05 + 0,645 I_{cl}$ ha $I_{cl} > 0,078$ [m ² ·K/W],	
	α_c	hővezetési tényező [W/m ² ·K], $\alpha_c = 2,35 \cdot \sqrt[4]{ t_{cl} - t_l }$: szabadáramlás, $\alpha_c = 12,1 \cdot \sqrt{v}$: kényszeráramlás, v : relatív légsebesség [m/s],	
	t_{ks}	közepes sugárzási hőmérséklet [°C],	/ISO 7726
	t_{cl}	a ruházat átlagos felületi hőmérséklete [°C], $t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{ks} + 273)^4] + f_{cl} \cdot \alpha_c \cdot (t_{cl} - t_l) \}$.	

A hőérzeti érték alapján meghatározható a hőkönyezettel várható elégedetlenek aránya az 1. ábra alapján.

PPD: „Predicted Percentage of Dissatisfied”, a hőkönyezettel elégedetlenek várható százalékos értéke.

$$PPD = f(PMV) \quad (6)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad [\%] \quad (7)$$



1. ábra: A PMV és PPD kapcsolata

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

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* modell széleskörű alkalmazhatóságát vizsgálta de Dear és Brager [35]. Vizsgálataik alapján arra a megállapításra jutottak, hogy természetesen szellőztetett terek esetében a *PMV* modell nem minden esetben ad megfelelő becslést, míg klimatizált terek esetében a *PMV* módszer jó becslést ad a hőérzetre vonatkozólag.

A *PMV-PPD* elméleten túl megjelentek egyéb módszerek is komfortterekben a hőérzet számszerű meghatározására, amelyek már specifikusan egy-egy éghajlatra, nemre

vonatközólag, vagy eltérő elméleti alapokon nyugvó módszerekként kerültek kidolgozásra. Fountain és Huizenga [36] tanulmányban foglalták össze a különböző módszereket 1997-ig bezárólag. Ennél későbbi módszereket összefoglaló tanulmányt készített Schweiker [37]. Ilyen új elméleti módszerek – a részletek ismertetését mellőzve – pl. a módosított (*PMV-IH*), vagy csomóponti módszerek, új empirikus módszerek (*AMV, ADP, CV, DISC, ICV, PD, PS, PTS, TS, TSENS, TN*), vagy az új az adaptív hőkomfort módszerek (*aPMV, tAdapt15251*) [38], [39], [39], [40], [41], [42], [43].

J. van Hoof [44] a tématerületre vonatkozó átfogó cikkében a *PMV* alkalmazásának 40 éves eredményeit, tapasztalatait foglalja össze. A nemzetközi irodalom feldolgozását a következő témakörönként csoportosította: validálás, hőérzeti semlegesség, preferált hőérzet, épülettípus szerinti különbségek. Elemzése során arra a megállapításra jutott, hogy ugyan megjelentek egyéb, pl. adaptív hőérzeti modellek (előző bekezdésben ismertetve), azonban ezek mérnöki gyakorlat szempontból vett jelentősége továbbra is lényegesen alacsonyabb a *PMV* módszernél. Továbbá irodai környezetben, irodai munkavégzésre a *PMV* mutató jellemzi legjobban a hőérzetet. A *PMV* módszert tehát klimatizált terek esetében általánosan alkalmazhatóként fogadták el, ezért én is ezt választottam a zárt terek komfortjának vizsgálati módszereként.

A fenti módszer mellett a hőkomfort vizsgálatára az 1940-es évektől kezdődően termikus, lélegző és izzadó műemberrel végzett méréses módszerek is kidolgozásra kerültek, melyről Nilsson [45], Goldmann [46] és Magyar [47] készítettek átfogó tanulmányokat. Laboratóriumi körülmények közt alkalmazzák a termikus műembert, helyszíni mérések során azonban nem, ilyen vizsgálatokról szakirodalmi forrásokat sem találni.

Zárt terek hőkomfort mérésére vonatkozólag nagyszámú vizsgálat történt, amelyek jól dokumentáltak szakirodalmakban. Számos vizsgálatot végeztek különböző esetekre és terekre vonatkozólag: ülő és álló emberre, közösségi terekben, gépjárművekben (busz, személyautó, repülőgép pilótafülkéje és utastere). Ezek a vizsgálatok jellemzően stacioner, vagy kvázi stacioner állapotra vonatkozólag történtek. Ebben az esetben a komforttér egyetlen hőérzeti jellemző értékkel adható meg, amely állandó, vagy közel állandónak tekinthető a teljes vizsgálat folyamán. Ekkor a mért komfort mutatószám (egyetlen érték) összevethető a követelményekben rögzített értéktartománnyal, így a komforttér kiértékelése egzakt módon történhet.

Helyszíni méréseket végzett Vilcekova és társai [48] egy iskola épületében Szlovákiában. Folyamatosan mérték több tanteremben a komfort paramétereiket, majd meghatározták azok számtani átlagértékét, mint az adott termikus környezetre jellemző referenciaértéket. Az így kapott értékeket összevetették az EN 15251 szabványban rögzített határértékekkel.

Sun H. Hong és társai [49] Angliában található lakóházak felújítás előtti és utáni állapotában végeztek hőkomfort összehasonlítást. A komfortteret azonban nem egyetlen számértékkel jellemezték, hanem grafikusán box-plot módszert alkalmaztak. A box-plot módszer tartalmazta a számtani átlag, interkvartilis (*IRQ*) terjedelem (*1. és 3. kvartilis*

közti tartomány), a legkisebb és legnagyobb elfogadható értékek ($< 3. kvartilis + 3 \times IRQ$; $> 1. kvartilis - 3 \times IRQ$), valamint a mérsékelt ($< 3. kvartilis + 1,5 \times IRQ$; $> 1. kvartilis - 1,5 \times IRQ$) és extrém kiugró értékek grafikus ábrázolását.

A mérési eredmények box-plot diagramon való ábrázolását alkalmazták Zhang és társai [50] is. Három kontinensen (Európa, Dél-Amerika, Ázsia) végzett komfort mérések eredményeit hasonlították össze egymással. A box-plot módszer tartalmazta a statisztikai számtani átlag, medián, interkvartilis terjedelemt, valamint a minimum és maximum értékek grafikus ábrázolását. A mérési eredmények közt a különböző mérési helyszínek operatív hőmérséklet gyakoriságát is ábrázolták, azonban az eloszlás jellegét nem értékelték.

Curado és társai [51] Portugáliában végeztek méréseket egy felújított szociális intézmény egymással szomszédos otthonaiban. A külső és belső hőmérsékletek együttes adatpontjait grafikusán is összehasonlították az EN 15251 követelményeivel. Egyértelmű megállapításokat a különböző lakásokra vonatkozólag ez alapján azonban nem tudtak levonni. A mért belső hőmérséklet értékeket kumulált relatív gyakorisági görbéken is ábrázolták, következtetéseiket végül ez alapján vonták le. Az összehasonlítás azon alapult, hogy a görbeseregnek relatív helyzete különbözött egymáshoz képest.

Kuchen és Fisch [52] Németországban 25 irodaépületben végeztek szubjektív kérdőíves és objektív műszeres vizsgálatokat. A szubjektív vizsgálatok az ASHRAE 55 szerinti 7-fokozatú hőkomfort kérdőív (CV: Comfort Value) alapján történtek. A műszeres mérések során felhasznált mérőeszközök, valamint a mérések lefolytatása az ISO 7726 előírásainak feleltek meg. A komfort jellemzőket az ISO 7730 szerint számították. Kiértékeléseik során azzal a feltételezéssel éltek, hogy a mért jellemzők eloszlása normális eloszlást követ. Ennek megfelelően a mért és számított jellemzők átlagértékeivel és szórásával jellemezték a belső tér hőkomfortját. A két normál eloszlás (PMV és CV) így könnyen összehasonlíthatóvá vált. Kuchen [53] később is folytatta németországi méréseit 10 évnél korábban épült és üzembe helyezett irodaépületekben, ezzel bővítve korábbi mérési adatbázisát. A korábbi és új mérési adatokat együttesen box-plot módszerekkel ábrázolta, szerepeltetve az átlag, szórás, minimum és maximum értékeket. Az eredményeket gyakorisági diagramokon is ábrázolta, a kapott hisztogramokra normál eloszlású görbéket is illesztett.

Wang és társai [54] kérdőíves kiértékelést és műszeres méréseket végeztek Kína három tartományában, összesen 13 iskolaépületben. A kérdőíves kiértékelést a nap négy időszakában (reggel, délelőtt, délután és este) egyaránt elvégezték, valamint mindezeket nemek szerint külön bontásban. A mérési eredményeket gyakorisági görbéken ábrázolták, majd azokra normál eloszlású folytonos görbéket is illesztettek. Meghatározták az objektív és szubjektív mérés közti kapcsolatot függvény formájában, majd az így kapott eredményeket összevetették más kutatások eredményeivel.

Az USA-ban található kis és közepes méretű kereskedelmi épületeket vizsgált Woohyun és társai [55]. A klímatechnikai rendszer és a szabályozó működésének leírása volt a cél.

Ehhez a szabályozó alapjelét módosították, majd azt vizsgálták, hogy a klímatechnikai rendszer milyen hatékonysággal követi ezt az alapjelállítást, ez a változás hogyan jelenik meg a levegőhőmérsékletben. A kiértékelést valószínűség-elméleti alapokon végezték a Bayes-féle osztályozó segítségével. A két alapjelhez tartozó hőmérséklet adatokat Bayes-féle osztályokba sorolták, mellyel meghatározhatóvá vált a mért jellemző eloszlása. Feltételezéseik szerint az egyes osztályokhoz tartozó hőmérséklet eloszlások normális eloszlásúak, így ehhez a normális eloszlású populációhoz jól kifejezhető az alapjel érzékelésének hatékonysága a konfidencia intervallum Student-féle t-eloszlásával. A t-eloszlás konfidencia intervallumának szélessége (keskenysége) az alapjel meghatározás algoritmus hatékonyságát fejezi ki.

Valós komfortterek esetében azonban nem ez a jellemző. Folyamatosan – időben változó – külső és belső zavaró hatások érik a komfortteret, ezt kell a klímatechnikai rendszernek megfelelően kompenzálnia. Az így megvalósult termikus környezet fizikai jellemzői is időben folyamatosan változnak, ezek kiértékelésére a szakirodalmakban az előbbieken felsorolt módszerek találhatók.

2.3 Szakirodalmi összefoglaló

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-féle peremfeltételi problémára csak korlátozottan találni szakirodalmi forrásokat. A témával emiatt részleteiben is foglalkozom a doktori értekezésben.

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

Komfort méréses vizsgálatával foglalkozó szakirodalmak a komfortjellemzők eloszlását egymódusú eloszlásként feltételezik, amely kutatások egy része ezen belül normál eloszlásúként kezeli. Célu 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 komfort paraméterek 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.

3. Komfortterek földfelszín alatti elhelyezkedésének hőtechnikai elemzése instacioner modell alapján

3.1 Elméleti alapok

A komforttér hőterhelése több módon csökkenthető: tájolás, határoló szerkezet megválasztása, hőszigetelés, árnyékolás, földfelszín alatti elhelyezés. A földfelszín alatti elhelyezés ma már gyakori, az energetikai megfontolásokon kívül településpolitikai szempontok is indokolják. Ebben az esetben a komfortteret falak helyett a körülvevő talaj, mint félvégtelen tér határolja. A hőtechnikai vizsgálatok csak instacioner módon végezhetők el félvégtelen tér időben változó harmadfajú peremfeltétele esetén. A hazai és nemzetközi szakirodalomban talált megoldásokat fejlesztettem tovább. Így a megoldás pontosságát növeltem, valamint a hőtechnikai folyamat lefolyását tudtam hosszabb időtartamra vonatkozóan vizsgálni. A feladathoz új matematikai modellt dolgoztam ki. A numerikus megoldás módját a mai korszerű számítástechnikai eszközök által kínált lehetőségek felhasználásával oldottam meg. Alkalmaztam:

- hatodrendű implicit Adams-Moulton,
- nyolcadrendű beágyazott explicit Dormand-Prince, valamint
- kompozit Simpson-formulákat.

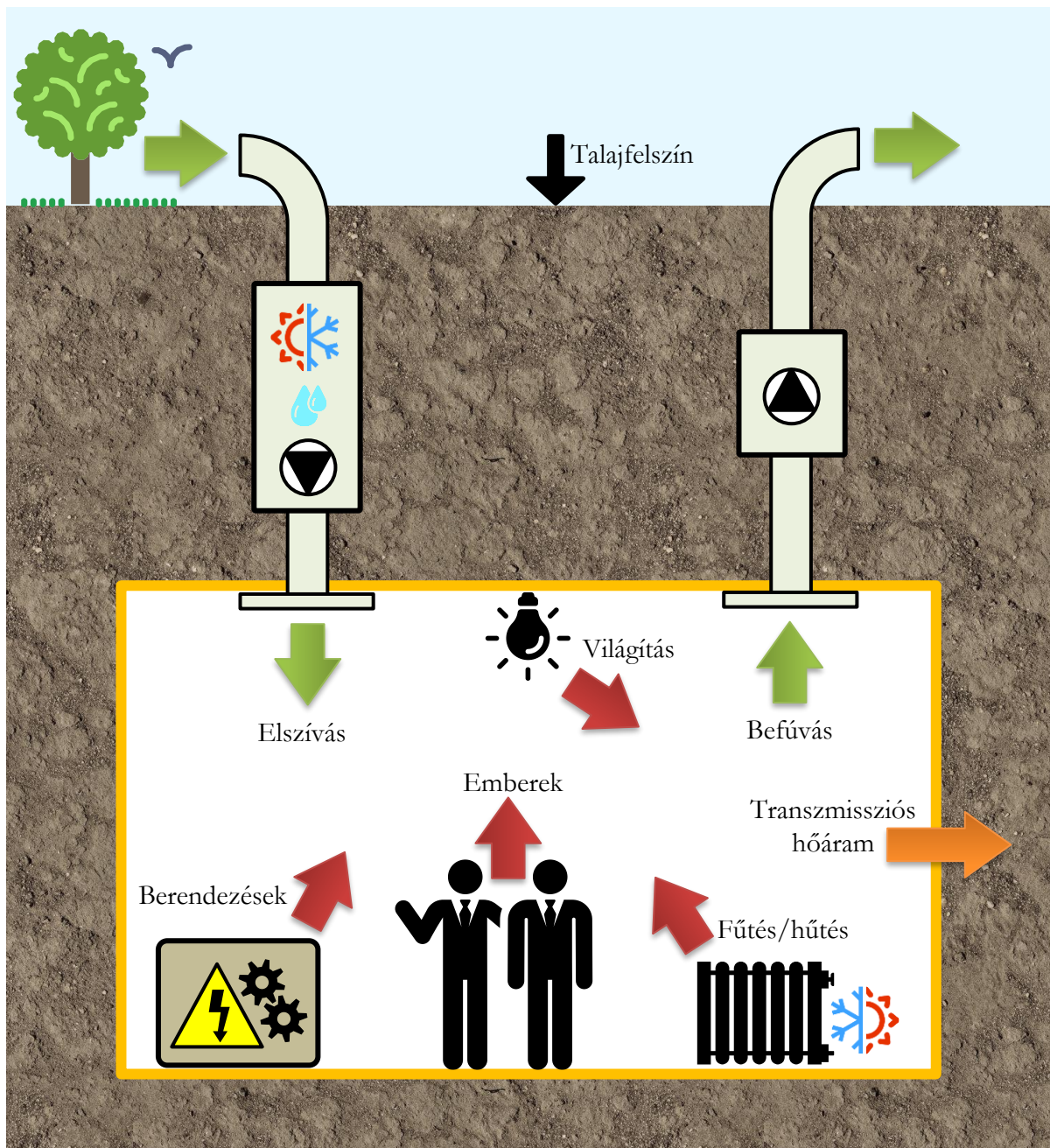
A földalatti térre vonatkozó elméleti alapok ismertetését a következő fejezetek tartalmazzák.

3.2 Fizikai modell

A földalatti terek hőtechnikai méretezésekor időben változó folyamatokat kell vizsgálnunk. Méretezés során számolnunk kell a felfűtés és a hűtés időben változó épületgépészeti teljesítményigényeit. A fűtés, hűtés és a szellőztetés együttes és esetenként eltérő kombinációban jelentkező változatának számítását is meg kell oldani. További igényként jelentkezik, hogy a hőérzeti jellemzőkről a méretezés során lehetőleg teljesebb képet kapjunk.

A kidolgozott, méretezési módszerrel a földalatti tér fűtési és légtechnikai teljesítmény igényeinek időbeli változása meghatározható. A hőérzeti jellemzők közül számolható a levegő hőmérséklet, a levegő nedvességtartalom és a falhőmérséklet a földalatti térben. Így már a méretezés során meghatározható a legösszetettebb hőérzeti mutató, a *PMV* érték.

Földalatti tér hőegyensúlyának vizsgálatakor a fizikai modellben a szellőztetés, fűtés, hűtés, eredő belső hőterhelés teljesítményét, valamint a falakon áthaladó hőáramokat kell figyelembe venni a 2. ábra szerint.



2. ábra: Földalatti tér fizikai modellje

3.2.1 A földalatti tér fala

A betonfalak hőtechnikai jellemzői a talajéhoz hasonlóak [63]. Modellalkotásom során a földalatti tér falát emiatt az azt körülvevő talaj részének tekintem, nem kezelem külön. A földalatti tér falának belső oldalán elhelyezett hőszigetelés figyelembe vételét a „3.3.4 Hőáram a földalatti tér falán” fejezetben ismertetem.

3.2.2 A földalatti teret körülvevő talaj

A talajt hőtechnikai szempontból homogén anyagúnak tekinthetjük [57].

A földalatti teret körülvevő talaj hőmérséklete az évszakoknak megfelelően a mélység függvényében eltérően változik. Ez a változás csak jelentős késéssel és csillapítással jelentkezik a mélyebb talajrétegekben. A hőmérsékletingadozás amplitúdója $0,6^{\circ}\text{C}$ 8 m mélységben és $0,2^{\circ}\text{C}$ 10 m mélységben [27], [56]. A talaj hőkapacitása lényegesen nagyobb a levegő hőkapacitásánál. Mindezek alapján megállapítható, hogy ezen talajmélységekben a talaj hőmérséklete kvazi-stacioner hőmérsékletűnek tekinthető. A földalatti tér hőtechnikai viselkedését ebben az állandósult hőmérsékletű talajmélységben vizsgálom.

Mivel a talaj hőmérséklete a vizsgálat szempontjából figyelembe vett talajmélységekben állandónak tekinthető, ezért a síkfelületekkel határolt földalatti tér esetében feltételeztem, hogy a hőáram vonalak párhuzamosak és a falra merőlegesek. Ez annyit jelent, hogy a sarkok hőfelvételét nem vesszük figyelembe. A gyakorlati adatok alapján 3 m hőbehatolási mélységet alapul véve, ha a földalatti tér keresztmetszetének kerülete nagyobb, mint 60 m, akkor a elhanyagolás hibája kisebb 5%-nál [56]. A megállapításokból következik, hogy a talajjal érintkező falfelületeken a transzmissziós hőáramokat egydimenziós hővezetéssel lehet közelíteni.

3.2.3 A földalatti tér légellátása

A földalatti tér mesterséges légellátása kiegyenlített szellőztetéssel van megoldva. Ennek értelmében a befúvás és elszívás azonos tömegáramú. A helyiség levegőjének hőmérsékletét homogénnek tekintjük a térben, tehát koncentrált paraméterű modellként egy levegőhőmérséklettel jellemezhetjük az idő függvényében. A modellben a távozó levegő hőmérséklete a belső tér levegőhőmérsékletével azonos.

3.2.4 A levegő nedvességtartalma

Abban az esetben, amikor a földalatti térnek nincs, vagy nem számottevő a nedvességterhelése, a levegő állapotváltozása az abszolút nedvességtartalom közel állandósága mellett megy végbe. Ekkor a nedvességtartalom a szellőző levegő nedvességtartalmával vehető azonosnak [58].

Amennyiben a földalatti tér nedvességterhelésével kell számolnunk, a levegő entalpiája a földalatti tér hőmérsékletváltozásán kívül a nedvességtartalom változásától is függ. Ezzel a későbbiekben külön foglalkozom.

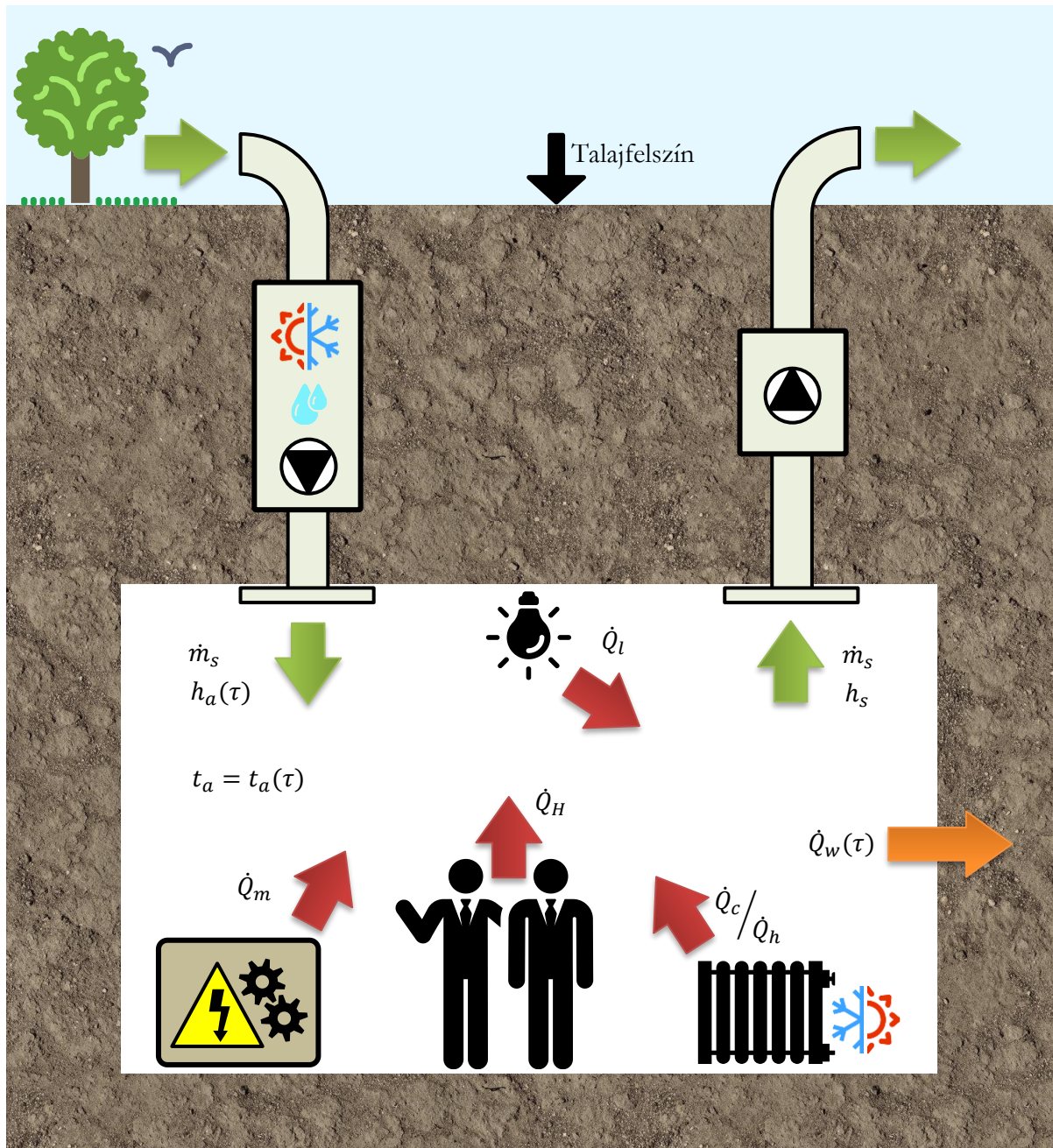
3.2.5 Egyértelműségi feltételek

A fizikai modell kidolgozásánál figyelembe vettem:

- a fal felületére hőátadással érkező hőáram egyenlő a hővezetéssel továbbterjedő hőárammal,
- a faltól végtelen távolságban lévő talaj hőmérséklete a hőátviteli folyamat során nem változik,
- a kezdeti időpillanatban a földalatti tér levegőjének és a talajnak a hőmérséklete egyenlő.

3.3 Matematikai modell

A matematikai modell kidolgozása során meg kellett határozni a hőátviteli alapegyenletet az egyértelműségi feltételekkel. Értelmezni kellett a hőáram egyenlet összetevőit, valamint a hőátviteli folyamatban szerepet játszó közegeket: a levegőt, a talajt és a földalatti tér falát. A fizikai modell és approximációi alapján elkészítettem a földalatti tér hőegyensúlyát bemutató 3. ábrát a matematikai modellalkotás során felhasznált fizikai jellemzők feltüntetésével.



3. ábra: Földalatti tér hőegyensúlya

3.3.1 Hőegyensúlyi alapegyenlet

A termodinamika első főtétele kimondja az energiamegmaradást. A földalatti térben a vizsgálni kívánt fizikai jellemző a tér levegőjének hőmérséklete, ezért a termodinamikai rendszer határait a belső fal felületén vettem föl. A vizsgált fizikai folyamatot a termodinamika 1. főtételének nyitott rendszerre vonatkozó egyenlete írja le az alábbi differenciális formában:

$$dU_a = \delta Q + \delta W \quad (8)$$

ahol:

U_a [kJ] tér levegőjének belső energiája,

Q [kJ] levegővel közölt hőmennyiség,

W [kJ] rendszeren végzett munka.

Mivel nyitott rendszerről van szó, a termodinamikai rendszertérfogata állandó, vagyis izochor az állapotváltozás, továbbá a tér nyomása is állandó (izobár), emiatt a rendszeren végzett munka zérus. Az előbbi megállapításokat felhasználva az entalpia definíciója szerint a belső energia kifejezhető a levegő entalpiájával. Visszahelyettesítve a (8) egyenletbe a következőt kapjuk:

$$dH_a = \delta Q \quad (9)$$

ahol:

H_a [kJ] a tér levegőjének entalpiája.

Így már felírható az időben változó instacioner folyamat differenciális alapegyenlete:

$$\frac{dH_a}{d\tau} = \dot{Q} \quad (10)$$

Átrendezést és fizikai tartalommal való kiegészítéseket követően:

$$V \cdot \rho_a \cdot dh_a = \{ \sum \dot{Q}_i + \dot{Q}_w(\tau) + \dot{m}_s \cdot [h_a(\tau) - h_s] \} d\tau \quad (11)$$

$$h_a(\tau) = c_{p,a} \cdot t_a(\tau) + x_a [c_{p,s} \cdot t_a(\tau) + r_0] \quad (12)$$

$$h_s = const. \quad (13)$$

ahol:

$\sum \dot{Q}_i$ [kW] belső tér eredő hőterhelése,

$\dot{Q}_w(\tau)$ [kW] falon keresztüli hőáram,

\dot{m}_s [kg/s] szellőzőlevegő tömegárama,

$c_{p,a}$ [kJ/kg K] száraz levegő állandó nyomáson vett fajhője,

ρ_a [kg/m³] levegő sűrűsége,
 V [m³] földalatti tér térfogata.

A földalatti térben a levegő nedvességtartalmának változása elhanyagolhatóan kicsiny, ezért a belső tér entalpiájának változása a levegő hőmérsékletének és az állandó nyomáson vett fajhőjének szorzatával jellemezhető. Ezzel előáll a földalatti tér matematikai modellje, amely a tér hőtranszportját tartalmazó hőegyensúlyi alapegyenlet (14). A hőmérséklet a belső hőterhelés, a szellőztetés energiaforgalma, valamint a falon áthaladó hőáram határozza meg. Az egyes tagok részletes ismertetését a következő fejezet tartalmazza.

$$\rho_a \cdot V \cdot c_{p,a} \cdot dt_a = \{ \sum \dot{Q}_i + \dot{Q}_w(\tau) + \dot{m}_s \cdot [h_a(\tau) - h_s] \} d\tau \quad (14)$$

ahol:

$t_a(\tau)$ [°C] földalatti tér levegőjének hőmérséklete.

3.3.2 A belső tér eredő hőterhelése

A belső hőterhelések tartalmazzák az emberek, világítás, villamos berendezések, valamint a gépi hűtés és fűtés komponenseit:

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_h + \dot{Q}_c + \dot{Q}_H + \dot{Q}_l + \dot{Q}_m \quad (15)$$

ahol:

\dot{Q}_c / \dot{Q}_h [kW] hűtés vagy fűtés teljesítménye,
 \dot{Q}_H [kW] emberek hőleadása,
 \dot{Q}_l [kW] világítási hőterhelés,
 \dot{Q}_m [kW] mechanikai vagy villamos berendezések hőleadása.

3.3.3 Konvektív hőátvitel a falon

A konvektív hőátvitel a falon:

$$\dot{Q}_w(\tau) = \int_A \alpha [t_a(\tau) - t(x, \tau)|_{x=0}] dA, \quad (16)$$

ahol:

α [W/m²K] hőátadási tényező,
 $t_a(\tau)$ [°C] földalatti tér levegőjének hőmérséklete,
 $t(x, \tau)$ [°C] talajhőmérséklet (4. ábra jelölései szerint).

