



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

Érintőleges légvezetési rendszerek légsugarainak
vizsgálata mérési módszerrel és CFD
alkalmazásával

TDK dolgozat

Készítette: Both Balázs MSc II. évfolyam

Konzulens: Goda Róbert egyetemi tanársegéd

Budapest, 2012. november 9.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	1
1. Légvezetési rendszerek főbb jellemzői és csoportosításuk	3
1. 1. Érintőleges LVR.....	4
2. Légsugarak főbb jellemzői	6
2. 1. Sík szabadsugarak	6
2. 2. Részlegesen korlátozott légsugarak	8
3. Érintőleges LVR-k vizsgálatának általános módszerei	10
4. Érintőleges LVR-k méréses vizsgálata	10
4. 1. Vizsgálati célok.....	10
4. 2. A sebesség- és hőmérséklet mérésére vonatkozó főbb követelmények.....	11
4. 3. A vizsgált légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata	12
4. 4. A mérések lefolytatása	13
5. Kiértékelés.....	17
5. 1. Mérési sorozat kiértékelése	17
5. 2. Izotermikus levegőbevezetés	18
5. 3. Hűtött légbefűvés	25
Összefoglalás.....	28

Ábrajegyzék

1. ábra: Légvezetési rendszer sémája
2. ábra: Légvezetési rendszerek kiválasztása
3. ábra: Résbefűvő kialakítása és főbb méretei
4. ábra: Sík szabadsugár metszete
5. ábra: Sebesség- és térfogatáram változása sík szabadsugárban
6. ábra: Coanda-effektus
7. ábra: Érintőleges LVR
8. ábra: A mérés kapcsolási vázlata
9. ábra: Íriszes légmennyiség-szabályzó
- 10-11. ábra: Mérési sík
12. ábra: Befűvási térfogatáram változtatása izotermikus állapotban
13. ábra: Befűvási térfogatáram változása hűtésnél
14. ábra: Dimenziótlan sebességeloszlás – eredeti
15. ábra: Dimenziótlan sebességeloszlás – mérési pontok sűrítése után
16. ábra: Logaritmizált dimenziótlan sebességeloszlás
17. ábra: Sebességprofil a kifűvási keresztmetszetben – eredeti
18. ábra: Sebességprofil a kifűvási keresztmetszetben – mérési pontok sűrítése után
19. ábra: Sebességprofil a befűvástól távolodva – mérési pontok sűrítése után
20. ábra: Sebességprofil a tapadási pont közelében – mérési pontok sűrítése után
21. ábra: Sebességprofil a fali levegőrétegben – mérési pontok sűrítése után
22. ábra: Maximális sebesség helyének változása
23. ábra: Tapadási pont helyzetének változása izotermikus befűvás esetében
24. ábra: Tapadási pont helyzetének változása hűtött befűvás esetén
25. ábra: Anizotermikus légsugár közepes túlhőmérséklete

Táblázatok

1. táblázat: Mérési pontok és sorozatok számának növelése
2. táblázat: Befűvási térfogatáram értékek izotermikus állapotban
3. táblázat: Befűvási térfogatáram értékek hűtött esetben
4. táblázat: Re-szám változása izotermikus befűvásnál
5. táblázat: Re-szám változása hűtött befűvásnál

Jelölésjegyzék

A_0 – résbefúvó keresztmetszete [m^2],

Ar_T – teremre vonatkozó Archimedes-szám [1],

$c_{p,keverék}$ – szellőző levegő (mint gázkeverék) közepes izobár fajhője [J/kgK],

F – írisz állása a légmennyiség-szabályzón,

g – gravitációs gyorsulás [m/s^2],

H – helyiség belmagassága [m],

L – résbefúvó hossza [m],

LVR – légvezetési rendszer,

n - légcsereszám [$1/h$],

N – mérési pontok száma,

p – átlagnyomás az áramló közegben [Pa],

$\dot{q}$ - a helyiség fajlagos eredő hőterhelése [W/m^2],

Re_0 – Reynolds szám a befúvási keresztmetszetben,

s_0 – rés szélessége [m],

t_0 – befújt levegő száraz hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],

T_0 – szellőző levegő száraz hőmérséklete [K],

t – a kívánt konfidenciaszinthez tartozó paraméter, értéke megtalálható az *M. mellékletben*,

$t_{\text{átlag}}$ – átlagos száraz hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],

t_i – i. pontban mért száraz hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],

t_k – környezeti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],

t_{zm} – légsugár átlagos száraz hőmérséklete z irányban [$^{\circ}\text{C}$],

u_0 – befújt levegő sebessége [m/s],

$u_{\text{átlag}}$ – átlagos légsebesség [m/s],

u_i – i. pontban mért légsebesség [m/s],

u_{max} – légsugárban mért maximális sebesség [m/s],

$u_{\text{max}/2}$ – légsugárban mért maximális sebesség fele [m/s],

$\dot{V}_0$ - befújt levegő térfogatárama [m^3/s ; m^3/h],

$\dot{V}$ – térfogatáram pillanatnyi értéke [m^3/s ; m^3/h],

x – horizontális koordináta [m ; mm],

x_{umax} – maximális sebesség helye vízszintes irányban [mm],

z – vertikális koordináta [m ; mm].

Görög betűk

β – köbös tágulási együttható [-],

Δp_{mp} – mérőperemmel mért nyomáskülönbség [Pa],

ΔT – szellőző- és távozó levegő hőmérséklet különbsége [K],

ρ_0 – befűjt levegő átlagos sűrűsége [kg/m³],

σ_t – hőmérséklet szórása [°C],

σ_u – sebesség szórása [m/s],

$\vartheta_0 = t_k - t_0$ – befűvási túlhőmérséklet [K],

ϑ_{zm} – közepes túlhőmérséklet [K],

ν – levegő kinematikai viszkozitása [m²/s].

Bevezetés

Az érintőleges légvezetési rendszerek széleskörű alkalmazása nemcsak a komfort épületgépészetben, hanem az élelmiszeriparban is jellemző. Ezen LVR-k egyik gyakran alkalmazott légbevezető eleme a résbefúvó anemosztát, melyből a levegő többnyire sík szabadsugaraként lép be a térbe. Ez a légsugár a befúvástól adott távolságra egy meghatározott felülettel érintkezik, aminek következtében részlegesen korlátozott légsugarat kapunk. Ennek köszönhetően az érintkezési felület közelében definiálható egy „tapadási pont”, ahol egy átmeneti tartományt követően érvényesül a Coanda-effektus, így a belépő légsugár feltapad a felületre, majd azon „kúszva” halad tovább. A tapadási pont helyzetének ismerete két szempontból is nagyon lényeges. Egyrészt fontos tudni, hol jelentkezik a Coanda-effektus, hiszen minél nagyobb a levegő „kúszva” megtett távolsága az adott felületen, annál jobb a szellőzés hatásossága. Másrészt ügyelnünk kell arra, hogy a sík szabadsugarakra érvényes összefüggések nagy része a korlátozott légsugarakra már nem alkalmazhatók.

Az érintőleges LVR-k vizsgálatával a hazai- és külföldi szakirodalom évtizedek óta foglalkozik. Lényeges tudni azonban, hogy az ezekben rögzített törvényszerűségek többnyire általános, egyik oldalról sem határolt sugarakra érvényesek. Az épületgépészet komplexitása ugyanakkor megköveteli a rendszerszemléletű vizsgálatot, így lényeges szempont, hogy az érintőleges LVR-ket az üzemeltetési- és/vagy telepítési viszonyok mellett vizsgáljuk.

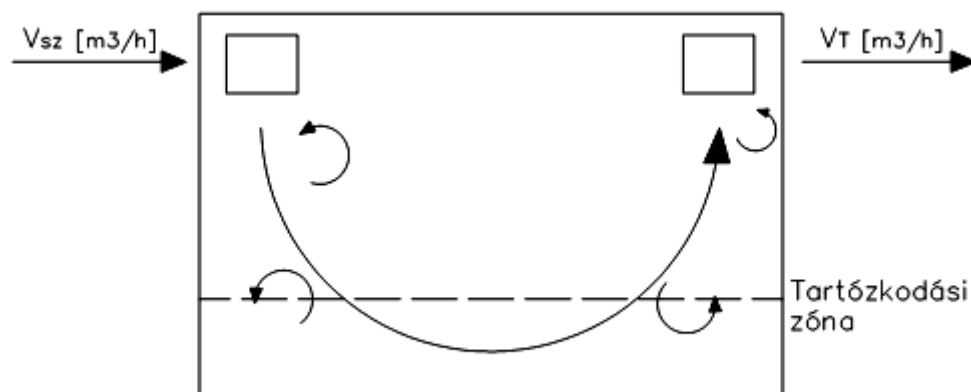
Tavalyi dolgozatunkban a BME Légtécnika Laboratóriumában egy résbefúvó anemosztáttal ellátott helyiség áramlási viszonyait vizsgáltuk. A laborban kialakított és a gépészeti gyakorlatban preferált, függőleges befúvás – függőleges elszívás konfigurációhoz jelenleg igen kevés a referált szakirodalom, így a probléma megoldására első körben a mérési vizsgálati módszert alkalmaztuk. A befúvási térfogatáram változtatásával különböző mérési sorozatokban bemutattuk a tapadási pont helyzetének változását három beállásban: izotermikus-, ferdeszögű izotermikus- és hűtött befúvás. A sebességmező mérése alapján vizsgáltuk a falon kúszó levegőréteg vastagságát, és bemutattuk a helyiség határoló szerkezetének a belépő légsugárra gyakorolt hatását. Láttuk, hogy a tapadási pont változásának pontosabb leírásához további mérési sorozatok felvétele szükséges. Célnak tűztük ki továbbá a mérési eredmények CFD-vel történő összehasonlítását.

Idei dolgozatunkban a mérőrendszer átalakításával és további mérési sorozatok felvételével kívántuk pontosítani a tapadási pont változásának leírását. Bemutatjuk, hogy a hűtött levegő befűvése hogyan módosíthatja a belépő légsugár viselkedését. További vizsgálati célnak tűztük ki a légsugár sebességprofiljának meghatározását, figyelembe véve a tapadási pont sugárra gyakorolt hatását. A sebességmező mérésének segítségével vizsgáljuk a falon „kúszó” levegőréteg viselkedését. A kiértékelés során látni fogjuk, hogy a mérési sorozatok- és pontok számának növelése miként pontosítja a korábbi vizsgálati eredményeinket.

Mindemellett a mérési adatokkal validáljuk a numerikus modellt, majd kvalitatív módon szemléltetjük a helyiségben kialakuló szellőzési viszonyokat.

1. Légvezetési rendszerek főbb jellemzői és csoportosításuk

A helyiségbe bevezetett primer légáram impulzusa a zárt tér nyugvó levegőjét karakterisztikus mozgásba hozza, ezáltal szekunder áramlásokat indukál (1. ábra). Ezeket a primer- és szekunder áramlásokat együttesen *légvezetési rendszereknek* (továbbiakban LVR) nevezzük.



