Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
**Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszék**

# Nedvességterhelés mérése és vizsgálata ipari környezetben

Szerző: **Deák Szabolcs BSc hallgató**

Témavezető: Kostyák Attila
Tanszékvezető: Dr. Lakatos Ákos

Debrecen
2022.

# Tartalomjegyzék

Alkalmazott jelölések és mértékegységek összefoglaló táblázata ....4
Bevezetés: ....5
1. Nedvességterhelés ismertetése és bevitelének módja ....6
1.1. A nedves levegő állapotjelzői ....6
1.1.1. A levegő abszolút nedvessége: ....6
1.1.2 A levegő relatív nedvessége: ....6
1.1.2 A nedves levegő entalpiája: ....7
1.2. A levegő keveredése vízzel ....7
1.3. A nedvesség terhelés bevitele ....8
2. Mérési terv leírása ....9
2.1. A mérési helyszín előkészítésének bemutatása ....9
2.2. A labor területén elhelyezett mérő műszerek pontos pozíciójának ábrázolása és ismertetése ....10
2.2.1. Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor ....10
2.2.2. Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő ....12
2.2.3. Testo 06280152 turbulencia fok szonda ....13
2.3. A Mérés menetének bemutatása ....14
2.2.1. Első eset a víztükör fölött nincs direkt levegő ventilálás ....14
2.2.2. Második eset a víztükör fölött van direkt levegő ventilálás ....16
3. Mért körülmények számítással történő becslése ....17
3.1. Empirikus becslő képletek a szabad vízfelületről – uszoda technika ....17
3.1.1. A nedves felület és a levegő közti hőcsere konvekciós hőárama ....17
3.1.2. A nedves felület párolgásának tömegárama ....17
3.2. Empirikus becslő képletek a szabad vízfelületről – Lurie-Mihajlov közelítés ....18
3.3. Számítási példa bemutatása az empirikus becslő képletek alkalmazásával ....18
3.3.1. Számítás alap adatai ....18
3.3.2. Első számítási példa nedves felület nedvesség bepárolgásának becslésére uszodai körülmények esetében alkalmazott közelítésére alkalmazott képletekkel ....18
3.3.3. Második számítás - Lurie-Mihajlov közelítéssel ....20
4. Mért eredmények bemutatása: ....21
4.1. Első eset a mért terület felett nincs direkt levegő ventilálás ....21
4.2. Második eset a mért terület felett van direkt levegőventilálás ....22

5. Mért és számított eredmények összehasonlítása: .....24
5.1. Nyugalmi állapot.....24
5.2. Ventilált állapot.....25
6. Számítási módszer alkalmazása valós ipari helyiségben: .....26
6.1. A helyiség bemutatása.....26
6.2. A helyiség nedvességterhelésének számítása: .....26
6.2.1. A nedves falfelület meghatározása: .....26
6.2.2. A nedves falfelület meghatározása: .....27
6.3. A helyiség légtechnikai igényinek számítása: .....27
Hivatkozások.....30

| Alkalmazott jelölések és mértékegységek összefoglaló táblázata | | |
|---|---|---|
| **Jelölés** | **Megnevezés** | **Mértékegyég** |
| $x_b$ | Belső levegő abszolút nedvesség tartalma | g/kg<br>kg/kg |
| $x_{sz}$ | Szellőző levegő abszolút nedvességtartalma | g/kg<br>kg/kg |
| φ | Relatív nedveség tartalom | % |
| h | Entalpia | kj/kg |
| $t_b$ | Belső levegő Hőmérséklete | °C |
| $t_{sz}$ | Szellőző levegő hőmérséklete | °C |
| $t_v$ | párolgó víz hőmérséklete | °C |
| α | hőátadási tényező | $W/m^2K$ |
| $r_0$ | Levegő párolgáshője | kJ/kg |
| $c_{pl}$ | Levegő állandó nyomáson vett közepes fajhője | kJ/kg°C |
| $c_{pg}$ | vízgőz állandó nyomáson vett közepes fajhője | kJ/kg°C |
| $A_v$ | Nedves felület területe | $m^2$ |
| V | Térfogatáram | $m^3/h$ |
| $G_p$ | Nedvesség terhelés tömegárama | kg/s<br>kg/h |
| $w_a$ | Légsebesség | m/s |
| $q_k$ | Fajlagos konvekciós hőáram | $W/m^2$ |
| Qk | Konvekviós hőáram | W<br>kW |
| β | Párolgási tényező | - |
| $P_{am}$ | Belső levegőhöz tartozó vízgőz parciális nyomás | mbar |
| $P_s$ | Párolgó vízhez tartozó vízgőz parciális nyomás | mbar |
| $g_p$ | Fajlagos nedvesség terhelés tömegárama | $kg/hm^2$ |
| Q | Hőterhelés | W |
| $m_{sz}$ | Szellőző levegő tömegárama | kg/s |
| DR | Huzatarány | % |
| TU | Turbulencia fok | % |

# Bevezetés:

A légtechnikai rendszerek egyik legfontosabb feladata, egy adott helyiség vagy épület frisslevegő ellátásának biztosításán kívül, a helyiség számára az ideális minőségű, mennyiségű és állapotú levegő bejuttatása.

A mai világban a légtechnikai rendszerek alkalmazása elengedhetetlen a nagyobb létesítmények számára, akár legyen az közintézmény [1], irodaház vagy ipari létesítmény. Az összes létesítmény egyedi levegőkezelést igényel. Minden egyes esetben egy légtechnikai rendszer tervezésekor rendkívül fontos a körülmények és az igények pontos felmérése, valamint az adott létesítményre vonatkozó kritériumok és jogszabályok figyelembe vétele.

Dolgozatomban az ipari, különösen az élelmiszeripari húsfeldolgozó létesítményekben keletkező levegő nedvesség terhelést vizsgálom. Az élelmiszeripari objektumok egyik legfontosabb kritériuma a higiénia, ebben az esetben elsőszámú, hogy a hús mint élelmiszer optimális higiéniai körülmények [2] között kerüljön feldolgozásra, tárolásra, csomagolásra és végül szállításra. Ennek érdekében, hogy a feldolgozó helyiség berendezésiről, valamint határoló szerkezeteiről semmiféle képpen ne kerülhessen bármilyen nemű szennyező anyag a termékekre, ezek a berendezések és szerkezetek rendszeres tisztításra szorulnak, [3] ez az eljárás nagy mennyiségű nedvesség helyiségbe való bevitelével jár. Mivel az épületben a kontrollálatlan nedvesség lecsepegés a feldolgozó helyiségeket határoló szerkezetekről veszélyt jelent a feldolgozandó élelmiszerek higiéniai tisztaságára, ezt a szennyező tényezőt az épületben lévő légtechnikai rendszer feladata elszállítani.

A dolgozatban azt vizsgálom mérések valamint közelítő becslések segítségével, hogy az ilyen típusú nedvesség terhelés milyen hatással van a helyiség belső levegőjének állapotára, valamint, hogy ezt az állapotot melyik közelítő egyenlettel lehet a legpontosabban megbecsülni az ilyen légtechnikai rendszerek tervezéséhez. A méréseket a Debreceni Egyetem Műszaki kar Légtechnikai laborjában végeztem.

# 1. Nedvességterhelés ismertetése és bevitelének módja

## 1.1. A nedves levegő állapotjelzői

1.1.1. A levegő abszolút nedvessége:

A nedves levegő két fő alkotó részből áll, száraz levegőből valamint a levegő által felvett nedvességből. A levegő abszolút nedvességét ennek a két fő alkotó résznek a tömegaránya határozza meg. [4]

$$x = \frac{m_l}{m_v} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

ahol:

x - A levegő abszolút nedvessége [kg/kg]

$m_l$ - A száraz levegő tömege [kg]

$m_v$ - A levegő által felvett nedvesség tömege[kg]

1.1.2 A levegő relatív nedvessége:

A levegő vízmegkötő képessége függ annak a hőmérsékletétől. Adott hőmérsékleten a levegő csak korlátozott mennyiségben képes nedvességet felvenni, amennyiben a levegő elérte azt a maximális nedvességi szintet, amit azon a hőmérsékleten képes felvenni akkor telítettnek nevezzük. A relatív nedvességtartalom azt határozza meg, hogy a nedves levegő hány százalékban érte el a telítettséget adott hőmérsékleten. [5]Ez az értéket a nedves levegő aktuális állapotban lévő vízgőz parciális nyomásának, valamint a telített állapotban lévő vízgőz parciális nyomásának hányadosa határozza meg. [4]

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{vt}} [\%]$$

ahol:

φ - A levegő relatívnedvessége [%]

$P_v$ - A nedves levegő vízgőz parciális nyomása [Pa]

$P_{vt}$ - A telített levegő vízgőz parciális nyomása [Pa]