3.3.4 Hőáram a földalatti tér falán

A fal felületi hőmérséklete kifejezhető a levegő hőmérsékletével [59], [60], [61], [62]. A betonfalak hőtechnikai jellemzői a talajéhoz hasonlóak [63]. Amennyiben a falszerkezet kis fajsúlyú és hővezetési tényezőjű (pl. műanyaghab) hőszigeteléssel van borítva, a talajnál lényegesen kisebb fáziskésleltetése és hőtárolása miatt hatását a hőátadási tényezőben lehet figyelembe venni a (17) egyenlet szerint [64].

$$\alpha' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \left[\frac{\delta}{\lambda}\right]_{ins}} \quad (17)$$

A „3.2.2 A földalatti teret körülvevő talaj” c. fejezetben részletezett megállapítások értelmében a talajban végbemenő fizikai folyamatot egydimenziós hővezetés differenciálegyenletével lehet leírni, amely az alábbi formában áll elő (4. ábra jelölésrendszere alapján) :

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (18)$$

$$a = \frac{\lambda_{so}}{\rho_{so} \cdot c_{so}} \quad (19)$$

A földalatti tér levegőjének hőmérséklete folyamatosan változik. A hőtranszport hőátadás formájában valósul meg a talaj irányába. A földalatti tér falában létrejövő hőátviteli jelenség hőátvitel félvégtelen térben (21) időben változó harmadfajú peremfeltétel (20) esetén.

3.3.5 Feltételi egyenletek

Az egyértelműségi egyenletek kidolgozásakor a peremfeltételeket és kezdeti feltételeket kell meghatározni a fizikai modell alapján. A „3.2.5 Egyértelműségi feltételek” fejezetben leírt fizikai feltételeket matematikai egyenletekben fogalmaztam meg:

Peremfeltétel:

$$x = 0 : -\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)|_{x=0}}{\partial x} + \alpha' \cdot [t_a(\tau) - t(x, \tau)|_{x=0}] = 0 \quad (20)$$

$$x \rightarrow \infty : t(x, \tau)|_{x \rightarrow \infty} = t(x, \tau)|_{\tau=0} = const. \quad (21)$$

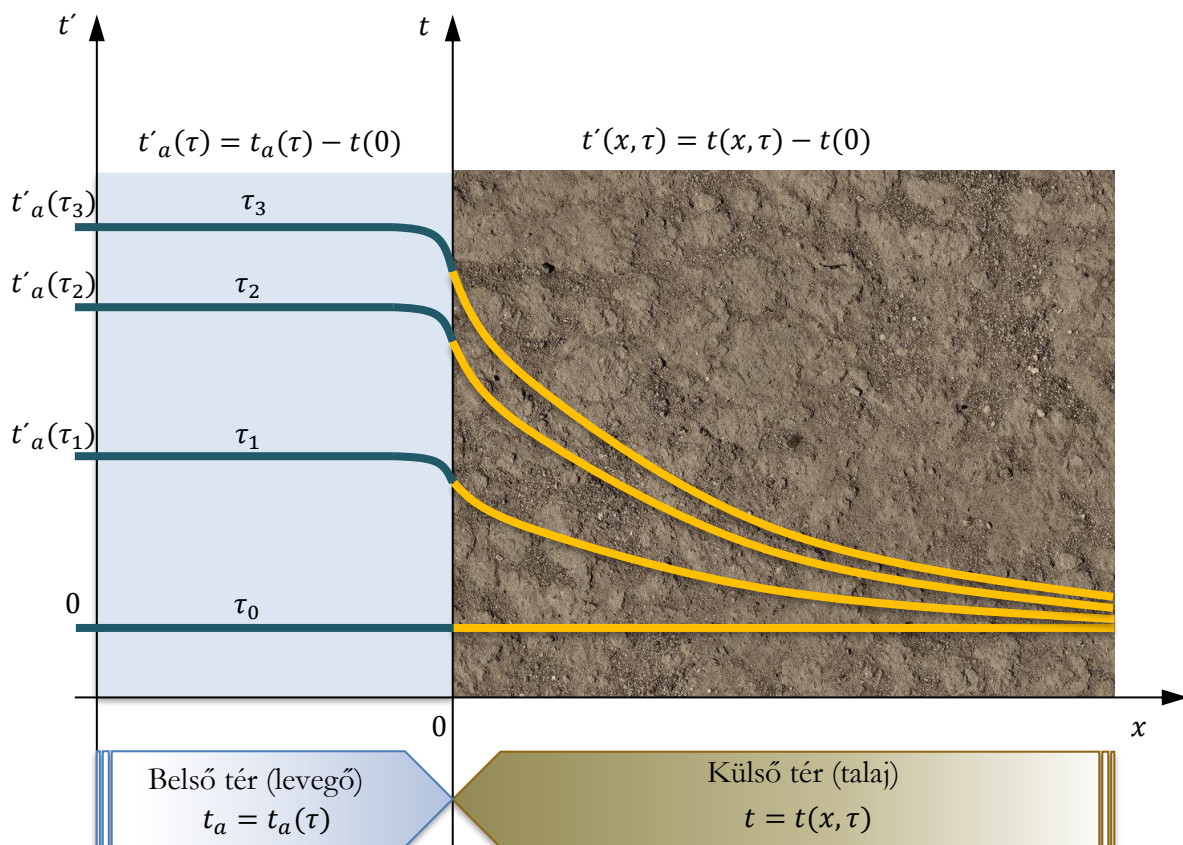
Kezdeti feltétel:

$$\tau = 0 : t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_a(0) = const. \quad (22)$$

3.4 A matematikai modell analitikus megoldása

3.4.1 Új változó bevezetése

A (18) differenciálegyenlet megoldását egyszerűbbé teszi, ha a (21) és (22) feltéti egyenletekben szereplő állandó zérus. Ez a hőmérséklet skála nulla pontjának az eltolását jelenti a kezdeti talaj, ill. levegő hőmérsékletéhez. A matematikai apparátus koordinátatranszformációval hajtható végre. Az így bevezetett új változót (hőmérséklet értékeket) a transzformált koordinátatengelyen vesszővel különböztetem meg (4. ábra).



4. ábra: A talaj, fal és levegő hőmérséklet-változása

3.4.2 A fal hőmérséklete

A hővezetés differenciálegyenlete időben változó peremfeltételnél Laplace transzformációval oldható meg [65], [66], [67], [60], [62].

A feltéti egyenletek alapján a megoldás időfüggvénye, melyre a következő konvolúciós integrál adódik:

$$t'(x, \tau) = \int_0^{\tau} t'_a(\tau - u) \cdot g(u) du \quad (23)$$

$$\text{ahol: } g(u) = H \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4au}} - aH^2 e^{Hx+aH^2u} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au}\right] \quad (24)$$

$$H = \frac{\alpha'}{\lambda} \quad (25)$$

$$t'(x, \tau) = \int_0^{\tau} t'_a(\tau - u) \cdot \left\{ \frac{\alpha'}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4au}} - a \left(\frac{\alpha'}{\lambda}\right)^2 e^{\frac{\alpha'}{\lambda}x + a\left(\frac{\alpha'}{\lambda}\right)^2 u} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + \frac{\alpha'}{\lambda} \cdot \sqrt{au}\right] \right\} du \quad (26)$$

A fal túlhőmérséklete az idő függvényében $x = 0$ helyen:

$$t'(x, \tau)|_{x=0} = \int_0^{\tau} t'_a(\tau - u) \cdot \left\{ H \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} - aH^2 e^{aH^2u} \cdot \operatorname{erfc}[H\sqrt{au}] \right\} du \quad (27)$$

A $(t - x)$ koordinátarendszerre visszatérve a megoldás:

$$t(x, \tau)|_{x=0} = \int_0^{\tau} [t_a(\tau - u) - t_a(0)] \cdot \left\{ H \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} - aH^2 e^{aH^2u} \cdot \operatorname{erfc}[H\sqrt{au}] \right\} du + t(x, \tau)|_{\tau=0, x=0} \quad (28)$$

Így a fal hőmérséklete a (28) egyenlettel számítható.

3.4.3 A földalatti tér differenciálegyenlete

Visszahelyettesítve az (28) egyenletet a hőegyensúlyi alapegyenletbe (14) kapjuk a földalatti tér differenciálegyenletét az idő függvényében:

$$\frac{dt_a(\tau)}{d\tau} + k_1 t_a(\tau) + k_2 \cdot \left[\int_0^{\tau} [t_a(\tau - u) - t_a(0)] \cdot g(u)|_{x=0} du + t(x, \tau)|_{\tau=0, x=0} \right] + k_3 = 0 \quad (29)$$

ahol:

$$k_1 = \frac{A \cdot \alpha' + \dot{m}_s (c_{p,a} + x_a \cdot c_{p,s})}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a} \quad (30)$$

$$k_2 = -\frac{A \cdot \alpha'}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a} \quad (31)$$

$$k_3 = \frac{\sum \dot{Q}_i - \dot{m}_s (x_a \cdot r_0 - h_s)}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a} \quad (32)$$

Kezdeti feltétel:

$$\tau = 0 : t_a(0) = t(x, 0) = \text{const.} \quad (33)$$

Megjegyzések:

- Kezdeti állapotban a talaj minden pontját egyetlen kezdeti hőmérséklettel jellemezhetjük, amely egyenlő a fal és a földalatti tér levegőjének hőmérsékletével is.
- A levegő nedvességtartalma a (30) és (32) egyenletekben vehető figyelembe. Amennyiben a nedvességterhelés a térben elhanyagolható, abban az esetben ennek értéke konstansnak vehető. Komfortterek esetében ez jellemző.
- Amennyiben a levegő nedvességtartalom-változása nem elhanyagolható mértékű, akkor k_1 és k_3 időfüggő változókat a (29) egyenletbe ennek megfelelően kell visszahelyettesíteni.
- A levegő abszolút nedvességtartalmának számítása az idő függvényében:

$$x_a(\tau) = Z_1 + x_s - e^{-Z_2\tau \cdot (Z_1 + x_s - x_a|_{\tau=0})} \quad (34)$$

$$Z_1 = \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_s} \quad (35)$$

$$Z_2 = \frac{\dot{m}_s}{V \cdot \rho_a} \quad (36)$$

3.5 Numerikus eljárás az integro-differenciálegyenlet megoldására

A kapott (29) integro-differenciálegyenlet megoldása nem fejezhető ki zárt alakban, mivel vagy a jelenlegi matematikai ismeretek nem elégségesek a meghatározásához, vagy a megoldásfüggvényt nem lehet analitikusan előállítani. A megoldás érdekében ezért numerikus módszereket alkalmaztam. A fejezet a numerikus séma felépítését írja le.

A kapott integro-differenciál egyenletet a keresett $t_a(\tau)$ változó legkisebb fokszámára nézve szétválasztható, átrendezve a következő összefüggést kapjuk:

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} \frac{dt_a(\tau)}{d\tau} d\tau = t_a(\tau_{p+1}) - t_a(\tau_p) = \Delta t_a(\tau_p) =? \quad (37)$$

A következő fejezet ezért ennek az integrálnak a meghatározásával foglalkozik.

3.5.1 Az integro-differenciál egyenlet numerikus sémája

Diszkrét ekvidisztáns (azonos lépésközű) pontsorozat esetében „s” darab alappontra illesztett „(s-1)”-edfokú interpolációs polinom alatti terület mérőszámával közelítjük az integrált [68], [69], [70]. Ekkor az ekvidisztáns alappontrendszer elemei:

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} \frac{dt_a(\tau)}{d\tau} d\tau = t_a(\tau_{p+1}) - t_a(\tau_p) = \Delta t_a(\tau_p) =? \quad (38)$$

A keresett $t_a(\tau)$ változó:

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} \frac{dt_a(\tau)}{d\tau} d\tau = t_a(\tau_{p+1}) - t_a(\tau_p) = \Delta t_a(\tau_p) =? \quad (39)$$

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) nyolcadrendű beágyazott Dormand-Prince metódust, míg a számítások további részeiben hatodrendű Adams-Moulton formulát alkalmaztam [71], [72]. Így az ötödik lépés után a keresett $t_a(\tau)$ változóra nézve hatodrendű a közelítés. A formulák a hibatag feltüntetésével az 1. táblázatban összefoglalva láthatók.

1. táblázat: Az alkalmazott differenciaséma formulák

Jelölés	„p” értékének tartománya	Közelítő eljárás	Közelítés rendje	Lépésszám	Lokális csonkítási hibafüggvény (Landau jelöléssel)
DP8(7)	[0 ; 4]	nyolcadrendű beágyazott Dormand-Prince metódus	$s = 8$	$k = 13$	$\mathcal{O}(\Delta\tau^8) = C \cdot \Delta\tau^9 \cdot f^{(8)}(\xi)$
AM6	[5 ; ∞ [hatodrendű Adams-Moulton formula	$s = 6$	$k = 5$	$\mathcal{O}(\Delta\tau^6) = \frac{863}{60\,480} \Delta\tau^7 \cdot f^{(6)}(\xi)$

Megjegyzés:

$$\Delta\tau = \tau_{p+1} - \tau_p; \quad \tau_p = p \cdot \Delta\tau; \quad p = 0, 1, 2, 3, \dots; \quad \xi \in [\tau_p, \tau_{p+1}]$$

3.5.2 DP8(7): Nyolcadrendű beágyazott Dormand-Prince metódus

$p \in [0; 4]$:

A közelítési hibák elkerülhetetlenek, ha iteratív módszereket alkalmazunk. A fellépő hiba függ az alkalmazott lépés méretétől, gyakorlati szempontból azonban a megkívánt pontosság ismert. Így azt szeretnénk, hogy a pontosságot kelljen megadni a lépés nagysága helyett a numerikus integrálás bemenő adataként. Ennek megfelelően az algoritmustól elvárt, hogy az első lépésekben automatikusan bírálja felül a lépés nagyságát úgy, hogy a lokális diszkretizációs hiba alatta maradjon a megkívánt értéknek. Tehát az egy iterációs lépés során keletkező hibát előre meg kell megbecsülni.

Két különböző megoldás kapható két különböző integrációs algoritmussal (beágyazott módszerek). A számított megoldások különbségéből a helyi hibát meg lehet becsülni. Ilyenformán érdekes lehet egy olyan módszer, amiben a magasabb rendű tagnak minimalizáljuk a hibahatárát, miközben az alacsonyabb rendű tag csak a lépéshossz kontrollálása miatt van jelen. A cél az új időlépés megválasztása, úgy, hogy a hiba a tolerancia közelébe essen. Ilyen módszereket konstruált Dormand és Prince, amelynek egy nyolcadrendűbe ágyazott hetedrendű változatát választottam a szimulációhoz [73].

Az „s”-edrendű módszernek legyenek ugyanazok a \mathbf{c} vektorának és \mathbf{A} mátrixának együtthatói, mint az „(s+1)”-edrendű módszernek. Ekkor viszont a \mathbf{b} vektorok különbözőek lesznek, ezért ezekre vezettem be $\hat{\mathbf{b}}$ jelölést. Butcher-táblában a következőképp jelölendő [74]:

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{c} & \mathbf{A} \\ \hline & \mathbf{b}^T \\ & \widehat{\mathbf{b}}^T \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|cccc} c_1 & a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,i} \\ c_2 & a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_i & a_{i,1} & a_{i,2} & \cdots & a_{i,i} \\ \hline & b_1 & b_2 & \cdots & b_i \\ & \widehat{b}_1 & \widehat{b}_2 & \cdots & \widehat{b}_i \end{array} \right] \quad (40)$$

$$\text{ahol: } \mathbf{A} = (a_{i,j})_{i,j=1}^k \in \mathbb{R}^{k \times k}$$

$$\mathbf{c} = (c_i)_{i=1}^k \in \mathbb{R}^k$$

$$\mathbf{b} = (b_i)_{i=1}^k \in \mathbb{R}^k$$

$$\widehat{\mathbf{b}} = (\widehat{b}_i)_{i=1}^k \in \mathbb{R}^k$$

A választott módszer esetében az \mathbf{A} mátrix alsó háromszög mátrix, amely egyben azt eredményezi, hogy az eljárás explicit módon közelíti a keresett függvényértéket [75], [76]. Az explicit egylépéses módszerek közé tartozó beágyazott Runge-Kutta-formula általános alakja az alábbi összefüggésekkel írható le.

$$Y_i = t_a(\tau_p) + \Delta\tau \sum_{j=1}^k a_{i,j} \cdot f(\tau_p + c_j \Delta\tau; Y_j) \quad (41)$$

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} f(\tau) d\tau \approx \Delta\tau \sum_{i=1}^k b_i \cdot f(\tau_p + c_i \Delta\tau; Y_i) - \mathcal{O}(\Delta\tau^s) \quad (42)$$

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} \widehat{f}(\tau) d\tau \approx \Delta\tau \sum_{i=1}^k \widehat{b}_i \cdot f(\tau_p + c_i \Delta\tau; Y_i) - \mathcal{O}(\Delta\tau^s) \quad (43)$$

$$t_a(\tau_{p+1}) = t_a(\tau_p) + \int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} f(\tau) d\tau \quad (44)$$

$$\widehat{t}_a(\tau_{p+1}) = t_a(\tau_p) + \int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} \widehat{f}(\tau) d\tau \quad (45)$$

Az általam alkalmazott nyolcadrendű beágyazott, tizenháromlépéses ($s=8$, $k=13$) közelítés numerikus sémájának Butcher táblája a 2. táblázatban található [77].

3.5.3 AM6: Hatodrendű Adams-Moulton formula

$p \in [5; \infty [$:

Az implicit lineáris többlépéses módszerek közé tartozó Adams-Moulton formula általános alakja:

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} f(\tau) d\tau \approx \Delta\tau \cdot \sum_{j=0}^k \left\{ \frac{(-1)^j}{j! (k-j)!} \int_0^1 \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^k (u+i-1) du \cdot f(\tau_{p+1-j}) \right\} - \mathcal{O}(\Delta\tau^s) \quad (46)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, k$$

Az általam alkalmazott hatodrendű, ötlépéses ($s=6, k=5$) közelítés numerikus sémája a hibatag feltüntetésével:

$$\int_{\tau_p}^{\tau_{p+1}} f(\tau) d\tau \approx \frac{475 f(\tau_{p+1}) + 1427 f(\tau_p) - 798 f(\tau_{p-1}) + 482 f(\tau_{p-2}) - 173 f(\tau_{p-3}) + 27 f(\tau_{p-4})}{1440} \cdot \Delta\tau - \mathcal{O}(\Delta\tau^6) \quad (47)$$

$$\mathcal{O}(\Delta\tau^6) = \frac{863}{60480} \Delta\tau^7 \cdot f^{(6)}(\xi); \quad \xi \in [\tau_p, \tau_{p+1}].$$

3.5.4 Optimális lépésköz meghatározás és hibabecslés

A numerikus sémához tartozó lépésköz meghatározása a „3.5.2-DP8(7): Nyolcadrendű beágyazott Dormand-Prince „ című fejezetben ismertetett első négy lépés tartományára ($p \in [0; 4]$) vonatkozóan és módszerének felhasználásával határozható meg. Mivel a \mathbf{c} vektor és az \mathbf{A} mátrix azonosak a kétféle rendű formulában, ezért ez annyit jelent, hogy minimális számítási többlettel tudunk nagy pontossággal hibát becsülni [78], [79].

$$\varepsilon(\tau_{p+1}) = |t_a(\tau_{p+1}) - \hat{t}_a(\tau_{p+1})| \quad (48)$$

$$\varepsilon(\xi) = \Delta\tau \sum_{i=1}^k (b_i - \hat{b}_i) \cdot f(\tau_p + c_i \Delta\tau; Y_i) = C \cdot \Delta\tau^8 \cdot f^{(7)}(\xi) \quad (49)$$

$$\Delta\tau_{new} = \beta \cdot \Delta\tau \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{p+1}} \right)^{\frac{1}{s+1}}; \quad \beta = 0.9 \quad (50)$$

Ha ε_{p+1} nem tér el lényegesen ε_0 -tól, akkor megtartjuk a kiszámolt $\Delta\tau$ lépésközt a további számításokhoz, ha lényegesen eltér, akkor újraszámolunk a javasolt $\Delta\tau_{new}$ lépésközzel. A becsült új $\Delta\tau_{new}$ lépésköz számítási módszer figyelembe veszi a közelítő eljárás rendjét, a megkívánt pontosság és az elért lokális hiba számszerű értékének viszonyát, valamint egy becsüli β biztonsági tényezőt is. Ezt az optimalizációs ciklust addig folytatjuk, amíg a kívánt hibaérték tartományába nem esik a számított lokális diszkretizációs hiba. Ekkor az ehhez tartozó $\Delta\tau$ lépésközt tekintem a későbbi szimulációhoz is felhasznált $\Delta\tau_{opt}$ optimális lépésköznek [80].

3.5.5 Komplementer hibafüggvény

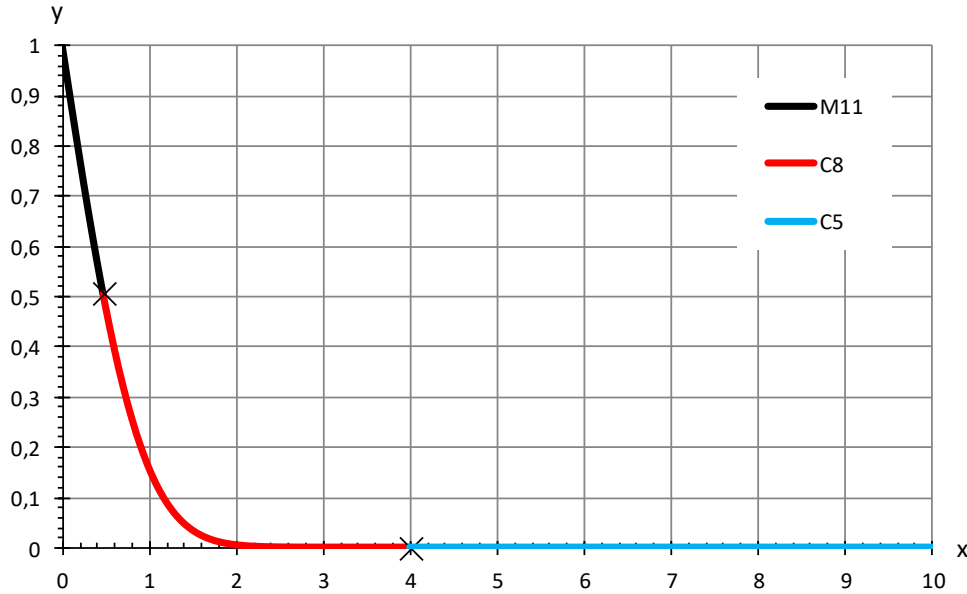
A komplementer hibafüggvény egy úgynevezett teljes függvény: nincsenek szingularitásai (kivéve a végtelenben). Definíció szerinti képlete:

$$\operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au}\right] = 1 - \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au}\right] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (51)$$

Az integrál meghatározását nem lehet zárt formában, elemi függvények kifejezéseivel elvégezni, ezért közelítő összefüggésekkel határozzuk meg az integrál értékét. Minél összetettebb az approximációs függvény, annál inkább nő a közelítés pontossága. A numerikus számítások 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. Mindegyik intervallumon különböző közelítő eljárást alkalmaztam, amelyeket összefoglalva a 3. táblázat tartalmaz a közelítés optimális fokszámának és legnagyobb abszolút hibájának feltüntetésével.

3. táblázat: A komplementer hibafüggvény közelítő formulái

Jelölés	Argumentum tartománya	Közelítő eljárás	Közelítés fokszáma	Abszolút hiba
M11	$\xi \in [0; 0.47[$	MacLaurin-formula	11	$ \varepsilon(\xi) < 5.98 \cdot 10^{-19}$
C8	$\xi \in [0.47; 4[$	Chebyshev-féle aszimptotikus sor	8	$ \varepsilon(\xi) < 5.92 \cdot 10^{-19}$
C5	$\xi \in [4; \infty[$	Chebyshev-féle aszimptotikus sor	5	$ \varepsilon(\xi) < 2.95 \cdot 10^{-20}$



5. ábra: A komplementer hibafüggvény formulák ábrázolása

A komplementer hibafüggvény fenti módszerekkel történő számítása egyenszilárdságúnak tekinthető a teljes valós számok halmazán. A numerikus számítási igény, valamint a legnagyobb abszolút hiba nagyságrendje közel azonos mindhárom értéktartományon.

3.5.6 M11: MacLaurin-formula

$$0 \leq \left| \frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right| < 0.47 :$$

A komplementer hibafüggvényt zárt formában meghatározni ugyan nem lehet, Taylor-sora azonban mindig konvergens. A Taylor-sorba fejtést elvégezve azt tapasztaltam, hogy a hatványsor nem egyenletesen, hanem csak pontonként konvergens. Emiatt a küszöbindex csökkentése érdekében zérus pontra vonatkozólag fejtjük hatványsorba az integranduszt, ekkor a következő MacLaurin-formulát kapjuk:

$$\operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p \cdot \frac{\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^{2p+1}}{p! (2p+1)} \quad (52)$$

Mivel a hatványsor konvergens, ezért ennél a módszernél a Lagrange-féle maradéktaggal explicit módon nagyon jó becslést lehet adni a közelítés hibájára. Az alkalmazott 11-edfokú MacLaurin-polinom egyenlete a hibataggal:

$$\operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] \approx 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{p=0}^{11} (-1)^p \cdot \frac{\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^{2p+1}}{p! (2p+1)} + R_{11} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] \quad (53)$$

$$R_{11} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^{2 \cdot 12 + 1}}{12! (2 \cdot 12 + 1)}$$

Ekkor $p=11$ tag esetén a maximális abszolút hiba értéke: $|\varepsilon| < 5.98 \cdot 10^{-19}$.

3.5.7 C8: Nyolcadfokú Chebyshev-féle aszimptotikus sor

$$0.47 \leq \left| \frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right| < 4 :$$

Ha az argumentum számértékek közé esik, akkor célszerűbb a Chebyshev-féle aszimptotikus sor, mint racionális törtfüggvény alkalmazása. Ekkor kevesebb számítási kapacitás szükséges azonos pontosság eléréséhez. Az alkalmazott 8-adfokú Chebyshev-féle racionális törtfüggvény:

$$\operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] \approx e^{-\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^2} \cdot \frac{\sum_{p=0}^8 b_p \cdot \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^p}{\sum_{p=0}^8 q_p \cdot \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^p} \quad (54)$$

$$b_p = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \\ b_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.23033935479799725 \cdot 10^3 \\ 2.05107837782607147 \cdot 10^3 \\ 1.71204761263407058 \cdot 10^3 \\ 8.81952221241769090 \cdot 10^2 \\ 2.98635138197400131 \cdot 10^2 \\ 6.61191906371416295 \cdot 10^1 \\ 8.88314979438837594 \cdot 10^0 \\ 5.64188496988670089 \cdot 10^{-1} \\ 2.15311535474403846 \cdot 10^{-8} \end{bmatrix} ; q_p = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.23033935480374942 \cdot 10^3 \\ 3.43936767414372164 \cdot 10^3 \\ 4.36261909014324716 \cdot 10^3 \\ 3.29079923573345963 \cdot 10^3 \\ 1.62138957456669019 \cdot 10^3 \\ 5.37181101862009858 \cdot 10^2 \\ 1.17693950891312499 \cdot 10^2 \\ 1.57449261107098347 \cdot 10^1 \\ 1.00000000000000000 \cdot 10^0 \end{bmatrix}$$

3.5.8 C5: Ötödfokú Chebyshev-féle aszimptotikus sor

$$4 \leq \left| \frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right| :$$

A harmadik argumentum tartományon is a fent említett aszimptotikus módszerrel történt a közelítés. Az alkalmazott ötöd fokú Chebyshev-féle racionális törtfüggvény:

$$\operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right] \approx \frac{e^{-\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^2}}{\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^2} \cdot \frac{\sum_{p=0}^5 b_p \cdot \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^{-2p}}{\sum_{p=0}^5 q_p \cdot \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]^{-2p}} \right\} \quad (55)$$

$$b_p = \begin{bmatrix} -6.58749161529837803 \cdot 10^{-4} \\ -1.60837851487422766 \cdot 10^{-2} \\ -1.25781726111229246 \cdot 10^{-1} \\ -3.60344899949804439 \cdot 10^{-1} \\ -3.05326634961232344 \cdot 10^{-1} \\ -1.63153871373020978 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}; \quad q_p = \begin{bmatrix} 2.33520497626869185 \cdot 10^{-3} \\ 6.05183413124413191 \cdot 10^{-2} \\ 5.27905102951428412 \cdot 10^{-1} \\ 1.87295284992346047 \cdot 10^0 \\ 2.56852019228982242 \cdot 10^0 \\ 1.00000000000000000 \cdot 10^0 \end{bmatrix}$$

3.5.9 Konvolúciós integrál

A konvolúciós integrált numerikusan a diszkrét konvolúció képzési szabálya szerint csak abban az esetben lehet meghatározni, ha a disztribúciók (konvolvándó tagok) ekvidisztáns alappontú értékeként ismertek. Ez egyben azt is meghatározza, hogy a numerikus lépésköz végig állandó kell maradjon a numerikus analízis során.