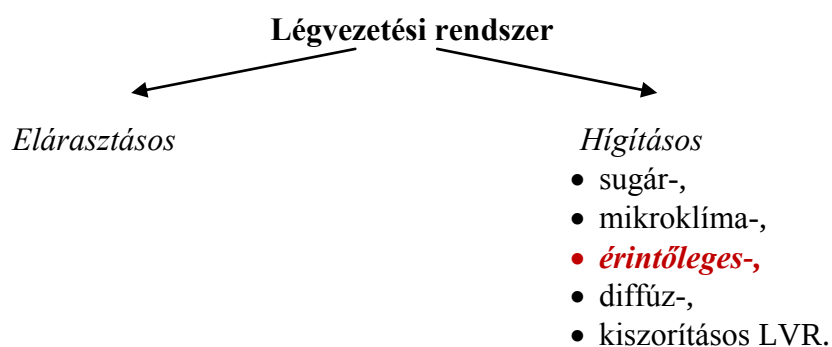
1. ábra: Légvezetési rendszer sémája

[9]

Az LVR-k lényeges szerepet töltenek be a légtechnikai rendszerekben belül, hiszen a levegővezetés módja jelentősen meghatározza a légátöblítés *hatásosságát*, a tartózkodási zónában mérhető *komfortérzetet* és a szellőztetés *gazdaságosságát* [5]. A helyiség rendeltetésének megfelelően kiválasztott LVR-kel szemben támasztott főbb követelmények a következők:

- huzathatás elkerülése,
- homogén átöblítés, a levegő rövidre záródásának elkerülése,
- a belső légállapotra és a tartózkodási zónára előírt szellőzési paraméterek azonosságának biztosítása.

A helyiségben kialakuló áramlási viszonyok alapján az LVR-k csoportosítása:



[9]

1. 1. Érintőleges LVR

Mint azt a *Bevezetés*ben leírtuk, az érintőleges LVR-ket széles körben alkalmazzák a komfort épületgépészetben és a gépészeti eljárástechnikában is [7]. Ezen légvezetési rendszerek gyakori alkalmazásának három legfontosabb előnye a következő:

- 1) a tangenciális levegő bevezetés miatt kialakuló *Coanda-effektus* révén növelhető a szellőzési hatékonyság a helyiségben,
- 2) üvegfelületeken, épülethatároló szerkezetek felületén elkerülhető a kondenzáció és
- 3) a levegő befűvése legtöbbször a tartózkodási zónán kívül történik, így a huzathatás okozta diszkomfort érzet kialakulása elkerülhető.

Hátrányként említhető a rövidre záródási hajlam, ami abban az esetben jellemző, ha a befűvő- és elszívó anemosztátok túl közel kerülnek egymáshoz. Ebben az esetben az LVR nem, vagy csak minimális mértékben végzi el a klimatizált tér légátöblítését. További jellegzetesség, hogy a helyiség maximális fajlagos hőterhelése $< 60 \text{ [W/m}^2\text{]}$ és a megvalósuló légcserezszám kisebb, mint 7 [1/h] .

Ismeretes, hogy valamennyi LVR kiválasztásának alapja az adott helyiségre számított *Archimedes-szám* (Ar_T), ami a tehetetlenségi- és a gravitációs erők viszonyát adja meg. A levezetést mellőzve, általános alakban felírva kapjuk, hogy:

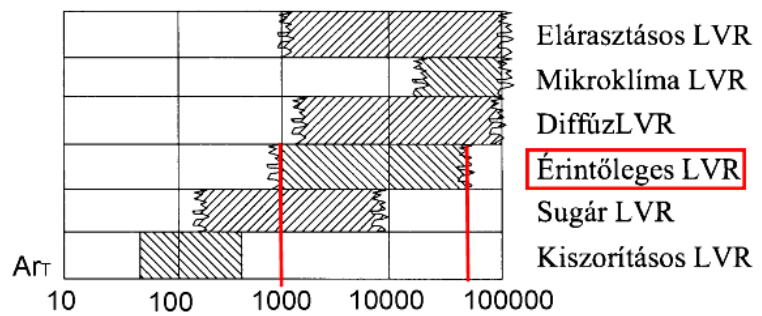
$$Ar_T = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot z}{u_{\text{átlag}}^2} \quad [1] \quad (1)$$

Az épületgépészeti gyakorlatban azonban a fenti egyenlet speciális alakját alkalmazzák, amely tartalmazza a tervezési alapadatokat.

$$Ar_T = g \cdot \frac{1}{T_0 \cdot \rho_0 \cdot c_{p, \text{keverék}}} \cdot \left(\frac{\dot{q}}{H^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{n^3} \right) \quad [1] \quad (2)$$

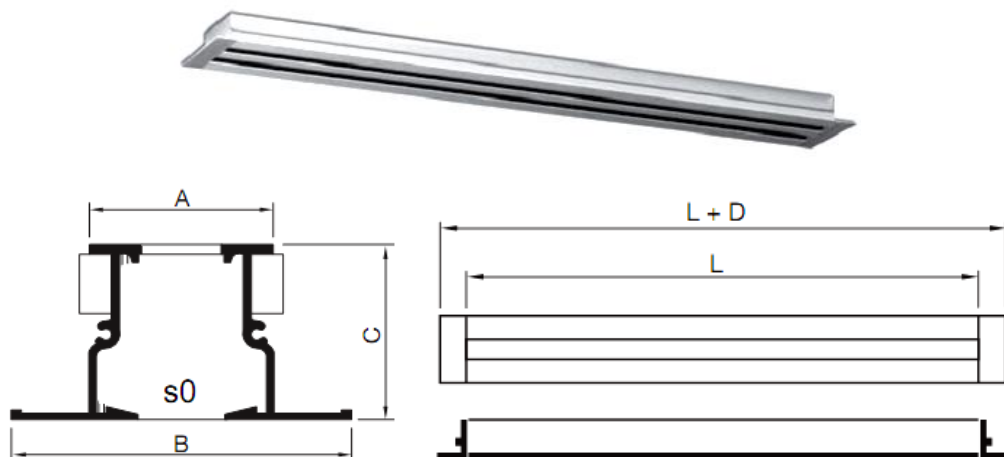
[9]

Abban az esetben, ha a tervezés során többféle LVR is alkalmazható, a (2) összefüggés alapján történik a megfelelő megoldás kiválasztása a 2. ábra segítségével [10].



2. ábra: Légvezetési rendszerek kiválasztása [10]

Az érintőleges légvezetési rendszerek egyik gyakran alkalmazott légbevezető eleme a *résbefúvó anemosztát*, melyet főként *irodaházakban*, *kiállítótermekben*, *bevásárlóközpontokban*, *lakóhelyiségekben* és egyes *ipari létesítményekben*, mint például *hűtőházakban*, *hűtőkamionokban* alkalmaznak [5], [7]. A különböző gyártók katalógusaiból kiválasztható résbefúvók legfőbb paraméterei: *hossz (L)*, *rés szélessége (s₀)*, valamint *a rések száma* (3. ábra) [10].



3. ábra: Résbefúvó kialakítása és főbb méretei [10]

A résbefúvóból a levegő többnyire *sík szabadsugárként* lép be a térbe, majd a befúvástól meghatározott távolságra érintkezik az épületszerkezettel, vagy egy másik légsugár határoló felületével. Utóbbi esetben a Coanda-effektus miatt már korlátozott/részlegesen korlátozott a légsugár, ami két problémát is eredményez. Egyrészt a szellőzés hatásosságának szempontjából lényeges ismernünk azt a pontot, ahol a Coanda-effektus jelentkezik. Másrészt ügyelnünk kell arra, hogy részlegesen korlátozott légsugaraknál az impulzustétel már nem alkalmazható.

[9]

A leírtak alapján a következő pontban áttekintjük a légsugarak legfontosabb jellemzőit.

2. Légsugarak főbb jellemzői

Az 1. pontban felsorolt LVR-k közös jellemzője, hogy a helyiségbe bevezetett levegő *szabad-, részlegesen korlátozott-,* vagy pedig *korlátozott légsugarat* képez.

Szabad légsugárról akkor beszélünk, ha egy meghatározott nyílásból kivezetett közegsugarat semmilyen felülettel nem határolunk.

Részlegesen korlátozott a légsugár, ha a helyiségbe bevezetett közegsugarat a befűvónyílástól meghatározott távolságra valamilyen épületszerkezettel, vagy egy másik légsugár burkolófelületével határoljuk.

Korlátozott légsugarak esetében a belépő közegsugár egy-, vagy mindkét oldalról érintkezik az épületszerkezettel, vagy egy másik légsugár határoló felületével.

[9]

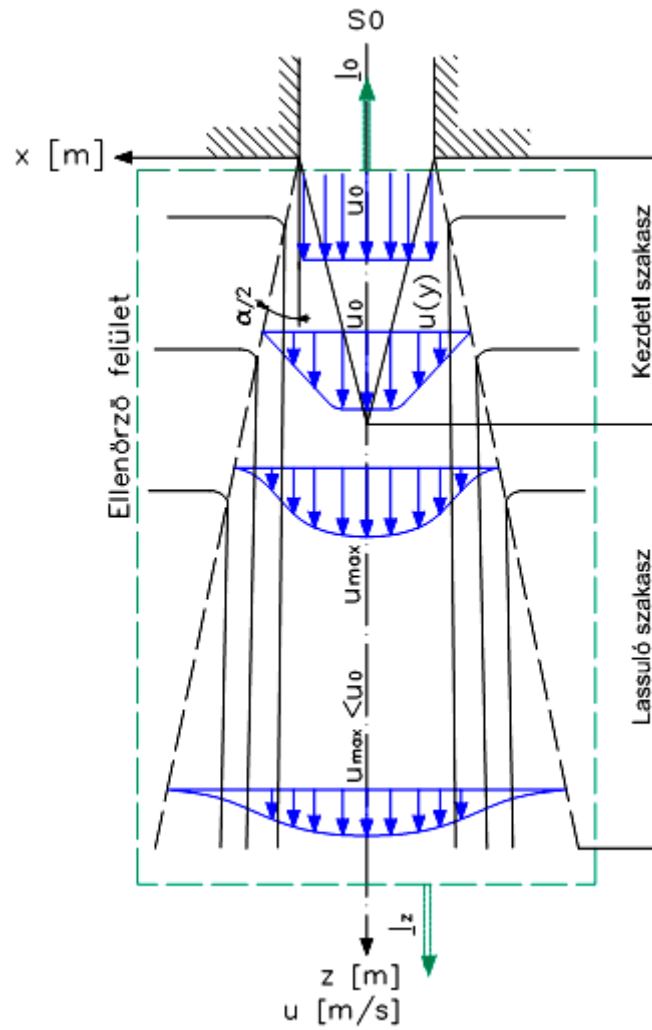
2. 1. Sík szabadsugarak

Ismeretes, hogy ha $L/s_0 > 40 \dots 50$, akkor a légbefűvő elemet *résnek* nevezzük [9]. A 4. ábrán egy s_0 szélességű résből kilépő sík szabadsugár metszete látható. Tavalyi [3] dolgozatunkban részletesen foglalkoztunk a szabadsugarakra vonatkozó elméleti összefüggésekkel, így most csak a kiértékelés szempontjából legfontosabb tudnivalókat ismételjük át.