1.1.2 A nedves levegő entalpiája:

A nedves levegő entalpiáját a két fő alkotó részének, a száraz levegő entalpiájának valamint az adott hőmérsékletű vízgőz entalpiájának összege határozza meg. [6]

$$h = h_l + h_v \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Száraz levegő entalpiája:

$$h_l = c_{pl} \cdot t \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

ahol:

$c_{pl}$ - levegő állandó nyomáson vett közepes fajhője [≈1,005 kJ/kg°C]

t - Hőmérséklet [°C]

Adott hőmérsékletű vízgőz entalpiája:

$$h_v = x \cdot (r_0 + c_{pg} \cdot t) \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

ahol:

$r_0$ - levegő párolgáshője [≈2500 kJ/kg]

$c_{pg}$ - vízgőz állandó nyomáson vett közepes fajhője [≈1,86 kJ/kg°C]

## 1.2. A levegő keveredése vízzel

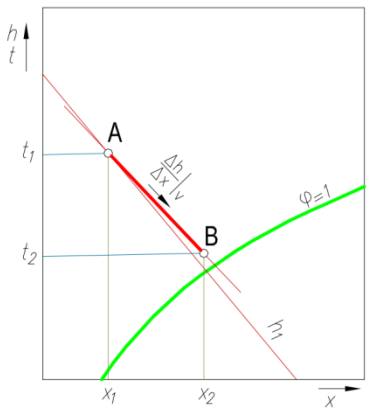
Ha hozzá keverünk egy adott állapotú levegőhöz, pontosan olyan mennyiségű vizet, beporlasztással, hogy azt a víz mennyiséget levegő száz százalékban meg tudja kötni, a keverés folyamán a száraz levegő tömege állandó lesz. [7]

Energiamérleg:

$$m_l \cdot h_v + m_v \cdot h_v = m_l \cdot h_2$$

Nedvességmérleg:

$$m_l \cdot x_l + m_v = m_l \cdot x_2$$




Állapotváltozás irányjelzője:

$$\frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = h_v$$

*1.ábra: Állapotváltozás ábrázolása* [7]

## 1.3. A nedvesség terhelés bevitele

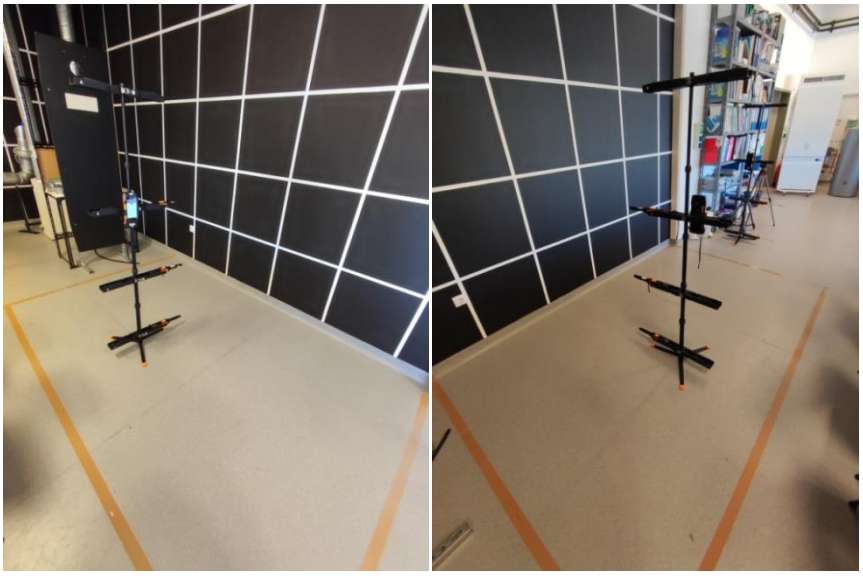
A mesterségesen szellőztetett helyiségekben, tervezés során meghatározásra kerül a belső levegőnek a fenttartandó állapota. A nedvesség terhelés akkor jön létre a térben, ha valamilyen többlet nedvesség keletkezik a helyiségben, ami eltér a fenntartani kívánt tervezési állapottól. [8]

A nedvességterhelés sokféle indíttatásból, többféle módon keletkezik a helyiségben. Jellemzően a helyiségben tartózkodó emberektől, ez fejenként átlag 40 [g/kg] nedvességterhelést jelent. [9] De nagy vízfelületek esetében ez az érték hatványozottan fokozódhat például uszodákban vagy egyes ipari létesítmények területén ahol tisztítás céljából létrehozott nedves felületek jöhetnek létre. Az általam vizsgált esetben egy ipari azon belül is élelmiszeripari környezetben előforduló nedvességterhelés kerül, kielemzésre itt elsősorban az előírt higiéniai szempontok betartásával jár a problémakör felmerülése. Ebben az esetben a többlet nedvesség bejutása a helyiségbe a helyiség határoló szerkezeteinek tisztása céljából történik. Annak érdekében, hogy a feldolgozó üzem berendezésiről, valamint határoló szerkezeteiről semmiképpen ne kerülhessen bármilyen nemű szennyező anyag a termékekre, ezek a berendezések és szerkezetek rendszeres tisztításra szorulnak, ez az eljárás nagy mennyiségű nedvesség helyiségbe való bevitelével jár. Amennyiben ez a nedvesség olyan túlzott mértékben jön létre a térben, hogy a határoló szerkezetek felületei képtelenek legyenek megtartani azt, az kontrollálatlan nedvesség lecsepegést eredményezhet, ez által szennyeződések kerülhetnek a feldolgozandó termékekre és károsulhat annak a minősége. A nedvesség bejutása így víz formában locsolás során kerül a helyiség környezetébe. A folyamat alatt a bejutó víz vékony filmréteget képez a helyiség határoló szerkezetein. A kialakult vízréteg párolgás útján a keveredik a helyiség levegőjével valamint eltérő hőmérsékletek esetében folyamatos hőcsere indul meg a két közeg között, ennek a hőcserének a mértéke a levegő és a víz hőmérsékletének különbségének nagyságától függ.

# 2. Mérési terv leírása

## 2.1. A mérési helyszín előkészítésének bemutatása

A mérés labor körülmények között került elvégzésre a Debreceni Egyetem Műszaki karának légtechnikai laborjában. A laborban egy 6 $m^2$ (3x2 m) területű rész került kijelölésre a mérés elvégzéséhez. A terület közepén három darab Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor került elhelyezésre, mind a három műszert különböző magasságba lett beállítva a kijelölt terület fölött egy állványon. A legfelső pozícióban lévő műszer 110 cm, a középső pozícióban lévő 60 cm, a legalsó helyen lévő pedig 5 cm távolságra helyezkedett el a padlószint fölött.

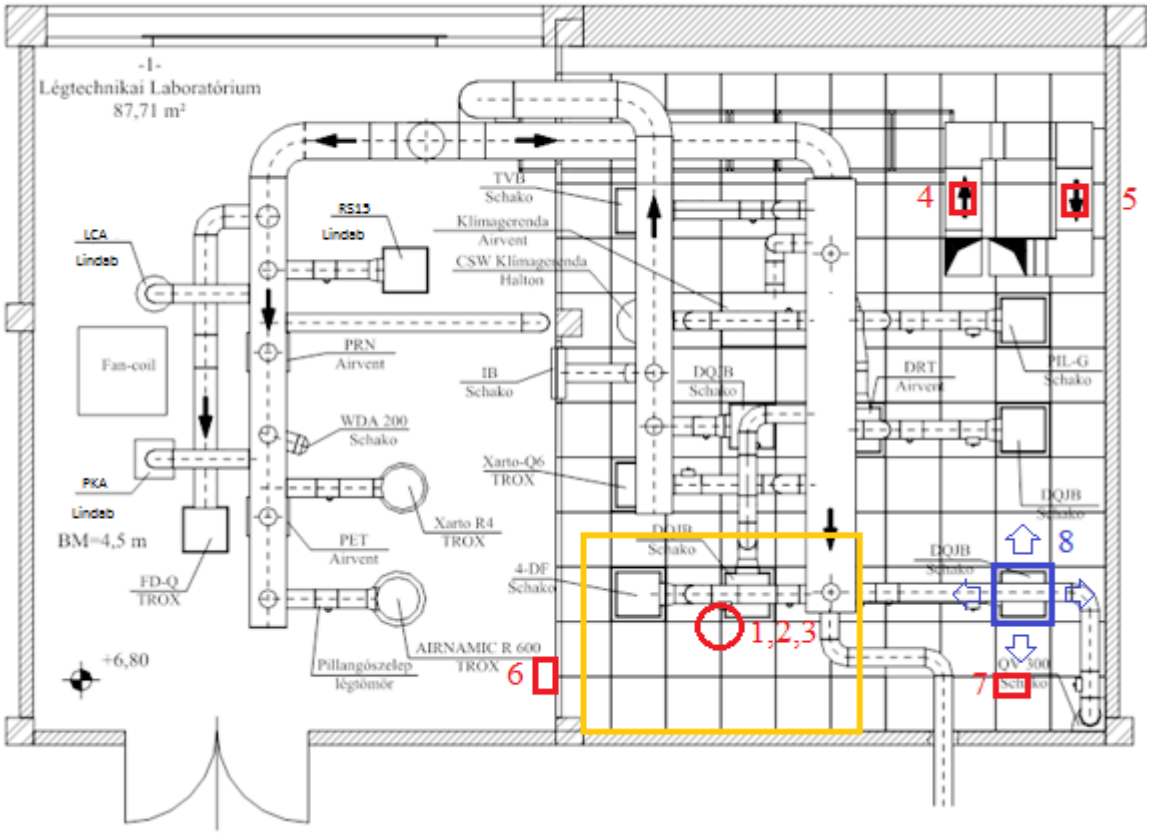


*2.ábra: Mérő műszerek elhelyezése a mérésre kijelölt terület fölött.*

A mérés kijelölt területe körül négy darab Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő műszer került kihelyezésre. Egy-egy darab a terület bal oldalára közvetlenül a befúvó anemosztát alá és a terület jobb oldalára, egy darab a légkezelő befúvó ágába, az utolsó pedig a légkezelő elszívó ágába.