A konvolúciós integrál diszkrét megoldása nem a diszkrét konvolúciónál alkalmazandó klasszikus szorzatösszeggel közelíttem. A fokozottabb pontosság érdekében elemi interpolációs kvadratúra képlettel határoztam meg. A numerikus kvadratúra számításához a kompozit Simpson-formulát alkalmaztam. A kompozit Simpson módszer a Newton-Cotes eljárás egy speciális esete, azaz a részintervallumokat egy másodfokú Lagrange interpolációs polinommal közelíti. Az alkalmazott kompozit Simpson-formula kétségtelen előnye, hogy alacsony fokszámú polinomokat használva az integrandus közelítő kiszámítása gyors, és nem megy az eredmény pontosságának rovására. Az interpolációs kvadratúra illeszkedése negyedrendű, valamint konzervatív becslést lehet adni a közelítés abszolút hibájára. Az alábbi összefüggés mutatja a kompozit Simpson-kvadratúra formulát a hiba taggal:

$$\int_{u_0}^{u_{2p}} f(u) du \approx \frac{1}{3} \Delta\tau \cdot \left\{ f(u_0) + f(u_{2p}) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{p-1} f(u_{2k}) + 4 \cdot \sum_{k=1}^p f(u_{2k-1}) \right\} - R_p[f(u), \Delta\tau] \quad (56)$$

$$R_p[f(u), \Delta\tau] = \mathcal{O}(\Delta\tau^4) = \frac{p-1}{2} \cdot \frac{1}{90} \Delta\tau^5 \cdot f^{(4)}(\xi)$$

$$\Delta\tau = \frac{u_{2p} - u_0}{2p}; \quad u_k = u_0 + k \cdot \Delta\tau; \quad k = 0, 1, 2, \dots, 2p; \quad \xi \in [u_0, u_{2p}]$$

3.6 Az eljárás validációja

A matematikai modell validálására elméleti módszert választottam. Vizsgáltam a megoldás határértékét. A határérték a numerikus megoldástól függetlenül elméleti úton meghatározható. Az matematikai megoldás abszolút megengedett hibáját megválasztva határoztam meg a szükséges időlépésközt. A továbbiakban a diszkretizációs séma sorfejtésének maradék tagjával becsültem a hibát.

3.6.1 Határérték vizsgálat

A földalatti tér hőmérséklet növekedésének van határértéke. A folyamat során a levegő és a talaj hőmérséklete is növekszik, a kezelt szellőzőlevegő hőmérséklete állandó. A talaj egyre kevesebb hőt tud felvenni. A földalatti tér falán a hőáram csökken, melynek határértéke:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \dot{q}(\tau) = 0 \quad (57)$$

Ekkor a szellőztetés és a belső hőterhelések eredője nulla.

Ha $\tau \rightarrow \infty$:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_s = 0 \quad (58)$$

Behelyettesítés után a földalatti térben a levegő hőmérsékletének határértéke:

$$t_a^* = \frac{\dot{Q} + \dot{m}_s(h_s - x_s \cdot r_0)}{\dot{m}_s(c_{p,a} + x_s \cdot c_{p,s})} \quad (59)$$

A határértékeket minden vizsgált esetre vonatkozólag meghatároztam, értékeit a 5. táblázat tartalmazza.

3.6.2 A megoldás konvergenciája és a hibája

A megoldás konvergenciájának és hibájának vizsgálata során lépésköz optimalizációt végeztem. Kezdeti időlépésközt választva meghatároztam az egyes lépések lokális hibáit, valamint halmozott hibáit a vizsgált időtartományon. A kifejlesztett program addig változtatta a lépésközt, amíg a számított hiba a kívánt (előírt) tartományba nem került. Az abszolút hiba a lokális hibák abszolút összértéke.

3.7 Hőtechnikai és komfort eredmények

3.7.1 A vizsgált esetek

A kidolgozott módszerrel több esetre vonatkozólag végeztem el a szimulációt. A kezdeti feltételek és a szimulációs alapadatok:

A vizsgált földalatti tér méretei:

8 m széles, 40 m hosszú és 3 m magas.

A szimulációkat fiktív talajtípus esetén végeztem el, amelynek a fizikai jellemzőit a különböző talajtípusok tulajdonságának középértékével vettem figyelembe [81]. A talaj fizikai jellemzői:

$$\rho = 1\,800 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 1,5 \text{ W/m K}$$

$$c = 0,84 \text{ kJ/kg K}$$

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_a(0) = 12^\circ\text{C} \text{ (8 m földfelszín alatti talajmélységben)}$$

A teremben tartózkodók száma 32 fő. A belső hőterhelés esetében az embereket 100 W/fő, a járulékos technológiát (iroda- és számítástechnikai berendezés) 310 W/fő, a világítást pedig 10 W/m² értékkel vettem figyelembe. Ez fajlagosítható térfogategységre is 17 W/m³ értékkel, amelyből az emberek hőleadása 3,3 W/m³.

A kidolgozott matematikai modell alapján szimulációs programot készítettem, ennek segítségével elemeztem a különböző paraméterek hatását. A vizsgált paraméterek: hőszigetelés vastagsága, eredő belső hőterhelés, szellőző levegő hőmérséklete, légcsereszám. Az egyes változatok bemenő adatait az 4. táblázat tartalmazza. Az elemzéseknél a „0.” sorszámú változatot tekintettem alapváltozatnak. A további alapadatokat úgy határoztam meg, hogy értékelhető legyen a hőszigetelés vastagságának, a fajlagos belső hőterhelésnek, a légcsereszámnak és a szellőzőlevegő hőmérsékletének hatása.

4. táblázat: A vizsgált változatok bemenő alapadatai

№		δ [cm]	$\Sigma \dot{Q}/V$ [W/m ³]	n [1/h]	t _s [°C]	t(0,0) [°C]
0.	Alapváltozat	3	17	3	24	12
1.	Hőszigetelés: 0	0	17	3	24	12
2.	Hőszigetelés: 5	5	17	3	24	12
3.	Hőszigetelés: 10	10	17	3	24	12
4.	Fajlagos hőterhelés: 5	3	5	3	24	12
5.	Fajlagos hőterhelés: 10	3	10	3	24	12
6.	Fajlagos hőterhelés: 20	3	20	3	24	12
7.	Szellőzőlevegő hőm.: 16	3	17	3	16	12
8.	Szellőzőlevegő hőm: 20	3	17	3	20	12
9.	Szellőzőlevegő hőm: 28	3	17	3	28	12
10.	Légcserezszám: 1	3	17	1	24	12
11.	Légcserezszám: 4	3	17	4	24	12
12.	Légcserezszám: 6	3	17	6	24	12

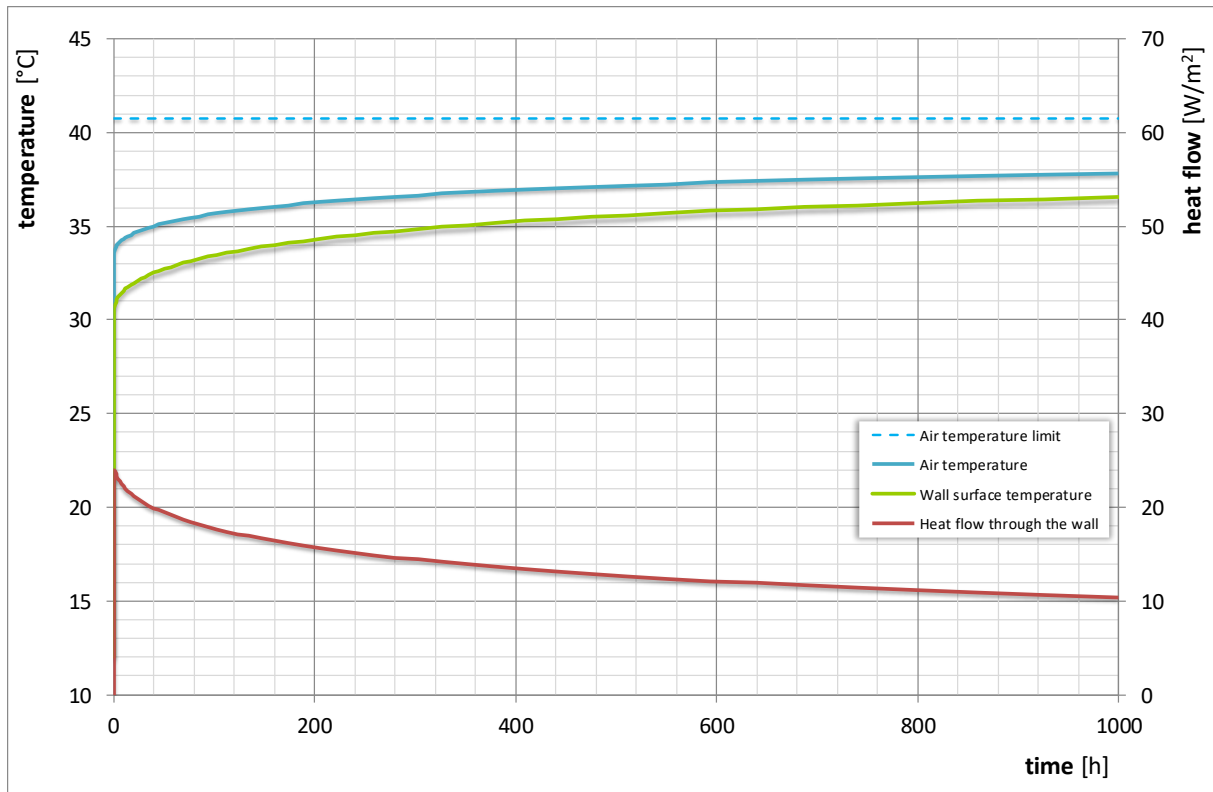
A szimuláció során az alábbi jellemzőket határoztam meg: levegő hőmérséklet, falhőmérséklet, hőáramsűrűség a falon.

Az egyes paraméterek hatását diagramokban ábrázolva értékeltem:

- hőszigetelés vastagsága,
- eredő belső hőterhelés,
- szellőzőlevegő hőmérséklete,
- légcserezszám.

Az instacioner folyamatot 1 000 óra időtartamig vizsgáltam. A 6. ábra az alapváltozatra („No.0 Alapváltozat”) szemlélteti a levegő és falfelület hőmérsékletét, valamint a falon áthaladó hőáramsűrűséget a vizsgált időszakban. Az ábra tartalmazza a levegő hőmérséklet határértékét is, amely egyúttal a falfelület határhőmérséklete is, az alapváltozat esetében 40,8°C.

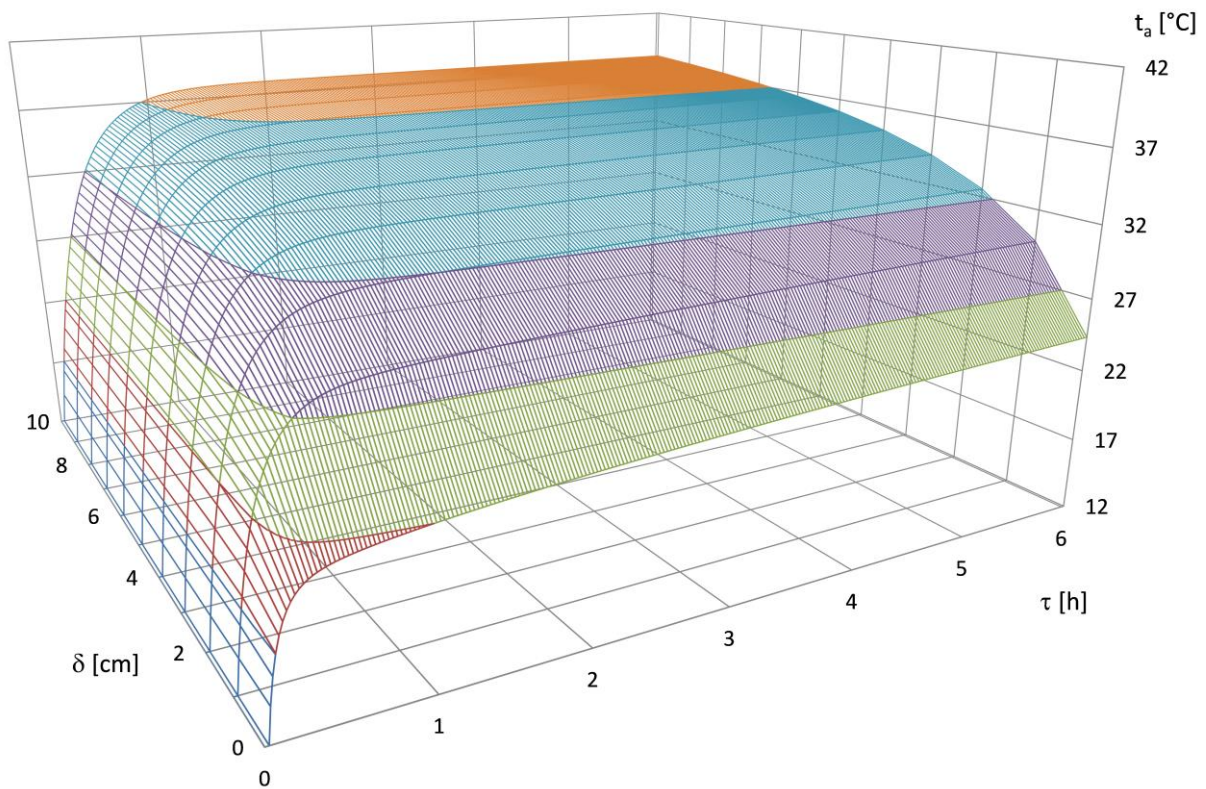
A vizsgált változatok eredményfelületen is szemléltethetők.



6. ábra: Az alapváltozat eredménye („No.0 Alapváltozat”)

3.7.2 Léghőmérséklet

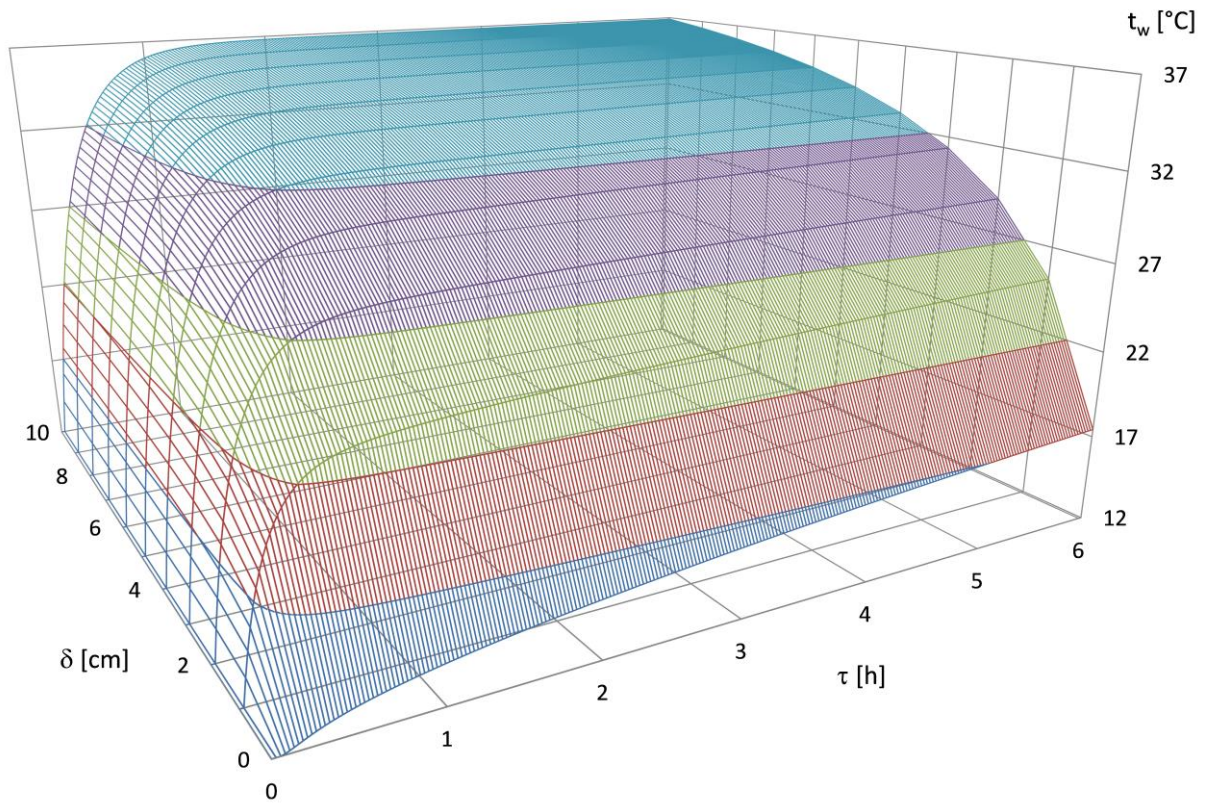
A vizsgált esetek nagyszámú összehasonlító elemzésre adnak lehetőséget. Az összehasonlítást a hőszigetelés vastagsága szempontjából vizsgáltam. Elemeztem a hőszigetelés vastagságának hatását a helyiségben kialakuló léghőmérsékletre. Az 7. ábra szemlélteti az eredményfelületet.



7. ábra: A léghőmérséklet változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében

3.7.3 Falhőmérséklet

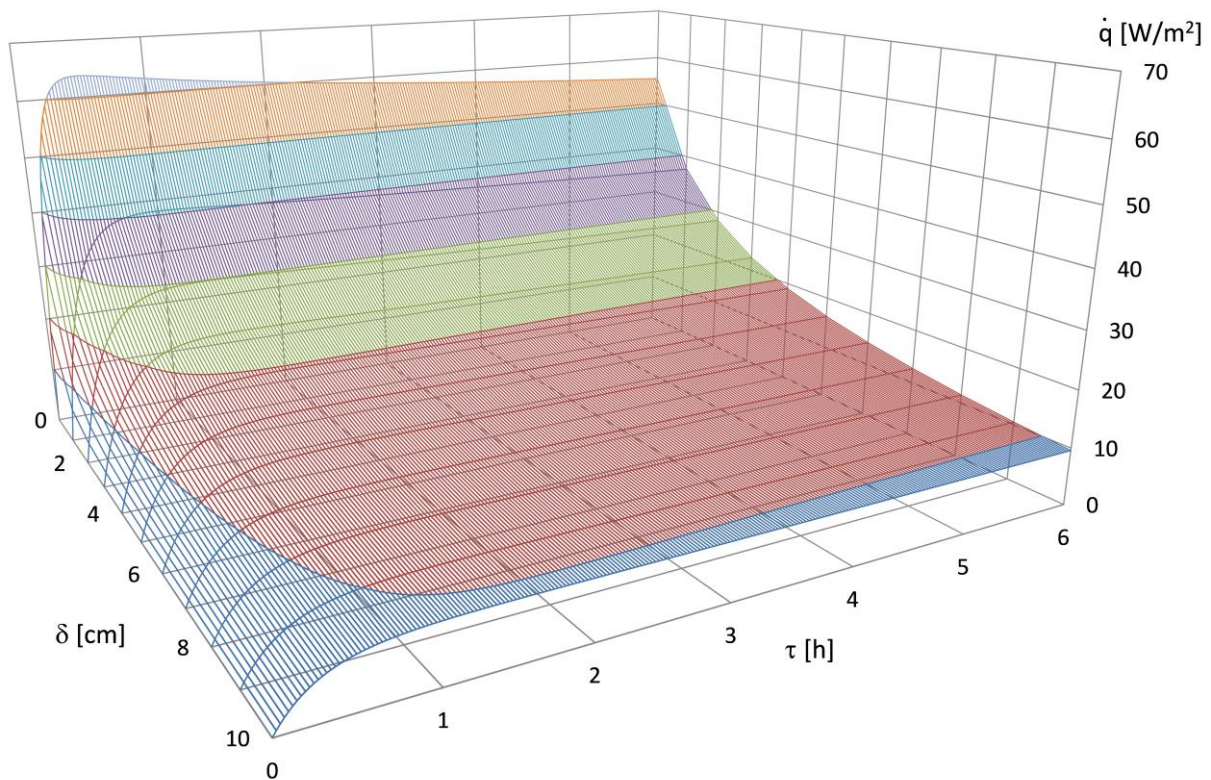
Elemeztem a hőszigetelés vastagságának hatását a belső falfelületen kialakuló falhőmérsékletre. A 8. ábra szemlélteti az eredményfelületet.



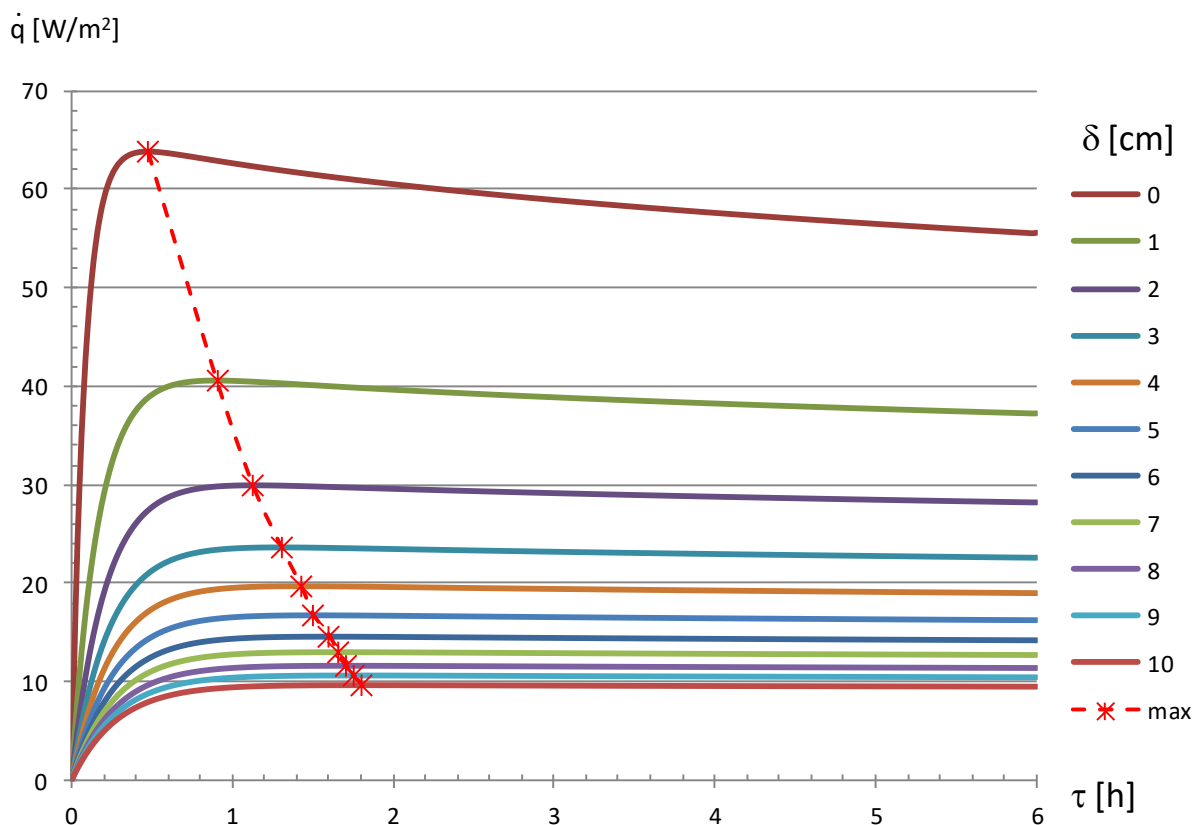
8. ábra: A falhőmérséklet változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében

3.7.4 Hőátvitel a falon

Elemeztem a hőszigetelés vastagságának hatását a falon átáramló hőáramsűrűségre. Az összehasonlító vizsgálat eredményét a 9. ábra eredményfelületete mutatja. A hőátviteli folyamat másodrendű rendszerként modellezhető: az egyik tároló a földalatti tér levegője, a másik pedig a földalatti teret körülvevő talaj, amely félvégtesen kiterjedésűnek tekintetem. A folyamat kezdetén a levegő hőmérsékletének változása gyorsabban következik be, majd fáziskéséssel és csillapítottan követi a talaj hőmérsékletének változása. A levegő hőmérséklet növekedése korlátos, határértékét elméleti úton határoztam meg (ennek eredményei megtalálhatók az 5. táblázatban). Emiatt a talajba jutó hőáramnak is maximuma van (10. ábra).



9. ábra: A falon átáramló hőáramsűrűség változása a hőszigetelés vastagsága és az idő függvényében



10. ábra: A hőszigetelés hatása a falon átáramló hőáramsűrűsége

3.8 Eredmények elemzése

A földalatti tér fizikai modelljének megoldásához kidolgoztam a tér matematikai modelljét. A matematikai modell alapján absztrakt algoritmust dolgoztam ki, amely algoritmus szerint számítógépes szimulációs programot készítettem. Így lehetővé vált tetszőleges földalatti tér esetében tetszőleges alapadatok mellett a hőtechnikai folyamat vizsgálata.

Bemenő adatok:

- hőszigetelés vastagsága,
- eredő belső hőterhelés:
 - emberek hőleadása,
 - világítás hőleadása,
 - alapfűtés teljesítménye,
- szellőzőlevegő hőmérséklete,
- légcsereszám,
- talaj kezdeti hőmérséklete,
- talaj hófizikai jellemzői.

A számítógépes szimulációs program segítségével meg tudjuk határozni a földalatti tér értékeléséhez szükséges eredményeket:

- levegő hőmérsékletének a változása,
- falfelület hőmérsékletének a változása,
- falon átáramló hőáramsűrűség változása,
- levegő és falfelület határhőmérséklete,
- alapfűtés teljesítménye,
- szellőztető rendszer fűtési teljesítményigénye,
- fűtés és szellőztető rendszer együttes teljesítményigénye,
- belső tér hőérzeti mutatószám (PMV) változása.

Több változatot értékeltem, a kapott eredményeket táblázatosan foglaltam össze. A földalatti térben és annak környezetében lezajló folyamat instacioner hőtechnikai folyamat, időben változik a levegő és fal hőmérséklete, a falon átáramló hőáramsűrűség, valamint a várható hőérzeti mutató értéke (PMV). Külön táblázatban mutatom be a 72 óra (5. táblázat), a 168 óra (6. táblázat) és az 1 000 óra (7. táblázat) utáni eredményeket. A kapott eredmények jól szemléltetik a változó értékek határértékhez való tartását, közelítését.

5. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 72 óra eltelte után

No	δ [cm]	$\Sigma \dot{Q}/V$ [W/m ³]	n [1/h]	t_s [°C]	$t(0,0)$ [°C]	t_a^* [°C]	PMV [-]	$t_a^{(t=72h)}$ [°C]	$t_w^{(t=72h)}$ [°C]	$\dot{q}_w^{(t=72h)}$ [W/m ²]	\dot{q}_w^{\max} [W/m ²]	
0.	Alapváltozat	3	17	3	24	12	40,8	2,6	35,4	33,0	18,7	23,9
1.	Hőszigetelés: 0	0	17	3	24	12	40,8	0,8	29,6	24,9	38,0	64,2
2.	Hőszigetelés: 5	5	17	3	24	12	40,8	3,1	36,8	35,0	14,0	16,9
3.	Hőszigetelés: 10	10	17	3	24	12	40,8	3,6	38,3	37,2	8,8	9,8
4.	Fajlagos hőterhelés: 5	3	5	3	24	12	28,9	0,2	25,8	24,4	11,0	14,1
5.	Fajlagos hőterhelés: 10	3	10	3	24	12	33,9	1,2	29,8	28,0	14,1	18,2
6.	Fajlagos hőterhelés: 20	3	20	3	24	12	43,7	3,2	37,8	35,2	20,6	26,4
7.	Szellőzőlevegő hőm.: 16	3	17	3	16	12	32,8	1,0	28,9	27,2	13,5	17,3
8.	Szellőzőlevegő hőm.: 20	3	17	3	20	12	36,8	1,8	32,1	30,1	16,1	20,6
9.	Szellőzőlevegő hőm.: 28	3	17	3	28	12	44,8	3,4	38,6	36,0	21,3	27,2
10.	Légcserezszám: 1	3	17	1	24	12	74,3	5,8	48,3	44,6	29,4	34,3
11.	Légcserezszám: 4	3	17	4	24	12	36,6	2,0	33,0	31,0	16,6	21,9
12.	Légcserezszám: 6	3	17	6	24	12	32,4	1,3	30,4	28,6	14,4	19,5

6. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 168 óra eltelte után

No	δ [cm]	$\Sigma \dot{Q}/V$ [W/m ³]	n [1/h]	t_s [°C]	$t(0,0)$ [°C]	t_a^* [°C]	PMV [-]	$t_a^{(t=168h)}$ [°C]	$t_w^{(t=168h)}$ [°C]	$\dot{q}_w^{(t=168h)}$ [W/m ²]	\dot{q}_w^{\max} [W/m ²]	
0.	Alapváltozat	3	17	3	24	12	40,8	2,8	36,1	34,1	16,2	23,9
1.	Hőszigetelés: 0	0	17	3	24	12	40,8	1,4	31,6	27,7	31,4	64,2
2.	Hőszigetelés: 5	5	17	3	24	12	40,8	3,2	37,2	35,6	12,7	16,9
3.	Hőszigetelés: 10	10	17	3	24	12	40,8	3,6	38,5	37,5	8,2	9,8
4.	Fajlagos hőterhelés: 5	3	5	3	24	12	28,9	0,4	26,2	25,0	9,5	14,1
5.	Fajlagos hőterhelés: 10	3	10	3	24	12	33,9	1,4	30,3	28,8	12,4	18,2
6.	Fajlagos hőterhelés: 20	3	20	3	24	12	43,7	3,5	38,6	36,4	17,8	26,4
7.	Szellőzőlevegő hőm.: 16	3	17	3	16	12	32,8	1,2	29,4	28,0	11,7	17,3
8.	Szellőzőlevegő hőm.: 20	3	17	3	20	12	36,8	2,0	32,8	31,0	13,9	20,6
9.	Szellőzőlevegő hőm.: 28	3	17	3	28	12	44,8	3,7	39,5	37,2	18,4	27,2
10.	Légcserezszám: 1	3	17	1	24	12	74,3	6,6	50,9	47,6	26,6	34,3
11.	Légcserezszám: 4	3	17	4	24	12	36,6	2,2	33,5	31,7	14,4	21,9
12.	Légcserezszám: 6	3	17	6	24	12	32,4	1,4	30,6	29,1	12,6	19,5

7. táblázat: A vizsgált változatok esetén a szimuláció eredményei 1 000 óra eltelte után

No	δ [cm]	$\Sigma \dot{Q}/V$ [W/m ³]	n [1/h]	t_s [°C]	$t(0,0)$ [°C]	t_a^* [°C]	PMV [-]	$t_a^{(t=1000h)}$ [°C]	$t_w^{(t=1000h)}$ [°C]	$\dot{q}_w^{(t=1000h)}$ [W/m ²]	\dot{q}_w^{\max} [W/m ²]	
0.	Alapváltozat	3	17	3	24	12	40,8	3,4	37,8	36,5	10,4	23,9
1.	Hőszigetelés: 0	0	17	3	24	12	40,8	2,4	34,8	32,3	20,5	64,2
2.	Hőszigetelés: 5	5	17	3	24	12	40,8	3,5	38,3	37,2	8,9	16,9
3.	Hőszigetelés: 10	10	17	3	24	12	40,8	3,8	39,0	38,2	6,5	9,8
4.	Fajlagos hőterhelés: 5	3	5	3	24	12	28,9	0,7	27,2	26,5	6,1	14,1
5.	Fajlagos hőterhelés: 10	3	10	3	24	12	33,9	1,8	31,7	30,7	7,9	18,2
6.	Fajlagos hőterhelés: 20	3	20	3	24	12	43,7	4,1	40,5	39,1	11,5	26,4
7.	Szellőzőlevegő hőm.: 16	3	17	3	16	12	32,8	1,6	30,7	29,7	7,5	17,3
8.	Szellőzőlevegő hőm.: 20	3	17	3	20	12	36,8	2,5	34,3	33,1	9,0	20,6
9.	Szellőzőlevegő hőm.: 28	3	17	3	28	12	44,8	4,3	41,4	40,0	11,8	27,2
10.	Légcserezszám: 1	3	17	1	24	12	74,3	8,6	57,6	55,2	19,1	34,3
11.	Légcserezszám: 4	3	17	4	24	12	36,6	2,6	34,7	33,6	9,1	21,9
12.	Légcserezszám: 6	3	17	6	24	12	32,4	1,7	31,4	30,4	7,6	19,5

8. táblázat: A vizsgált változatok hőkomfort és energetikai eredményei

No		δ [cm]	$\Sigma \dot{Q}/V$ [W/m ³]	n [1/h]	t_s [°C]	t(0,0) [°C]	$\Sigma \dot{Q}$ [kW]	$\dot{Q}_{SZ,F}$ [kW]	$\Sigma \dot{Q} + \dot{Q}_{SZ,F}$ [kW]	PMV [-]
0.	Alapváltozat	3	17	3	24	12	16,3	37,4	53,8	2,6
1.	Hőszigetelés: 0	0	17	3	24	12	16,3	37,4	53,8	0,8
2.	Hőszigetelés: 5	5	17	3	24	12	16,3	37,4	53,8	3,1
3.	Hőszigetelés: 10	10	17	3	24	12	16,3	37,4	53,8	3,6
4.	Fajlagos hőterhelés: 5	3	5	3	24	12	4,8	37,4	42,2	0,2
5.	Fajlagos hőterhelés: 10	3	10	3	24	12	9,6	37,4	47,0	1,2
6.	Fajlagos hőterhelés: 20	3	20	3	24	12	19,2	37,4	56,6	3,2
7.	Szellőzőlevegő hőm.: 16	3	17	3	16	12	16,3	29,8	46,1	1,0
8.	Szellőzőlevegő hőm.: 20	3	17	3	20	12	16,3	33,6	49,9	1,8
9.	Szellőzőlevegő hőm.: 28	3	17	3	28	12	16,3	41,3	57,6	3,4
10.	Légcserezszám: 1	3	17	1	24	12	16,3	12,5	28,8	5,8
11.	Légcserezszám: 4	3	17	4	24	12	16,3	49,9	66,2	2,0
12.	Légcserezszám: 6	3	17	6	24	12	16,3	74,9	91,2	1,3

A különböző változatok eredményei alapján lehet értékelni az egyes változatokat:

- A javasolt maximális hőszigetelés vastagságát 3 cm-ben határoztam meg a szimulációk eredményei alapján, növelése nem jár energetikai és komfort előnyökkel.
- 3 cm vastag hőszigetelés alkalmazásával és 24°C-os szellőzőlevegővel már kiegészítő hőbevitel nélkül is biztosítható a belső hőkomfort, amennyiben a belső hőterhelés eléri az 5 W/m³ értéket.
- Amennyiben a belső hőterhelés nem éri el az 5 W/m³ értéket, akkor a hiányt kiegészítő fűtéssel kell pótolni.
- 17 W/m³ belső hőterhelés felett hőszigetelés alkalmazása már nem szükséges.
- A földalatti tér hőveszteségét nem ajánlott a szellőzőlevegő hőmérsékletének, vagy térfogatáramának növelésével pótolni, hanem energetikai megfontolásból alapfűtés (pl. radiátor) alkalmazása javasolt.
- A szellőzőlevegő térfogatáramát a frisslevegő igény alapján javasolt méretezni, figyelembe véve azt a korlátozó feltételt, miszerint 3 h⁻¹ légcserét javasolt biztosítani.

A kidolgozott matematikai modell és számítógépes program lehetővé teszi tetszőleges változatok gyors megoldását, a kapott eredmények elemzését. Az eredmények között a komfortnak, valamint az alapfűtés és a szellőzés teljesítményigényének van meghatározó szerepe. A kidolgozott módszer lehetővé teszi az energetikai és komfort optimum meghatározását.

4. Zárt terek hő- és levegőminőségi komfortjának értékelése, minősítése valószínűség-elméleti alapon

4.1 Elméleti alapok

A zárt tér minden egyes hőkomfort jellemzője (léghőmérséklet, páratartalom, közepes sugárzási hőmérséklet, átlagos légsebesség, turbulencia intenzitás) valószínűségi változók. Értékük ennek megfelelően átlagértékkel, szórással, konfidencia intervallummal, stb. jellemezhető. A komfort értékeléséhez két feladatot kellett megoldanom:

- a komfortot befolyásoló paraméterek folyamatos mérése és gyűjtése,
- a komfort értékelése valószínűségelméleti modell alapján.

A helyszíni mérésekhez mérési módszert és kiértékelési metodikát dolgoztam ki. A komfort értékeléséhez a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott *PMV*, *PPD*, *Tu*, *DR* paramétereket alkalmaztam. A komfort elemzéséhez elméleti modellt és PC programot fejlesztettem. Helyszíni mérésorozatot végeztem különböző klímarendszerekkel felszerelt irodaépületekben:

- parapet fan-coil,
- légcsatornázzható fan-coil,
- aktív klímagerenda rendszerek.

A komfort értékelésének eredményeképpen általánosítható következtetéseket fogalmaztam meg az egyes rendszerekkel elérhető komfortra vonatkozóan (hő- és levegőminőség). A komfort elemzés részletes kifejtése a „4.3 Különböző rendszerek vizsgálata” című fejezet további részeiben található.

4.2 Klímarendszerekkel elérhető komfort elemzése

A klímatechnikai rendszerekkel üzemelő komfort terek az előírások és szabványok alapján differenciált komfort kategóriák szerint minősíthetők. A komfort tér minősíthető a légállapot, a hőérzet, a huzatérzet és a levegőminőség szempontjából. Tervezési fázisban az adott komfort kategóriához tartozó határértékek figyelembe vételével történik a méretezés, tervezés. Már meglévő, üzemelő klímarendszer esetében pedig a komfort térben történő helyszíni mérésekkel vizsgálható a megvalósult komfort. A mérési eredmények alapján lehet a komfortot értékelni, elemezni. Az erre vonatkozó mérési módszert a „4.2.1 Mérési metodika, mérési módszer” című fejezet, a komfort kiértékelését pedig a „4.2.2 Kiértékelés valószínűségelméleti alapon” című fejezet taglalja részletesen. A mérési eredmények feldolgozása és kiértékelése a valószínűségszámítás módszereivel végezhető.

4.2.1 Mérési metodika, mérési módszer

A doktori kutatómunka folyamán felhasznált mért jellemzők és az azt mérő eszközök, valamint a mérési paraméterek és a kidolgozott módszerek szerepelnek részletesen ebben a fejezetben.

Mérőeszközök kiválasztása

Hőmérséklet mérése (M.1 Melléklet)

A mérések során egyrészt az ellenállás-elvű NTC típusú termisztorokat alkalmaztuk, másrészt a hőmérséklet mérésére termoelem típusú T típusú Cu-Cu/Ni termoelem párokat használtunk, amelyek nedves környezeti körülmények közt is jól alkalmazhatók, mérési hőmérséklettartománya $-200^{\circ}\text{C} \dots +350^{\circ}\text{C}$.

Páratartalom mérése (M.2 Melléklet)

Kapacitív-elvű páratartalom mérőket alkalmaztuk a kis zajérzékenység, kis hőmérsékletfüggés és nagy felbontás miatt.

Légsebesség mérése (M.3 Melléklet)

A mérések során termikus-elvű, hődrótos légsebesség mérőket alkalmaztuk a komfort terekben jellemző nagyon alacsony légsebességek és a nagy felbontás miatt.

Mérési metodika

Az MSZ EN ISO 7726:2003, „A hőmérsékleti környezet ergonómiája. A fizikai mennyiségek mérőeszközei” című szabvány ide vonatkozó méréstechnikai követelményeit a 9. táblázatban foglaltam össze:

9. táblázat: A fizikai jellemzők mérésének követelménye az MSZ EN ISO 7726:2003 szerint

Fizikai jellemző	Mérési tartomány	Pontosság		Válaszidő (90%)		Megjegyzés
		Követelmény	Ajánlás	Követelmény	Ajánlás	
Levegőhőmérséklet	+10 - +40°C	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	minél rövidebb	-	érzékelőt sugárzástól védett kialakítás
Közepes sugárzási hőmérséklet	+10 - +40 °C	$\pm 2,0^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	minél rövidebb	-	-
Légsebesség	0,05 - 1,0 m/s	$\pm (0,05 + 0,05 v_a)$ m/s * 3π sr tértszögtartományban	$\pm (0,02 + 0,07 v_a)$ m/s * 3π sr tértszögtartományban	0,5 s	0,2 s	amennyiben a szenzor nem irányfüggetlen, abban az esetben a levegő áramlási irányának megfelelően helyezendő az érzékelő
Parciális vízgőznyomás	500 - 3000 Pa	± 150 Pa *abban az esetben, ha $ t_{\text{ks}} - t_a \leq 10^{\circ}\text{C}$	-	minél rövidebb	-	-

10. táblázat: A komfortjellemzők követelménye az MSZ CR 1752:2000 szerint

Épület / tér típusa	Ruházat (clo)		Aktivitási szint (met)	Kategória	Operatív hőmérséklet °C		Átlagos levegő-sebesség		Hőérzeti várható elégedetlenségi arány PPD, %	Várható hőérzeti érték PMV, –	Huzatérzeti várható elégedetlenségi arány DR, %	Levegő-minőséggel várható elégedetlenségi arány PD, %	Szén-dioxid koncentráció a külső érték felett Δk_{CO_2} , ppm
	Nyár	Tél			Nyár	Tél	Nyár	Tél					
Kis- és nagyterű iroda-helyiség	0,5	1,0	1,2	A	24,5 ± 0,5	22,0 ± 1,0	0,2	0,2	< 6	-0,2<PMV<+0,2	< 15	< 15	460
				B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,2	0,2	< 10	-0,5<PMV<+0,5	< 20	< 20	660
				C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,3	0,2	< 15	-0,7<PMV<+0,7	< 25	< 30	1 190

A kutatómunka során figyelembe vettem a fenti szabványban közölt ajánlásokat, az MSZ CR 1752 és MSZ EN 15251 komfort követelményértékeit, a mért fizikai jellemzők komfortparaméterekre való érzékenységét [82], továbbá az előzetes mérések folyamán szerzett tapasztalatok alapján állítottam össze a mérések során felhasznált komplett mérőműszerparkot, amelynek adatait a 11. táblázatban foglaltam össze.

11. táblázat: A kutatómunka során felhasznált műszerek mérési paramétere

Mért fizikai jellemző	Típus	Mérési tartomány	Pontosság	Válaszidő	Mintavételezési időköz	Megjegyzés
Szén-dioxid koncentráció	Testo No. 0632 1240	0 - 10 000 ppm 0 - 1 V/V%	$\pm [50 + 0,02 k_{CO_2}]$ ppm (0-5000ppm) $\pm [100 + 0,03 k_{CO_2}]$ ppm (5000-10000ppm)	1 min	5 min	egysugaras NDIR
	Horiba VIA-510	0 - 100 V/V%	± 50 ppm (nagy érzékenység) ± 100 ppm (normál érzékenység)	10s		kétsugaras NDIR
Levegőhőmérséklet	Testo No. 0636 9741	-20 - +70°C	$\pm 0,2$ °C (+10 - +40 °C) $\pm 0,4$ °C (-10 - +50 °C) $\pm 0,5$ °C (maradék tartomány)	12 s (t90)	5 min	NTC
Relatív páratartalom Parciális vízgőznyomás	Testo No. 0636 9741	0 - 100% 0 - 31 170 Pa	± 1 %RH (10-90 %RH @15-30°C) ± 2 %RH (maradék tartomány) ± 40 Pa (10-90 %RH @15-30°C) ± 80 Pa (maradék tartomány)	12 s (t90)	5 min	kapacitív
Gömbhőmérséklet	Testo No. 0554 0670	0 - 120°C	$\pm 0,5$ °C (0 - +50 °C) $\pm 1,0$ °C (maradék tartomány)	30 min (t90)	5 min	NTC $\epsilon=0,95, \varnothing 150$ mm
Légsebesség	Testo No. 0628 0009	0 - 5 m/s	$\pm (0,03 + 0,04 v_a)$ m/s irányfüggetlen (4π sr)	0,2 s (t63)	2 s	hődrótos

A mérési időköz úgy állapítandó meg, hogy a mérőműszer válaszidejének (t90) legalább 1,5-szeresének kell lennie. Az összes hőmérsékleti adatról azonos mért adatmennyiséget szerettem volna kapni, ezen megfontolásból választottam gyakoribb mintavételezésűnek, ezért a gömbhőmérő esetében nem teljesül a műszer beállási idejére és a mintavételezés gyakoriságára vonatkozó kritérium. A gömbhőmérő esetében $\varnothing 150$ mm átmérőjű Vernon-féle gömbhőmérőt alkalmaztam, amelynek a beállási ideje – saját méréseim és mások mérései [86] is ezt igazolták – jellemzően 7-30 min között változott, csak néhány

esetben haladta meg ezt az értéket (~40 min). A gyakorlatban elterjedt még az $\varnothing 50$ mm átmérőjű gömbhőmérő is, melynek előnye a gyorsabb válaszüidő (<20 min), azonban hátránya a nagyobb pontatlanság a kisebb sugárzási és az erőteljesebb konvekciós hatások miatt a $\varnothing 150$ mm-es gömbhőmérővel szemben. A kétféle gömbhőmérő közt azonban nincs számottevő különbség [86], [87].

Mérési módszert és mérési metodikát dolgoztam ki a komfort értékelésére. A komfortterek kiértékeléséhez 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 eredményeink kiértékelései azt igazolták, hogy a mintavételezési időköz maximuma a légsebesség mérésére vonatkozólag 5 másodperc. Amennyiben 5 sec-nál magasabb ez az érték, abban az esetben a mérési sokaság száma alapján már nem adható megfelelő statisztikai becslés a turbulenciaintenzitás számszerű adataira. A szén-dioxid koncentráció mérésének mintavételezési időközét szintén 5 percben állapítottam meg. Az alábbi táblázat tartalmazza a helyszíni komfort mérőrendszerekkel szemben támasztott követelményeim:

12. táblázat: A mérési metodika szerint támasztott követelmények

Mért fizikai jellemző	Mérési tartomány	Pontosság	Válaszüidő	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 Parciális vízgőznyomás	10 - 90% 150 - 6 500 Pa	± 3 %RH ± 150 Pa *abban az esetben, ha $ t_{ks} - 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 térszögterületben	0,5 s (t63)	2 s	amennyiben a szenzor nem irányfüggetlen, abban az esetben a levegő áramlási irányának megfelelően helyezendő az érzékelő

4.2.2 Kiértékelés valószínűségelméleti alapon

A „valószínűségszámítás” kifejezést a matematikai statisztikában Magyarországon először Rényi Alfréd honosította meg [88]. Később – többek közt Prékopa András [89] munkássága révén – a mérnöki alkalmazások számára írt szakirodalmakban ez a kifejezés azonban már „valószínűségelmélet” néven vált ismertté. Ennek hatására a mérnöki szakterületeken a mai napig a „valószínűségelmélet” elnevezéssel jellemzik a matematikus szakterületen „valószínűségszámítás” néven megismert fogalmat. Dolgozatomban emiatt a továbbiakban a mérnöki gyakorlatban meghonosodott valószínűségelmélet kifejezést használom.

A komfortparaméterek időben folyamatosan változó fizikai mennyiségek, kiértékelésükhöz a valószínűségszámítás módszereinek alkalmazásával lehetséges. A vizsgált jellemzők valószínűségi változóknak tekinthetők, így a mért értékek statisztikailag jellemezhetők. Az idősorok értékeiből tapasztalati sűrűségfüggvények, vagyis hisztogramok képezhetők. Ábrázolásukkor az osztályintervallumok szerepelnek a vízszintes tengelyen, fölöttük pedig olyan téglalapok, amelyek területe a százalékos gyakorisággal megfelelő. Komfort terek vizsgálatakor a mért adathalmazok kiértékelését követően a statisztikai jellemzők meghatározásával kaphatunk reprezentatív kvantitatív képet az adott komforttérről (M.4 Melléklet).

Eloszlás identifikálása

A tapasztalati diszkrét eloszláshoz keresünk elméleti folytonos eloszlásfüggvényt, amellyel a mérési adathalmazt jellemezni, majd később ez alapján elemezni tudjuk. Az elméleti eloszlást véges kevert modellel (*FMM*: Finite Mixture Model) állíthatjuk elő [90]. A tapasztalati eloszlások alapján normál eloszlások keverékeként (*GMM*: Gaussian Mixture Model) keressük [91], [92]. Végesszámú K darab Gauss-féle normál eloszlás lineáris szuperpozíciója:

$$p(x) = \sum_{k=1}^K [n_k \cdot \mathcal{N}(x|\mu_k, \sigma_k)] \quad (60)$$

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

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

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

A tapasztalati eloszlásra való elméleti eloszlás illesztésének több módja is lehetséges kevert eloszlások esetében [93], [94]: grafikus módszer, momentumok módszere,

minimum-távolság módszer, maximum likelihood (*ML*) és Bayes-féle módszer. Amennyiben kevert eloszlások esetében az eloszlás komponensek ismertek, akkor ennek egyik leggyakrabban alkalmazott módszere a maximum likelihood függvény (*ML*) identifikációja. Az *ML* módszer a keresett elméleti eloszlás paramétereinek becslését a legnagyobb valószínűség elve alapján végzi. Ekkor az alábbiak szerint áll elő a likelihood függvény:

$$p(X|n, \mu, \sigma) = \prod_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \{n_k \cdot \mathcal{N}(x_n | \mu_k, \sigma_k)\} \quad (61)$$

A későbbi egyszerűbb matematikai eljárás érdekében mindkét oldal normál alapú logaritmusát vehetjük, mivel a logaritmus függvény szigorúan monoton növekvő. Ekkor a produktum szorzat számítása egyszerű szumma összeadássá alakul. Az így előállított log-likelihood függvény az alábbi formában áll elő:

$$\ln p(X|n, \mu, \sigma) = \sum_{n=1}^N \ln \sum_{k=1}^K \{n_k \cdot \mathcal{N}(x_n | \mu_k, \sigma_k)\} \quad (62)$$

Cél ezen függvény maximumának megtalálása, ezzel a három vektor (n , μ , σ) értékeiből nyert eloszlás optimális paramétereinek meghatározása. Ez a maximum likelihood módszer. A megnevezett módszer esetében két nehézséget is meg kell oldani, mégpedig a szingularitások és a keverékek azonosíthatóságának problémáját.

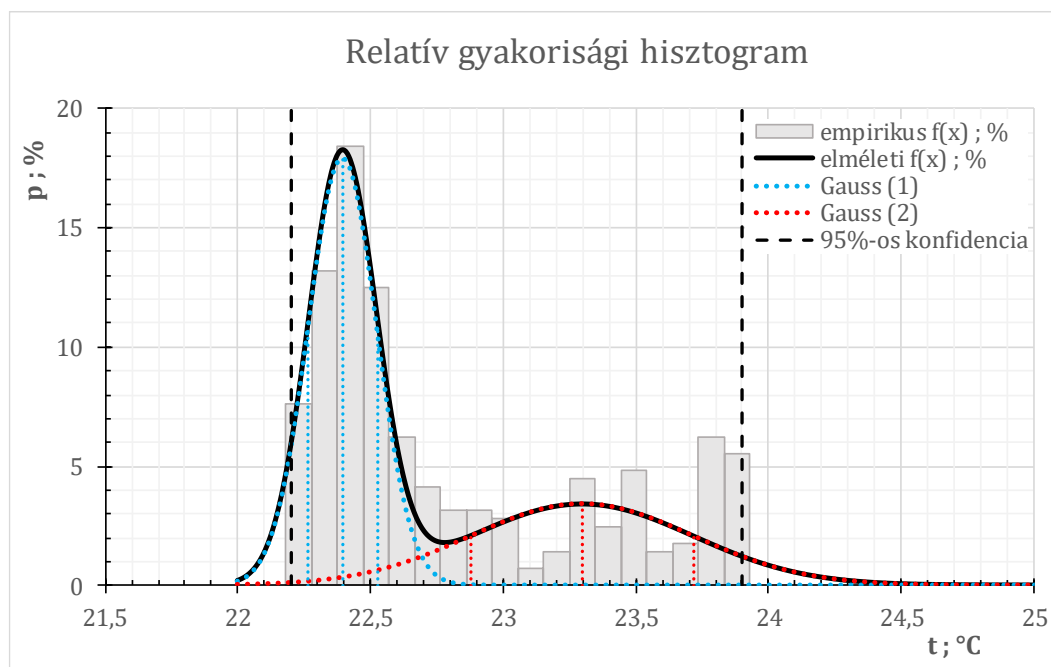
A maximum likelihood megkeresésére alkalmas a jól ismert *EM* algoritmus (expectation-maximization algorithm) [95], amely egy fix-pont iterációs eljárás a likelihood függvény (*LF*) helyi maximumának hatékony megkeresésére. Az *EM* algoritmus jellemzően a lokális optimumok felé konvergál, ami nem feltétlen jelenti a globális optimumot. Mivel a megoldás nagyon érzékeny a kiinduló értékekre, valamint jellemzően elfajult globális megoldások megtalálására alkalmas, ezért ezt az eljárást önmagában nem tekinthetjük megfelelőnek a globális optimum megkeresésére [96], [97]. Léteznek azonban eljárások, amelyekkel a módszert alkalmassá lehet tenni a globális optimum megkeresésre [98], [99]. Ezeket vizsgálták Lourens és társai [100] is kifejezetten két normál eloszlás keveréke esetén, különös tekintettel azon esetekre, amikor kicsik az eltérések az eloszlások komponensei között. Az ismertetett módszer már alkalmas az általam vizsgált probléma megoldására, azonban további lehetséges globális optimumhoz vezető eljárást – mint alternatívát – is megvizsgáltam. A problémára a genetikus algoritmust (*GA*) találtam leginkább alkalmasnak, amely szintén alkalmas globális optimum keresésére [101], [102].

Munkám során a Lourens és társai által kidolgozott módszert és genetikus algoritmust egyaránt felhasználtam optimumkeresési számításaim során. Az eredményeket tekintve – a probléma jellegéből és behatárolhatóságából adódóan – mindkét módszer hatékonynak bizonyult. Az algoritmus összetettsége, programstruktúrába való megírása és az optimalizációs algoritmus számítási igényében azonban már vannak eltérések a két algoritmus között.

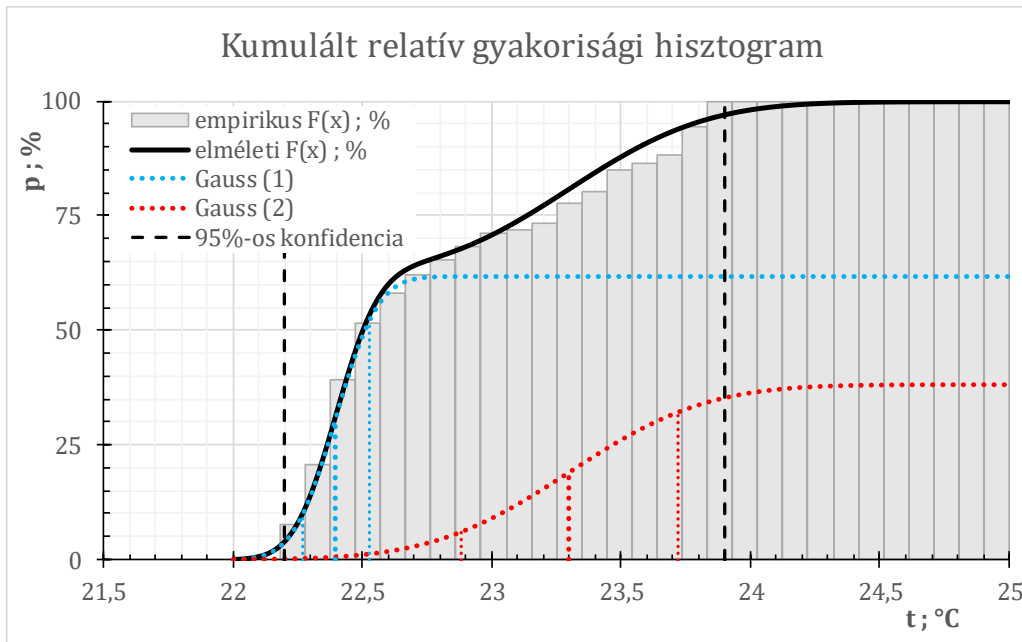
Minden egyes mérés esetén, a követelményekkel összehasonlítható mérési változóra vonatkozólag meghatároztam a legjobban illeszkedő kettős kevert eloszlást. Az alábbi példával szemléltetem egy mérési nap végére kapott hőmérsékleteloszlás relatív gyakorisági diagramját (11. ábra), kumulált relatív gyakoriságát (12. ábra), valamint a legjobban illeszkedő (optimális) kettős kevert normál eloszlás paramétereit (13. táblázat). A grafikonokon a diszkrét és folytonos eloszlások lényegesen eltérő értéktartományban helyezkedhetnek el (a lenti példa esetén is), így a két eloszlás nem ábrázolható azonos léptékű skálán. Annak érdekében, hogy jól szemléltethető legyen, – standard maradék hibára épülő – léptéktranszformációs eljárást készítettem. A kidolgozott eljárás már alkalmas a kétféle eloszlás egy ábrán történő összehasonlítására, megjelenítésére.

Gauss (1)	n_1 :	0,62
	μ_1 :	22,40
	σ_1 :	0,13
Gauss (2)	n_2 :	0,38
	μ_2 :	23,30
	σ_2 :	0,42

13. táblázat: Hőmérsékletmérésre optimalizálva illesztett kettős kevert normál eloszlás paramétereit (az ábrákkal megegyező színjelölést alkalmazva)

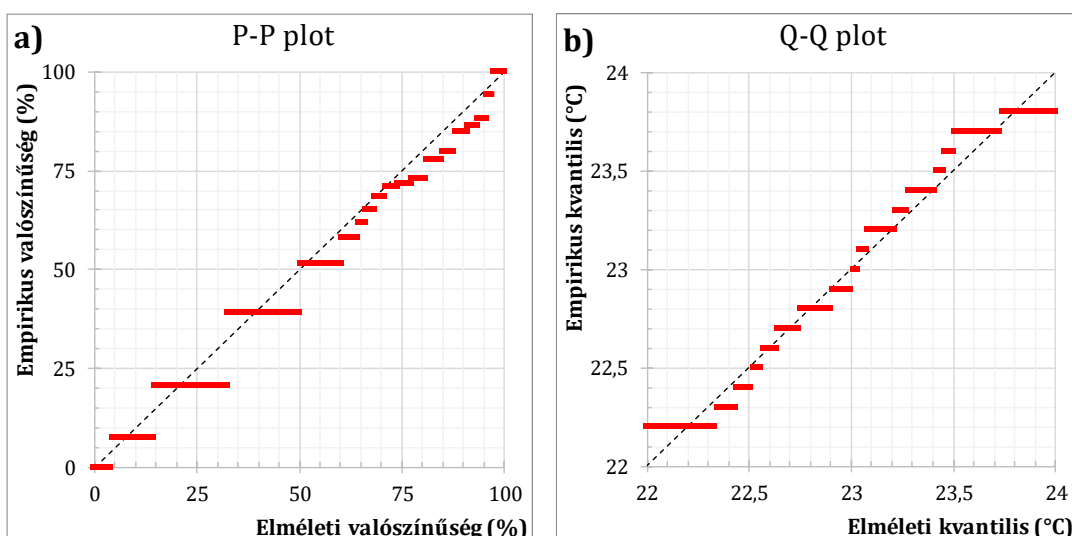


11. ábra: Hőmérsékletmérés gyakorisági hisztogramja



12. ábra: Hőmérsékletmérés kumulált relatív gyakorisági hisztogramja

Az így kapott folytonos elméleti és diszkrét empirikus eloszlások illeszkedése grafikus módon is ábrázolható. Az illeszkedés mértékét Q – Q plot (kvantilis-kvantilis ábra), valamint P – P plot (percentilis-percentilis ábra) grafikonjain a mérési pontok $x=y$ egyenesére való illeszkedésével szemléltethető. Mindkét diagram az eloszlás más-más részeinek illeszkedéséről ad megfelelő képet. A P – P plot (13. ábra a) elsősorban az eloszlás „közepének” (magas relatív gyakoriságú pontok), míg a Q – Q plot (13. ábra b) az eloszlás „széleinek” (alacsony relatív gyakoriságú pontok) vizsgálatára alkalmas. Jól látható, hogy a legjobban illeszkedő kettős kevert normál eloszlás folytonos görbéje és a mért jellemzők gyakorisági hisztogramja azonos eloszlásúnak tekinthető.