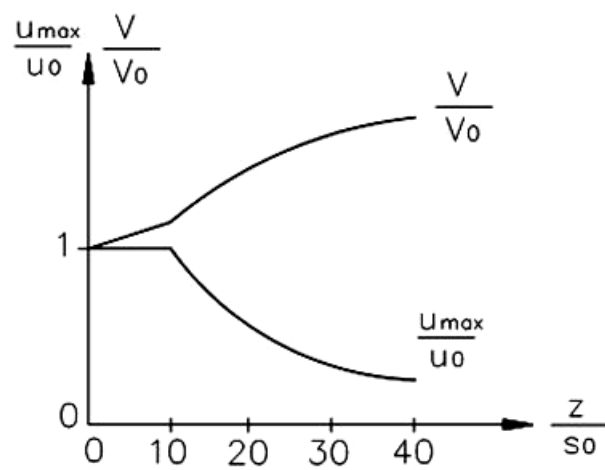
Azt a kb. $5s_0$ hosszúságú szakaszt, ahol a sugár keresztmetszetének legalább egy pontjában a sebesség azonos a kifűvási sebességgel (u_0), *kezdeti szakasznak* nevezzük. Egy átmeneti tartomány után az ezt követő *lassuló szakaszban* az axiális irányú sebesség nagysága ($u_{\max}$) fokozatosan csökken. [8]

A mérési adatok kiértékelésének szempontjából lényeges ismernünk a szabad légsugarakra vonatkozó törvényszerűségeket, a *Prandtl-axiómákat* (1904) [9].

- 1) A bevezetett levegő fokozott turbulens impulzuscsere révén mozgásba hozza a környezet nyugvó levegőjét, melyet *injektál* a sugár belsejébe (a tengely mentén mért térfogatáram a befűvástól távolodva növekszik, 5. ábra).
- 2) Az 1) axióma miatt a távolság növekedésével a *sugár szélessége* fokozatosan *növekszik*.
- 3) A fokozott turbulens impulzuscserehez szükséges energiát a sugár belsejéből nyeri, ezáltal a befűvástól mért z távolság növekedésével a *tengelysebesség csökken* (5. ábra).



4. ábra: Sík szabadsugár metszete [9]

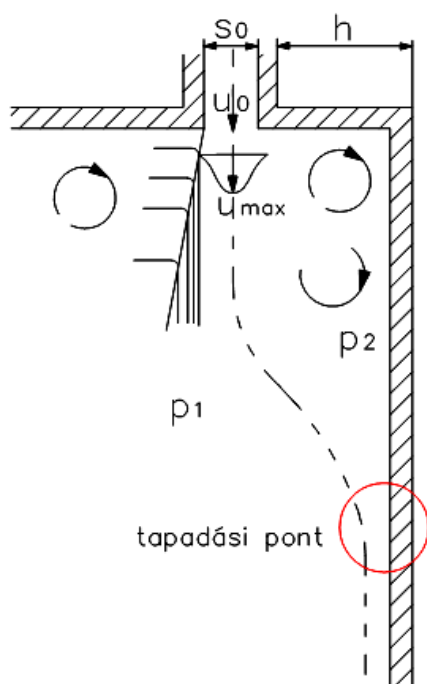


5. ábra: Sebesség- és térfogatáram változása sík szabadsugárban [8]

Mivel az áramvonalak a sugáron belül párhuzamosak, így a sugár és környezet közötti nyomásdifferencia zérus. A 4. ábrán szaggatott vonallal jelölt ellenőrző felület mentén az impulzusok egyensúlyban vannak, tehát az impulzus nagysága a befúvásnál ugyanakkora, mint a befúvástól mért z távolságban ($I_0 = I_z$).

[9]

2. 2. Részlegesen korlátozott légsugarak [8], [9]



6. ábra: Coanda-effektus

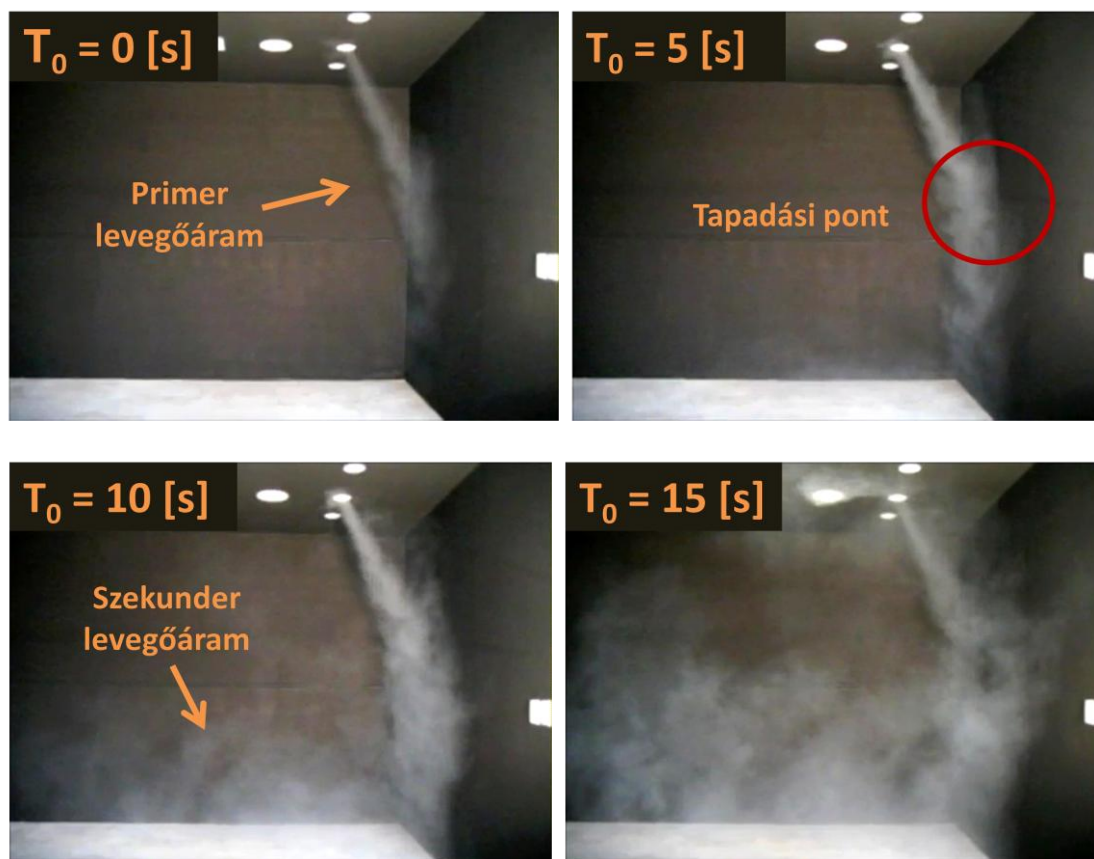
A Bevezetésben olvashattuk, hogy érintőleges LVR alkalmazásakor nagyon sok esetben a belépő sík szabadsugárból részlegesen korlátozott légsugarat kapunk. Amennyiben $h/s_0 < 30...50$, akkor a légsugár tengelye a 6. ábrán látható módon elhajlik. Ebben az esetben az impulzustétel helyett *Euler II. tételét* kell alkalmaznunk, melyet tavalyi dolgozatunkban már ismertettünk. A részlegesen korlátozott légsugarak esetében jelentős szerepe van a Coanda-effektusnak, melynek lényege a következőkben foglalható össze.

A résbefúvó anemosztát közelében lévő felület görbíti a belépő légsugár áramvonalait, így azokra merőlegesen

a nyomás változik, azaz a görbületi középpont felé haladva csökken ($p_2 < p_1$) a 6. ábrán látható módon.

Ennek eredményeként a légsugár és a falfelület között kialakul egy *negatív túlnyomásos tér*, aminek hatására a levegő *feltapad* a falfelületre. A falon „kúszó”, meghatározott vastagságú levegőrétegre érvényes a tapadás törvénye: a felület közvetlen közelében a sebesség értéke zérus, majd attól távolodva az áramlás jellegétől függően fokozatosan növekszik.

A 7. ábrán egy kör keresztmetszetű befúvóelemmel ellátott érintőleges LVR belépő légsugara látható. Ezen jól megfigyelhető a primer levegőáram, majd ΔT idő elteltével a szekunder áramok megjelenése és a tapadási pont, valamint a falon kúszó levegőréteg.



7. ábra: Érintőleges LVR [12]

3. Érintőleges LVR-k vizsgálatának általános módszerei

Tavalyi TDK-dolgozatunkban már foglalkoztunk az érintőleges LVR-k vizsgálatának általános módszereivel és céljaival. A Légtechnika Laboratóriumban kialakított és a gépészeti gyakorlatban preferált függőleges befúvás – függőleges elszívás konfigurációhoz jelenleg kevés a rendelkezésre álló szakirodalom. Ennek megfelelően vizsgálatainkat a mérési módszerrel kezdtük, majd az így kapott eredményeket felhasználjuk a numerikus modellezéssel kapott eredmények validálására.

A CFD vizsgálatok általános céljait és elméleti hátterét előző dolgozatunkban [3] részletesen bemutattuk. A numerikus szimuláció készítése jelen dolgozat írásakor folyamatban van, az eredmények a szóbeli előadás időpontjára várhatók.

4. Érintőleges LVR-k mérési vizsgálata

4. 1. Vizsgálati célok

A [3] dolgozatunkban ismertettük, hogy az előzetesen felvett mérési pontok és sorozatok száma elegendő a szekunder áramlások- és a padlófelület torlasztó hatásának kimutatására. Láttuk azonban, hogy a tapadási pont helyzetének változását legpontosabban további mérési sorozatok felvételével tudjuk meghatározni. A fal közelében lefolytatott sebességmérés eredménye alapján javasoltuk a mérési pontok számának növelését.

A fentiek ismeretében a megvalósítani kívánt vizsgálati céljaink a következők:

- sebesség- és hőmérséklet mérése a befúvás környezetében,
- sebesség- és hőmérsékletprofilok meghatározása a sík szabadsugárban, az átmeneti zónában és a korlátozott légsugárban,
- a „tapadási pont” helyzetének pontosabb meghatározása a térfogatáram- és a befúvási hőmérséklet változtatásával növelve a mérési sorozatok és pontok számát,
- a falra feltapadt levegősugár viselkedésének megfigyelése.