*3.ábra: Mérő műszerek elhelyezése a mérésre kijelölt terület körül.*

## 2.2. A labor területén elhelyezett mérő műszerek pontos pozíciójának ábrázolása és ismertetése




*4.ábra: A labor tervrajza és a benne elhelyezett műszerek pontos pozíciója* [10]

### 2.2.1. Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor

1,2,3. Pozíció:

- Három darab egymás fölött állványon elhelyezett mérő műszer
  1. Alsó Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor 10 cm-re a padlószinttől

2. Középső Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor 60 cm-re a padlószinttől
3. Felső Testo 06321550 $CO_2$, hőmérséklet, páratartalom szenzor 110 cm-re a padlószinttől

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Probe head | 2 | Quick-release connector for probe heads and adapter |
| 3 | LED status display | 4 | Button |
| 5 | Bluetooth® handle | 6 | Battery compartment (on rear) |

*5. ábra – Testo páraszenzor* [11]

| **Műszer adatai** | |
|---|---|
| **Mérési tartomány** | 0-tól +50°C<br>5-től 95% RH<br>0-tól 10,000 ppm $CO_2$<br>700-tól 1100 hPa |
| **Pontosság**<br>**(22°C ± 1 -on)** | ± 0,5°C<br>± (50 ppm +3% m.v.) (0-tól 5,000 ppm)<br>± (100 ppm +5% m.v.) (5,001-től 10,000 ppm)<br>± 3 hPa |
| **Pontosság**<br>**(25°C ± 1 –on)** | ± 3.0% RH (10-től 35% RH)<br>± 2.0% RH (35-től 65% RH)<br>± 3.0% RH (65-től 90% RH)<br>± 5% RH (fennmaradó tartomány) |
| **Adat lépték** | 0,1°C<br>0,1% RH<br>1 ppm<br>0,1 hPa |
| **Tárolási hőmérséklet** | -20°C-tól +60°C-ig |
| **Működési hőmérséklet** | -5°C-tól +50°C-ig |

*1. táblázat: páraszenzor műszaki adatai* [11]

2.2.2. Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő

4. Pozíció:

- Légkezelő befúvó ágában elhelyezett Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő műszer

5. Pozíció:

- Légkezelő elszívó ágában elhelyezett Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő műszer

6. Pozíció:

- Mérési terület jobb oldalán elhelyezett Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő műszer

7. Pozíció:

- Mérési terület bal oldalán, befúvó anemosztát alatt elhelyezett Testo Saveris 2-H1 hőmérséklet és páratartalom adat gyűjtő műszer

| | |
|---|---|
| 1 | Display |
| 2 | Alarm LED, flashes red in the event of an alarm |
| 3 | QR code, for direct access to the instrument data in the Testo Cloud |
| 4 | Control key, to manually start data transfer |
| 5 | Battery compartment (on rear) |
| 6 | USB and probe sockets (on the bottom, instrument-specific) |

*6. ábra - Testo Severis 2-H1* [12]

| **Műszer adatai** | |
|---|---|
| **Mérési tartomány** | -30-tól +50°C<br>0-tól 100% RH |
| **Pontosság** | ± 0,5°C<br>± 2% RH |
| **Adat lépték** | 0,1°C<br>0,1% RH |
| **Tárolási hőmérséklet** | -40-től +70°C |
| **Működési hőmérésklet** | -30-tól +50°C |

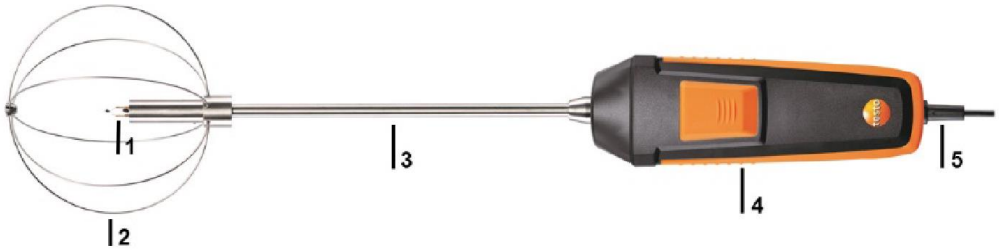
*2. táblázat: adatgyűjtő műszaki adatai* [12]

8. Pozíció:

- Álmennyezetbe épített Schako DQJB típusú mennyezeti befúvó anemosztát, V=207 [$m^3$/h]

*7. ábra – Schako DQJB mennyezeti befúvó anemosztát*

## 2.2.3. Testo 06280152 turbulencia fok szonda




| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Sensor | 2 | Guard |
| 3 | Probe shaft | 4 | Handle |
| 5 | Cable | | |

*8. ábra – Testo turbulencia szonda* [13]

| Műszer adatai | |
|---|---|
| **Mérési tartomány** | 0-tól 5 m/s<br>0-tól +50°C<br>700-tól 1100 hPa |
| **Pontosság**<br>**22°C ± 1 -on** | ± (0,03 m/s + 4 % m.v.) (0-tól +5 m/s)<br>± 0,5°C<br>± 3 hPa |
| **Adat lépték** | 0,01 m/s<br>0,1°C<br>0,1 hPa |
| **Tárolási hőmérséklet** | -20-tól +60°C |
| **Működési hőmérséklet** | 0°C-tól +50°C |

*3. táblázat: turbulencia szonda műszaki adatai* [13]