13. ábra: Hőmérsékletmérés a) P – P és b) Q – Q plot ábrája

Az illeszkedésvizsgálat az előzőkben bemutatott grafikus módszer mellett analitikusan is elvégezhető. Statisztikai próbák segítségével elvégeztem a két eloszlás illeszkedésvizsgálatát (M.5 Melléklet). Az illeszkedésvizsgálatot χ^2 -próbával végeztem. A H_0 nullhipotézis értelmében az eloszlásokat egymáshoz illeszkedőnek tekintem, H_1 ellenhipotézis értelmében pedig nem tekintem illeszkedőnek. Az empirikus és az elméleti eloszlás próbastatisztika értéke 13,8-ra adódott. A kritikus értéket a 24 szabadságfokhoz és a 0,05 szignifikancia szinthez a kontingenciatáblázat alapján határoztam meg: 36,4. A kritikus értéknél lényegesen alacsonyabb a próbastatisztika értéke, továbbá az eredményként kapott 0,94 szignifikancia szint jelentős, tehát elfogadhatjuk a H_0 nullhipotézist. Megállapítható, hogy a mérések során kapott komfortjellemzők eloszlása az általam kidolgozott optimalizált kettős kevert normál eloszlással jól közelíthető.

4.3 Különböző rendszerek vizsgálata

A helyszíni komfortmérések elvégzésében – a feladat nehézségeiből adódóan – témavezetőm és kutatócsoportja nyújtott segítséget számomra. Kiválasztott irodaépületekben végeztünk méréseket, amelyekben különböző klímatechnikai rendszerek ütemeltek, melyek közül a legelterjedtebben alkalmazott rendszereket vizsgáltam:

- parapet fan-coil rendszer,
- légcsatornázható fan-coil rendszer (érintőleges *LVR*),
- légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz *LVR*),
- aktív klímagerenda rendszer.

A légcsatornázható fan-coil rendszerek esetében a befúvó anemosztáttal megvalósított légvezetési rendszert (*LVR*) ellenőriztem. Az ellenőrzés a teremre vonatkoztatott Archimedesi szám meghatározásával történt. A számításokat téli és nyári üzemállapotra is elvégeztem. Az így kapott eredmények és az egyes *LVR*-re jellemző Archimedesi szám tartományok alapján elfogadtam a fent nevezett légvezetési rendszereket [103].

A helyszíni méréseket kis- és nagyterű irodákban végeztük. Az irodatereteket homogén módon választottunk ki épületen belüli elhelyezkedésük, üvegezési arányuk és tájolásuk szerint az adott irodaépületre specifikusan.

4.4 Parapet fan-coil rendszer

Az irodaházak és lakóépületek klimatizálásánál elterjedten alkalmazzák. A komforttérből a hőterhelés elszállítása a levegőnél lényegesen nagyobb víz hőhordozóval történik. Előnye a kisebb helyigény, hátránya a komforttér homogenitása nehezen biztosítható. Jellegzetes diszkomfort hatás a huzatérzet jelen rendszer esetében. A kezelt levegő térfogatáramát a légzés frisslevegő igénye határozza meg.

4.4.1 Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése

Épület adatok

Funkció: irodaház

Építés éve: 2009

bruttó épített alapterület: 33 000 m²

szintek száma: földszint + 6

üvegezési arány: Északi oldal: 25%

Keleti oldal: 20%

Déli oldal: 40%

Nyugati oldal: 90%

Épületgépészeti rendszerek

Központi kazánház, kétcsöves fan-coil fűtés-hűtés, épület teljes szellőzőlevegő ellátása.

Méretezési hőmérsékletek

Fűtés:

FŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	-13	22,0 ± 1,5
φ; %	90	

Hűtés:

HŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	32	26,0 ± 1,5
φ; %	40	

Nyári üzemben a belső hőmérséklet eltérése a külsőtől: 6°C.

Fűtési rendszer

Az épület fűtési teljesítményigénye:

FŰTÉS	Transzmisszó kW	Légtechnika kW	Összesen kW
I. épületrész	750	1 260	2 010
II. épületrész	890	560	1 325

Az egyes fűtési körök méretezési hőmérséklete:

- irodai fan-coil készülékek: 50/40°C
- légtechnikai kaloriferek: 70/50°C

Hűtési rendszer

Az épület hűtési teljesítményigénye:

HŰTÉS	Hűtési igény kW	Légtechnika kW	Összesen kW
I. épületrész	1 500	480	1 980
II. épületrész	1 160	165	1 325

A hűtési rendszer méretezési hőmérséklete:

- hűtővíz: 7/13°C

Szabályozás

A fan-coil készülékek üzemét együtű szabályozó szelepek biztosítják, melyek helyiség termosztátról üzemelnek. A nagyterű iroda bérleményben fan-coil készülékcsoportokat közös fali termosztátok vezérelnek. A termosztátokon az alábbi beavatkozási lehetőségek vannak:

- ki-/bekapcsolás,
- ventilátor fordulatszám állítás (3 fokozat),
- hűtés/fűtés üzemmód váltás,
- alapérték állítás.

Az épület frisslevegő ellátása

Önálló levegőkezelő központok biztosítják a kezelt frisslevegő ellátást.

Az I. épületrészen 11 db levegőkezelő egység van telepítve, az összes levegő térfogatáram:

- Befúvás: 169 300 m³/h
- Elszívás: 150 920 m³/h

A II. épületrészen szintén 11 db levegőkezelő egység van telepítve, az összes levegő térfogatáram:

- Befúvás: 82 700 m³/h
- Elszívás: 59 430 m³/h

4.4.2 Helyszíni mérések eredményei

Több kiválasztott helyiségben végeztem méréseket. Ezek eredményeit táblázatban foglaltam össze. A táblázat tartalmazza az MSZ CR 1752 által adott kategória értékeket is.

14. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	PMV			PPD, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
3. mérőhely	2011.06.25.	0,20	0,09	[0,09; 0,31]	5,99	0,80	[5,19; 7,10]	B
	2011.06.26.	0,06	0,06	[-0,02; 0,14]	5,14	0,22	[5,00; 5,32]	A
	2011.06.27.	0,33	0,08	[0,23; 0,41]	7,37	1,22	[6,15; 8,72]	B
7. mérőhely	2011.06.25.	0,49	0,06	[0,44; 0,56]	10,21	1,42	[8,64; 11,92]	C
	2011.06.26.	0,40	0,09	[0,31; 0,50]	8,54	1,57	[6,82; 10,58]	C
	2011.06.27.	0,39	0,06	[0,31; 0,45]	8,27	1,10	[6,85; 9,36]	B
9. mérőhely	2011.06.21.	-0,29	0,27	[-0,58; -0,08]	8,24	2,95	[5,58; 12,37]	C

15. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei

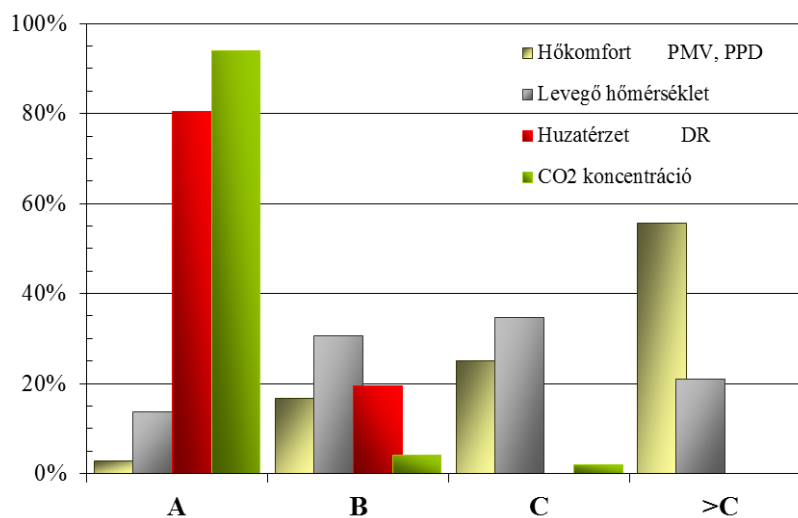
Helyiség	Dátum	t ; °C			φ ; %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
3. mérőhely	2011.06.25.	25,32	0,19	[25,11; 25,55]	34,83	2,76	[32,35; 38,69]	B (A)
	2011.06.26.	24,87	0,16	[24,69; 25,09]	35,21	1,81	[33,58; 37,56]	A
	2011.06.27.	25,45	0,13	[25,29; 25,55]	36,91	0,94	[35,78; 38,23]	B (A)
7. mérőhely	2011.06.25.	25,36	0,39	[25,01; 25,83]	38,38	3,16	[33,95; 41,86]	C (A)
	2011.06.26.	25,11	0,26	[24,86; 25,32]	36,77	1,08	[35,37; 38,28]	B (A)
	2011.06.27.	24,92	0,24	[24,58; 25,16]	39,77	0,44	[39,29; 40,29]	A
9. mérőhely	2011.06.21.	21,36	1,25	[19,61; 22,35]	51,13	2,59	[48,02; 53,97]	>C (C)

16. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	v _á , m/s			Tu, %			DR, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
3. mérőhely	2011.06.25.	0,16	0,02	[0,14; 0,18]	27,10	4,93	[20,69; 33,01]	11,53	1,34	[9,92; 13,41]	B
	2011.06.26.	0,16	0,02	[0,14; 0,19]	27,63	3,34	[23,62; 30,31]	12,03	1,81	[10,40; 13,84]	B
	2011.06.27.	0,14	0,02	[0,13; 0,17]	36,54	4,78	[29,85; 42,28]	10,46	1,95	[7,93; 12,99]	A
7. mérőhely	2011.06.24.	0,07	0,01	[0,05; 0,09]	31,24	2,99	[27,95; 34,23]	3,60	1,43	[2,17; 4,74]	A
	2011.06.26.	0,09	0,01	[0,08; 0,11]	29,53	3,78	[24,62; 32,55]	5,43	1,20	[3,76; 7,11]	A
	2011.06.27.	0,08	0,02	[0,07; 0,10]	30,66	3,16	[26,87; 33,51]	4,66	1,60	[2,43; 5,94]	A
9. mérőhely	2011.06.21.	0,09	0,01	[0,07; 0,11]	39,23	6,07	[30,73; 46,52]	7,44	2,50	[5,19; 10,44]	A

17. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	CO ₂ koncentráció			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
3. mérőhely	2011.06.25.	432,5	4,9	[415,33; 425,21]	A
	2011.06.26.	426,8	2,8	[541,08; 798,35]	A
	2011.06.27.	503,9	29,5	[560,52; 821,61]	A
7. mérőhely	2011.06.24.	504,1	31,6	[416,91; 427,65]	A
	2011.06.26.	379,0	2,9	[541,08; 798,35]	A
	2011.06.27.	473,9	40,0	[560,52; 821,61]	A
9. mérőhely	2011.06.21.	756,3	308,7	[415,33; 425,21]	C



14. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júni. 15 – 28.)

18. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júni. 15 – 28.)

	Komfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőkomfort PMV, PPD	2,8	16,7	25,0	55,5
Levegő hőmérséklet	13,7	30,6	34,7	21,0
Huzatérzet DR	80,6	19,4	0,0	0,0
CO ₂ koncentráció	94,0	4,0	2,0	0,0

4.4.3 Kiértékelés és következtetések

A helyszíni mérések eredményeit kiértékeltem a 95%-os konfidencia intervallum alapján. Ezeket követően az alábbi megállapításokat tettem:

- A hőkomfort mutatók túlnyomó részt „C”-nél rosszabb, a további mérési eredmények pedig a „B” és „C” kategóriába tartoznak. Az A kategóriába csak 2,8% tartozott.
- A levegőhőmérséklet szerint a „B” és „C” kategória értékek a jellemzőek 30,6% és 34,7%-os értékekkel.
- Huzatérzet szerint lényegesen jobb a helyzet. A kategória követelményeit a mérési eredmények túlnyomó része, 80,6%-a teljesíti. A C és C-nél rosszabb kategóriába nem esett mérési eredmény.
- A szén-dioxid koncentráció szempontjából a legkedvezőbb a komfort besorolás. A mérések elenyésző része a „B”, többsége 94,0%-kal az „A” kategóriába tartozik.

4.5 Légcsatornázzható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)

Az irodaház klimatizálását légcsatornázzható álmennyezeti fan-coil biztosítja. Az álmennyezetbe való telepítés a légcsatornával és anemosztáttal kellemesebb komfortot biztosít.

4.5.1 Épület és klimatechnikai rendszer ismertetése

Épület adatok

Funkció: irodaház

Építés éve: 2008

bruttó épített alapterület: 31 000 m²

szintek száma: földszint + 5 irodaszint

üvegezési arány: fsz. + 3 irodaszint: 40%

5-6. irodaszint: 100%

Épületgépészeti rendszerek

Központi kazánház, 4 csöves fan-coil fűtés-hűtés, kiemelt komfort fokozatú helyiségek esetében mennyezeti fűtés-hűtési rendszerek, számítógépteremek hűtési rendszerei, épület teljes szellőzőlevegő ellátása.

Méretezési hőmérsékletek

Fűtés:

FŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	-13	22 ± 0,5
φ; %	90	

Hűtés:

HŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	32	26,0
φ; %	40	

Fűtési rendszer

Az épület fűtési teljesítményigénye 2,2 MW, melyet 2 db egyenként 1 120 kW teljesítményű VIESSMANN VITOPLEX 100 kazán biztosít.

Az egyes fűtési körök méretezési hőmérséklete:

- irodák fan-coil készülékei: 60/50°C
- padlófűtési rendszerek: 42/37°C
- alárendelt helyiségek radiátoros fűtése: 80/60°C
- légtechnikai kaloriferek: 80/60°C

Hűtési rendszer

Az épület egyidejű csúcs hőterhelése: 933 kW.

A hűtési energiaellátást 2 db egyenként 1 400 kW hűtőtelteljesítményű (7/12°C; 32°C) folyadékű hűtő biztosítja. Az üzem gazdaságosabbá tételét teszi lehetővé a kapcsolódó McQuay free-cooling rendszer, melynek méretezési hűtőtelteljesítménye 314 kW.

További SPLIT hűtőrendszerek biztosítják a speciális helyiségek hűtését. A fokozott üzembiztonsági követelmények miatt a külső hőmérséklet méretezési alapadata 35°C.

Az irodaépület öt irodaszintjén négycsöves fan-coil hűtő-fűtő rendszert építettek. A frisslevegő ellátást az irodaterekben négy levegőkezelő központ biztosítja.

A fan-coil rendszer méretezési energiaellátó rendszerének hőmérséklete:

- hűtővíz: 7/12°C

Szabályozás

A készülékek üzemét kétutú szabályozó szelepek biztosítják, melyek helyiségtermosztátról üzemelnek. Az épületgépészeti rendszereket épületfelügyeleti rendszer vezérli. Az irodák hűtő-fűtő üzemmódjában az alapérték az épületfelügyeleti rendszeren állítható. Szobánként a helyiségtermosztáton $\pm 2,0^\circ\text{C}$ alapérték korrekciót lehet beállítani.

Az épület frisslevegő ellátása

A méretezési kezelt frisslevegő ellátás irodákban $50 \text{ m}^3/\text{h},\text{fő}$, tárgyalók esetében $40 \text{ m}^3/\text{h},\text{fő}$.

Önálló levegőkezelő központok biztosítják a kezelt frisslevegő ellátást. Az épületben 4 db levegőkezelő központ üzemel. Központi szellőzés levegő térfogatárama:

$$\dot{V}_{SZ} = 118\,000 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dot{V}_T = 100\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

A légszűrő nélküli négycsöves CIAT fan-coil készülékek az álmennyezeti térben vannak, mellyel depresszív álmennyezeti teret hoznak létre. A készülékek nyomóoldalához felvevő idom kapcsolódik és körkeresztmetszetű légszűrővel kapcsolódnak a befűvő anemosztátok. A befűvés az ablak mellett történik. A távozó levegő visszaszívása az ablaktól távoli oldalon, az álmennyezetnél kialakított építészeti nyíláson keresztül történik.

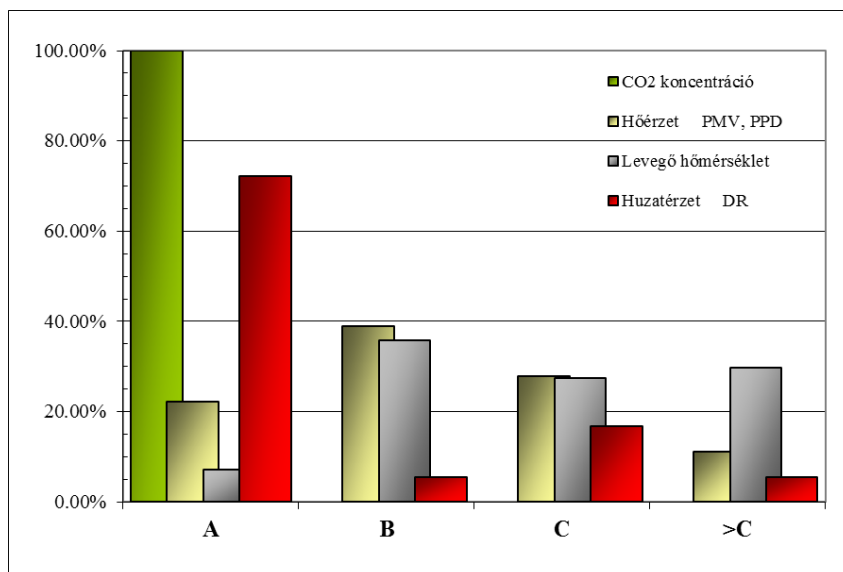
Az épület IV. és V. szintjén a külső határoló szerkezetek üvegfalak. További épületszinten is található nagy üvegfelületű irodák. A nyári intenzív napsugárzás hőkomfortra gyakorolt hatását hővédő ablaküveg ($n_u = 0,5$ tervezési érték), valamint belső relaxa alkalmazásával csökkentik. Az előbbi csökkenti, míg az utóbbi érdemben nem befolyásolja az irodatermek eredő hőterhelését.

4.5.2 Helyszíni mérések eredményei

Több kiválasztott helyiségben végeztem helyszíni méréseket. Ezek eredményeit az alábbi táblázatban foglalom össze.

19. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei

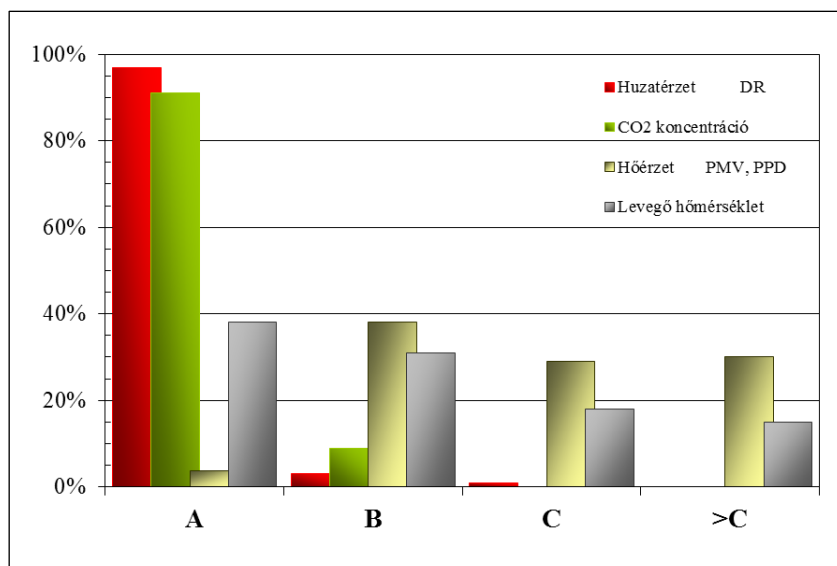
Helyiség	Dátum	PMV			PPD, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
1. iroda (4-IM-39)	01.27.	-0,06	0,26	[-0,35; 0,15]	6,46	2,22	[5,00; 8,68]	B
	01.28.	-0,16	0,18	[-0,32; 0,04]	6,16	1,89	[5,00; 7,86]	B
	01.29.	0,00	0,21	[-0,29; 0,17]	5,86	0,94	[5,01; 6,79]	B
	01.30.	-0,15	0,11	[-0,24; -0,03]	5,69	0,60	[5,00; 6,24]	B
	01.31.	-0,06	0,17	[-0,21; 0,13]	5,64	0,59	[5,00; 6,29]	B
	02.01.	-0,18	0,20	[-0,38; -0,02]	6,47	1,97	[5,00; 8,04]	B
	02.02.	-0,01	0,32	[-0,43; 0,40]	7,03	2,25	[5,22; 9,28]	B
	02.03.	-0,23	0,21	[-0,51; 0,01]	7,00	3,06	[5,00; 9,76]	B
	06.13.	-0,08	0,03	[-0,10; -0,05]	5,17	0,11	[5,05; 5,30]	A
	06.14.	-0,06	0,04	[-0,12; -0,03]	5,12	0,11	[5,00; 5,26]	A
	10.27.	0,06	0,06	[-0,02; 0,13]	5,14	0,16	[5,00; 5,33]	A
10.28.	0,02	0,14	[-0,10; 0,14]	5,39	0,56	[5,00; 5,89]	A	
5. iroda (4-IM-22)	06.09.	-0,08	0,25	[-0,43; 0,20]	6,41	1,70	[5,00; 7,77]	B
8. iroda (4-IM-30)	06.11.	0,03	0,07	[-0,05; 0,11]	5,11	0,11	[5,01; 5,25]	A
12. iroda (4-IM-14)	02.05.	-0,07	0,33	[-0,54; 0,26]	7,31	3,11	[5,00; 10,10]	C
	02.06.	0,13	0,23	[-0,14; 0,43]	6,41	1,74	[5,00; 8,15]	B
	02.07.	0,15	0,31	[-0,19; 0,58]	7,38	3,43	[5,00; 11,15]	C
	02.08.	1,08	0,87	[0,21; 2,12]	40,85	29,96	[7,89; 64,82]	>C
	02.09.	0,19	0,47	[-0,19; 0,70]	10,14	4,33	[5,00; 15,78]	>C
	02.10.	0,47	0,56	[-0,14; 1,09]	15,95	13,38	[5,00; 27,99]	>C
	02.11.	-0,09	0,24	[-0,43; 0,22]	6,36	2,03	[5,00; 8,19]	B
	02.12.	-0,07	0,26	[-0,36; 0,26]	6,45	1,71	[5,00; 8,67]	B
	02.13.	0,42	0,73	[-0,16; 1,36]	19,22	14,29	[5,00; 32,08]	>C
	02.14.	1,28	0,84	[0,61; 2,21]	49,26	26,45	[22,81; 81,00]	>C
	10.23.	0,57	0,15	[0,37; 0,72]	12,26	3,64	[8,26; 16,63]	>C
10.24.	0,78	0,22	[0,51; 0,99]	18,66	6,98	[13,08; 27,04]	>C	
10.25.	0,99	0,46	[0,43; 1,40]	28,88	19,84	[9,04; 52,69]	>C	



15. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 8-17., júl. 23-27.)

20. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 8-17., júl. 23-27.)

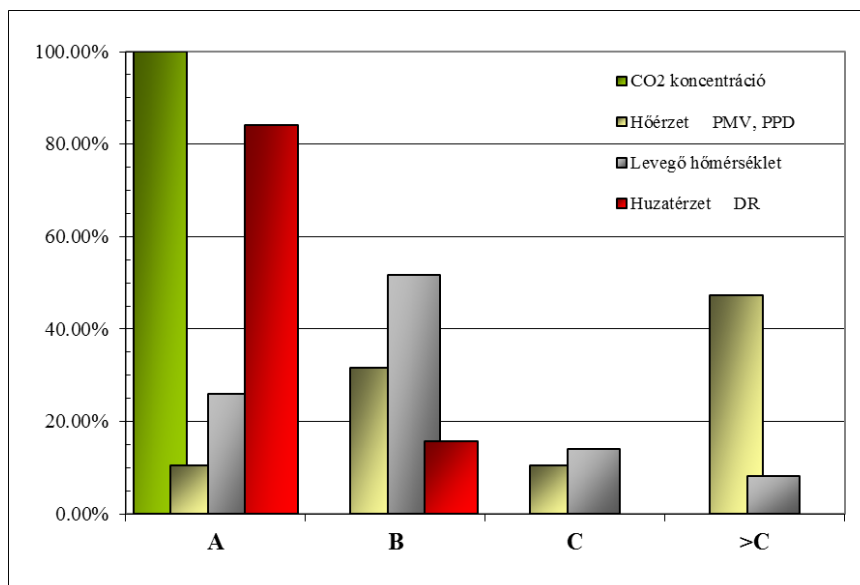
	Komfort kategóriák CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőérzet PMV, PPD	22,22%	38,89%	27,78%	11,11%
Levegő hőmérséklet	7,14%	35,71%	27,38%	29,77%
Huzatérzet DR	72,21%	5,56%	16,67%	5,56%
CO ₂ koncentráció	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%



16. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: téli időszak (jan. 26 – febr. 22.)

21. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: téli időszak (jan. 26 – febr. 22.)

	Komfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőérzet PMV, PPD	1,67	35,00	28,33	35,00
Levegő hőmérséklet	34,41	36,02	14,52	15,05
Huzatérzet DR	95,00	5,00	0,00	0,00
CO ₂ koncentráció	93,33	6,67	0,00	0,00



17. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (okt. 20 - nov. 4.)

22. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (okt. 20 - nov. 4.)

	Komfort kategóriák CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőérzet PMV, PPD	10,53	31,58	10,53	47,37
Levegő hőmérséklet	25,88	51,76	14,12	8,24
Huzatérzet DR	84,21	15,79	0,00	0,00
CO ₂ koncentráció	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%

4.5.3 Kiértékelés és következtetések

A mérési eredmények 95%-os konfidencia intervallumra történő kiértékelése alapján megállapítható:

- A hőérzeti eredmények szempontjából nyári esetre a legkedvezőbb, a mérési eredmények 61,2%-a került együttesen az A és B kategóriába. Ezt követi a téli időszak, ahol ez az érték 36,7%. Az átmeneti időszakra vonatkozó eredmények a legrosszabbak, itt ugyanis a mérési eredmények 47,4%-a esett a C-nél rosszabb kategóriába.

- Levegőhőmérséklet szerint a téli időszak rendelkezik a legkedvezőbb eredményekkel (A kategória 34,4%), az átmeneti időszak kicsivel lemaradva (A kategória 25,9%), a nyári időszak pedig a legrosszabbakkal (A kategória 7,1%).
- Huzatérzeti szempontból a téli időszak a legkedvezőbb (A kategória 95%), ezt követi az átmeneti (A kategória 84,2%), legvégül pedig a nyári időszak eredményei következnek (A kategória 72,2%),.
- Szén-dioxid koncentráció esetében nincs lényeges különbség. Az átmeneti és nyári időszak eredményei az „A” kategória követelményeit teljesítik 100%-ban. A téli időszak esetében ez 93,3%.

4.6 Légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz LVR)

Az álmennyezetbe telepített légcsatornázott fan-coil anemosztáttal biztosítja az irodaház klimatizálását.

4.6.1 Épület és klimatechnikai rendszer ismertetése

Épület adatok

Funkció: irodaház

Építés éve: 2010

bruttó épített alapterület: 29 000 m²

szintek száma: földszint + 6 irodaszint

üvegezési arány: fsz. + 3 szintek: 40%

5-6. szintek: 80%

Épületgépészeti rendszerek

Központi kazánház, 4 csöves fan-coil fűtés-hűtés, épület teljes szellőzőlevegő ellátása központi kezelt levegővel történik.

Méretezési hőmérsékletek (általános cellás irodák, nagyterű irodák, tárgyalók)

Fűtés:

FŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	-13	22,0 ± 1,5
φ; %	90	

Hűtés:

HŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	32	24,0 ± 1,5
φ; %	40	

Nyári üzemben a belső hőmérséklet eltérése a külsőtől: 8°C.

Fűtési rendszer

Az épület fűtési teljesítmény igénye 1,2 MW, melyet 1 db 700 kW teljesítményű VIESSMANN Vitoplex 200, valamint 1 db 575 kW teljesítményű VIESSMANN Vitocross 200 tetőtéri kondenzációs kazán biztosít. A használati melegvíz termelés előnykapcsolással, napkollektoros rendszer rásegítésével történik.

Az irodák és a kapcsolódó közösségi terek kiszolgálására TRANE FCD 304 H négyvezetékes fan-coil berendezések vannak telepítve álmennyezeti beépítéssel. A kezelt levegő az álmennyezet síkjában diffúz levegőbevezetést biztosító anemosztátokon keresztül kerül befúvásra. A 4-csőves berendezésekkel – átmeneti időszakban – a helyiségek hőterhelésének függvényében az épület egyes területein fűtés, illetve más területen hűtés biztosítható, helyiségenkénti szabályozással.

A raktárakban, lépcsőházban, WC mosdó helyiségekben, valamint a gépházakban található radiátorok. Az előcsarnokban a mennyezeti fan-coil rendszert padlófűtés egészíti ki.