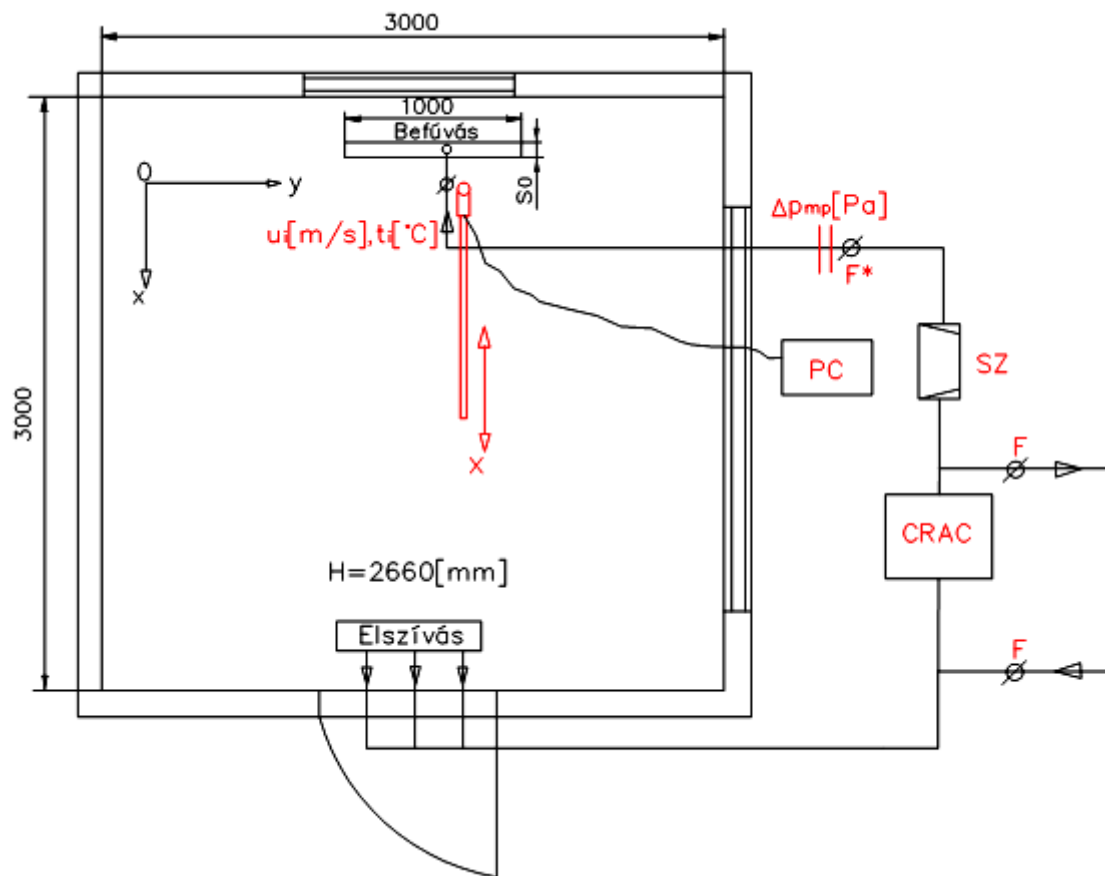
A megvalósítani kívánt céloknak megfelelően vizsgálatainkat a következő metodika szerint végeztük.

1. Irodalomkutatás, a légtechnikai mérésekre vonatkozó szabványok- és műszaki előírások feldolgozása.
2. A vizsgált helyiség geometriai felmérése, a mérőszobát kiszolgáló légtechnikai rendszer kapcsolási rajzának elkészítése, majd a mérések megtervezése.
3. Előmérések lefolytatása izotermikus állapotban.
4. Az előmérések során kapott eredmények ismeretében a mérési sorozatok és pontok számának növelése *izotermikus és anizotermikus (hűtött) légbefúvás* alkalmazása esetén.
5. Numerikus modell készítése és összehasonlítása a mérési eredményekkel.
6. Kiértékelés, szükség esetén a mérési pontok sűrítése, összefoglalás, további vizsgálati célok meghatározása.

4. 2. A sebesség- és hőmérséklet mérésére vonatkozó főbb követelmények

A méréseket az MSZ EN ISO 5167-1:2003 és az MSZ EN 24006:2002 szabványoknak megfelelően folytattuk le, melynek főbb követelményeit [3]-ban már ismertettük. Az alkalmazott szabványok a dolgozat készítésekor hatályban vannak.

4. 3. A vizsgált légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata



8. ábra: A mérés kapcsolási vázlata [3]

Jelmagyarázat:

CRAC = Computer Room Air Conditioning (precíziós klímasekrény); F^* – fojtás íriszes légmennyiség szabályzó segítségével; F – fojtó elem; SZ – légszűrő; PC – adatgyűjtő számítógép; Δp_{mp} – a mérőperemmel mért nyomáskülönbség [Pa].

A 8. ábrán látható helyiség egy 3x3 [m] alapterületű, közel 3 [m] belmagasságú, hőszigetelt mérőszoba a Légtechnikai Laboratóriumban.

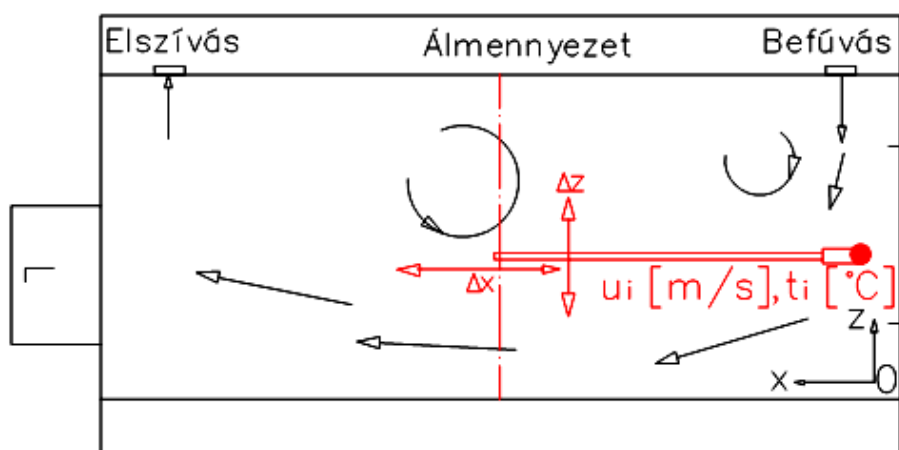


9. ábra: Íriszes légmennyiség-szabályzó [10]

A befűvő- és elszívó légcsatornák az álmennyezetben kerültek kialakításra. A levegőellátást biztosító precíziós klímasekrény névleges térfogatárama 4000 [m³/h]. A mérés során a mellékágakban lévő pillangószelepeket (F) nyitott állásba helyezve 50...150 [m³/h] levegőt juttattunk a vizsgált helyiségbe.

Az áramlást homogenizálandó, az íriszes légmennyiség szabályzót (9. ábra) a szűrő utáni légcsatorna szakaszba építettünk be (8. ábra). A légtechnikai rendszer teljes mértékben recirkuláltatott.

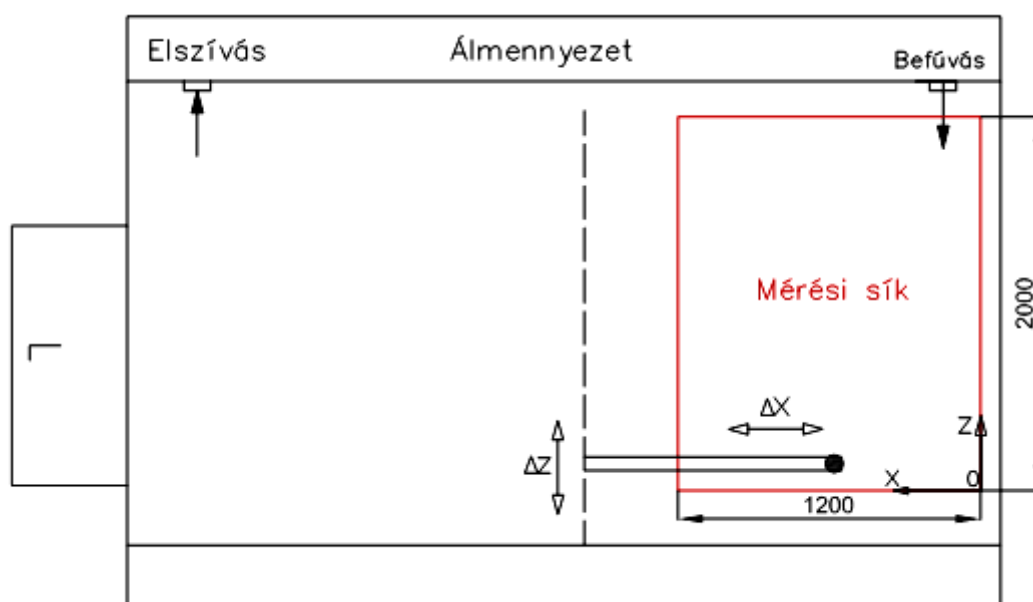
A mérőműszer pozícionálása az x-z síkban történik a beállított lépésközökkel, megfelelően szerkesztett számítógépes program segítségével (10. ábra).



10. ábra: Mérési sík

Itt fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy a 10. ábrán jelölt x-z koordináta-rendszer a mérőrendszerhez tartozik. A kiértékelésnél alkalmazott koordináta-rendszer nullpontját a befűvási pontba helyeztük (ld. 5. pont).

4. 4. A mérések lefolytatása



11. ábra: Mérési sík

A 11. ábrán látható az 1200x2000 [mm] alapterületű mérési sík, melyben a sebesség nagyságát és a száraz hőmérsékletet mértük tanszéki fejlesztésű hődrótos mérőszondával. A hődrótos mérőműszerek működési elvéről már írtunk a [3] szakirodalomban. A sebesség- és a hőmérsékletek mérése az MSZ EN ISO 5167-1:2003 és MSZ EN 24006:2002 szabványoknak megfelelően történt. A mérésekre vonatkozó főbb követelményeket [3] tartalmazza.

Az előmérések lefolytatása során a helyiség geometriájának megfelelően 1071 mérési pontot vettünk fel az x-z mérési síkban, 5 sorozatban. A beállításoknak megfelelően egy mérési sorozat lefolytatásának időtartama körülbelül 2 [óra] volt. A hődrótos mérőszonda minden pontban azonos időben mérte a levegő száraz hőmérsékletét (t_i) és sebességének nagyságát (u_i) SI mértékegységben. Az előméréseket izotermikus légbefúvás mellett végeztük stacionárius állapotban. A mérési adatokat a program txt fájlalba rögzítette.

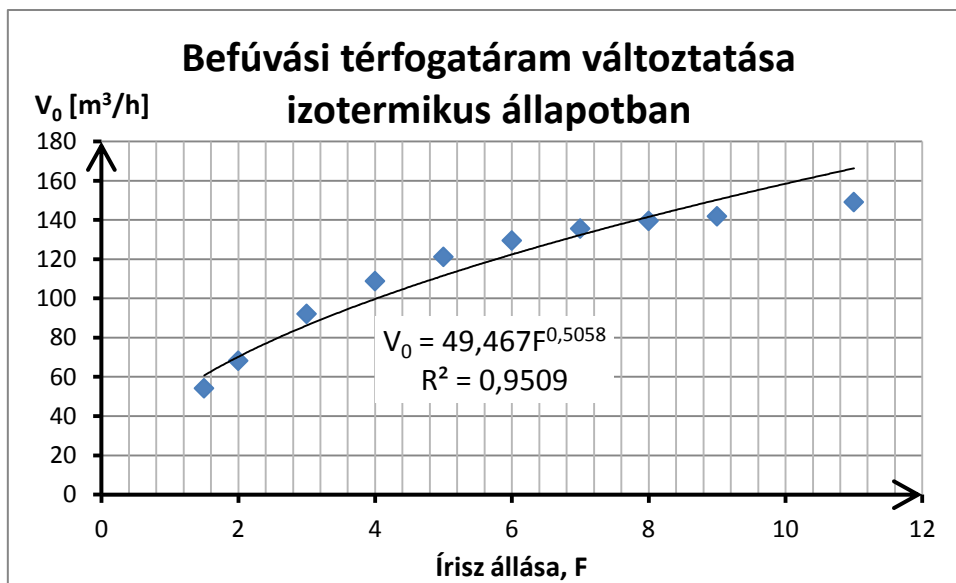
A vizsgálatokat időben állandósult állapotra vonatkozóan végeztük el. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a rendszer indítását követően az áramlás stabilizálódása érdekében 10...20 perc elteltével kezdtük el a mérések lefolytatását [1].