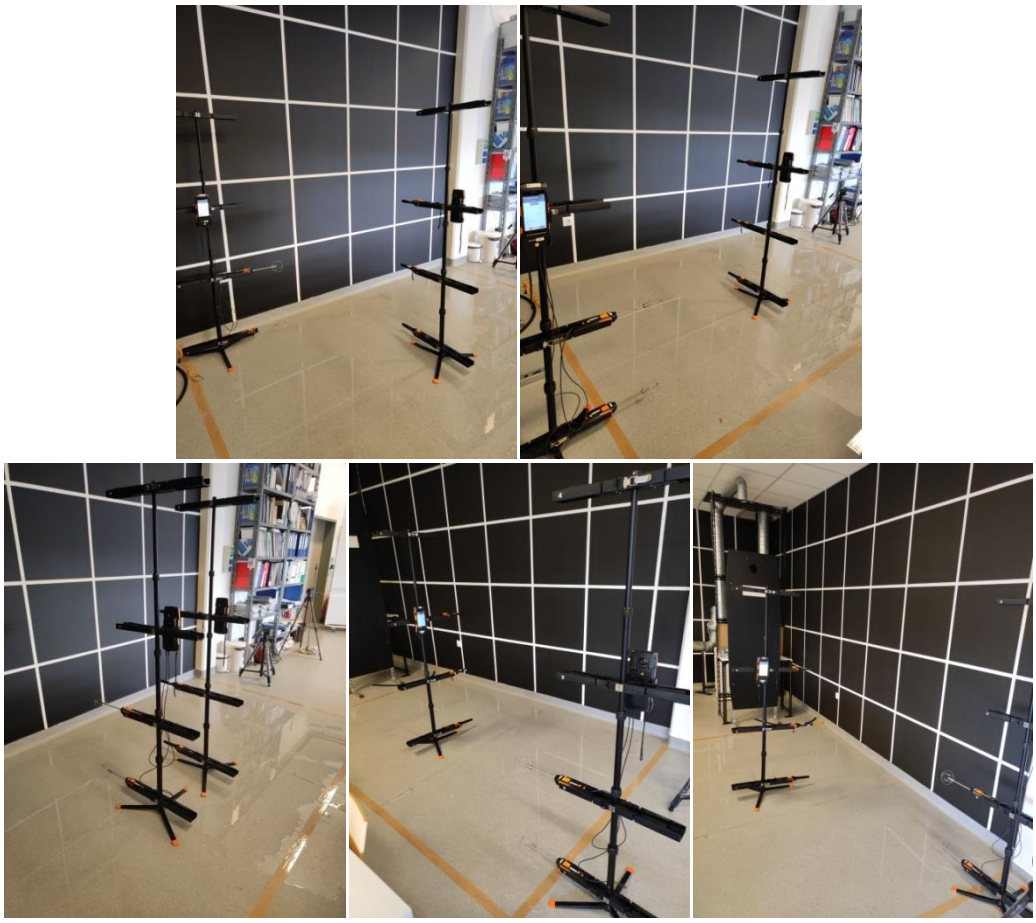
## 2.3. A Mérés menetének bemutatása

2.2.1. Első eset a víztükör fölött nincs direkt levegőventilálás

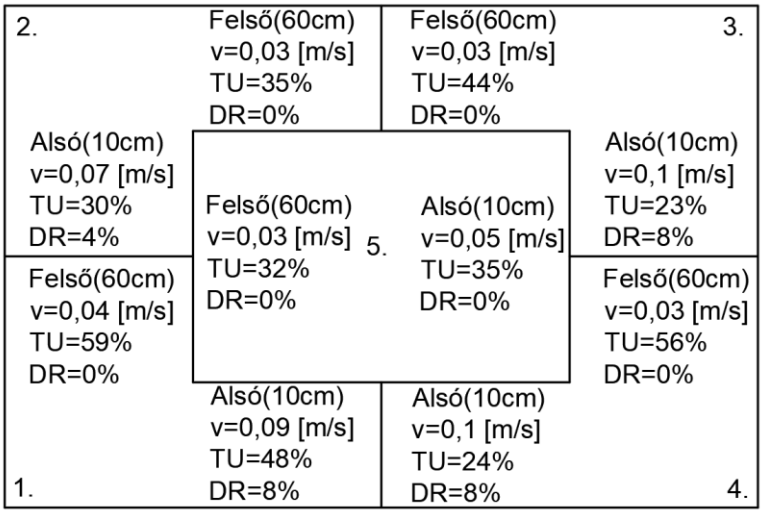
A mérés helyszínének előkészítését követően és a kihelyezett mérőműszerek beállítása következett, mégpedig úgy, hogy minden 1 percet követően rögzítsék az aktuális adatokat. Ez után a légkezelő gép beállítása következett, ami 100% hő visszanyeréssel 207 $m^3$/h levegő befújására lett beállítva. Ezt követően egy vékony 23°C-os vízréteggel lett beborítva a mérési terület.

*9. ábra: Mérés területén létrehozott víztükör*

A levegő sebességet a víztükör fölött két darab Testo 06280152 turbulencia fok szondával került megmérése a műszerek egymás felett helyezkedtek el egy állványon az egyik 10cm-re a másik 60cm-re a vízfelület fölött. A műszerek 3 perces átlag mérési ciklusra lettek beállítva és a terület 5 különböző pontján kerültek felállításra.



*10.ábra: Átlag légsebesség mérése öt különböző pontban*




*11. ábra: Légsebességek alakulása a terület öt különböző pontján*

## 2.2.2. Második eset a víztükör fölött van direkt levegő ventilálás

Ebben az esetben pontosan ugyanúgy lett elhelyezve az összes műszer a laborban, mint az előző esetben, azzal a különbséggel, hogy egy ventilátor került elhelyezésre a mért terület mellett, ami úgy lett beállítva, hogy a levegőt közvetlen a terület felett tudja keringetni nagy sebességgel.

*12.ábra: Létrehozott víztükör direkt ventiláltatással*

A levegő sebessége ebben az esetben is Testo 06280152 turbulencia fok szondával lett lemérve. Az előző esethez képest annyi különbséggel, hogy mivel az irányított légsugár nem volt képes az egész felületet egyenlően lefedni ezért a pontosabb mérés érdekében a terület 12 egységre lett felosztva és mindegyik pontban el lett végezve a légsebesség mérés.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3.<br>v=0,14 [m/s]<br>TF=52%<br>HA=18% | 6.<br>v=0,66 [m/s]<br>TF=31%<br>HA=100% | 9.<br>v=1,25 [m/s]<br>TF=18%<br>HA=100% | 12.<br>v=0,43 [m/s]<br>TF=20%<br>HA=47% |
| 2.<br>v=0,58 [m/s]<br>TF=34%<br>HA=95% | 5.<br>v=1,84 [m/s]<br>TF=15%<br>HA=100% | 8.<br>v=1,1 [m/s]<br>TF=23%<br>HA=82% | 11.<br>v=0,26 [m/s]<br>TF=33%<br>HA=32% |
| 1.<br>v=1,9 [m/s]<br>TF=21%<br>HA=100% | 4.<br>v=0,32 [m/s]<br>TF=32%<br>HA=43% | 7.<br>v=0,06 [m/s]<br>TF=86%<br>HA=4% | 10.<br>v=0,03 [m/s]<br>TF=30%<br>HA=9% |

13.ábra: *Levegő sebességének alakulása a terület mért pontjaiban*

*14.ábra: Levegő sebességének mérése*

# 3. Mért körülmények számítással történő becslése

## 3.1. Empirikus becslő képletek a szabad vízfelületről – uszoda technika

Az alábbi közelítő egyenleteket uszodatechnikai légnedvesség becsléséhez szokták alkalmazni,

3.1.1. A nedves felület és a levegő közti hőcsere konvekciós hőárama: [14]

$$\alpha = 6{,}3 + (4{,}8 \cdot w_a)\left[\frac{W}{m^2K}\right]$$

$$q_k = \alpha \cdot (T_v - T_{be})\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

$$Q_k = A_v \cdot q_k[W]$$

ahol:

$A_v$ - a nedves felület [$m^2$]

$T_v$ - víz hőmérséklete [°C]

$T_{be}$ - belső levegő hőmérséklete [°C]

$\alpha$ - nedves felület és a levegő közötti hőátadási tényező [$W/m^2K$]

$w_a$ - levegő sebessége a tartózkodási zónában [m/s]

3.1.2. A nedves felület párolgásának tömegárama: [14]

$$\beta = 0{,}0167 + 0{,}129 \cdot w_a$$

$$g_p = (0{,}0167 + 0{,}129 \cdot w_a) \cdot (p_s - p_{am})\left[\frac{kg}{h \cdot m^2}\right]$$

$$G_p = A_v \cdot g_p\left[\frac{kg}{h}\right]$$

ahol:

$p_s$ - a párolgó víz hőmérsékletéhez tartozó telített gőznyomás [mbar]

$p_{am}$ - a belső levegőhöz tartozó vízgőz parciális nyomásértéke [mbar]

$\beta$ - párolgási tényező

## 3.2. Empirikus becslő képletek a szabad vízfelületről – Lurie-Mihajlov közelítés [15]

Kutatásom során több közelítő függvényt is találtam a szabad vízfelületből a helyiség levegőjébe kipárolgó nedvességterhelés becslésére. Az uszodatechnikai becsléssel párhuzamosan az úgynevezett Lurie-Mihajlov közelítést is alkalmazom és az eredmények összevetésével vizsgálom a kapott értékek pontosságát.[1]

$$G_p = A_w \cdot c \cdot (22 + 17 \cdot w_a) \cdot (p_s - p_{am}) \left[\frac{kg}{h}\right]$$

ahol:

$p_s$ - a párolgó víz hőmérsékletéhez tartozó telített gőznyomás [mbar]

$p_{am}$ - a belső levegőhöz tartozó vízgőz parciális nyomásértéke [mbar]

$A_w$ - nedves felület [$m^2$]

c - állandó érték 0,0000075

## 3.3. Számítási példa bemutatása az empirikus becslő képletek alkalmazásával

3.3.1. Számítás alap adatai

| | |
|---|---|
| Alapterület (A) | 6 [$m^2$] |
| Szellőző levegő hőmérséklete ($T_{sz}$) | 20,6[°C] |
| Szellőző levegő térfogatárama ($V_{sz}$) | 207[$m^3$/h] |
| Belső hőmérséklet ($T_b$) | 20,4[°C] |
| Szellőző levegő abszolút nedvesség tartalma ($x_{sz}$) | 9,8[g/kg] |
| Légsebesség ($w_a$) | 0,1[m/s] |

3.3.2. Első számítási példa nedves felület nedvesség bepárolgásának becslésére uszodai körülmények esetében alkalmazott közelítésére alkalmazott képletekkel [14]

A nedves felület és a levegő közti hőcsere konvekciós hőárama:

$$\alpha = 6{,}3 + (4{,}8 \cdot w_a) = 6{,}3 + (4{,}8 \cdot 0{,}1) = 6{,}28 \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

$$q_k = \alpha \cdot (T_v - T_{be}) = 6{,}28 \cdot (23 - 20{,}4) = 18{,}84 \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

$$Q_k = q_k \cdot A = 18{,}84 \cdot 6 = 113\ [W]$$

[1] Az közelítő egyenletek becslési pontosságának összevetésére a mért adatok elemzése után kerül sor.