Az egyes fűtési körök méretezési hőmérséklete:

- irodák fan-coil készülékei: 70/50°C
- légtechnikai kaloriferek: 70/50°C

Hűtési rendszer

Az épület egyidejű csúcs hőterhelése: 1,9 MW.

A hűtési energiaszállítást 2 db egyenként 912 kW teljesítményű McQuay AWS SE-ST 260.2 folyadékűtő (7/12°C; 35°C) biztosítja. A fokozott energiatakarékosság – környezetvédelem – érdekében a téli hűtőenergia ellátására 1 db 470 kW hűtőteljesítményű McQuay GCDC099/2×5N-64D80 szárashűtő (10/15°C) üzemel.

A fan-coil rendszer méretezési energiaellátó rendszerének hőmérséklete:

- fan-coil hűtővíz: 7/12°C
- légkezelő hűtővíz: 7/12°C

Szabályozás

A berendezések négy csöves kialakításúak, a helyiségtermosztátok kétállású (on/off) szabályozást biztosítanak. A fan-coil készülékek szabályozás szempontjából függetlenek az épületgépészeti rendszertől. Lekapcsolásukat az épületfelügyelet az elektromos hálózati betáplálásról történő lekapcsolással oldja meg.

A fan-coil készülékek zónánként kapcsolódnak a helyiségtermosztátokhoz. A nagyterem irodák esetében egy-egy zónához általában négy berendezés tartozik. A termosztátok típusa: T6375C1003, analóg ikerfémes termosztát, a kapcsolási hiszterézis $\pm 1^\circ\text{C}$.

A levegőkezelő központok hűtői megkerülő ággal, mennyiségi szabályozással üzemelnek. A fan-coil készülékek együtű szelepei nyit/zár funkció szerint szabályoznak.

A fan-coil készüléket víz oldalon TA EMOTEC mozgatómotorral ellátott TBV-C szelepekkel látták el, amelyek mennyiségi szabályozást biztosítanak.

A légszűrőknél aknában illetve álmennyezetben vannak vezetve az egyes szintek leágazásaiban motoros tűzcsappantyúval és TROX gyártmányú CAS szabályozókkal.

Az épület frisslevegő ellátása

A méretezési kezelt frisslevegő ellátás irodákban $43,2 \text{ m}^3/\text{h},\text{fő}$, tárgyalók esetében $40 \text{ m}^3/\text{h},\text{fő}$.

Önálló levegőkezelő központok biztosítják a kezelt frisslevegő ellátást. Az épületben 4 db levegőkezelő központ üzemel. A központi szellőzés levegő térfogatárama:

$$\dot{V}_{sz} = 106\,000 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dot{V}_t = 100\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Minden iroda területet határoló üvegezés belső síkjára rolós rendszerű álmennyezetbe süllyesztett, de kézi mozgatású árnyékoló kerül.

4.6.2 Helyszíni mérések eredményei

Több kiválasztott helyiségben végeztem helyszíni méréseket. Ezek eredményeit az alábbi táblázatban foglaltam össze.

23. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	PMV			PPD, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
7. mérőhely	2013.04.22.	0,32	0,20	[0,02; 0,60]	8,0	2,9	[5,0; 12,7]	C
	2013.04.23.	0,45	0,25	[-0,09; 0,77]	10,7	4,2	[5,1; 17,7]	>C
	2013.04.24.	0,58	0,23	[0,12; 0,99]	13,2	5,5	[5,3; 25,9]	>C
13. mérőhely	2013.04.25.	0,20	0,22	[-0,09; 0,62]	6,8	2,5	[5,0; 13,1]	C
	2013.04.26.	0,25	0,24	[0,06; 0,92]	7,5	5,0	[5,1; 22,9]	>C
7. mérőhely	2013.07.25.	0,08	0,15	[-0,27; 0,29]	5,6	0,6	[5,0; 7,0]	B

24. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei

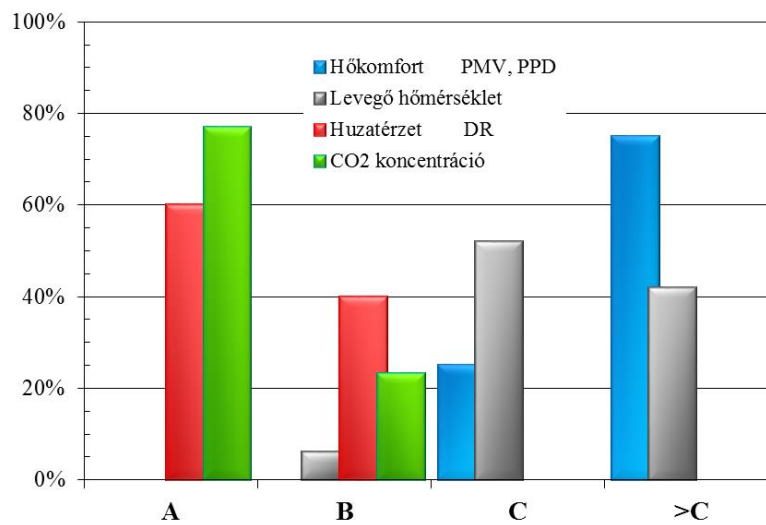
Helyiség	Dátum	t ; °C		φ ; %		t ; °C		φ ; %		Kategória
		Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum	
7. mérőhely	2013.04.22.	25,66	0,74	30,9	1,1	[24,38; 26,70]	[28,8; 32,7]	[28,8; 32,7]	[28,8; 32,7]	C (B)
	2013.04.23.	25,78	0,89	37,7	1,4	[23,80; 26,80]	[36,0; 40,4]	[36,0; 40,4]	[36,0; 40,4]	C (B)
	2013.04.24.	26,38	0,81	33,6	1,6	[24,76; 28,32]	[30,0; 36,9]	[30,0; 36,9]	[30,0; 36,9]	>C (C)
13. mérőhely	2013.04.25.	24,41	0,83	38,3	2,5	[23,30; 25,90]	[33,4; 41,3]	[33,4; 41,3]	[33,4; 41,3]	B
	2013.04.26.	24,40	0,82	41,4	1,8	[23,62; 26,78]	[37,8; 43,7]	[37,8; 43,7]	[37,8; 43,7]	C
7. mérőhely	2013.07.25.	23,76	0,74	46,3	1,6	[22,10; 24,90]	[43,2; 48,8]	[43,2; 48,8]	[43,2; 48,8]	C (B)

25. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	v _a , m/s		Tu, %		DR, %		v _a , m/s		Tu, %		DR, %		Kategória
		Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum	95%-os konfidencia intervallum			
7. mérőhely	2013.04.22.	0,16	0,02	28,37	3,22	10,28	1,54	[0,13; 0,19]	[23,64; 34,10]	[8,08; 12,48]	[8,08; 12,48]	[8,08; 12,48]	[8,08; 12,48]	B
	2013.04.23.	0,15	0,01	29,81	3,17	9,76	1,56	[0,13; 0,18]	[24,64; 36,60]	[7,16; 12,50]	[7,16; 12,50]	[7,16; 12,50]	[7,16; 12,50]	B
	2013.04.24.	0,15	0,01	30,85	3,32	8,93	1,32	[0,13; 0,17]	[24,39; 38,07]	[6,48; 11,14]	[6,48; 11,14]	[6,48; 11,14]	[6,48; 11,14]	A
13. mérőhely	2013.04.25.	0,10	0,01	36,14	3,52	6,53	1,65	[0,07; 0,12]	[29,52; 42,06]	[2,66; 8,84]	[2,66; 8,84]	[2,66; 8,84]	[2,66; 8,84]	A
	2013.04.26.	0,09	0,02	32,50	8,91	5,49	2,51	[0,04; 0,12]	[4,00; 44,07]	[0,00; 9,06]	[0,00; 9,06]	[0,00; 9,06]	[0,00; 9,06]	A
7. mérőhely	2013.07.25.	0,14	0,02	33,21	3,49	11,37	1,59	[0,10; 0,18]	[27,22; 39,60]	[8,26; 14,76]	[8,26; 14,76]	[8,26; 14,76]	[8,26; 14,76]	B

26. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei

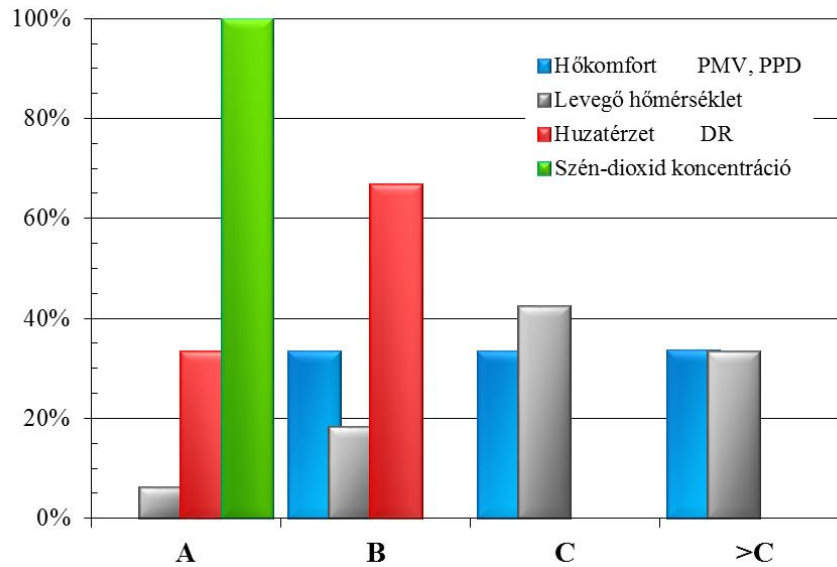
Helyiség	Dátum	CO ₂ koncentráció		CO ₂ koncentráció	Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
7. mérőhely	2013.04.22.	623,7	65,0	[484,00; 751,20]	A
	2013.04.23.	609,5	77,7	[407,80; 722,20]	A
	2013.04.24.	610,4	80,2	[410,60; 743,90]	A
13. mérőhely	2013.04.25.	806,8	147,8	[502,10; 989,50]	B
	2013.04.26.	703,5	143,6	[502,20; 907,70]	B
7. mérőhely	2013.07.25.	658.0	82.1	[468.1; 767.8]	A



18. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 22 - 26.)

27. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 22 - 26.)

	Komfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőkomfort <i>PMV, PPD</i>	0.0	0.0	25.0	75.0
Levegő hőmérséklet	0.0	6.0	52.0	42.0
Huzatérzet <i>DR</i>	60.0	40.0	0.0	0.0
CO ₂ koncentráció	76.9	23.1	0.0	0.0



19. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júl. 24 - 26.)

28. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (júl. 24 - 26.)

	Komfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőkomfort <i>PMV, PPD</i>	0.0	33.3	33.3	33.4
Levegő hőmérséklet	6.1	18.2	42.4	33.3
Huzatérzet <i>DR</i>	33.3	66.7	0.0	0.0
Szén-dioxid koncentráció	100.0	0.0	0.0	0.0

4.6.3 Kiértékelés és következtetések

A mérési eredményeket a 95%-os konfidencia intervallum alapján értékeltem ki. A levonható következtetések az alábbiak:

- A hőérzeti vizsgálatok azt mutatták, hogy a PMV értékek nyáron kismértékben jobbak, mint átmeneti időszakban. Az átmeneti időszakban az A és B kategóriába nincs mérési eredmény, és a mérési eredmények 75%-a esik a C-nél rosszabb kategóriába. Nyári esetben sincs A kategóriának megfelelő eredmény, azonban mindössze a mérési eredmények 33,4%-a került a C-nél rosszabb kategóriába.

- A léghőmérséklet mérések eredményei hasonló eloszlást mutatnak a hőkomfort eredményekkel, a nyári értékek minimálisan jobbak. A C és C-nél rosszabb kategóriákba átmeneti időszakban 52,0% és 42,0%, míg nyári időszakban 42,4% és 33,3% tartozott.
- A huzatérzet vizsgálat eredményei szerint nyáron rosszabb a huzatérzet, ekkor az A kategória 33,3%, a B kategória 66,7%. Az átmeneti időszakban az A kategóriába 60%, a B kategóriába 40%-a tartozott a mérési eredményeknek.
- A szén-dioxid koncentráció nyáron valamivel jobb értéket mutat az átmeneti időszakban mért értékeknél. Nyáron minden mért eset az A kategóriába esett, míg átmeneti időszakban az A kategóriába 76,9%, a B kategóriába pedig 23,1% esett, C-nél rosszabb eredmény nincs.

4.7 Aktív klímagerenda rendszer

Az irodaépület esetében a huzatmentes komfort biztosítása céljából aktív klímagerenda rendszert telepítettek. Ezen klímagerendák biztosítják az irodatermek fűtését és hűtését, valamint a központilag kezelt frisslevegő huzatmentesen bejuttatását a komforttérbe.

4.7.1 Épület és klímatechnikai rendszer ismertetése

Épület adatok

Funkció: irodaház

Építés éve: 2008

bruttó épített alapterület: 35 000 m²

szintek száma: földszint + 6

üvegezési arány: fsz. + 6 szintek: 40%

Épületgépészeti rendszerek

Központi kazánház, hűtés klímagerendákkal, épület teljes szellőzőlevegő ellátása.

Méretezési hőmérsékletek

Fűtés:

FŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	-13	21 ± 1,0
φ; %	90	

Hűtés:

HŰTÉS	Külső	Belső
t; °C	32	24,0
φ; %	40	

Fűtési rendszer

Az épület fűtési teljesítmény igénye 1,1 MW, melyet 1 db HOVAL ULTRAGAS 600D 546 kW, valamint 1 db HOVAL ULTRAGAS 450 950 kW teljesítményű kazán biztosít.

Az egyes fűtési körök méretezési hőmérséklete:

- légtechnikai kaloriferek: 80/60°C,
- klímagerendák: 47/44°C

Hűtési rendszer

Az épület egyidejű csúcs hőterhelése: 1 470 kW.

Az irodaépület hat irodaszintjén klímagerenda hűtő rendszert építettek. A frisslevegő ellátást az irodaterekben három levegőkezelő központ biztosítja.

A hűtési energiaszállítást 1 db Regalair AWA Enersave 4440 ZC SLN 430 kW, valamint 1 db Regalair AWA Enersave 4490 ZC SLN 475 kW hűtőt teljesítményű (6/12°C; 32°C) folyadékhűtő biztosítja a levegőkezelő központokhoz.

A klímagerendákat 1 db Regalair AWA Enersave II 4560 ZC SLN 658 kW, valamint 1 db Regalair AWA Enersave II 4560 ZC SLN 663 kW hűtőt teljesítményű folyadékhűtő látja el.

A hűtőenergia ellátó rendszerének hőmérséklete:

- légtechnikai kaloriferek: 7/12°C,
- klímagerendák: 15/18°C,

További SPLIT hűtőrendszerek biztosítják a speciális helyiségek hűtését. A fokozott üzembiztonsági követelmények miatt a külső hőmérséklet méretezési alapadata 35°C.

Szabályozás

A klímagerendák üzemét központi klímarendszer szabályozza, helyileg módosítható az alapérték.

Az épület frisslevegő ellátása

Önálló levegőkezelő központok biztosítják a kezelt frisslevegő ellátást. Az épületben 3 db levegőkezelő központ üzemel. A központi szellőzés levegő térfogatárama:

$$\dot{V}_{SZ} = 76\,000 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dot{V}_t = 67\,700 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.7.2 Helyszíni mérések eredményei

A helyszíni mérések kiértékelését az alábbi táblázat tartalmazza. A kiértékelés a 95%-os konfidenciaszint alapján történt. A táblázatban megtalálhatók a komfortkategóriák a mért értékek alapján.

29. táblázat: A hőkomfort vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	PMV			PPD, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
137. iroda	08.07.	-0,24	0,02	[-0,26; -0,20]	6,17	0,23	[5,92; 6,47]	B
	08.08.	-0,26	0,01	[-0,27; -0,24]	6,39	0,15	[6,18; 6,51]	B
	08.09.	0,15	0,31	[-0,26; 0,50]	7,45	1,89	[5,00; 9,91]	B
	08.10.	0,30	0,21	[0,09; 0,49]	7,78	1,83	[5,22; 10,35]	C
	08.11.	0,38	0,19	[0,17; 0,55]	8,70	3,83	[5,64; 14,05]	C
344-346. iroda	08.03.	0,31	0,18	[0,17; 0,47]	7,67	1,87	[5,42; 9,54]	B
	08.04.	0,15	0,21	[-0,11; 0,40]	6,34	1,34	[5,00; 7,55]	B
	08.05.	0,29	0,16	[0,06; 0,43]	7,21	1,67	[5,87; 9,39]	B
423. iroda	08.13.	0,48	0,21	[0,18; 0,72]	10,81	4,23	[5,73; 14,19]	C
	08.14.	0,56	0,27	[0,30; 0,86]	13,09	6,22	[8,12; 19,93]	>C
	08.15.	0,31	0,09	[0,17; 0,38]	7,12	1,27	[5,60; 8,27]	B
	08.16.	0,29	0,13	[0,17; 0,42]	7,10	1,74	[5,36; 8,84]	B
	08.17.	0,36	0,14	[0,20; 0,53]	8,07	1,79	[6,46; 10,22]	C
	08.18.	0,57	0,21	[0,34; 0,80]	12,76	4,64	[7,66; 18,79]	>C

30. táblázat: A légállapot vizsgálatok eredményei

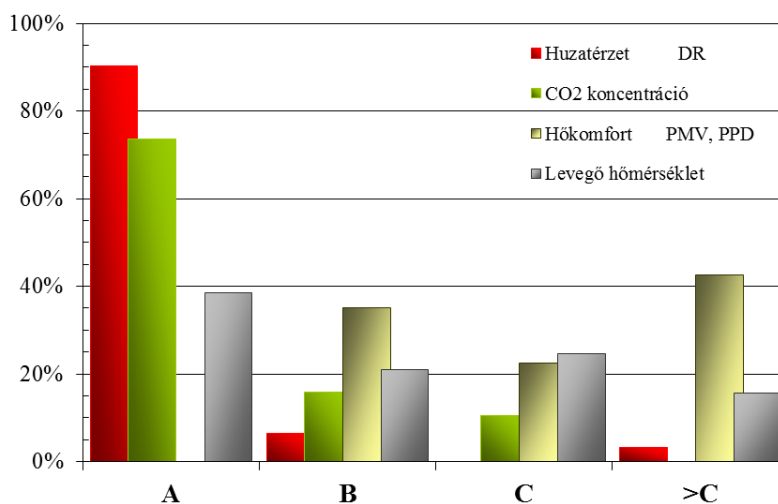
Helyiség	Dátum	t ; °C			φ ; %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
137. iroda	2010.08.07.	22,90	0,06	[22,83; 22,97]	58,01	0,50	[57,61; 58,71]	C (A)
	2010.08.08.	22,83	0,05	[22,75; 22,88]	57,24	0,45	[56,88; 57,73]	C (A)
	2010.08.09.	24,65	1,31	[23,08; 25,83]	54,39	5,62	[47,65; 60,57]	>C
	2010.08.10.	25,24	0,83	[24,50; 25,90]	51,65	2,98	[47,48; 55,81]	C
	2010.08.11.	25,38	0,51	[24,92; 25,84]	54,03	1,21	[52,58; 55,00]	C (B)
344-346. iroda	2010.08.03.	25,28	0,71	[24,36; 26,20]	63,30	2,99	[59,71; 66,89]	C (B)
	2010.08.04.	24,56	0,88	[23,68; 25,44]	59,29	2,28	[56,09; 62,25]	C
	2010.08.05.	25,16	0,67	[24,49; 25,82]	58,31	1,72	[56,59; 60,21]	C (B)
423. iroda	2010.08.13.	26,00	0,88	[25,20; 27,06]	52,57	2,23	[50,78; 55,24]	>C (C)
	2010.08.14.	26,34	1,10	[25,34; 27,44]	48,22	1,21	[46,76; 49,67]	>C (C)
	2010.08.15.	25,24	0,38	[24,70; 25,66]	51,55	0,63	[50,86; 52,06]	C (A)
	2010.08.16.	25,15	0,50	[24,50; 25,55]	54,89	5,70	[48,05; 62,87]	C (B)
	2010.08.17.	25,49	0,52	[24,86; 26,01]	42,35	4,49	[36,07; 46,84]	C (B)
	2010.08.18.	26,43	0,80	[25,47; 27,48]	39,70	1,98	[37,52; 41,28]	>C (C)

31. táblázat: A huzatérzet vizsgálatok eredményei

Helyiség	Dátum	v _á , m/s			Tu, %			DR, %			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
137. iroda	08.07.	0,052	0,004	[0,05; 0,06]	32,56	3,48	[28,38; 36,39]	0,91	0,79	[0,00; 1,62]	A
	08.08.	0,051	0,002	[0,05; 0,05]	28,80	5,55	[23,80; 34,35]	0,62	0,50	[0,22; 1,02]	A
	08.09.	0,067	0,028	[0,04; 0,10]	73,62	21,29	[56,59; 97,04]	4,00	5,44	[0,00; 10,54]	A
	08.10.	0,064	0,010	[0,05; 0,07]	60,18	12,94	[47,24; 71,83]	2,71	1,66	[1,21; 4,38]	A
	08.11.	0,068	0,011	[0,05; 0,08]	57,80	17,71	[38,32; 71,96]	3,34	1,52	[1,37; 5,46]	A
344-346. iroda	08.03.	0,078	0,009	[0,07; 0,09]	51,01	8,12	[41,27; 58,32]	4,36	0,96	[3,59; 5,70]	A
	08.04.	0,091	0,015	[0,07; 0,11]	57,83	11,38	[47,58; 70,35]	6,78	2,23	[4,78; 8,78]	A
	08.05.	0,079	0,011	[0,07; 0,09]	51,65	11,26	[39,26; 61,79]	4,51	1,20	[3,31; 5,95]	A
423. iroda	08.13.	0,071	0,023	[0,04; 0,09]	33,74	4,28	[28,17; 38,88]	2,75	2,24	[0,05; 5,66]	A
	08.14.	0,074	0,021	[0,05; 0,10]	36,72	5,47	[31,24; 43,83]	3,08	2,05	[1,02; 5,13]	A
	08.15.	0,056	0,006	[0,05; 0,06]	32,03	3,57	[28,82; 35,60]	1,33	0,91	[0,42; 2,24]	A
	08.16.	0,055	0,005	[0,05; 0,06]	33,71	3,40	[30,66; 36,77]	1,21	0,83	[0,21; 2,37]	A
	08.17.	0,076	0,028	[0,04; 0,11]	34,44	4,85	[30,08; 39,77]	3,32	2,74	[0,00; 6,06]	A

32. táblázat: A levegőminőségi vizsgálatok eredményei

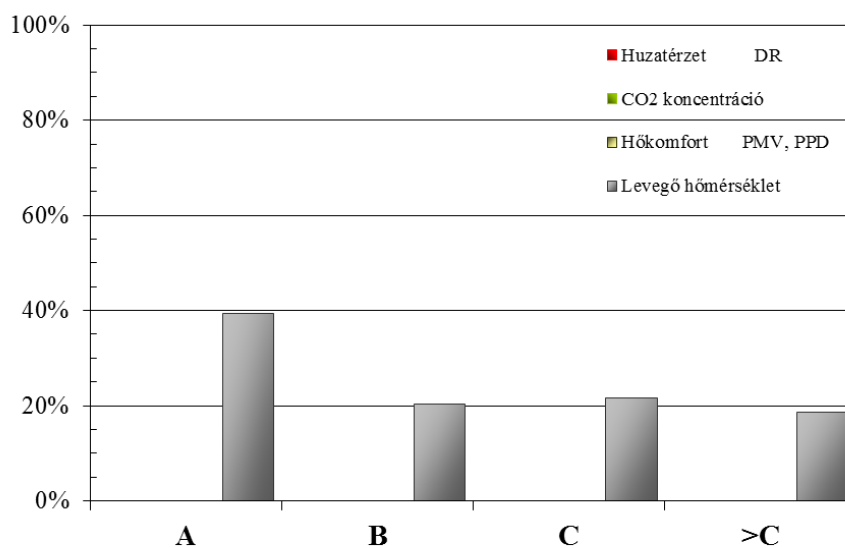
Helyiség	Dátum	CO ₂ koncentráció			Kategória
		Átlag	Szórás	95%-os konfidencia intervallum	
137. iroda	2010.08.07.	422,3	6,7	[415,56; 430,33]	A
	2010.08.08.	420,8	5,5	[413,68; 427,41]	A
	2010.08.09.	654,3	102,9	[520,49; 788,06]	B
	2010.08.10.	711,7	137,4	[601,74; 904,06]	B
	2010.08.11.	835,3	150,2	[715,07; 955,43]	C



20. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 3 – aug. 27.)

33. táblázat: Komfort kategóriák eloszlása: nyári időszak (jún. 3 – aug. 27.)

	Komfort kategóriák az MSZCR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőkomfort PMV, PPD	0.00	35.00	22.50	42.50
Levegő hőmérséklet	38.63	20.98	24.71	15.69
Huzatérzet DR	90.32	6.45	0.00	3.23
CO ₂ koncentráció	73.68	15.79	10.53	0.00



21. ábra: Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 10 – jún. 2., aug. 28 – szept. 30.)

34. táblázat: *Komfort kategóriák eloszlása: átmeneti időszak (ápr. 10 – jún. 2., aug. 28 – szept. 30.)*

	Komfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Hőkomfort PMV, PPD	0.00	0.00	0.00	0.00
Levegő hőmérséklet	36.60	28.24	29.02	6.14
Huzatérzet DR	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂ koncentráció	0.00	0.00	0.00	0.00

4.7.3 Kiértékelés és következtetések

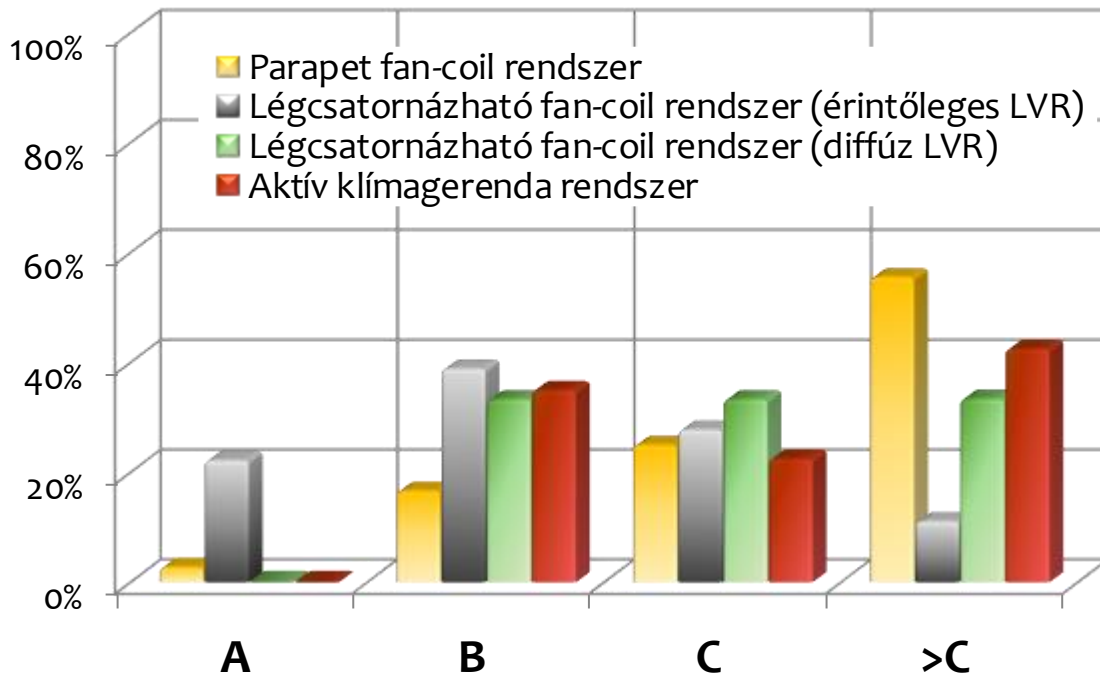
A nyári és átmeneti időszak méréseinek 95%-os konfidencia intervallumok szerinti kiértékelés alapján a következő megállapítások tehetők:

- A hőkomfort eredmények esetében nyáron az A kategóriában nem volt mérési eredmény, a mérések 35%-a a „B” kategória eredményeinek felel meg, a „C”-nél rosszabb kategória esetében ez 42,5% volt.
- Léghőmérsékletben nincs szignifikáns különbség a nyári és az átmeneti időszakban kapott eredmények közt. Jellemzően az A kategóriában helyezkednek el a mérési eredmények 38,6% és 36,6%-kal, a további kategóriák eredményei közel egyenletesen oszlanak el.
- Huzatérzeti szempontból az eredmények 90,3%-a megfelel az „A” kategória követelményeinek.
- A szén-dioxid koncentráció szempontjából a mérési eredmények 73,7%-a került az „A” kategóriába, „C”-nél rosszabb eredmény nincs.

4.8 Komfort értékelése, összefoglalás

A helyszíni méréseket kiértékeltem mindegyik klímatechnikai rendszer esetében, így lehetővé vált az egymással történő összehasonlítása. Valamennyi rendszer esetében igaz, hogy beüzemelt, szabályozott állapotról volt szó. A nyári időszakban végeztem mindegyik rendszerre vonatkozólag komfort vizsgálatokat, továbbá klimatizálás szempontjából a nyári időszak a kritikus. Az összehasonlítást is ezen eredmények alapján teszem meg, mely összehasonlítási szempontjait két részre bontottam: rendszertípusok, valamint kategóriák szerinti összehasonlítás. Az eredményeket számszerűsítve és grafikus formában ábrázoltam az előbbi csoportosításoknak megfelelően (20-23. ábra).