A mérési pontok számának növelését az 1. táblázat tartalmazza, a sorozatok számát pedig 5-ről 10-re növeltük.

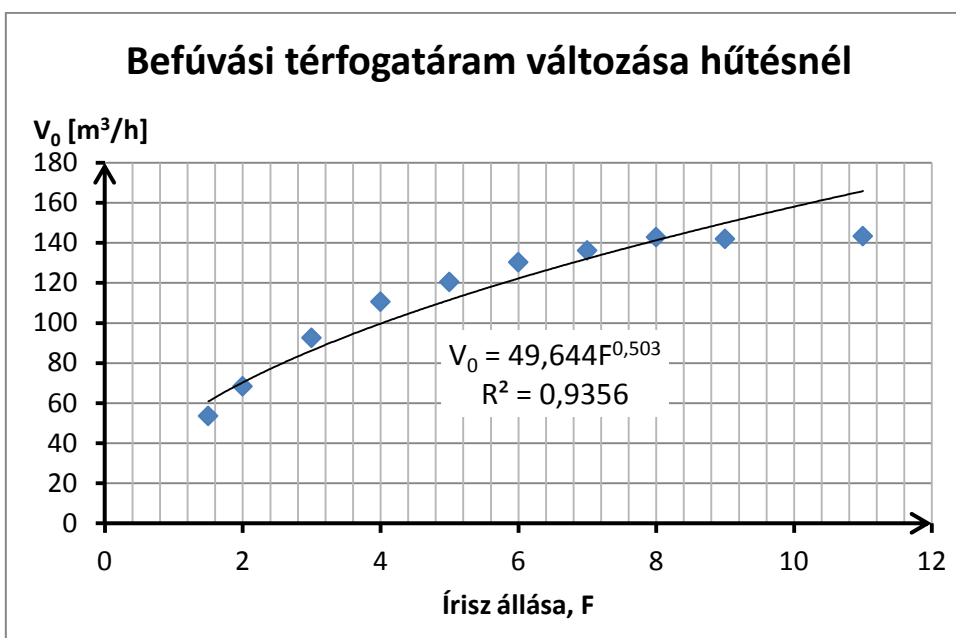
	Δx [mm]	Δz [mm]	Mérési tartomány [mm]
Előmérések	20	100	$x = 0 \dots 1000$; $z = 0 \dots 2000$
Mérési pontok sűrítése 1.	12	100	$x = 0 \dots 1200$; $z = 0 \dots 2000$
Mérési pontok sűrítése 2.	20	25	$x = 0 \dots 800$; $z = 0 \dots 2000$

1. táblázat: Mérési pontok és sorozatok számának növelése

A befúvási térfogatáramot a 9. ábrán látható íriszes légmennyiség-szabályzóval változtattuk, melynek eredménye a 12-13. ábrán tekinthető meg (M2. melléklet).



12. ábra



13. ábra

Az íriszlemez állása és a térfogatáram-változás közötti függvénykapcsolat hatványos 0,90 feletti korreláció négyzettel, aminek értéke a kiértékelés szempontjából megfelelő [11]. *Függőleges befúvást és függőleges elszívást alkalmazva tehát két beállításban végeztük a méréseket időben állandósult állapotra* [2].

Izotermikus állapotban a befújt levegő beállított hőmérséklete 25 [°C], míg hűtött befúvásnál 18 [°C]. A légköri nyomás értéke a mérések lefolytatása során állandónak tekinthető, ~1020 [mbar]. A különböző mérési sorozatokban beállított térfogatáramok értékeit a 2-3. táblázat tartalmazza.

Mérési sorozat	F [-]	t ₀ [°C]	ρ ₀ [kg/m ³]	Δp _{mp} [Pa]	V ₀ [m ³ /h]
1	1,5	25,3	1,18	101,0	54
2	2,0	24,0	1,19	90,0	68
3	3,0	25,0	1,18	72,9	92
4	4,0	25,0	1,18	57,2	109
5	5,0	25,0	1,18	45,4	121
6	6,0	25,0	1,18	36,0	130
7	7,0	25,0	1,18	29,0	136
8	8,0	25,0	1,18	23,5	140
9	9,0	25,0	1,18	19,2	142
10	11,0	25,0	1,18	14,2	149

2. táblázat: Befúvási térfogatáram értékek izotermikus állapotban

Mérési sorozat	F [-]	t ₀ [°C]	ρ ₀ [kg/m ³]	Δp _{mp} [Pa]	V ₀ [m ³ /h]
1	1,5	18,0	1,21	98,5	54
2	2,0	18,0	1,21	90,2	68
3	3,0	18,0	1,21	73,5	93
4	4,0	18,0	1,21	59,0	111
5	5,0	18,0	1,21	44,8	120
6	6,0	18,0	1,21	36,4	130
7	7,0	18,0	1,21	29,2	136
8	8,0	18,0	1,21	24,6	143
9	9,0	18,0	1,21	19,2	142
10	11,0	18,0	1,21	13,1	143

3. táblázat: Befúvási térfogatáram értékek hűtött esetben

A 2-3. táblázat adataiból jól látható, hogy az íriszes légmennyiség-szabályzó pontos és reprodukálható beállítást tesz lehetővé, hiszen az izotermikus- és hűtött befúvásnál mért térfogatáramok közötti legnagyobb hiba értéke 3,5 [%].

5. Kiértékelés

5. 1. Mérési sorozat kiértékelése [11]

A mért adatokból számított átlagos légsebesség:

$$u_{\text{átlag}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (3)$$

Az átlagos száraz hőmérséklet pedig:

$$t_{\text{átlag}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \text{ [}^{\circ}\text{C]}. \quad (4)$$

Az egyes mérési eredmények eltérése a középértéktől (deviancia):

$$\Delta u_i = u_i - u_{\text{átlag}} \text{ [m/s]}, \quad (5)$$

és

$$\Delta t_i = t_i - t_{\text{átlag}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}. \quad (6)$$

A devianciából meghatározható a mérési adatok szórása:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta u_i^2} \text{ [m/s]}, \quad (7)$$

és

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta t_i^2} \text{ [}^{\circ}\text{C]}. \quad (8)$$

Mivel minden egyes mennyiséget közvetlenül mértünk, így a hibaterjedés számítására jelen esetben nincsen szükség.

A mérési eredmények korrekt megadása a következő formában történik (95 [%]-os konfidencia szinten):

$$\text{Mért mennyiség} = \text{Átlagérték} + t \cdot \text{szórás [mértékegység]}. \quad (9)$$

A kifúvási keresztmetszetben lévő sebesség:

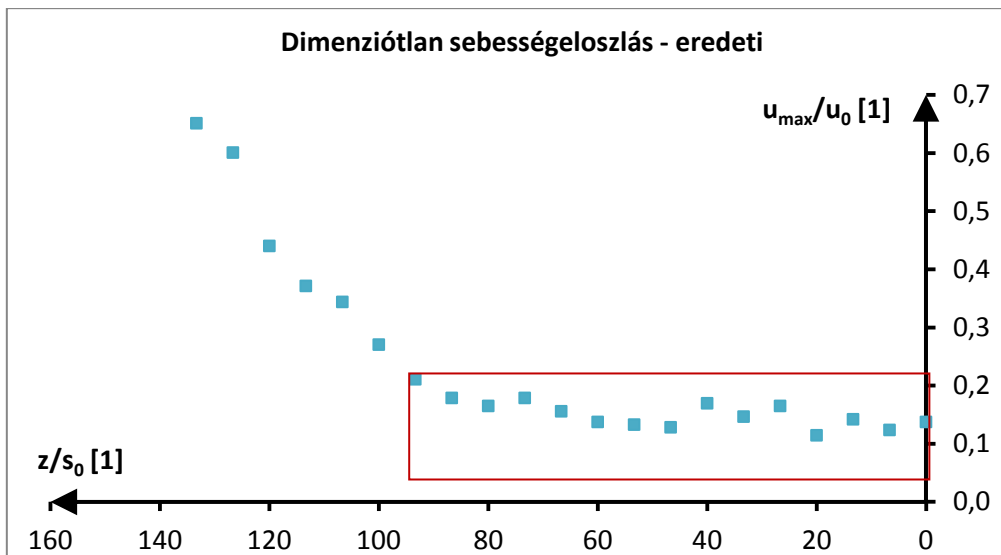
$$u_0 = \frac{\dot{V}_0}{A_0} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (10)$$

Az íriszes légmennyiség-szabályzóval beállított térfogatáram számítása [10]:

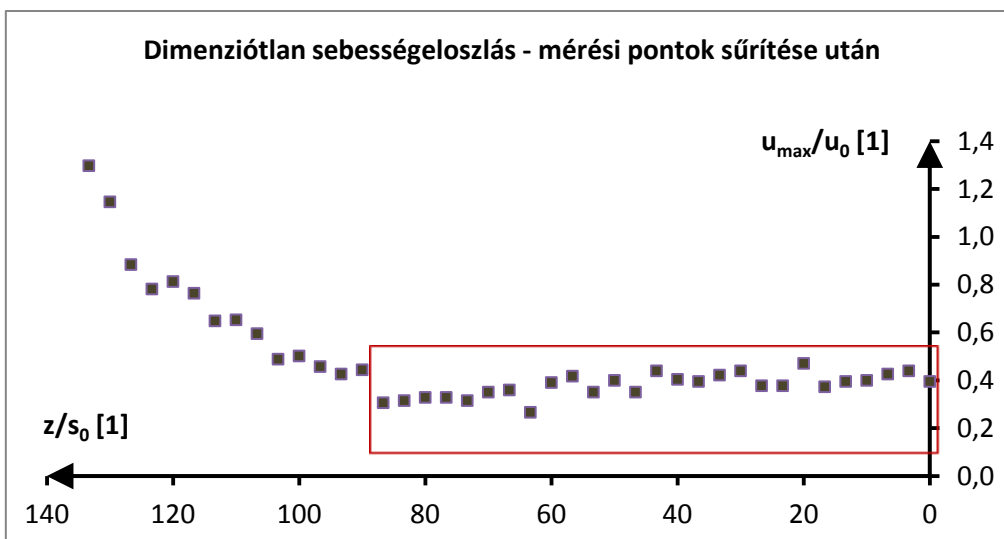
$$\dot{V}_0 = 3,6 \cdot F \cdot \sqrt{\Delta p_{\text{mp}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]. \quad (11)$$

5. 2. Izotermikus levegőbevezetés

A [2] cikkben már bemutattuk a sajátléptékben ábrázolt sebességeloszlást állandó befúvási térfogatáramra vonatkoztatva.