Mivel mindössze 5 liter víz került kiöntésre, a közeg hőkapacitása rendkívül alacsony értéket vesz fel. A keletkező hőáram miatt tehát a víz a kiöntés pillanata után rendkívül hamar egy közel izoterm állapotot vesz fel, ezért a pontosabb számítás érdekében érdemes erre az izoterm állapotra végezni a becslést.

A nedves felület párolgásának tömegárama:

$$\beta = 0{,}0167 + 0{,}129 \cdot w_a = 0{,}0167 + 0{,}129 \cdot 0{,}1 = 0{,}0296$$

$$g_p = (0{,}0167 + 0{,}129 \cdot w_a) \cdot (p_s - p_{am}) = 0{,}0296 \cdot (23{,}5 - 15{,}5) = 0{,}237 \left[\frac{kg}{h \cdot m^2}\right]$$

$$G_p = A_{30\%} \cdot g_p = 6 \cdot 0{,}237 = 1{,}422 \left[\frac{kg}{h}\right] \rightarrow 3{,}95 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Belső levegő kialakuló állapotjelzőinek számítása:

$$m_{sz} = \frac{V_{sz} \cdot 1{,}2}{3600} = \frac{207 \cdot 1{,}2}{3600} = 0{,}069 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

1. Belső levegő kialakuló abszolút nedvesség tartalma:

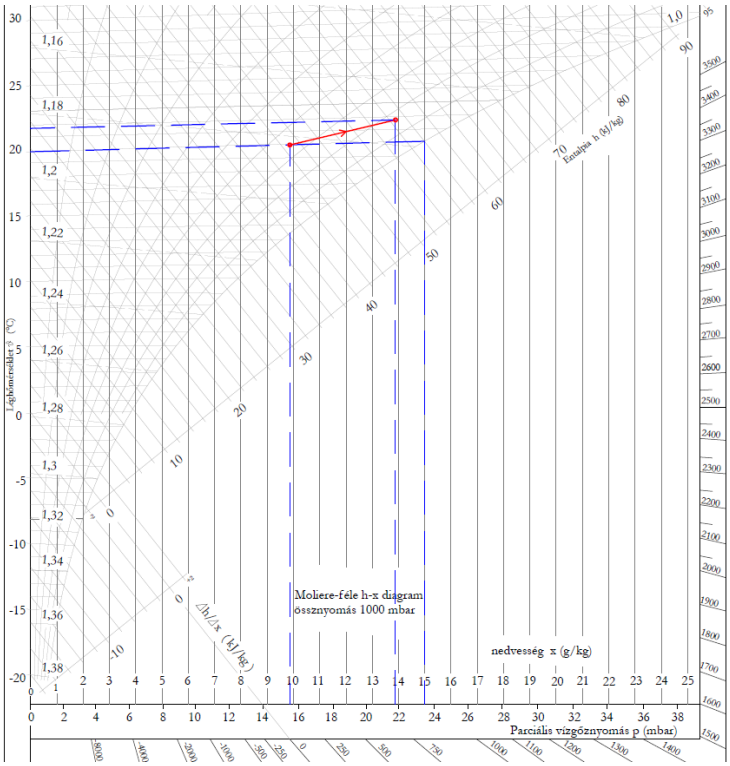
$$G_p = \Delta x \cdot m_{sz} \rightarrow (x_b - x_{sz}) = \frac{G_p}{m_{sz}} \rightarrow x_b = \frac{G_p}{m_{sz}} + x_{sz}$$

$$x_b = \frac{3{,}95 \cdot 10^{-4}}{0{,}069} + 0{,}00827 = 0{,}0139 \left[\frac{kg}{kg}\right] \rightarrow 13{,}9 \left[\frac{g}{kg}\right]$$

2. Belső levegő kialakuló hőmérséklete:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot (t_b - t_{sz}) \rightarrow (t_b - t_{sz}) = \frac{Q_v}{c \cdot m} \rightarrow t_b = \frac{Q_v}{c \cdot m} + t_{sz}$$

$$t_b = \frac{0{,}113}{1 \cdot 0{,}069} + 20 = 21{,}63\ [°C]$$




*15. ábra: Állapotváltozás ábrázolása Moliere-féle h-x diagramban*

3.3.3. Második számítás - Lurie-Mihajlov közelítéssel [15]

A nedves felület párolgásának tömegárama:

$$G_p = A_w \cdot c \cdot (22 + 17 \cdot w_a) \cdot (p_s - p_{am}) =$$

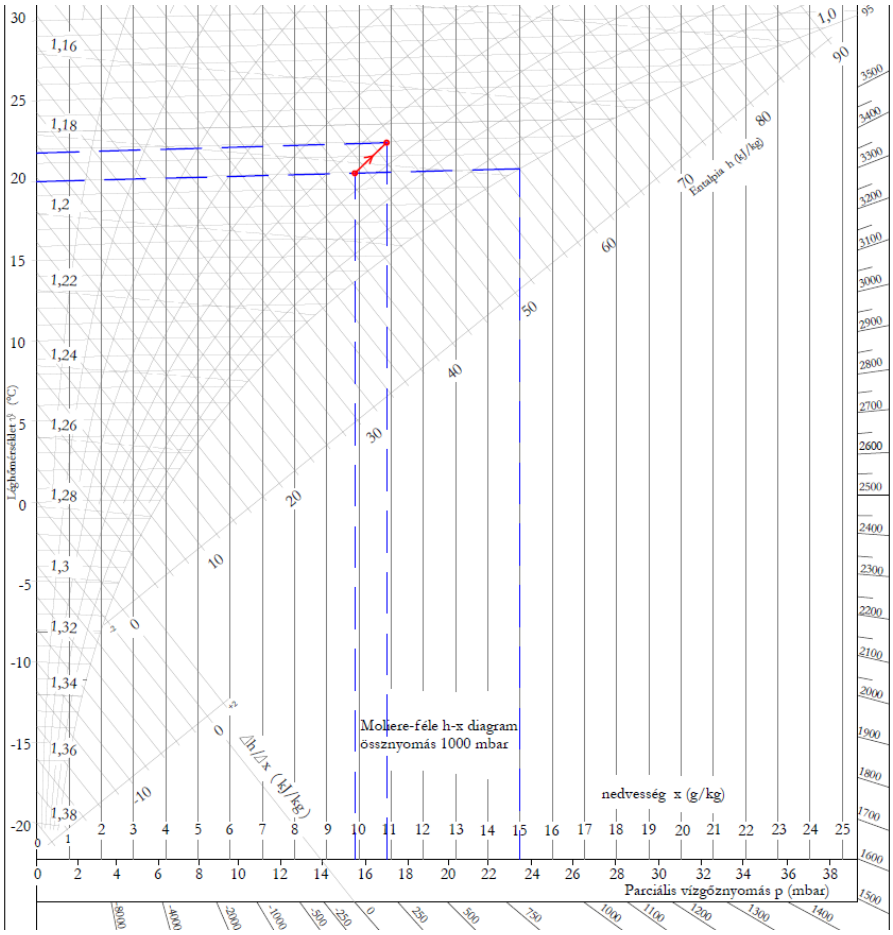
$$= 6 \cdot 0{,}0000075 \cdot (22 + 17 \cdot 0{,}1) \cdot (2350 - 1750) =$$

$$= 0{,}64 \left[\frac{kg}{h}\right] = 1{,}77 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Belső levegő kialakuló abszolút nedvesség tartalma:

$$G_p = \Delta x \cdot m_{sz} \rightarrow (x_b - x_{sz}) = \frac{G_p}{m_{sz}} \rightarrow x_b = \frac{G_p}{m_{sz}} + x_{sz}$$