Hőkomfort (PMV, PPD)

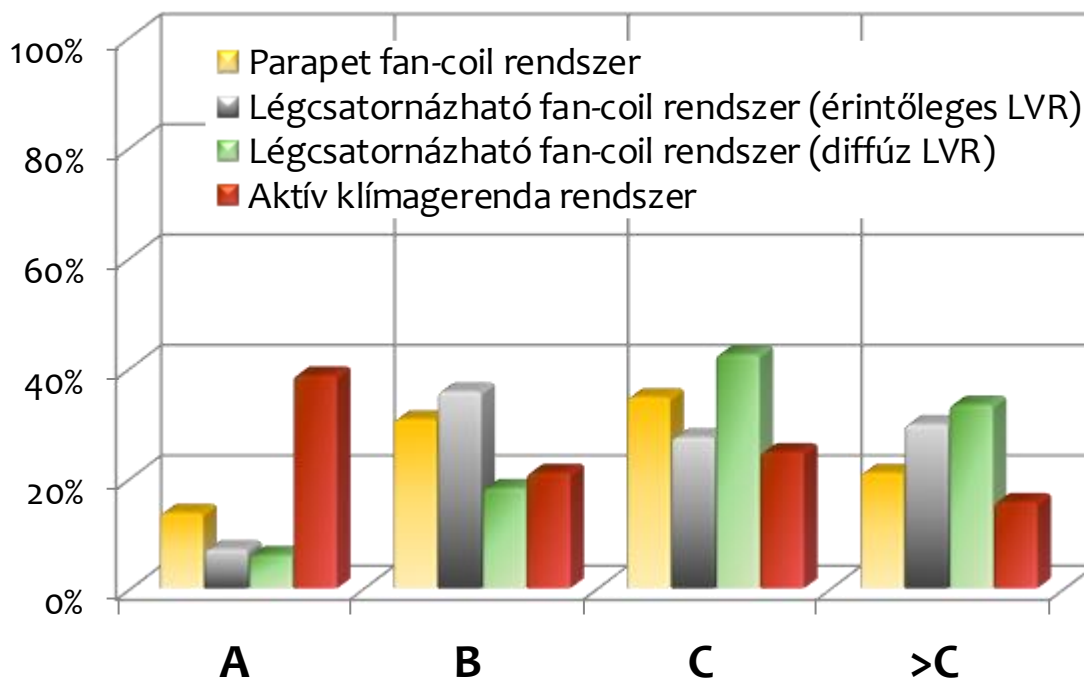


22. ábra: Hőkomfort kategóriák eloszlása: nyári időszak

35. táblázat: Hőkomfort kategóriák eloszlása: nyári időszak

Hőkomfort PMV, PPD (nyári időszak)	Komfort kategóriák az MSZCR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Parapet fan-coil rendszer	2,8	16,7	25,0	55,6
Légcsatornázható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)	22,2	38,9	27,8	11,1
Légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz LVR)	0,0	33,3	33,3	33,4
Aktív klímagerenda rendszer	0,0	35,0	22,5	42,5

Levegő hőmérséklet

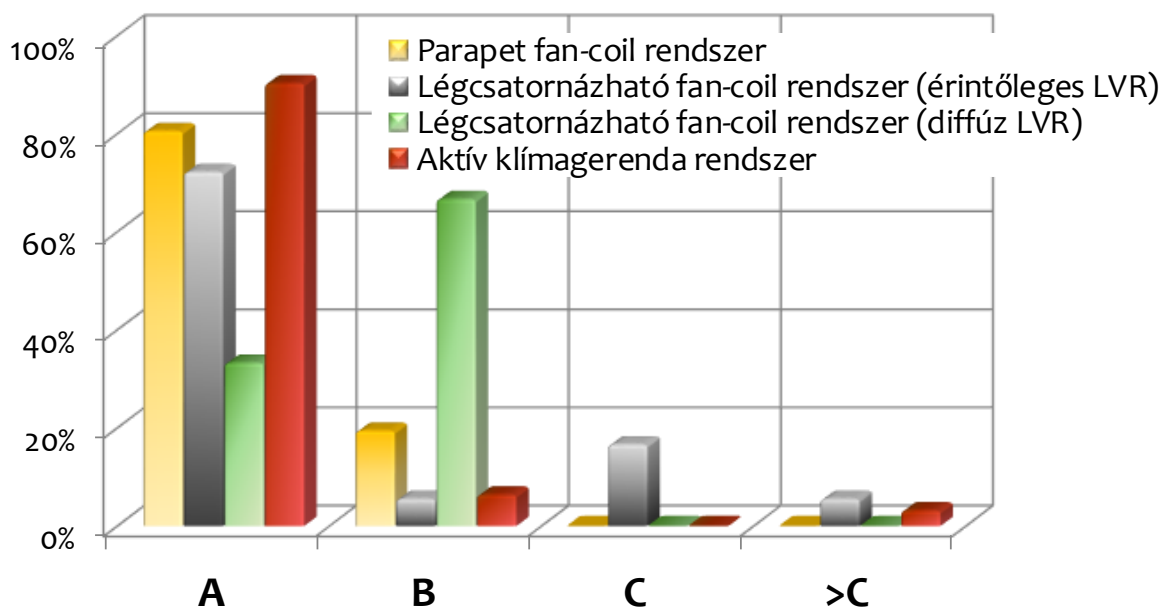


23. ábra: Levegőhőmérséklet kategóriák eloszlása: nyári időszak

36. táblázat: Levegőhőmérséklet kategóriák eloszlása: nyári időszak

Levegő hőmérséklet (nyári időszak)	Kömfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Parapet fan-coil rendszer	13,7	30,6	34,7	21,0
Légcsatornázható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)	7,1	35,7	27,4	29,8
Légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz LVR)	6,1	18,2	42,4	33,3
Aktív klímagerenda rendszer	38,6	21,0	24,7	15,7

Huzatérzet (DR)

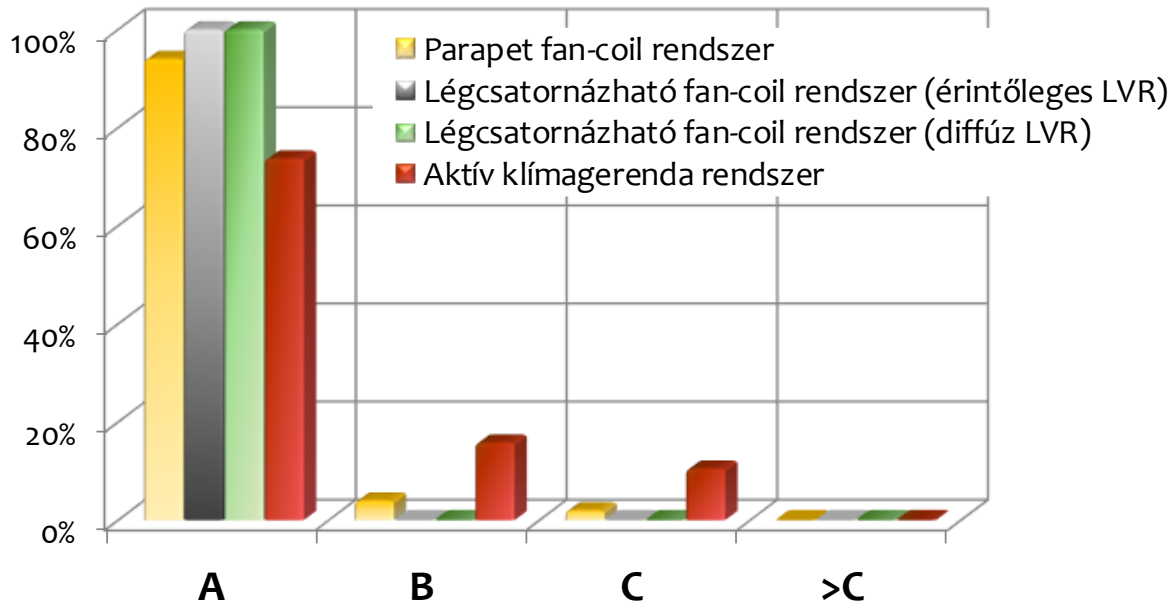


24. ábra: Huzatérzeti kategóriák eloszlása: nyári időszak

37. táblázat: Huzatérzeti kategóriák eloszlása: nyári időszak

Huzatérzet <i>DR</i> (nyári időszak)	Kömfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Parapet fan-coil rendszer	80,6	19,4	0,0	0,0
Légcsatornázható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)	72,2	5,6	16,7	5,6
Légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz LVR)	33,3	66,7	0,0	0,0
Aktív klímagerenda rendszer	90,3	6,5	0,0	3,2

Szén-dioxid koncentráció



25. ábra: Levegőminőségi (CO₂-koncentráció) kategóriák eloszlása: nyári időszak

38. táblázat: Levegőminőségi (CO₂-koncentráció) kategóriák eloszlása: nyári időszak

Szén-dioxid koncentráció (nyári időszak)	Kömfort kategóriák az MSZ CR 1752 szerint			
	A	B	C	>C
Parapet fan-coil rendszer	94,0	4,0	2,0	0,0
Légcsatornázható fan-coil rendszer (érintőleges LVR)	100,0	0,0	0,0	0,0
Légcsatornázható fan-coil rendszer (diffúz LVR)	100,0	0,0	0,0	0,0
Aktív klímagerenda rendszer	73,7	15,8	10,5	0,0

4.8.1 Kömfort kategóriaszintek 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. Itt is a hőkomfort biztosítása a nehezebb („>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%.

4.8.2 Komfort jellemzők szerint

Hőkomfort:

Hőkomfort szempontjából a legjobb eredményt a légcsatornázható fan-coil érintőleges légvezetési rendszerrel 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:

Szén-dioxid koncentráció szempontjából kaptam a legjobb eredményeket. Az egyes rendszerek közti eltérés is kismértékű. Ez adódik abból, hogy a CO₂-koncentráció alapvetően a frisslevegő mennyiségétől függ, kevésbé a klímatechnikai rendszer fajtájától. A kapott eredmények az „A” kategóriára vonatkozólag 73,7-100% közé estek.

5. Új tudományos eredmények, tézisek

5.1 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

Földalatti tér hőtechnikai vizsgálatának matematikai modellje

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:

$$g(u) = H \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi u}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4au}} - aH^2 e^{Hx+aH^2u} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{au}} + H\sqrt{au} \right]$$

$$k_1 = \frac{A\alpha + \dot{m}_s(c_{p,a} + x_a \cdot c_{p,s})}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}$$

$$k_2 = -\frac{A\alpha}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}$$

$$k_3 = \frac{\dot{Q} - \dot{m}_s(x_a \cdot r_0 - h_s)}{c_{p,a} \cdot V \cdot \rho_a}$$

$$x_a(\tau) = Z_1 + x_s - e^{-Z_2\tau \cdot (Z_1 + x_s - x_a|_{\tau=0})}$$

$$Z_1 = \frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_s}$$

$$Z_2 = \frac{\dot{m}_s}{V \cdot \rho_a}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

Kezdeti feltétel:

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

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 kvadratúra képlettel határoztam meg. A numerikus kvadratúra 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

A fal felületi hőmérsékletének és a falon áthaladó hőáram időbeli változása

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].

5.2 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 klímatechnikai rendszerekkel üzemelő komfortterekre.

3. tézis

Mérési módszer és mérési metodika az időben változó komfort minősítéséhez

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 Parciális vízgőznyomás	10 - 90% 150 - 6 500 Pa	± 3 %RH ± 150 Pa *abban az esetben, ha $ t_{ks}-t_a \leq 4^\circ\text{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

Az időben változó komfort értékelése és minősítése

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 adatahalmazok kiértékelését követően a statisztikai jellemzők meghatározásával kaphatunk reprezentatív kvantitatív képet az adott komforttéréről. **A mérési eredmények feldolgozása 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 mérés eredményei alapján az időben változó komfort jellemzők eloszlásának identifikációja

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 normál eloszlás komponensek részaránya,

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

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

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

Az időben változó komfort valószínűség-elméleti elemzése helyszíni mérések alapján

Helyszíni méréseket végeztem különböző irodaépületekben, melyek parapet fan-coil, légszűrő nélküli 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.

Komfort kategóriaszintek 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%.**

Komfort jellemzők szerint

Hőkomfort:

Hőkomfort szempontjából a legjobb eredményt az érintőleges légvezetési rendszerrel kiépített légcsatornázható 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 klímatechnikai 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].

5.3 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 klímatechnikai rendszerek optimális üzemi paramétereinek beállítása során.

Irodalomjegyzék

- [1] Simge Andolsuna, Charles H. Culpa, Jeff Haberla, Michael J. Witte: Energy Plus vs. DOE-2.1e: The effect of ground-coupling on energy use of a code house with basement in a hot-humid climate, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 7, July 2011, pp. 1663–1675. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.03.009
- [2] K Ip, A Miller: Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building – The Brighton Earthship, *Renewable Energy*, 34 (9), 2009, pp. 2037-2043. doi:10.1016/j.renene.2009.02.006
- [3] C.A. Balaras, K. Droutsas, E. Dascalaki, S. Kontoyiannidis: Heating Energy Consumption and Resulting Environmental Impact of European Apartment Buildings, *Energy & Buildings*, 37, pp. 429-442, (2005).
- [4] Labs, K.: The use of Earth covered Buildings through History. Forth Worth, Texas, The Use of Earth covered Buildings, 1975.
- [5] Kusuda, T.: The Effect of Ground covered on Earth Temperature. Forth Worth, Texas, The Use of Earth covered Buildings, 1975.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Bligh T: Comparison of energy consumption in earth covered vs. non-earth covered, Forth Worth, Texas, The Use of Earth covered Buildings, 1975
- [9] Miquel Casals, Marta Gangoellsa, Núria Forcadaa, Marcel Macarullaa, Alberto Girettib: A breakdown of energy consumption in an underground station, *Energy and Buildings*, Volume 78, August 2014, pp. 89–97. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.04.020
- [10] P. Novak: Background document for Rules on efficient use of energy in buildings, July, 2008 (published as Rules, Official Gazette of RS No. 93/08, pp. 12698- 12717)
- [11] M. S. Todorovic, I. Martinovic, N. Ilincic, Where are limits of the minimum value of specific heating and cooling loads of low-rise buildings at the Montenegrin coast, 39th Congress on Air - Conditioning, Refrigeration and Heating KGH, SMEITS, Proceedings, pp. 99-107, Belgrade, 2008.
- [12] C.A. Balaras: The Role of Thermal Mass on the Cooling Load of Buildings. An Overview of Computational Methods, *Energy & Buildings*, 24, pp. 1-10, (1996).
- [13] L. Kajtár, J. Szabó, Effect of Large Window Surfaces in Office Buildings In: *Healthy Buildings 2012: 10th International Conference*. Brisbane, Ausztrália, 2012.07.08-2012.07.12. Brisbane: p. 6p. Paper 4E.8. ISBN: 978-162748075-8 (2012)

- [14] S. Karatasou, M. Santamouris, V. Geros, Modelling and predicting building's energy use with artificial neural networks: Methods and results, Journal: Energy and Buildings - ENERG BLDG , vol. 38, no. 8, pp. 949-958, 2006. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.11.005
- [15] B. Poel, G. van Cruchten, C.A. Balaras: Energy Performance Assessment of Existing Dwellings, Energy & Buildings, Vol. 39, No 4, pp. 393-403, 2007.
- [16] 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
- [17] 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.
- [18] Xing, L. 2014. Estimations of Undisturbed Ground Temperatures using Numerical and Analytical Modeling. Ph.D. Diss. Oklahoma State University, Stillwater
- [19] Hagentoft, C-E. (1988). Heat loss to the ground from a building: slab on the ground and cellar Byggnadsfysik LTH, Lunds Tekniska Högskola, 216 p.
- [20] Bogoszlovszkij, V. N., Razumov, N. N.: Otoplenije i ventilacija. Moskov, Sztrojizdat, 1980.
- [21] Macsinszkij V. D.: Teplotehnicoseszkie oszнови sztroitelsztva, Moskov, Sztrojizdat, 1980.
- [22] Lakos A.: Földalatti helyiségek szellőztetése ,klimatizálása és hűtése. Budapest, 1968.
- [23] Barcs V.: Padlók hőtechnikai minősége. Épületgépészet, X. 1961. pp. 216-220.
- [24] Gráber J.: Földalatti terek hőtani vizsgálata. Épületgépészet, XIV. 1964. pp. 15-19.
- [25] Kokits Zs.: Közeli eljárás végtelen vastag falakban kialakuló hőmérséklet eloszlás meghatározására. Épületgépészet, VII. 1958. pp. 203-206.
- [26] Straub Gy.: Földalatti terek hőtani vizsgálata. Épületgépészet, XIII. 1964. pp. 71-73.
- [27] Erdősi, I., Kajtár, L.: Non stationary Dimensioning of Thermal Comfort and Energetical Optimalization of Underground Space, Bp. 2000. Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering 2000. 44/2, pp. 237-248
- [28] 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.

- [29] 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
- [30] Bánhidi, L., Kajtár, L.: *Komfortelmélet*. Bp, 2000. ISBN 963-420-633-6 Műegyetemi Kiadó 436 p.
- [31] 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.
- [32] 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, pp. 59–77.
- [33] Kalmár, F.: *A belső környezet minősége [elektronikus dok.]*, Budapest, 2013. ISBN 978-963-9968-58-5, TERC Kft., 255 p.
- [34] Fanger, P. O.: *Thermal Comfort* McGraw Hill 1970
- [35] de Dear RJ, Brager GS (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, *Energy and Buildings* 34: pp. 549-561.
- [36] Fountain, M.E., Huizenga, C.: *A Thermal Sensation Prediction Tool for Use by the Profession*, *ASHRAE Trans.*, Vol.103, Pt 2, 1997
- [37] Schweiker, M. (2016): An R Package for Thermal Comfort Studies. *The R Journal*. ISSN 2073-4859 Vol. 8/2, pp. 341-351, 2016
- [38] Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.: A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.* 92(2): pp. 709-731, 1986.
- [39] Rohles, F.H., Nevins, R.G.: The nature of thermal comfort for sedentary man. *ASHRAE Trans.* 77(1): 239-246, 1971
- [40] P. O. Fanger and J. Toftum. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34: pp. 533–536, 2002
- [41] R. Yao, B. Li, and J. Liu. A theoretical adaptive model of thermal comfort - Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44: pp. 2089–2096, 2009
- [42] D. A. McIntyre. *Indoor climate*. Applied Science Publisher, London, 1980
- [43] J. Gao, Y. Wang, and P. Wargocki. Comparative analysis of modified pmv models and set models to predict human thermal sensation in naturally ventilated buildings. *Building and Environment*, 92: pp. 200–208, 2015
- [44] van Hoof, J.: Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air* 2008: 18: pp. 182-201. Printed in Singapore
- [45] Nilsson, H. (2004): *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Doktori disszertáció. *Arbete och Hälsa* 2004:2. p. 202.

- [46] Goldman, R. F. (2006): Thermal manikins, Their origins and role . Fan, J. (szerk.): Thermal manikins and modelling. Sixth International Thermal Manikin and Modelling Meeting. Hong Kong, 16-18 October, 2006. pp. 3-18.
- [47] Magyar Zoltán: Termikus műember alkalmazási lehetőségei hőkomfort vizsgálatoknál. Doktori disszertáció, Gödöllő, 2011, 149 p.
- [48] Silvia Vilcekova, Ludmila Meciarova, Eva Kridlova Burdova, Jana Katunska, Danica Kosicanova, Saeed Doroudiani, Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic, *Building and Environment*, Volume 120, 2017, pp. 29-40, ISSN 0360-1323
- [49] Sung H. Hong, Jan Gilbertson, Tadj Oreszczyn, Geoff Green, Ian Ridley, A field study of thermal comfort in low-income dwellings in England before and after energy efficient refurbishment, *Building and Environment*, Volume 44, Issue 6, 2009, pp. 1228-1236, ISSN 0360-1323
- [50] Nan Zhang, Bin Cao, Zhaojun Wang, Yingxin Zhu, Borong Lin, A comparison of winter indoor thermal environment and thermal comfort between regions in Europe, North America, and Asia, *Building and Environment*, Volume 117, 2017, pp. 208-217, ISSN 0360-1323
- [51] António Curado, Vasco Peixoto de Freitas, Nuno M.M. Ramos, Variability Assessment of Thermal Comfort in a Retrofitted Social Housing Neighbourhood Based on "In Situ" Measurements, *Energy Procedia*, Volume 78, 2015, pp. 2790-2795, ISSN 1876-6102
- [52] Kuchen, E and Fisch, M.N. (2009) Spot Monitoring—Thermal Comfort Evaluation in 25 Office Buildings in Winter. *Building and Environment*, 44, pp. 839-847.
- [53] Kuchen, E. (2016) Variable Thermal Comfort Index for Indoor Work Space in Office Buildings: A Study in Germany. *Open Journal of Civil Engineering*, 6, pp. 670-684.
- [54] Wang, D., Jiang, J., Liu, Y., Wang, Y., Xu, Y., Liu, J.: Student responses to classroom thermal environments in rural primary and secondary schools in winter. *Building and Environment* (2017), 115, pp. 104-117.
- [55] Woohyun Kim, Srinivas Katipamula, Robert Lutes, Improving HVAC operational efficiency in small-and medium-size commercial buildings, *Building and Environment*, Volume 120, 2017, pp. 64-76, ISSN 0360-1323
- [56] L. Kajtár, Thermal comfort dimensioning and results of measurements in underground spaces, Delft, 1992. 5th International Conference on Underground Space and Earth Sheltered Structures. 1992, *Kiadvány* pp. 636 - 645
- [57] L. Kajtár, A talaj hőfizikája, Bp., *Épületgépészet* 1986/5 (1986) pp. 193-197.
- [58] J. Kurnitski, Crawl space air change, heat and moisture behaviour, *Energy and Buildings - ENERG BLDG.* 01/2000; 32(1) pp. 19-39.

- [59] A. A. Al-Temeemi, D. J. Harris, The effect of earth-contact on heat transfer through a wall in Kuwait. *Energy and Buildings* 35 (2003) 399-404: Available from: www.sciencedirect.com [Accessed 1st. March 2011].
- [60] Likov, A. V.: *Teorija teploprovodnoszti*. Moskva, Goszudarsztvennoje izdatelsztvo tekhniko teoreticeszskoj literaturi, 1952.
- [61] Gröber-Erk-Grigull: *Grundgesetze der Wärmeübertragung*. Berlin - Göttingen Heidelberg, Springer Verlag, 1963.
- [62] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger: *Conduction of heat in solids*, 1959, ISBN: 0198533683
- [63] M. Staniec and H. Nowak, "Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. XI, no. 1, pp. 221-235, 2011.
- [64] S. Choi, M. Krarti: Thermally optimal insulation distribution for underground structures, *Energy and Buildings*, Volume 32, Issue 3, September 2000, pp. 251–265. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00051-7
- [65] Konrad Schumacher: On the resolving of linear non autonomous partial functional differential equations, *Journal of Differential Equations*, Volume 59, Issue 3, 1985, pp. 355–387. DOI: 10.1016/0022-0396(85)90146-9
- [66] Yimin Xiaoa, Xichen Liua, Rongrong Zhangb: Calculation of transient heat transfer through the envelope of an underground cavern using Z-transfer coefficient method, *Energy and Buildings* Volume 48, 2012, pp. 190–198. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.01.040
- [67] Oberhettinger F, Badii L: *Tables of Laplace transforms*, 1973, p. 428 SBN: 978-3-540-06350-6
- [68] E. Hairer, S. P. Nørsett, G.Wanner: *Solving Ordinary Differential Equations I*, Springer Series in Computational Mathematics, ISBN 978-3-540-56670-0
- [69] M. Emmett and M. L. Minion, Toward an efficient parallel in time method for partial differential equations, *Commun. Appl. Math. Comput. Sci.* 7 (2012), no. 1, 105–132. MR 2979518 Zbl 1248.65106
- [70] J. Zhao, T. Zhang, A highly accurate derivative recovery formula to integro-differential equations, *Numer. Math. J. Chin. Universities* 26 (1) (2004) 81–90.
- [71] Kincaid, D., Cheney, W. *Numerical Analysis. Mathematics of Scientific Computing*, American Mathematical Society, 2009.
- [72] J. C. Butcher, *Numerical methods for ordinary differential equations*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2008. MR 2009b:65002 Zbl 1167.65041
- [73] Dormand J. R., Prince P. J.: A family of embedded Runge-Kutta formulae, *J. of Computational and Applied Maths.*, 6, No. 1, 19-26, 1980.
- [74] J.C. Butcher: *The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations*, Wiley, Chichester, 1987
- [75] Higham, D. J. 1991 Global error versus tolerance for explicit Runge-Kutta methods, *IMA J. Numer. Anal.* 11, 457-480.

- [76] J.H. Verner, A comparison of some Runge-Kutta formula pairs using DETEST, Dept. Mathematics and Statistics, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 1990.
- [77] Prince P.J., Dormand J.R.: High order embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, ISSN 0377-0427, Volume 7, Issue 1, 1981, pp. 67-75.
- [78] Calvo, M., Higham, D. J., Montuano, J. I., & Randez, L. 1994 Stepsize selection for tolerance proportionality in explicit Runge-Kutta codes, Tech. Report NA/152, University of Dundee.
- [79] Ch. Tsitouras and S. N. Papakostas, Cheap Error Estimation for Runge-Kutta pairs, *SIAM J. Sci. Comput.*, 20, 2067-2088 (1999).
- [80] J.R. Dormand, M.R. Lockyer, N.E. McCorrigan and P.J. Prince, Global error estimation with Runge-Kutta triples, *J. Comput. Appl. Math.*, 7 (1989), pp. 835-846.
- [81] T. Nikiforova, M. Savytskyi, K. Limam, W. Bosschaerts, R. Belarbi: Methods and Results of Experimental Researches of Thermal Conductivity of Soils, In *Energy Procedia*, ISSN 1876-6102, Volume 42, 2013, pp. 775-783
- [82] I. Barta, L. Banhidi, L. Garbai: Analysis of the static thermal comfort equation, *Elsevier: Energy & Buildings*, Vol. 49, pp. 188-191, 2012
- [83] Juhász Dávid: Pórusos Si alapú nedvességérzékelő szerkezetek tervezése, előállítása és minősítése. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszéke és MTA MFA, Budapest, 2003*
- [84] Nagy Gergely: Páratartalom mérése pórusos anyagok segítségével, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2005*
- [85] Alberto Barbaresi, Daniele Torreggiani, Stefano Benni, Patrizia Tassinari: Underground cellar thermal simulation: Definition of a method for modelling performance assessment based on experimental calibration, *Energy and Buildings*, Volume 76, 2014, pp. 363–372. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.008
- [86] D. A. Quintela, A. R. Gaspar, A. R. Raimundo, A. V. M. Oliveira, and D. Cardoso: Assessment of the performance of globe thermometers under different environmental conditions, *Occupational Safety and Hygiene II*. ISBN: 978-1-138-00144-2 2014, pp. 523-528.
- [87] Aparicio Ruiz, Pablo, Salmerón Lissén, Jose Manuel, Ruiz Pardo, Álvaro, Sánchez de la Flor, Francisco José, Brotas, Luisa: The globe thermometer in comfort and environmental studies in buildings. En: *Revista de la Construcción*. 2016. Vol. 15. (3). pp. 57-66.
- [88] Rényi A.: Valószínűségszámítás, Tankönyvkiadó, ISBN 0619000-991029, 510 p. 1966
- [89] Prékopa A.: Valószínűségelmélet műszaki alkalmazásokkal, Műszaki könyvkiadó, Budapest ISBN 96310-38440, 440 p. 1974

- [90] Medgyessy P (1953) Valószínűség-eloszlásfüggvények Keverékének Felbontása Összetevőire. Hungarian Academy of Sciences Communications, Inst. of Appl. Math., (2) pp. 165-177.
- [91] Clifford Cohen A. (1967) Estimation in Mixtures of Two Normal Distributions. *Technometrics* (9) pp. 15-28.
- [92] Day N.E. (1969) Estimating the Components of a Mixture of Normal Distributions. *Biometrika* (56) pp. 463-474.
- [93] G Bhattacharya, C. (1967). A Simple Method of Resolution of a Distribution into Gaussian Components. *Biometrics*. 23. pp. 115-135. doi:10.2307/2528285
- [94] G McLachlan, D Peel (2000). *Finite Mixture Models*, Willey Series in Probability and Statistics. ISBN: 978-0-471-00626-8, 419 p.
- [95] Dempster, A. P., Laird, N. M., Rubin, D. B., 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *J. R. Statist. Soc. B* 39, 1-38.
- [96] Biernacki, C., Chrétien, S., (2001) Degeneracy in the likelihood approach to univariate Gaussian mixture estimation with EM. Vol. 1. X-th International Symposium on Applied Stochastic Models and Data Analysis (ASMD A-2001), pp. 206-212.
- [97] van de Geer S (1996) Rates of convergence for the maximum likelihood estimator in mixture models. *J. Nonparametr. Stat.* 6, 293-310.
- [98] Ridolfi A, Idier J (2002) Penalized Maximum Likelihood Estimation for Normal Mixture Distributions. École Polytechnique Fédérale de Lausanne – EPFL, School of Computer and Information Sciences Technical Report 200285 (ID: IC/2002/85)
- [99] Gouriéroux C., Monfort A. and Renault E. (2017) Consistent Pseudo-Maximum Likelihood Estimators. *Annals of Economics and Statistics*, No. 125/126, pp. 187-218. DOI: 10.15609/annaeconstat2009.125-126.0187
- [100] Lourens S, Zhang Y, Long JD, Paulsen JS (2013) Bias in Estimation of a Mixture of Normal Distributions. *Journal of Biometrics & Biostatistics* ISSN: 2155-6180, 2013, 4:179. doi: 10.4172/2155-6180.1000179
- [101] Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York. (ISBN: 978-0-442-00173-8), 385 p.
- [102] Chambers L. D.: *Practical Handbook of Genetic Algorithms: Complex Coding Systems*, Vol. 3. (ISBN: 978-0-849-32539-7), CRC Press, 1998, 592 p.
- [103] Magyar T.: *Épületgépészet a gyakorlatban*. Légtechnika. Budapest, Verlag Dashöfer (6. fejezet)

A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

- [S1] Kajtár L, Nyers J, Szabó J, Ketskemény 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, Ketskemény 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.