14. ábra

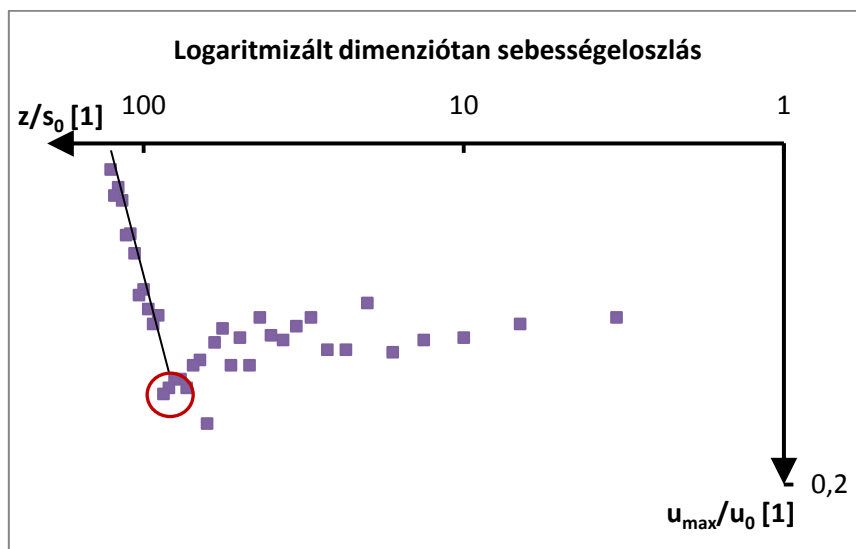


15. ábra

A 14-15. ábrán látható, hogy a mérési pontok sűrítése milyen hatással van a dimenziótlan sebességeloszlás megjelenítésére. A pirossal jelölt téglalapon belüli ponthalmaz a falon „kúszó” levegőrétegben mért sebességeloszlás, ahol az egyes pontok kiugrása a főáramlás által okozott szekunder áramlásoknak tulajdonítható. A két sebességeloszlást összehasonlítva megfigyelhető, hogy a mérési pontok sűrítésével látványosan pontosabbá válik a szekunder áramlások hatásának kimutatása.

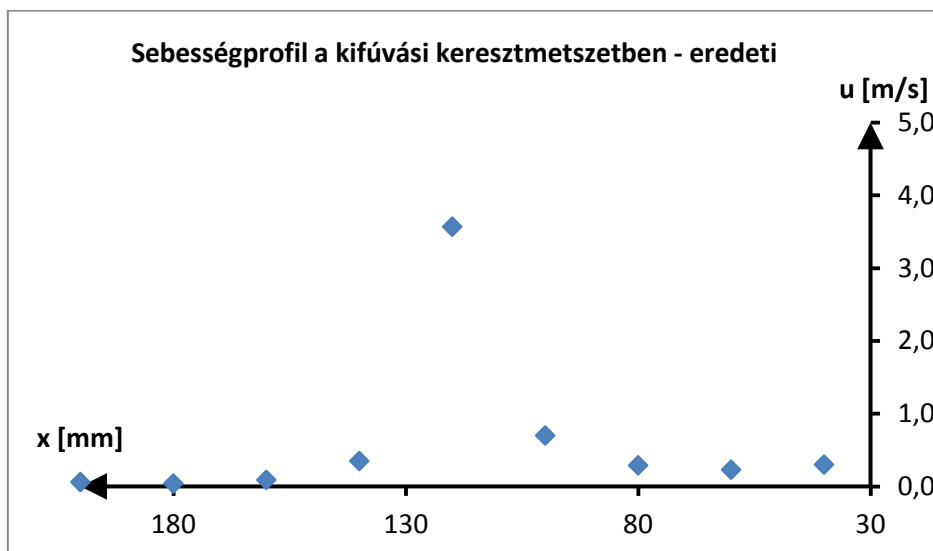
További magyarázatot igényel a 15. ábrán tapasztalható 1-nél nagyobb dimenziótlan sebesség érték. Ismeretes, hogy a Prandtl-axiómák értelmében a sugáron belül (lassuló szakaszban) mért maximális sebesség értéke a befűvástól távolodva csökken, tehát $u_{\max}/u_0 < 1$. Az ábrán tapasztalható látszólagos ellentmondás oka feltételezhetően a következő. A mérőrendszer átalakításából adódó geometria-változás miatt a mérőperem után a résbefűvóból kilépő levegő sebessége nagyobb lesz, mint a mérőperemnél leolvasott érték. Természetesen a kontinuitási egyenlet miatt a levegő térfogatárama nem változik.

A mindeddig leírtak ismeretében adódik a kérdés, hogy hol van a határ a sík szabadsugár és a korlátozott légsugár között, vagyis hol jelentkezik a Coanda-effektus. A kérdés megválaszolásához logaritmizáljuk a 15. ábrán látható diagramot. Esetünkben a kezdeti szakasz hossza körülbelül $5 \cdot s_0 = 5 \cdot 15 = 75$ [mm], majd egy rövid átmeneti tartományt követően a lassuló szakaszban a logaritmizált pontok egy egyenesre esnek (16. ábra). Ezt követően a mért pontok jelentős szóródása tapasztalható, ami a falfelület légsugárja gyakorolt hatásának tulajdonítható. A Coanda-effektus tehát ott jelentkezik, ahol a lassuló szakasz után jelentős inhomogenitás tapasztalható a sebességmezőben. Vizsgálataink alapján ez az egyik módja annak, hogy megállapítsuk a tapadási pont helyzetét (piros kör).

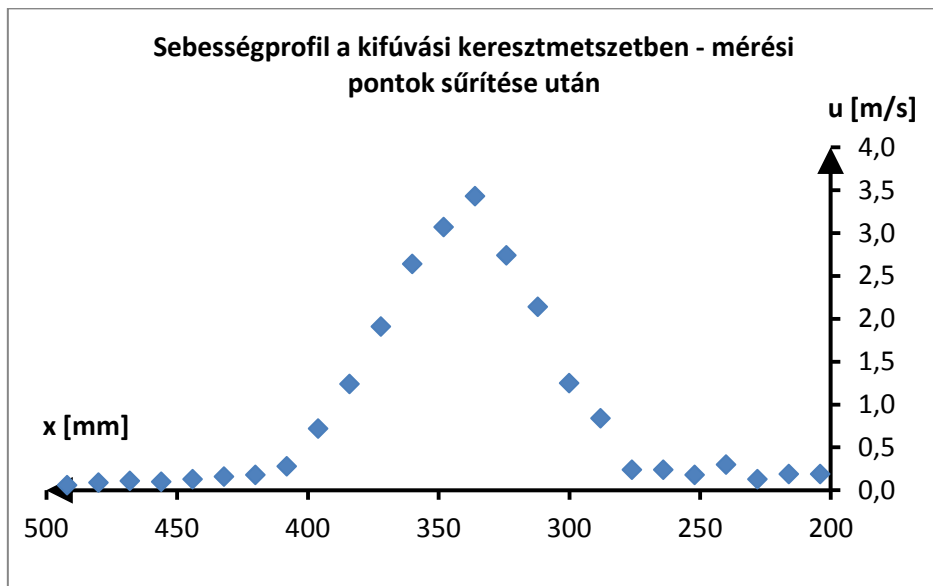


16. ábra

Korábbi mérési eredményeinkre [3] alapozva azt már megállapítottuk, hogy a befúvás közvetlen közelében mért sebességprofil közel ideálisnak tekinthető (17. ábra). Ebben a keresztmetszetben látszólag még nem jelentkeznek a szekunder áramlások hatásai. Az ábrán rajzolt sebességprofil azonban önmagában még nem elegendő arra, hogy a befúvás közelében esetlegesen jelentkező szekunder áramlások hatásait kimutassuk. Növelve a mérési pontok számát és finomítva a Δx lépésközt (10. ábra), a 18. ábrán látható sebességprofilt kapjuk eredményül.

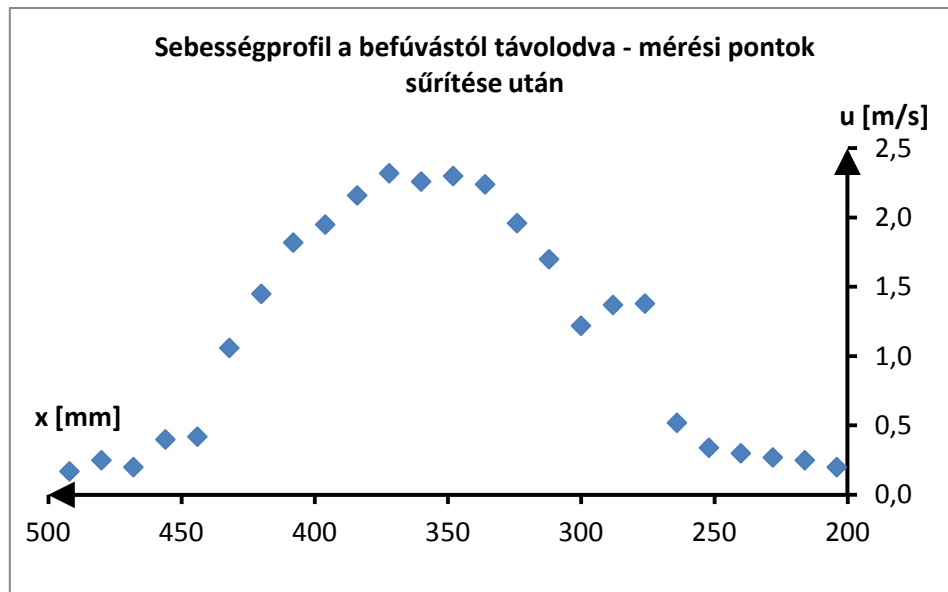


17. ábra



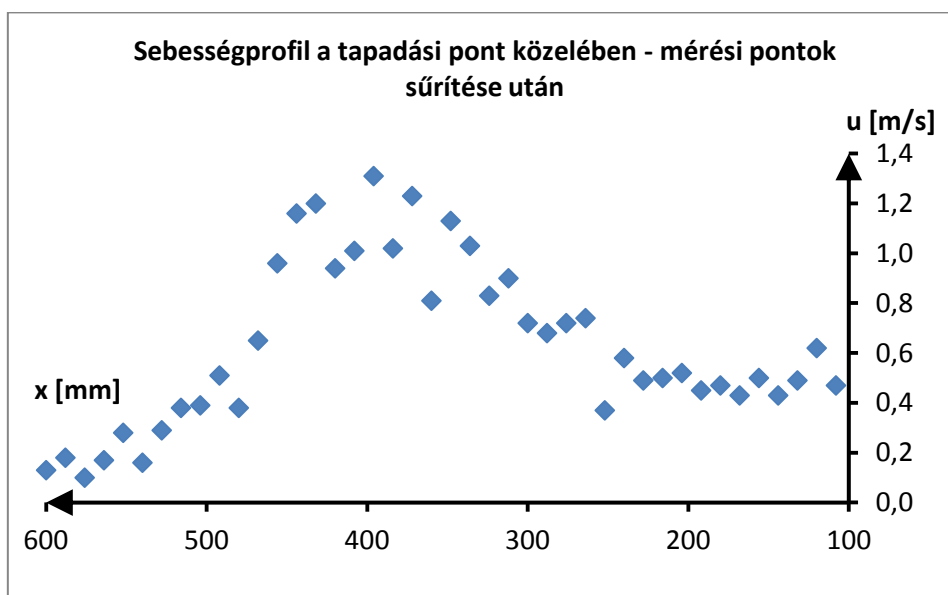
18. ábra

A 18. ábrán tapasztalható, hogy a befúvási keresztmetszet közelében még valóban nem jelentkeznek a szekunder áramlások hatásai, hiszen egyenletes sebességeloszlást kaptunk.