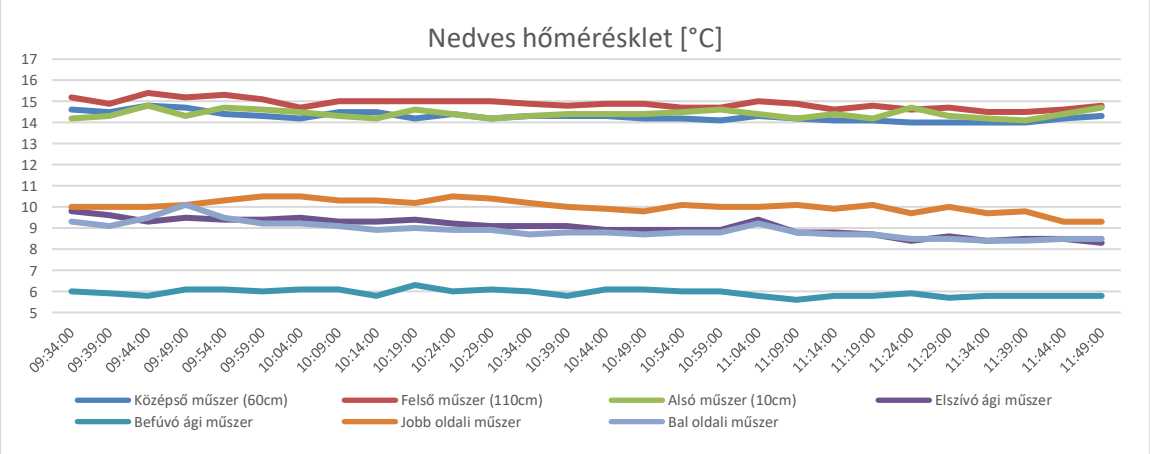
$$x_b = \frac{1{,}77 \cdot 10^{-4}}{0{,}069} + 0{,}00827 = 0{,}01085 \left[\frac{kg}{kg}\right] \rightarrow 10{,}85 \left[\frac{g}{kg}\right]$$




*16. ábra: Állapotváltozás ábrázolása Moliere-féle h-x diagramban*

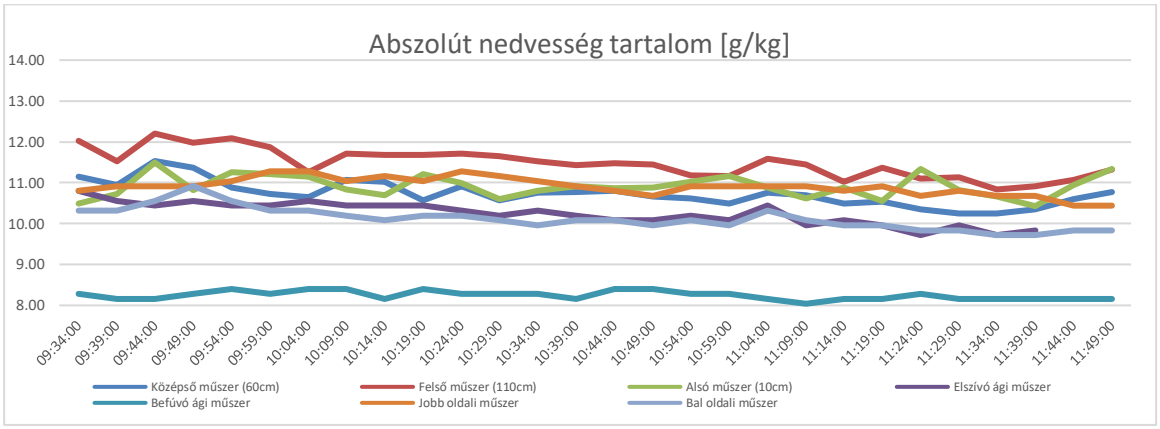
# 4. Mért eredmények bemutatása:

## 4.1. Első eset a mért terület felett nincs direkt levegőventilálás




*17. ábra*

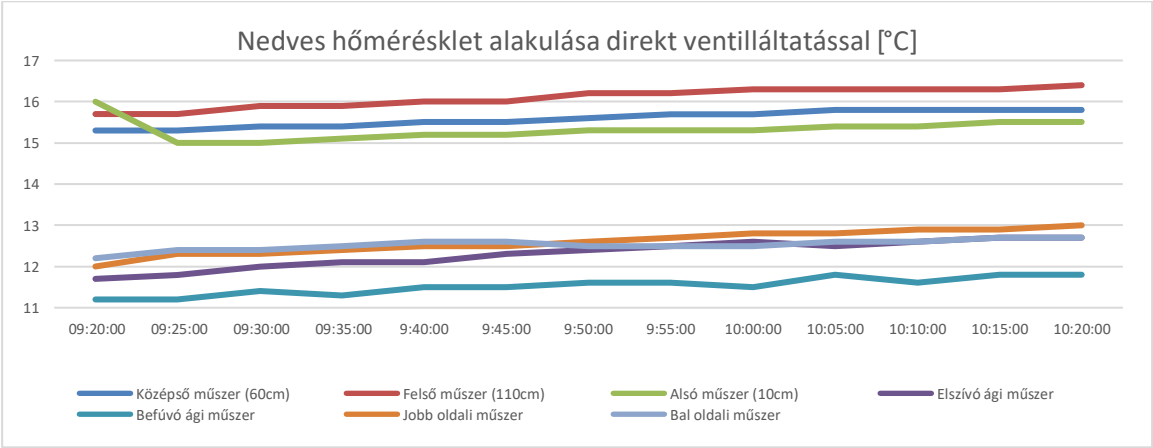
A 17-es ábrán rendkívül jól megfigyelhető, a különböző helyeken elhelyezett mérő műszerek mért adatai között kialakult különbség. A diagrammról az olvasható le, hogy a mérési terület felett elhelyezett műszerek mérték a legmagasabb nedves hőmérséklet értéket. A mérési terület körül és az elszívó ágban lévő műszerek ettől kevesebb értékeket mértek és a befúvó ágban lévő műszer mérte a legkevesebbet. Mivel a helyiség kiindulási hőmérséklete egy fix értéket vesz fel a mérés folyamán, a nedves hőmérséklet értékek vizsgálata jól szemlélteti a nedvességterhelés alakulását a mért területeken. Az így kapott adatok megfelelnek az általános elvárásnak, miszerint a vízfelülettől távolodva csökken a nedvességterhelés mértéke.



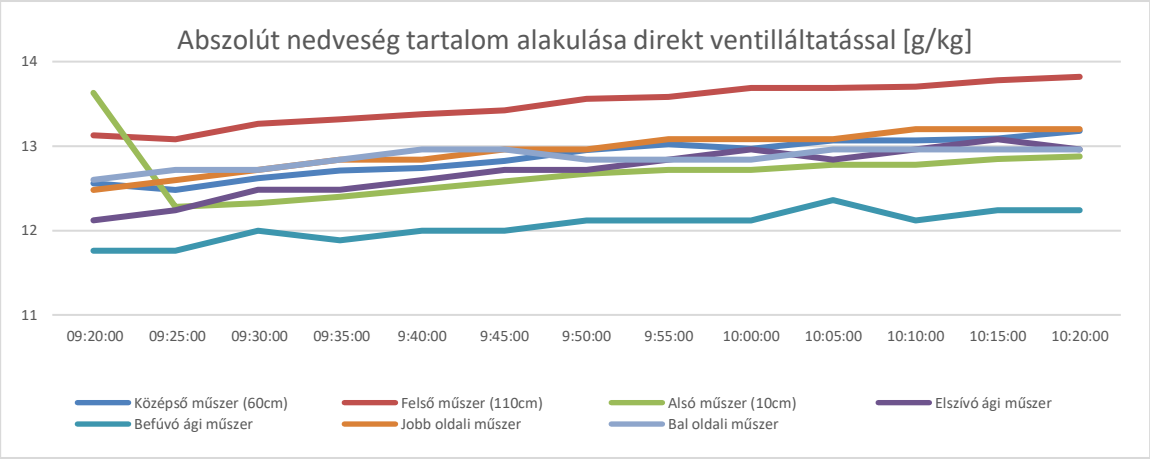

*18. ábra*

A 18-es ábrán is megfigyelhető, hogy a terület fölött lévő műszerek magasabb értéket mértek, mint az összes többi helyre kihelyezett műszer. Mivel ez mind a két ábrán tisztán látható ezért ez arra enged következtetni, hogy a levegő a vízfelület közelében a legnedvesebb és attól távolodva a nedvességterhelés mértéke csökken a helyiségben. Valamint az is megfigyelhető a diagramokon, hogy a befúvó ágban elhelyezett műszer mérte a legkisebb értékeket. Leolvasható továbbá a 18-es ábráról, hogy a befúvó és az elszívó ág között átlagban 1,96 [g/kg] abszolút nedvességtartalom különbség jött létre a mérés folyamán. A légkezelő gép beindítása után azt is megfigyelhetjük, hogy a helyiség levegőjének abszolút nedvesség tartalma csökkent a mérés végére. A helyiségben lévő levegő nedvessége ebben az esetben 10,8 [g/kg]-ról 9,72 [g/kg]-ra csökken ($\Delta x$ = -1,08 [g/kg])