Mellékletek

M. 1. Hőmérséklet mérése

A hőmérséklet mérése az egyik leggyakoribb mérési feladat mindennapi életünkben és az ipari folyamatok során egyaránt. Mérése azért is fontos feladat, mert a hőmérséklet változása szorosan összefügg az anyagok más makroszkopikus tulajdonságainak változásával. A mérések és kiértékelések során a Magyarországon is alkalmazott Celsius-skálát használtam.

A hőmérők mindig a saját hőmérsékletüket mérik. Amikor hőmérőt helyezünk egy rendszerbe, a rendszert megzavarjuk, tulajdonságait megváltoztatjuk, mert a hőmérő más hőmérsékletű, mint a rendszer, és a hőmérőnek is van hőkapacitása. A hőmérő hőkapacitásának ezért kicsinek kell lennie a rendszer hőkapacitásához képest, hogy a rendszer állapota kevésbé változzon.

Szintén a hőmérő kis hőkapacitása teszi lehetővé, hogy a hőmérő hőmérséklete minél hamarabb megközelítse kívánt mértékben a környezet hőmérsékletét, tehát minél kisebb legyen a hőmérő tehetetlensége. A hőmérsékleti egyensúly beállása, azaz amíg a hőmérő felveszi a mérendő test hőmérsékletét ugyanis több-kevesebb időt igényel. A hőmérőt csak ez után a beállási idő után szabad leolvasni. A beállási idő csökkenthető a felület növelésével és a mérőeszköz tömegének csökkentésével, valamint a kis fajhőjű és jó hőátadási tényezőjű anyag megválasztásával.

A hőmérőket az alábbi módon csoportosíthatjuk:

Kontakthőmérő:

- Termoszkóp:
 - Folyadékhőmérő
- Folyadékkristályos hőmérő
- Hőérzékeny festék
- Gáz hőmérő
- Fémhőmérő:
 - Fémrudas hőmérő
 - Bimetál hőmérő
 - Termoelem
- Ellenállás-hőmérő
- Galilei-hőmérő
- Kontra hőmérő

Táv hőmérő:

- Pirométer
- Infravörös hőmérő
- Infravörös kamera

Ellenállás-hőmérő

Az ellenállás-hőmérő működése az elektromos ellenállás hőmérséklet-függésén alapul. Mivel az elektromos ellenállást, illetve ennek változásait igen pontosan lehet mérni, az ellenállásmérést pontos hőmérsékletmérésre használhatjuk fel.

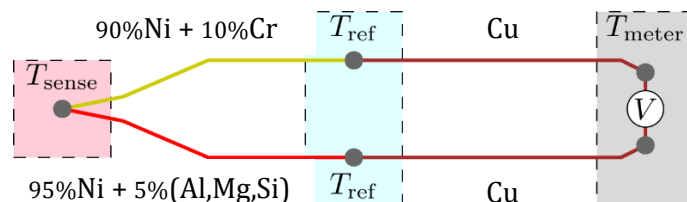
A mérés alapja, hogy a hőmérséklet emelkedésével megváltozik az anyagok ellenállása. Ennek oka, hogy hő közlése esetén melegedés és térfogatváltozás következik be, nő az anyag belső energiája, módosul a kristályrács és a töltéshordozók mozgékonyága. A szobahőmérséklet körüli tartományban végzett hőmérséklet-mérésre – amely a disszertáció témakörébe tartozó komfort terekre jellemző tartomány – leggyakrabban alkalmazott típusok a félvezető hőmérséklet-érzékelő ellenállások, melyeknek három fajtája terjedt el, a negatív karakterisztikájú (NTC), a pozitív karakterisztikájú (PTC) és a terjedési ellenállás alapú szilícium hőmérsékletérzékelők. Az első esetén a hőmérséklet növelésére az ellenállás csökken, a második esetében a hőmérséklet növelésére az ellenállás nő.

A félvezető ellenállások anyaga korábban fénoxid kerámia volt, az anyagtechnológia fejlődésével az anyagválaszték bővült. Ide tartoznak az eredetileg nem félvezetőként ismert, szénből és más anyagokból készült villamos ellenállások, a germániumból, szilíciumból stb. készített passzív (ellenállás) és aktív (dióda) érzékelők a hőmérsékletre érzékeny karakterisztikájú tranzisztorok, sőt integrált áramkörű műveleti eszközök is. A csoport tipikus képviselője a termisztor.

A félvezetők jelleggörbéje negatív meredekségű exponenciális görbe, mert az anyag melegítése energiaközvetítést jelent, az elektronok gerjesztődnek és egyre több elektron lép ki a vegyértéksávból a vezetési sávba, és részt vesz a vezetésben. Ez fajlagos ellenállás-csökkenést eredményez.

Termoelem

Ha két különböző fémet fémesen összeérintkeztetünk, akkor a két fém között elektromos potenciálkülönbség (kontaktspotenciál) lép fel. E kontaktspotenciálok összege zárt vezetőhurokban zérus, ha a csatlakozási pontok azonos hőmérsékletűek. Ha viszont a csatlakozási pontok között hőmérsékletkülönbség van, akkor a körben (általában egy nem zérus) termoelektromotoros erő lép fel.



26. ábra: A termoelem sémája

A két különböző (I. és II.) fém két pontban (A, B) csatlakozik egymáshoz. A C és D szakadási pontok között mérhető feszültség a termofeszültség. Ha a C és D között zárjuk a kört, termoáram lép fel. A termofeszültség (ε) függ a két fém anyagi minőségétől és függ a csatlakozási pontok hőmérsékletétől:

$$\varepsilon = f(T_A, T_B)$$

Ennek a függvénynek olyannak kell lennie, hogy $T_A = T_B$ esetén $\varepsilon = 0$ legyen. Az érzékenység széles tartományban független a hőmérséklettől. A termoelemek tehetetlensége kicsi.

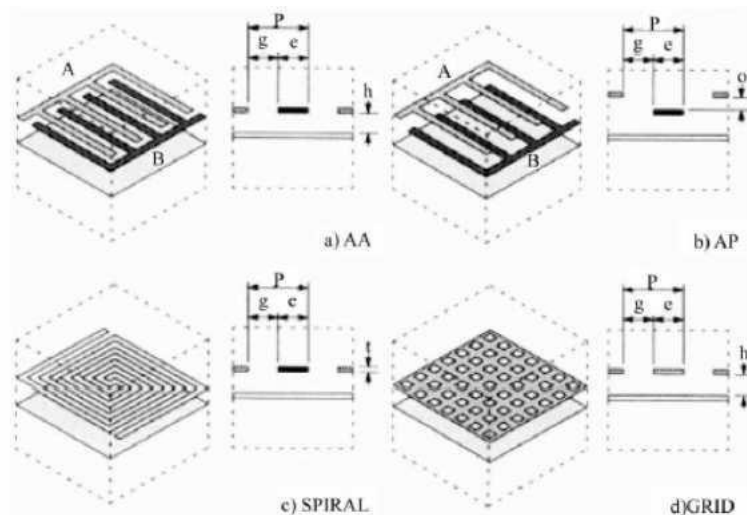
M. 2. Páratartalom mérése

Az légkör levegője mindig tartalmaz vízgőzt is. A levegőben kétféle nedvesség mérhető: az abszolút és a relatív nedvességtartalom. A komfort terek esetében a relatív nedvességtartalom ismerete a fontosabb. Megadja a levegőben lévő parciális vízgőznyomás %-os értékét az adott hőmérsékleten, a vízgőzzel teljesen telített levegő parciális vízgőznyomásához képest. Ennek értéke többféle módszerrel is meghatározható:

- Pszichrometrikus:
 - August-féle pszichrométer
 - Assmann-féle aspirációs pszichrométer
- Kondenzációs légnedvesség-mérő:
 - Lambrecht-féleharmattükör
- Abszorpciós légnedvesség-mérő
- Higrometrikus:
 - Szerves szál:
 - Fuess-féle állomás-higrométer
 - Poliméter
 - MEMS:
 - Nedvességérzékeny film (piezorezisztív)
 - Rezgőnyelvény
 - Dunmore-cella
- Rezisztív
- Kapacitív:
 - MOS tranzisztor (gate-oxid)
 - Síkkondenzátor (dielektrikum)

A kapacitív érzékelők [84]

A kapacitív páraérzékelés alapját olyan vékonyréteg filmek, illetve pórusos szerkezetű anyagok képezik, amelyeknek megváltoznak a dielektromos tulajdonságaik vízgőz hatására. Tulajdonságaik az alkalmazott anyagoktól, és a szerkezetüktől függenek. A 27. ábra mutatja a jellemző szerkezeteket [83].



27. ábra: A kapacitív páraérzékelők szerkezeti típusai [83]

A fésűs szerkezeteket ((a) és (b)) úgy alakítják ki, hogy fémrétegből két egymásba nyúló fésű alakzatot képeznek ki, majd a páraérzékeny anyagot ennek a tetejére viszik fel. Ennek előnye, hogy könnyen kialakítható, a dielektrikum közvetlenül érintkezik a levegővel és a válaszideje rendkívül gyors, ám a kialakuló elektromos tér inhomogén, és csak kis értékű kapacitások valósíthatók meg (reális méretben). Síkelektrodás szerkezetet úgy lehet kialakítani, hogy egy vékony felső elektródát hozunk létre, amely pórusos szerkezetű, így a nedvesség át tud rajta hatolni, és el tudja érni a dielektrikumot. Itt problémát jelent a felső fegyverzet hozzáférése, kivezetése. Egy megoldás szerint a felső fegyverzet egy vastagabb kontaktus-paddal érintkezik, amelyen már létrehozható a termokompressziós kötés.

A kapacitív szenzorok pártartalomfüggése nemlineáris. Pórusos dielektrikumokban a levegővel teli üregekbe víz kerül, ahogy a páratartalom növekszik. Ez a jelenség a kapilláris kondenzáció, amely csak akkor alakulhat ki, ha az üregek sugara kisebb, mint az ún. Kelvin-sugár.

Léteznek olyan kerámiák, amelyeknek a felület-térfogat arányuk rendkívül nagy, így nagy az érzékenységük is. Ilyen például az Al_2O_3 , amelynek a pórusméretei az anódos marás során jól szabályozhatók. Az Al_2O_3 -ból magas hőmérsékleten is működő, stabil szenzorok építhetők.

A pórusos szerkezetű szenzorok válaszidejét jellemzően a diffúzió sebessége befolyásolja. A 2-50 nm-es tartományban a Knudsen-diffúzió a domináns. A Knudsen-diffúzió olyankor lép fel, amikor a szabad úthossz nagy a pórusok hosszához képest. Ilyenkor a részecskék a pórusok falához ütközve haladnak.

A pórusos anyagokon alapuló szenzorok nagyon érzékenyek a füstre és egyéb szennyezésekre. Ezek, valamint a vízgőz eltávolítására a kondenzátorok mellett elhelyeznek egy fűtőellenállást is. A vízgőzt azért szükséges eltávolítani, hogy a mérés

újából elvégezhető legyen (ellenkező esetben egy csúcsegyenirányítóhoz hasonlóan csak a maximális páratartalmat tudná mérni az eszköz a párolgási idő belül). A fűtőellenállás a lerakódott szennyezéseket is leégeti a pórusok faláról. Ezért olyan esetekben is szükség lehet rá, amikor a vízgőz elpárolog magától két mérés között.

A kerámiák mellett egyéb anyagokat is alkalmaznak páraérzékelőkben. Ilyenek például a polimerek, amelyek előnye a lineáris karakterisztika az 5-95 RH% tartományban, ám hátrányuk, hogy szerkezetük a nedvesség hatására irreverzibilis változáson megy át, így élettartamuk rövid, valamint a magas hőmérsékletet sem bírják.

M. 3. Légsebesség mérése

A levegő mozgás sebességének meghatározása közvetlen, sebességre kalibrált skálájú műszeren méréssel, vagy közvetve, más adatok meghatározása alapján, számítással történhet. A légsebesség közvetlen mérésére a hődrótos és szárnykerekű légsebességmérő, közvetett úton való meghatározására pedig a Prandt- ill. Pitot-cső és a Kata-hőmérő használatos.

Kis légsebességek közvetett meghatározására felhasználható a Kata-hőmérő is. A felmelegített Kata-hőmérő lehűlése a környezeti levegő hőmérsékletének, a levegő mozgása következtében megváltozó hőtadási tényezőnek a függvénye. Ha a levegőáramlásba helyezett Kata-hőmérő lehűlési idejét és a levegő hőmérsékletét mérjük, valamint ismerjük a Kata-hőmérő állandóját, akkor a levegő sebessége számolható a (3) egyenlet és annak leírása szerint (14. oldal).

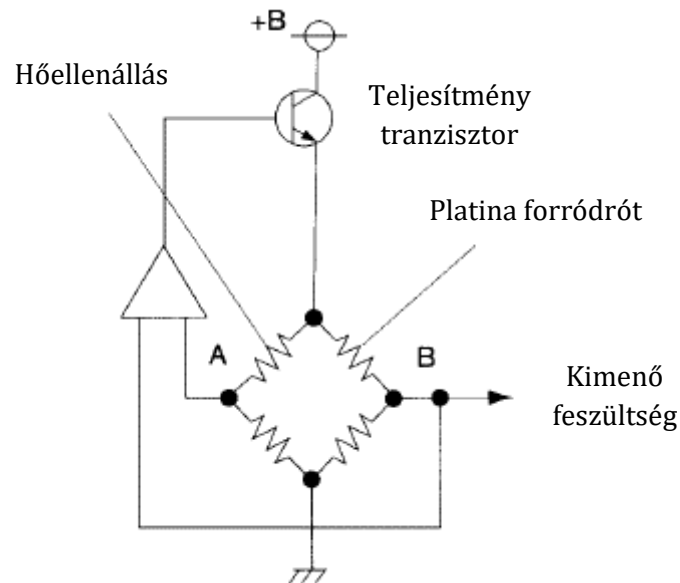
A levegő áramlási sebességének meghatározása:

- Nyomáselví:
 - Forgókerekű:
 - Turbinalapátos, szárnykerekű
 - Kanalas
 - Pitot-cső
 - Prandtl-cső
 - Venturi-cső:
 - Szimpla
 - Dupla
- Termikus-elví:
 - Hődrótos
 - Hólapkás
 - Forrógömbös
 - Hőpulzáló drótos
 - Hőtranzienzes
- Sebesség alapú:
 - Örvényleválásos
 - Lézer Doppler anemométer (Laser-Doppler anemometer, LDA)
 - Lézer áthaladásos anemométer (Laser transit anemometer, LTA)
- Akusztikai elví:

- Ultrahangos
- Akusztikus rezonáns

Hődrótos sebességmérő

A hődrótos sebességmérő (termoanemométer) a légáram útjába helyezett villamos fűtésű vékony huzal hőveszteségének meghatározásán alapszik. Az érzékelő huzal ellenállása a hőmérséklettel változik. A huzalt fűtő áramot úgy szabályozzák, hogy a huzal ellenállása, ennek következtében hőmérséklete állandó legyen. A fűtőáram és a levegő sebessége között egyértelmű összefüggés van, így a műszer közvetlenül sebességre hitelesített. A forró drótos sebességmérő előnye, hogy kisméretű érzékelőeleme révén gyakorlatilag időkésleltetés nélkül mér. Hátránya viszont az, hogy a sebesség iránya nehezen határozható meg, a sebesség irányára kevésbé érzékeny. A 28. ábra mutatja a hődrótos érzékelő szerkezeti rajzát.



28. ábra: A forró drótos anemométer szerkezeti rajza

M. 4. Statisztikai jellemzők

Középérték

Olyan általánosító mutatószám, amely a vizsgált statisztikai sokaságot egy számmal jellemzi.

- számtani (aritmetikai) átlag (\bar{X}): az a szám, amelyet a statisztikai sor adatai helyébe helyettesítve a sor összege változatlan marad
 - használata: legtöbbször ezt alkalmazzuk

- kiszámítása:

$$X_1 + X_2 + \dots + X_n = \sum X_i$$

$$\bar{X} + \bar{X} + \dots + \bar{X} = n\bar{X}$$

- képlete: $\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$ és $\bar{X} = \frac{\sum f_i X_i}{\sum f_i}$ (gyakorisági táblázat esetén súlyozott átlag)

b) kronologikus átlag (\bar{X}_{kr}): állapotidősor adataiból számított speciális számtani átlag

- képlete (ha az állapotidősor adatai egyenlő távolságra vannak):

$$\bar{X}_{kr} = \frac{\frac{x_1}{2} + x_2 + \dots + x_{n-1} + \frac{x_n}{2}}{n-1}$$

- használata: átlagkészletek, átlagállományok meghatározásánál

c) mértani (geometriai) átlag (\bar{X}_g): az a szám, amelyet az átlagolandó adatok helyére behelyettesítve, azok szorzata nem változik.

- használata: egy folyamat relatív változásainak vizsgálatokor - átlagos fejlődési ütemet mutatja (pl. idősorok relatív változásait mutató lánctényezőszámok mértani átlaga a változás átlagos ütemét mutatja - bázisviszonyyszám n-edik gyöke)

- kiszámítása:

$$X_1 * X_2 * \dots * X_n = \prod X_i$$

$$\bar{X}_g * \bar{X}_g * \dots * \bar{X}_g = \bar{X}_g^n$$

- képlete: $\bar{X}_g = \sqrt[n]{\prod X_i}$ és $\bar{X}_g = \sqrt[n]{\sum f_i \prod_{i=1}^n x_i^{f_i}}$

d) medián (középső érték) (M_e): a jelenség nagyság szerinti rendezett adatsorának közepén elhelyezkedő érték

- kiszámítása:

- ha az értéksor diszkrét és páratlan számú tagból áll:

$$M_e = x_{\frac{n+1}{2}}$$

- ha az értéksor diszkrét és páros számú tagból áll:

$$M_e = \frac{x_{\left[\frac{n+1}{2}\right]} + x_{\left[\frac{n+1}{2}\right]+1}}{2}$$

- ha az értéksor folytonos sor és egyenlő osztályközű:

$$M_e = m_e + \frac{\frac{n}{2} - f'_{m_e-1}}{f_{m_e}} * h$$

(mediánt tartalmazó osztály alsó határa: m_e ; gyakorisága: f_{m_e} ; az előző osztályköz kumulált gyakorisága: f'_{m_e-1} ; az osztályköz terjedelme: h ; a gyakoriság összege: n)

e) módusz (leggyakoribb érték) (M_o): a statisztikai sor leggyakrabban előforduló értéke

- használata: ahol a számtani átlag megállapítása nehézségekbe ütközik, a sokaság természetét sokszor ez fejezi ki legjobban
- kiszámítása: gyakorisági sorba foglalt adatokból:
 - ha diszkrét a sor: a leggyakrabban előforduló érték a módusz
 - ha folytonos és egyenlő osztályközű, akkor

$$M_0 = m_0 + \frac{f_{m_0} - f_{m_0-1}}{\left(f_{m_0} - f_{m_0-1}\right) + \left(f_{m_0} - f_{m_0+1}\right)} * h$$

(m_0 : modális osztályköz alsó határa, h : osztályköz, f_{m_0} , f_{m_0+1} , f_{m_0-1} : gyakoriságok)

- megjegyzés: M_0 nyers: modális osztályköz közepe a nyers módusz

Szóródás

Az azonos tulajdonságú adatok értékeinek egymástól vagy a középértéktől való különbözőségét mutatja.

- a) szóródás terjedelme (i_s): az észlelési adatok közül a legkisebb és a legnagyobb adat különbsége
- képlete: $i_s = x_{\max} - x_{\min}$

behatárolja azt az értékközt, amelyben az adatok előfordulnak

- b) középeltérés (M_{ee}): a sokaságelemek mediántól számított abszolút eltéréseinek számtani átlaga

- képlete:
$$M_{e_c} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - M_e|}{n}$$

- c) abszolút átlageltérés (A_e): a sokaságelemek átlagtól számított abszolút eltéréseinek számtani átlaga

- képlete:
$$A_e = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

- d) szórás (σ): a sokaságelemek átlagától való eltéréseknek négyzetes átlaga. Előnyös, mert az eltérések pozitívvá válnak és a kiugró szélső értékekre erősen reagál.

- képlete:
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

- gyakorisági sornál:
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n f_i}}$$

- megjegyzés: s -sel jelöljük a tapasztalati adatokból, mintából számított szórást;
- σ -val jelöljük az elméleti szórást (s ennek közelítése)

- e) konfidencia intervallum: akár csak az átlagérték, véletlen helyzetű, ezért csak azt tudjuk megadni, hogy „ X ” az adott tartományon belül mekkora valószínűséggel helyezkedik el. Az átlag körül rajzolható egy „ a ” sugarú intervallum, amely adott „ p ” valószínűséggel tartalmazza majd a várható értéket:

- képlete: $P(\bar{x} - a \leq X \leq \bar{x} + a) = p$

Gyakorisági sorok eloszlása

Gyakorisági sor alkalmas a sokaságelemek valamely tulajdonságának értéknagyság szerinti eloszlásának értékelésére: a heterogenitás ill. homogenitás felismerésére. Ábrázolva a mennyiségi sort az alakja elárulja az értékbeli eloszlást, ez lehet egymódusú (unimodális) és többmódusú (polimodális).

Egymódusú gyakorisági sor eloszlása:

- a) szimmetrikus, ha a gyakorisági poligon v. hisztogram legmagasabb pontjából a vízszintes tengelyre húzott merőleges az ábrát két azonos alakú szimmetrikus részre osztja: (gyakorlatban közelítőleg szimmetria, ilyenkor a számtani átlag alkalmas a sokaság jellemzésére)
- b) aszimmetrikus, ha nem szimmetrikus, azaz a módusz valamelyik szélső értékhez közelebb esik (a módusz jellemzi jól a sokaságot)
 - baloldali aszimmetria: ha $M_o < M_e < \bar{x}$
 - jobboldali aszimmetria: ha $M_o > M_e > \bar{x}$
- c) aszimmetria: sokaság jellemzésének útja: középértékek → szóródás → eloszlás
 - Pearson-féle mutatószám:

$$A = \frac{\bar{x} - M_o}{\sigma}$$

A előjele a ferdeség iránya,

$|A| > 0,5$ erős aszimmetria,

$|A| < 1$ a gyakorlatban, de felső határ nincs.

- d) csúcosság/lapultság (Kurtosis): a normális eloszláshoz viszonyítva. A negyedik centrális momentum és a variancia négyzetének a hányadosánál pont hárommal kisebb szám.
 - Ha az eloszlás grafikus ábrájának csúcsa magasabban illetve alacsonyabban van, mint a normális eloszlás görbéjének csúcsa, akkor csúcosságról, illetve lapultságról beszélünk.

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \right)^2} - 3$$

- e) ferdeség (Skewness): az eloszlás szimmetrikusságát adja meg. A harmadik centrális momentum és a szórás köbének a hányadosa.

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \right)^{3/2}}$$

Többmódusú gyakorisági sor: általában heterogén sokaság adataiból készülnek és az egyes móduszok a homogén részsokaságok móduszai.

- a) Ha a fő sokaságot a heterogenitást okozó ismérv szerint csoportokra bontjuk, egymódusú gyakorisági sorhoz jutunk.
- b) speciális esetei:
 - M alakú bimodális: sokaságelemek minőségileg két csoportra oszthatók, megszüntethető szétválasztással

- U alakú bimodális: nem a sokaságelemek egészén belüli minőségi különbséget mutatja, hanem a vizsgált jelenség szakmailag lényeges tulajdonságát.

M. 5. Statisztikai próbái

Hipotézisvizsgálat alapjai

1. *Statisztikai hipotézisek:* $\Theta = \Theta_1 \cup \Theta_2$
 H_0 (nullhipotézis): $\vartheta \in \Theta_0$
 H_1 (ellenhipotézis): $\vartheta \in \Theta_1 = \Theta \setminus \Theta_0$
 A hipotézis egyszerű, ha egyetlen elemből áll. Ellenkező esetben összetett.
2. *Statisztikai próba:* X -et felbontjuk két diszjunkt tartományra: X_0 -ra és X_1 -re, és az X minta alapján döntünk:
 X_0 : elfogadási tartomány: ha X ide esik, akkor H_0 -t elfogadjuk
 X_1 : elutasítási tartomány: ha X ide esik, akkor H_0 -t elvetjük.
3. *A hibás döntés típusai:*
 elsőfajú hiba: ha H_0 teljesül, mégis elvetjük
 másodfajú hiba: ha H_0 nem teljesül, mégis elfogadjuk.
4. Általában olyan próbákat keresünk, ahol az elsőfajú hiba nem halad meg egy kicsi (pl. 0,05) értéket, és ilyen feltétel mellett a másodfajú hiba a lehető legkisebb. Ezért H_0 és H_1 szerepe nem szimmetrikus, H_0 elvetése az informatív döntés!
5. Legyen $\Psi(\vartheta) = P_{\vartheta}(X_1)$. Ha $\vartheta \in \Theta_0$, akkor ez éppen az elsőfajú hiba valószínűsége.
 Próba terjedelme: az elsőfajú hibavalószínűségek supremuma, azaz $\alpha = \sup_{\vartheta \in \Theta_0} \Psi(\vartheta)$. (pl. 0,05; a vizsgálatok során is rendre ezt az értéket alkalmaztam)
 Próba szintje = 1 - terjedelem
 Erőfüggvény: Ψ megszorítva Θ_1 -re (tehát a másodfajú hiba valószínűsége: 1-erő)
6. Véletlenített próba: ilyenkor megadunk egy $\varphi: X \rightarrow [0,1]$ próbafüggvényt. Ha a megfigyelt minta X , akkor $\varphi(X)$ valószínűséggel vetjük el H_0 -t. (Speciálisan ha a próba nem véletlenített, akkor φ indikátorfüggvény.)
7. Próbák összehasonlítása, tulajdonságai egy adott D próbaosztályban (pl. max. α terjedelmű próbák esetében):
 a) φ_1 erősebb φ_2 -nél, ha erőfüggvénye Θ_1 minden pontjában nem kisebb.
 b) φ optimális D -ben, ha minden D -beli próbánál erősebb.
 c) φ megengedhető D -ben, ha nincs nála erősebb D -beli próba
 d) φ torzítatlan, ha ereje \geq terjedelme
 e) φ_n próbasorozat (φ_n az n elemű mintából van számítva) konzisztens, ha az erőfüggvény pontonként 1-hez tart.
8. A próbák rendszerint úgy néznek ki, hogy egy $T: X \rightarrow \mathbf{R}$ próbastatisztika alapján döntünk: ha $T > c$, akkor H_0 -t elvetjük, egyébként elfogadjuk. „ c ” elnevezése: kritikus érték.

Illeszkedésvizsgálat

Annak ellenőrzésére, hogy egy valószínűségi változó adott eloszlás követ-e, illeszkedésvizsgálattal lehet számszerűleg igazolni. Ezt egy hipotézis felállításával kell kezdeni, melynek menetét és elméletét az előző fejezet részben részleteztem:

H₀: $\chi^2 - \chi^2_{p\%} = 0$ a minta eloszlása megegyezik egy elméletileg feltételezett eloszlással

$$\text{Próbafüggvény: } \chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*},$$

ahol r az osztályközök száma, f_i i . osztályköz megfigyelt gyakorisága,

$f_i^* = n * p_i$ i . osztályköz gyakorisága az elméletileg feltételezett eloszlásnál

$$\text{és a számításokhoz } x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

Kritikus érték: $\chi^2_{p\%}$ a χ^2 eloszlás táblázatából $FG=r-1$ esetben

Összevetés:

- ha $\chi^2 > \chi^2_{p\%}$, akkor H_0 elvetve, azaz a minta eloszlása szignifikánsan eltér az elméletileg feltételezett elosztástól,
- ha $\chi^2 \leq \chi^2_{p\%}$, akkor H_0 elfogadva, azaz a minta eloszlása megfelel az elméletileg feltételezettnek.

Homogenitásvizsgálat

Annak ellenőrzésére, hogy két minta származhat-e azonos eloszlású sokaságból, homogenitásvizsgálattal lehet számszerűleg igazolni.

H₀: $\chi^2 - \chi^2_{p\%} = 0$ a két minta azonos eloszlású alapsokaságból származik

$$\text{Próbafüggvény: } \chi^2 = n_1 * n_2 * \sum_{i=1}^r \frac{\left(\frac{f_{1i}}{n_1} - \frac{f_{2i}}{n_2}\right)^2}{\frac{f_{1i}}{n_1} + \frac{f_{2i}}{n_2}},$$

ahol $\sum_{i=1}^r f_{1i} = n_1$ $\sum_{i=1}^r f_{2i} = n_2$ az x_i értékekhez tartozó gyakoriságokra

Kritikus érték: $\chi^2_{p\%}$ a χ^2 eloszlás táblázatából $FG=r-1$ esetén (szabadságfok)

Összevetés:

- ha $\chi^2 > \chi^2_{p\%}$, akkor H_0 elvetve, azaz a két minta különböző eloszlású sokaságból származik,

- ha $\chi^2 \leq \chi^2_{p\%}$, akkor H_0 elfogadva, azaz a két minta azonos eloszlású sokaságból származik.