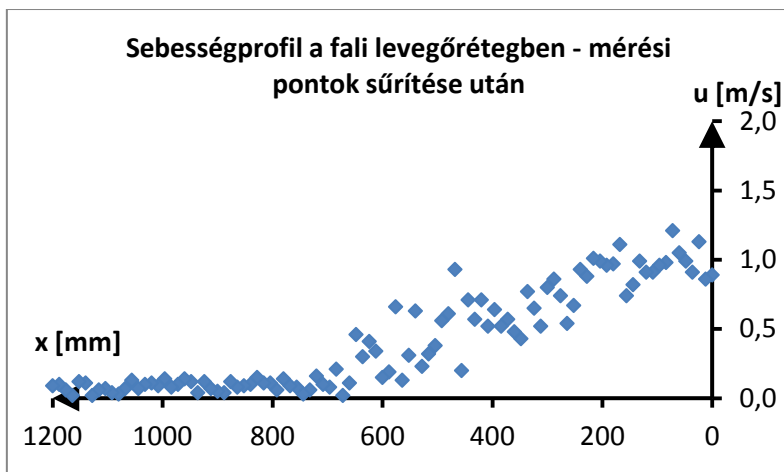
19. ábra

A befúvástól távolodva a 19. ábrán már jelentkezik a kezdeti sebességprofil „torzulása”, aminek legvalószínűbb oka a sugár körüli szekunder áramlás hatása az adott mérési keresztmetszetben. A 20. ábrán a tapadási pont közelében lefolytatott mérés eredményeként a sebességprofil jelentős inhomogenitása tapasztalható, melynek két legfőbb oka a szekunder áramlások erősödése és a falfelület torlasztó hatása. Ebben az átmeneti zónában a sík szabadsugar érkezik a falfelülettel, melynek eredményeként létrejön a tapadás, így korlátozott légsugarat kapunk.



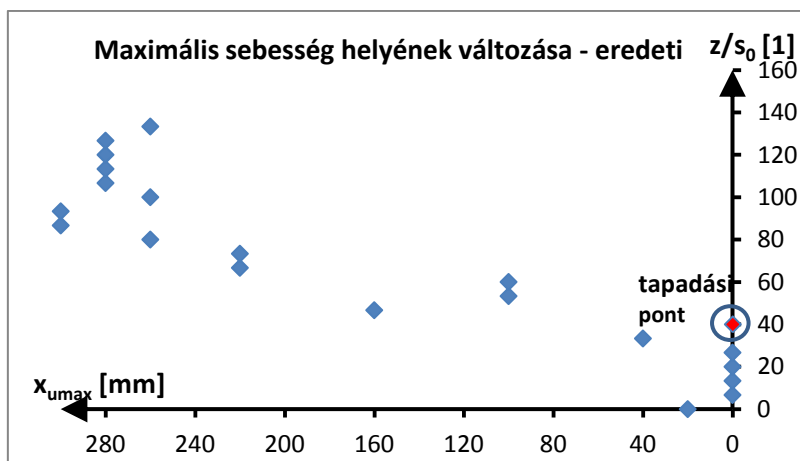
20. ábra

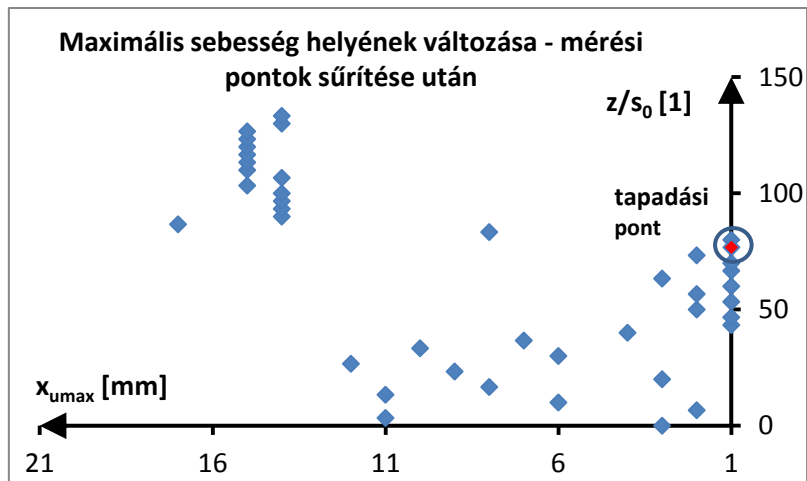
A 21. ábrán bemutatjuk a fali levegőrétegben végzett sebességmérés eredményét állandó térfogatáram mellett egy mérési keresztmetszetben ($z = \text{állandó magasságban}$). A fali levegőrétegben $x \approx 0 \dots 200$ [mm] között a sebesség közel állandó, majd a felülettől távolodva fokozatosan csökken.



21. ábra

A résből kilépő légsugárban mért maximális sebességértékeket egy diagramban ábrázolva nemcsak kvantitatív információkat kapunk a légsugár viselkedéséről, hanem kvalitatív módon is szemléltethető a légsugár tengelyének elhajlása. Ennek okaival korábban már részletesen foglalkoztunk, így most csak azt mutatjuk be, hogy a mérési pontok számának növelése hogyan módosítja a kiértékelés pontosságát.

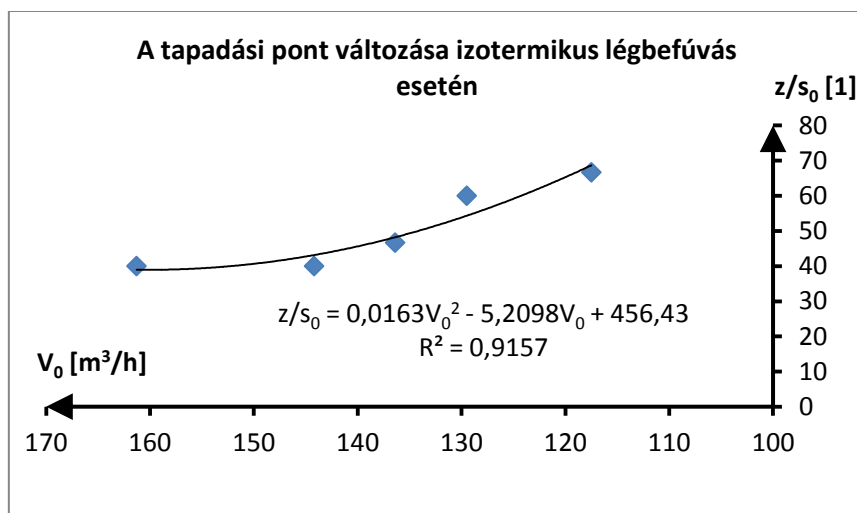


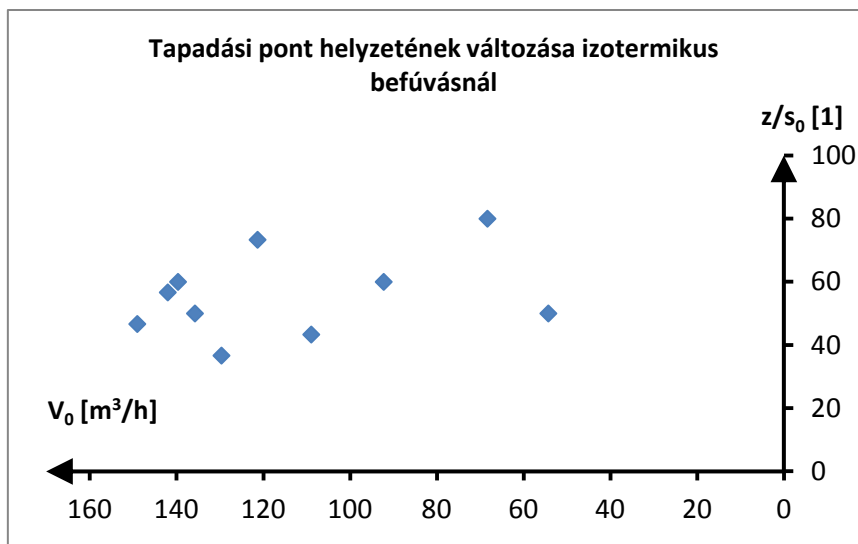


22. ábra

Megjegyzés: a 22. ábra alsó diagramjának vízszintes tengelyén szereplő számok a mérési pontok pozícióját jelölik (az Excel kiértékelést könnyítendő), és egyenes arányban állnak a [mm]-ben mért távolsággal.

A korábbi vizsgálatainknál alkalmazott módszernek megfelelően a maximális sebesség helyének változását bemutató ponthalmazból most is megállapítható a tapadási pont helyzete. Korábbi feltevésünk az volt, hogy izotermikus légbefúvásnál a térfogatáram csökkentésével a tapadási pont fokozatosan közelebb kerül a befúvási keresztmetszethez. Másképpen fogalmazva, minél kisebb a bejuttatott levegő mennyisége, annál hamarabb megindul a légsugár feltapadása a falfelületre. Vizsgáljuk meg, hogy ez a megállapítás a mérések pontosítását követően is megállja-e a helyét.





23. ábra

Tavalyi dolgozatunkban a tapadási pont változására egy másodfokú egyenlettel leírható függvényt kaptunk. Ha azonban duplázuk a mérési sorozatok számát ötről-tízre, akkor látható, hogy ez a növekedési tendencia csak egy meghatározott térfogatáram-tartományban jellemző. Korábbi munkánkban a $\sim 115 \dots 160$ [m³/h] térfogatáram tartományban mértünk, ami jó közelítéssel most is hasonló tendenciát mutat.

A pontsorozat hullámlásának oka lehet a Re-szám változása, aminek számítása esetünkben:

$$Re_0 = \frac{u_0 \cdot s_0}{\nu} [1] \quad (12)$$

Mérés ssz	$\tilde{V}_0$ [m³/h]	Re0 [-]	Áramlás típusa
1	54	1005	Lamináris
2	68	1265	Lamináris
3	92	1708	Lamináris
4	109	2017	Lamináris
5	121	2246	Lamináris
6	130	2400	Átmeneti
7	136	2513	Átmeneti
8	140	2585	Átmeneti
9	142	2629	Átmeneti
10	149	2759	Átmeneti

4. táblázat: Re-szám változása izotermikus befűvsnál

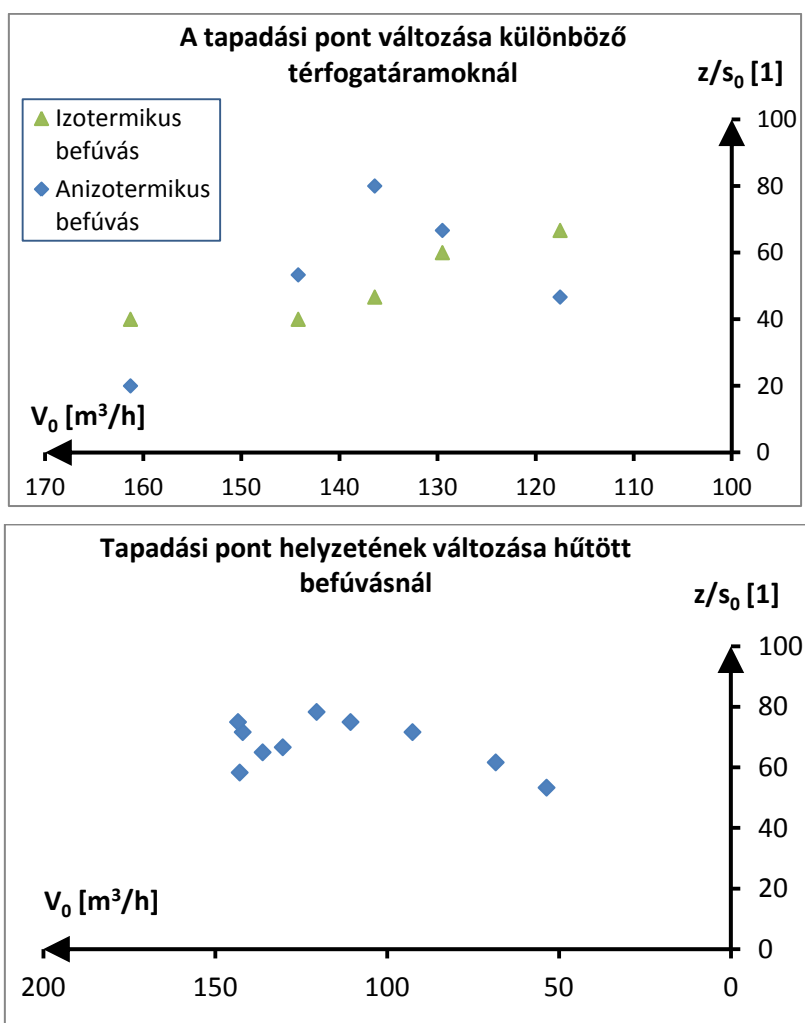
A 23. ábra alsó diagramján és a 4. táblázat adatain jól látható, hogy a törés körülbelül ott következik be, ahol az áramlás a laminárisból átmeneti tartományba vált.