## 4.2. Második eset a mért terület felett van direkt levegőventilálás




*19. ábra*

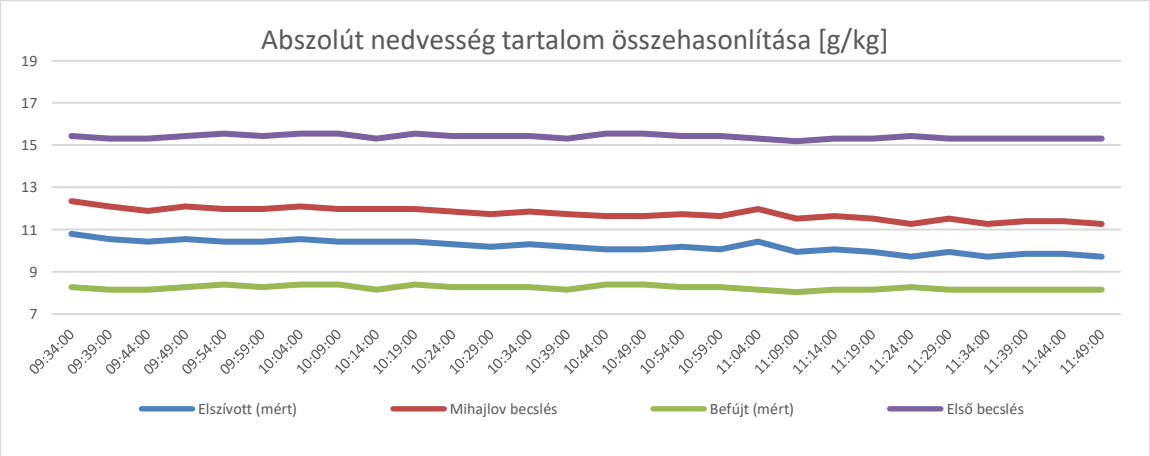



*20. ábra*

A 19-es és 20-as ábrán megfigyelhető, hogy a mért eredmények jól elkülönülnek egymástól a mérőműszerek elhelyezkedése alapján. A 20-as ábráról leolvasható, hogy a befúvó ágban elhelyezett műszer és az elszívó ágban lévő mérési eredményei azt mutatják, hogy ebben az esetben a két mérési pont között 0,64 [g/kg] abszolút nedvesség tartalom különbség jött létre. Ez az eredmény jóval kisebb mint a 19-es ábrán látható (1,96 [g/kg]) érték, de figyelembe kell azt vennünk, hogy a 19-es ábrán a már a mérés kezdeti időpontjában is nagyobb abszolút nedvesség tartalom uralkodott a helyiségben és ez az érték a mérés kezdetétől a végéig növekvő tendenciát mutat. A levegő abszolút nedvessége 12,12 [g/kg]-ról 12,96 [g/kg]-ra növekedett ($\Delta x = +0{,}84$ [g/kg]). Tehát mivel a 18-as ábrán látható nyugalmi állapotban végzett mérés esetében az abszolút nedvesség tartalom csökkent a 20-as ábrán látható ventilált állapotban pedig növekedett, ezért egyértelművé válhat, hogy a második esetben sokkal több nedvesség párolgott be a helyiség levegőjébe. Ezekből az a következtetés vonható le, hogy a befújt adott mennyiségű és állapotú levegő nem volt képes jól kezelni a bepárolgó többlet nedvességet.

# 5. Mért és számított eredmények összehasonlítása:

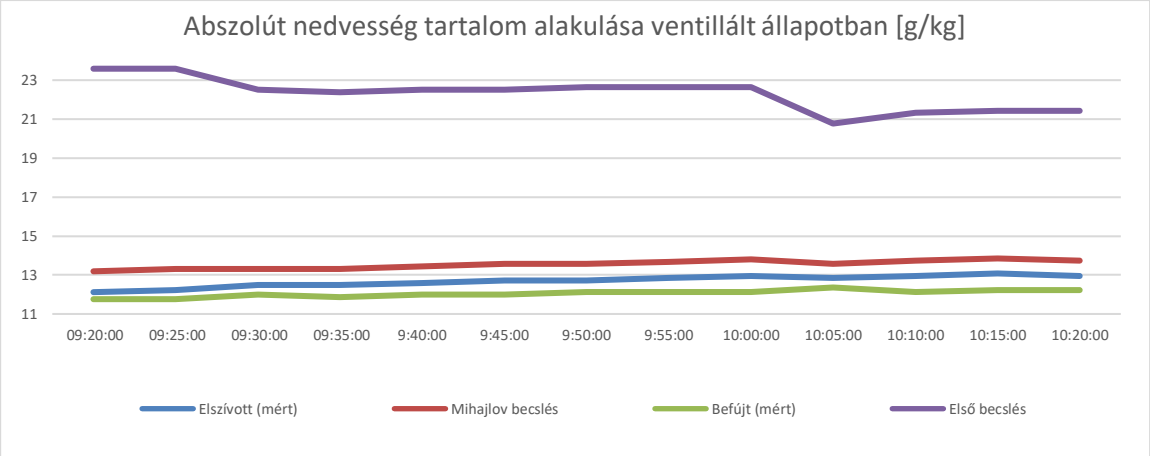
## 5.1. Nyugalmi állapot




*21. ábra*

A 21. ábráról leolvasható, hogy az elsőnek alkalmazott uszoda technikai empirikus becslő képletek eredményei lényegesen túlbecsülik a valóságban kialakult, mért eredményeket. Ebben az esetben 23°C-os volt a víz, amivel beborításra került a mérési terület, mivel ezt közelítést legtöbb esetben uszodák esetében szokták használni a függvény úgy számol, hogy a vízfelület a mérés teljes ideje alatt 23°C-os és nem hűl el. De valójában a kis hő kapacitás miatt, mivel mindössze 5 liter vízről van szó és nem kerül utánpótlásra a víz hőmérséklete a kiöntés pillanatában, vagy nem sokkal azután felvesz egy izoterm értéket. Ez annak köszönhető, hogy a víz az érintkező padlóval valamint a helyiség levegőjével hőcserébe kezdett és az uszodákban egyébiránt alkalmazott folyamatos vízhőmérséklet temperálás hiánya miatt, ez a két hűtő tényező rendkívül gyorsan elhűtötte a vizet. Ezért a hűtő tényezők miatt a számítást a pontosabb közelítések érdekében az izoterm állapotra vonatkozó hőmérséklet adatokkal kell végezni a mérés összes mért időpillanatára, de még ebben az esetben is jelentősen túl becsült értékeket kapunk. A Lurie-Mihajlov becslő képletekkel, mint ahogy az 21. ábráról is tisztán leolvasható sokkal pontosabb eredményeket kaphatunk a számítások végeredményeképpen.

## 5.2. Ventilált állapot



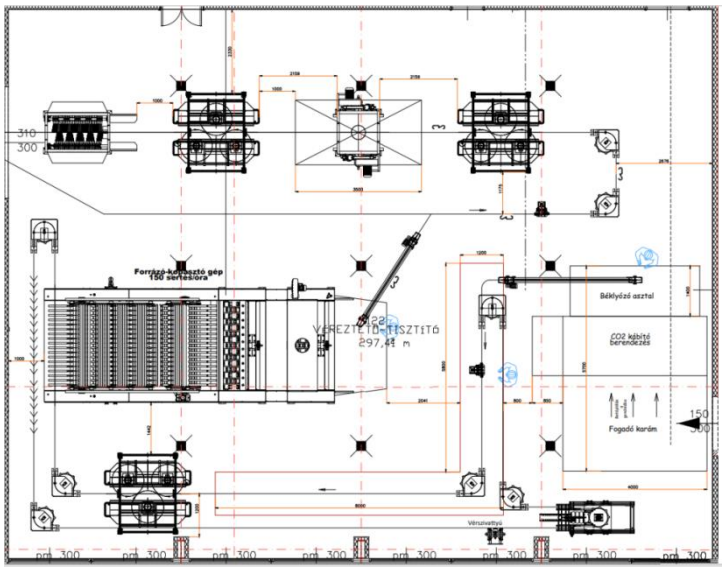

*22. ábra*

A 22. ábrán a direkt ventiláltatás mellett elhelyezett vízfelület párolgásának számolt és mért eredményei láthatóak mivel ebben az esetben jóval, nagyobb (0,71 m/s) légsebességekkel számoltam, mint a nyugalmi állapotban (0,1 m/s) a képletek még sokkal jobban túlbecsülték a keletkező nedvesség értékeket. Mivel ebben az esetben is fent állnak a víz hűtésében közbenjáró tényezők. Ebben az esetben is a víz izoterm állapotára végeztem a számításokat, az egyébként 23°C-os vízhőmérséklet helyett, de ezúttal is rendkívül túlbecsülik a nedvesség értékeket a mért eredményekkel szemben. A Lurie-Mihajlov közelítéssel ebben az esetben is pontosabb, a mért értékekhez közelebbi eredményeket kaptam. Mivel ez a megállapítás igaz mind a kettő állapotra, a diagramok alapján a Lurie-Mihajlov közelítő egyenlettel sokkal pontosabb megbecsülhető a helyiség nedvességterhelése mint az uszodák vízfelületinek nedvesség kipárolgására alkalmazott empirikus becslő képletekkel.