A mérési adatokat és ábrákat az M1- és M3. mellékletek tartalmazzák.

5. 3. Hűtött légbefúvás

Anizotermikus vizsgálat esetében a méréseket a korábbiaknak megfelelően folytattuk le, azzal a különbséggel, hogy a befújt levegő hőmérsékletét vízhűtéssel 18 [°C]-ra csökkentettük. Az így kapott hőmérsékletkülönbség az izotermikus befúváshoz képest: $\Delta t = 7$ [K].

Korábban már megállapítottuk, hogy az anizotermikus tapadási pont növekedési tendenciája csak egy meghatározott pontig érvényes. A pontsorozatban ugyanis egy „törés” van, melytől a tapadási pont a térfogatáram csökkenésével távolodik a befúvástól.



24. ábra

A 24. ábra és az 5. táblázat adatai alapján ez a töréspont valószínűleg a Re-szám változásának tulajdonítható (lamináris → átmeneti tartomány).

Mérés ssz	$\tilde{V}_0$ [m ³ /h]	Re0 [-]	Áramlás típusa
1	54	992	Lamináris
2	68	1266	Lamináris
3	93	1715	Lamináris
4	111	2048	Lamináris
5	120	2231	Lamináris
6	130	2413	Átmeneti
7	136	2522	Átmeneti
8	143	2645	Átmeneti
9	142	2629	Átmeneti
10	143	2654	Átmeneti

5. táblázat: Re-szám változása hűtött befúvásnál

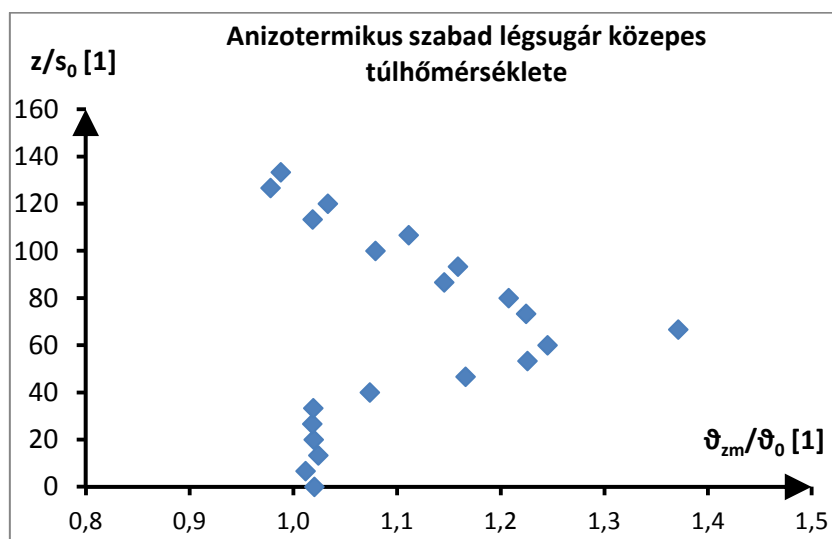
Anizotermikus légbevezetésnél további érdekesség a befűjt levegő közepes túlhőmérsékletének változása a befúvástól mért dimenziótlan távolság függvényében [4], [6].

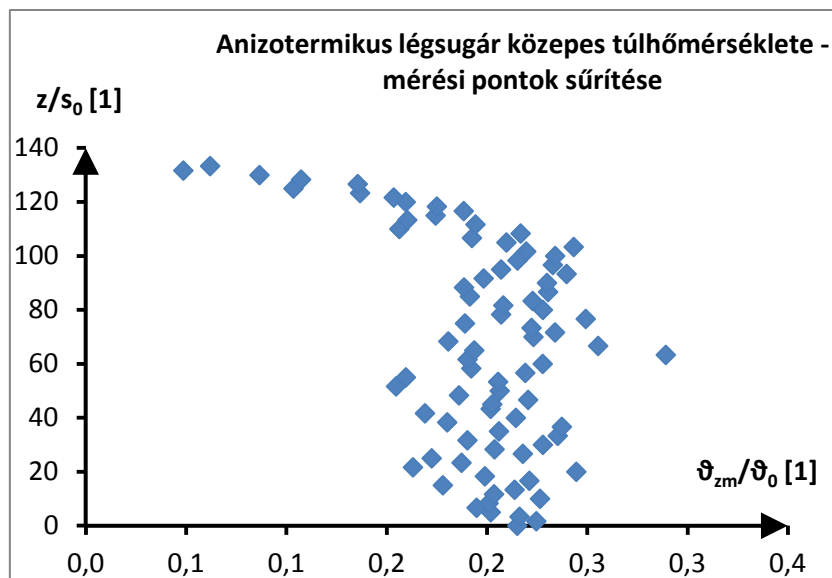
A befúvási túlhőmérséklet:

$$\vartheta_0 = t_k - t_0 \text{ [K]}. \quad (13)$$

A bevezetett légsugár közepes túlhőmérséklete:

$$\vartheta_{zm} = t_k - t_{zm} \text{ [K]}. \quad (14)$$





25. ábra

A 25. ábrán bemutatott közepes túlhőmérséklet változásból megfigyelhető, hogy a befúvástól távolodva a légsugárban mért hőmérséklet-változása (a sebességekhez hasonlóan) követik a nyomáscsökkenés irányát a fal és a befúvás közötti tartományban. A tapadási pontot követően látható, hogy a falra tapadt levegőrétegben a hőmérséklet eloszlás közel egyenletes. Minél finomabb felosztást választunk a mérési síkon belül, annál pontosabban ábrázolható a fali levegőréteg hőmérséklet-eloszlása.

A hűtött befúvás során mért adatokat és ábrákat az *M4. melléklet* tartalmazza.

Összefoglalás

Figyelembe véve a korábbi vizsgálati eredményeinket, a dolgozatban lényeges hangsúlyt fektettünk a mérési pontok és sorozatok számának növelésére. Összehasonlító ábrák segítségével bemutattuk, hogy a mérési pontok sűrítése látványosabban pontosítja a kiértékelést és adott esetben módosíthatja az eredményekből levonható konzekvenciákat.

Időben állandósult állapotra vonatkozóan diagramok segítségével részletesen ismertettük a helyiségbe belépő sík szabadsugár és a korlátozott légsugár közötti átmenetet. Láttuk, hogy a sík szabadsugár lassuló szakaszában mért pontsorozat logaritmus-léptékben történő ábrázolása és a maximális tengelysebesség helyének változása egyaránt alkalmas a tapadási pont helyzetének megállapítására.

A mérési sorozatok számának duplázásával szemléltettük a tapadási pont helyzetének változását. Láthattuk, hogy izotermikus és hűtött befúvásnál a tapadási pont hol közeledik, hol távolodik a befúvási keresztmetszethez viszonyítva. A befúvásra vonatkozó Re -szám számítására alapozva feltételeztük, hogy ez a változó tendencia az áramlás lamináris tartományból átmenetibe való átlépésének köszönhető.

A sebességmező mérése alapján vizsgáltuk a légsugarak sebességprofilját különböző mérési síkokban. Tapasztaltuk, hogy a mérési pontok sűrítésével a főáramlás által indukált szekunder áramlások hatásai precízebben kimutathatók.

Mind izotermikus, mind hűtött befúvásnál vizsgáltuk a fali levegőréteg sebesség- és hőmérséklet eloszlását, majd bemutattuk, a falra merőleges irányban hogyan változnak az említett szellőzési paraméterek.

A dolgozatban leírtuk, hogy a CFD vizsgálat készítése jelenleg folyamatban van. A validálást követően további vizsgálati céljaink:

- padlófelület közelében végzett sebességmérés, padlófelület légsugárra gyakorolt hatásának vizsgálata,
- elszívás közelében kialakuló légáramlás vizsgálata,
- helyiség belső fajlagos hőterhelésének változtatása és ennek hatása a belépő légsugárra,
- a méréses vizsgálatból kapott eredmények CFD-vel történő összehasonlítása.

Irodalom

- [1] Az áramlástan válogatott fejezetei. BME előadásjegyzet, 2011. Előadó: Dr. Vad János.
- [2] *Both Balázs, Goda Róbert*: Résbefűvő anemosztátok méréses vizsgálata érintőleges légvezetési rendszer alkalmazása esetén. Magyar Épületgépészet, LX. évfolyam, 2011/11. szám.
- [3] *Both Balázs*: Résbefűvő anemosztátok méréses vizsgálata érintőleges légvezetési rendszer alkalmazása esetén. Konzulens: Goda Róbert. TDK dolgozat, Budapest, 2011.
- [4] *Fekete – Menyhárt*: A légtechnika elméleti alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [5] *Hsin Yua, Chung-Min Liao, Huang-Min Liang*: Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: isothermal condition. Building and Environment 38 (2003) 1271 – 1279.
- [6] *Hsin Yu, Chung-Min Liao, Huang-Min Liang, Kuo-Chih Chiang*: Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: Non-isothermal condition. Building and Environment 42 (2007) 1142–1150.
- [7] *J. Moureh, D. Flick*: Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. International Journal of Heat and Fluid Flow 26 (2005) 12–24.
- [8] *Lajos T.*: Az áramlástan alapjai, 4. kiadás. Budapest, Lajos Tamás, 2008.
- [9] Légtechnikai rendszerek. BME előadás jegyzet, 2012. Előadó: Dr. Magyar Tamás.
- [10] Lindab tervezési segédlet, 2007. Elérhetőség: <http://www.lindab.hu/dokumenter/HU-04-Theory.pdf>
- [11] Mérés és jelfeldolgozás, BME előadás jegyzet, Budapest, 2008. Előadó: Dr. Huba Antal.
- [12] <http://www.youtube.com/watch?v=kT25WVwmsx8>