# 6. Számítási módszer alkalmazása valós ipari helyiségben:

## 6.1. A helyiség bemutatása

A helyiség egy valóságban létező sertés vágóhíd véreztető és tisztító nevű helyisége. Az állatok egy állatpihentető helyiségből kerülnek ide átterelésre, majd itt történik meg a kábítás és véreztetés és a sertések előkészítése a bontási folyamatra. Az előkészítési folyamat nagy mennyiségű víz felhasználásával jár, ebből kifolyólag a légtechnikai rendszer tervezéséhez fontos, hogy az így keletkező nedvességterhelés pontos meghatározásra kerüljön.




*23. ábra: A helyiség alaprajza*

## 6.2. A helyiség nedvességterhelésének számítása:

A helyiség adatai:

$T_{be}$ = 18 [°C]; $\varphi_{be}$ = 80 %; $x_{be}$ = 10,8 [g/kg]; $Q_{ny}$ = 4,8 [kW]; $Q_t$ = 2,7 [kW]; $T_v$ = 20 [°C]
$p_s$ = 21 [mbar]; $p_{am}$ = 17 [mbar]; $w_a$ = 0,2 [m/s]; $A_t$ = 872,82 [$m^2$]

### 6.2.1. A nedves falfelület meghatározása:

Mivel egy ilyen helyiség esetében az összes határoló szerkezet teljes felülete is tisztítása kerül ezért ezeknek a szerkezeteknek a felületének összegével kellene végezni a számítást. Azonban feltételezhető, hogy egyidejűleg nem lesz az összes felület teljes mértékben nedves, ezért a teljes felület 30%-val végzem el a számítást.

$$A_{vizes} = A_{teljes} \cdot 0{,}3 = 872{,}82 \cdot 0{,}3 = 261{,}85\ [m^2]$$

6.2.2. A nedves falfelület meghatározása:

A fentiekben végzett mérések alapján a helyiség nedvességterhelésének kiszámításához a Lurie-Mihajlov közelítést alkalmazom.

$$G_p = A_v \cdot c \cdot (22 + 17 \cdot w_a) \cdot (p_s - p_{am}) =$$

$$= 261{,}85 \cdot 0{,}0000075 \cdot (22 + 17 \cdot 0{,}2) \cdot (2050 - 1680) = 18{,}46 \left[\frac{kg}{h}\right] =$$

$$= 5{,}13 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg}{s}\right]$$

## 6.3. A helyiség légtechnikai igényinek számítása:

Falfelületek teljes beborításához szükséges levegő mennyiség:

A helyiségben érintőleges légvezetési rendszer kerül alkalmazásra, a falakon kialakuló nedvesség elszállításának elősegítése miatt, ebből kifolyólag, a szükséges légmennyiség előzetesen, a beborítani kívánt felületek nagysága alapján kerül meghatározásra.

$$V_{sz,szük} = 5000 \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$m_{sz,szük} = \frac{V_{sz,szük} \cdot 1{,}2}{3600} = \frac{5000 \cdot 1{,}2}{3600} = 1{,}66 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Szellőző levegő abszolút nedvesség tartalmának meghatározása:

$$G_p = \Delta x \cdot m_{sz} \rightarrow (x_{be} - x_{sz}) = \frac{G_p}{m_{sz}} \rightarrow x_{sz} = -\frac{G_p}{m_{sz}} + x_{be}$$

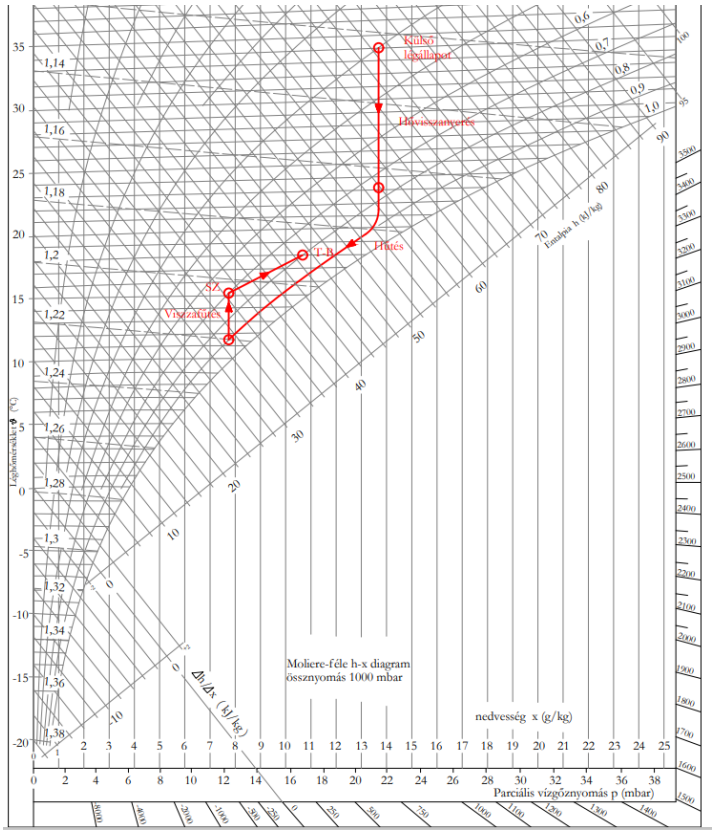
$$x_{sz} = -\frac{5{,}13 \cdot 10^{-3}}{1{,}66} + 0{,}0108 = 7{,}7 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg}{kg}\right] = 7{,}7 \left[\frac{g}{kg}\right]$$

1. Nyári állapot

   Szellőző levegő hőmérsékletének meghatározása:

   $$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot (t_b - t_{sz}) \rightarrow (t_b - t_{sz}) = \frac{Q_{ny}}{c \cdot m} \rightarrow t_{sz} = -\frac{Q_{ny}}{c \cdot m} + t_b$$

   $$t_{sz} = -\frac{4{,}8}{1 \cdot 1{,}66} + 18 = 15{,}1\ [°C]$$




*24. ábra: Állapotváltozások ábrázolása Moliere-féle h-x diagramban*

1. Téli állapot

   Szellőző levegő hőmérsékletének meghatározása:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot (t_{sz} - t_b) \rightarrow \ (t_{sz} - t_b) = \frac{Q_t}{c \cdot m} \rightarrow t_{sz} = \frac{Q_t}{c \cdot m} + t_b$$

$$t_{sz} = \frac{2{,}7}{1 \cdot 1{,}66} + 18 = 19{,}6\ [°C]$$

## Köszönetnyilvánítás

A TKP2021-NKTA-34 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

# Hivatkozások


[1] H. Zhang and H. Yoshio, "Building and Environment," Elsevier, Amsterdam, 2010.

[2] P. Wolkoff, P. Carrer and K. Azuma, "International Journal of Hygiene and Environmental Health," Elsevier, Amsterdam, 2021.

[3] A. Li, X. Hou, D. Jiang and Y. Zhao, "Building and Environment," Elsevier, Amsterdam, 2012.

[4] S. Marcsó, Légtechnika elméleti alapjai, Debrecen, 2010, p. 5.

[5] W. Peder, *Indoor air humidity, air quality, and health-An overview,* Amsterdam: Elsevier, 2018.

[6] S. Marcsó, Légtechnika elméleti alapjai, Debrecen, 2010, p. 6.

[7] S. Marcsó, Légtechnika elméleti alapjai, Debrecen, 2010, p. 15.

[8] C. K. J., J. C. Ho és S. K. Chou, *A comparative study of different control strategies,* Amsterdam: Elsevier, 2006.

[9] J. Dr. Menyhárt, Légtechnika méretezési alapadatok, 2., átdolgozott és bővített szerk., Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1978.

[10] I. Dr. Csáky, *Lég-Klimatechnika Laboratóriumi mérések,* Debrecen, 2016.

[11] „Testo-Direct.com," Testo kft., [Online]. Available: https://www.testo-direct.com/pdfs/cache/www.testo-direct.com/0632-1550/manual/0632-1550-manual.pdf. [Hozzáférés dátuma: 15 10 2022].

[12] „Testo.com," Testo kft., [Online]. Available: https://static-int.testo.com/media/12/ac/01af665a32d6/testo-saveris-2-brochure-US.pdf. [Hozzáférés dátuma: 15 10 2022].

[13] „Testo.com," Testo kft., [Online]. Available: https://static-int.testo.com/media/14/25/8a58715128ab/testo-Air-velocity-IAQ-probes-with-fixed-cable-Instruction-Manual.pdf. [Hozzáférés dátuma: 15 10 2022].

[14] G. Dr. Ákoshegyi és I. Dr. Németh, Fürdők kézikönyve, Budapest: Magyar Fürdőszövetség, 2006.

[15] I. Völgyes, Épületgépészeti számítások példatára, Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1972.