

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYTEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

Résbefúvó anemosztátok méréses vizsgálata érintőleges légvezetési rendszer alkalmazása esetén

TDK dolgozat

Készítette: Both Balázs MSc I. évfolyam

Konzulens: Goda Róbert egyetemi tanársegéd

Budapest, 2011. október 28.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	1
1. Résbefűvők főbb jellemzői, alkalmazási területei.....	3
2. Résbefűvő anemosztátok vizsgálatának módszerei és céljai.....	5
2. 1. Analitikus módszerek	5
2. 2. Numerikus szimuláció alkalmazása.....	6
2. 3. Méréses módszerek.....	6
2. 4. Általános vizsgálati célok	8
2. 4. 1. Anemosztátból kilépő légsugár vizsgálata	8
2. 4. 2. Hő- és huzatkomfort vizsgálata.....	8
2. 4. 3. Levegő minőségre vonatkozó vizsgálatok	8
2. 4. 3. 1. Ipari létesítmények levegőminőségi vizsgálatai	8
2. 4. 3. 2. Belső levegő minőség vizsgálata	9
3. Résbefűvő anemosztátok méréses vizsgálata	10
3. 1. A vizsgálati célok megfogalmazása	10
3. 2. Elméleti háttér.....	11
3. 2. 1. Szabadsugarak.....	11
3. 2. 2. A Coanda – effektus.....	13
3. 3. A sebesség- és hőmérséklet mérésére vonatkozó főbb követelmények	14
3. 4. A légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata	15
3. 5. A mérések lefolytatása.....	16
4. Kiértékelés.....	19
4. 1. Mérési sorozat kiértékelése	19
4. 2. Izotermikus légbevezetés.....	20
4. 3. Anizotermikus légbevezetés	26
4. 4. Ferdeszögű, izotermikus légbevezetés	28
4. 5. Javaslatok.....	31
Összefoglalás.....	32

Ábragyűjtemény

1. ábra: Légvezetési rendszerek kiválasztása	4
2. ábra: Résbefűvő kialakítása és főbb méretei	4
3. ábra: „Tapadási pont”	10
4. ábra: Sík szabadsugár	11
5. ábra: Dimenziótlan sebesség- és térfogatáram megoszlás sík szabadsugárban	13
6. ábra: Coanda – effektus.....	13
7. ábra: Hődrótos mérőszonda.....	14
8. ábra: A mérőhelyiséget kiszolgáló légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata	15
9. ábra: A vizsgált helyiség előlnézeti képe	16
10. ábra: Szabad áramlási keresztmetszet csökkenése és a szűrő nyomáscsökkenése közötti kapcsolat.....	17
11. ábra: Terelőlemezzel ellátott résbefűvő	18
12. ábra: Dimenziótlan sebességek állandó térfogatáramon	20
13. ábra: Dimenziótlan sebességek logaritmikus léptékben ábrázolva	20
14. ábra: Sebességprofil a kifűvési keresztmetszetben	21
15. ábra: A sebességprofil torzulása a kifűvéstől távolodva	21
16. ábra: Sebességprofil az érintkezési keresztmetszetben és az eloszlás függvény.....	22
17. ábra: A sűrűség- és az eloszlásfüggvény kapcsolata	23
18. ábra: Maximális sebesség helyének változása állandó térfogatáramon	24
19. ábra: A tapadási pont változása izotermikus befűvésnél.....	24
20. ábra: Sebességprofil a különböző keresztmetszetekben.....	25
21. ábra: Szabadsugár síkszögének változása	25
22. ábra: Tapadási pont helyzetének változása a befűjt térfogatáram függvényében	26
23. ábra: Anizotermikus légsugár közepes túlhőmérséklete	27
24. ábra: Ferdeszögű befűvés sebességeloszlása.....	28
25. ábra: Maximális sebesség helyének változása ferdeszögű befűvésnél.....	28
26. ábra: Leválási pont helyzetének változása ferdeszögű befűvésnél	29
27. ábra: Különböző magasságokban mért sebességprofilok.....	30

Táblázatok

1. táblázat: Beállított térfogatáramok izotermikus állapotban	17
2. táblázat: Beállított térfogatáramok anizotermikus állapotban.....	18
3. táblázat: Százalékos eltérés a beállított térfogatáramok között.....	18
4. táblázat: Beállított térfogatáramok ferdeszögű befűvés esetén	18
5. táblázat: Százalékos eltérés a beállított térfogatáramok között.....	18

Jelölések jegyzéke

A_0 – résbefúvó keresztmetszete [m^2],

A – szabad áramlási keresztmetszet a szűrőnél [m^2],

Ar_T – Archimedes-szám [-],

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

$f(u)$ – mért sebességértékek sűrűségfüggvénye,

$F(u)$ – mért sebességértékek eloszlásfüggvénye,

g – gravitációs gyorsulás [m/s^2],

Gr – Grashof szám (nehézségi erők és a tehetetlenségi erők arányát jellemzi),

H – helyiség belmagassága [m],

k – konstans [-],

L – résbefúvó hossza [m],

LVR – légvezetési rendszer,

n - légcsereszám [$1/h$],

$\vec{n}$ - normális irányú koordináta [m],

N – mérési pontok száma,

p – átlagnyomás az áramló közegben [Pa],

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

R – az áramvonalak görbületi sugara [m],

Re – Reynolds szám (tehetetlenségi erők és a viszkozus erők arányára jellemző),

s_0 – rés szélessége [m],

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

T_0 – szellőző levegő száraz hőmérséklete [K],

t – a kívánt konfidenciaszinthez tartozó paraméter, értéke megtalálható az *M8. 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 – befűjt levegő sebessége [m/s],

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

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

u_{max} – maximális sebesség [m/s],

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

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

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

V – helyiség légtérfogata [m^3],

x – horizontális koordináta [m; mm],

$x_{1/2}$ – szabadsugárban a maximális sebesség feléhez tartozó horizontális távolság [m; mm],

x_h – a szabadsugar határának távolsága a tengelytől [m; mm],

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

X – valószínűségi változó,

z – vertikális koordináta [m; mm].

Görög betűk

β – köbös tágulási együttható [-],

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

Δp_{sz} – szűrő nyomásvesztesége [Pa],

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

μ – várható érték,

ρ_0 – befűjt levegő átlagos tömegsűrűsége [kg/m^3],

σ_t – hőmérséklet szórása [$^{\circ}\text{C}$],

σ_u – sebesség szórása [m/s],

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

ϑ_{zm} – közepes túlhőmérséklet [K].

Bevezetés

Az érintőleges LVR-re jellemző résbefúvó anemosztátok alkalmazása nemcsak az épületgépészetben, hanem számos vegyipari, élelmiszeripari területen igen elterjedt. Általánosságban elmondható, hogy minden LVR-nél alapvető fontosságú a helyiségbe bevezetett levegőt jellemző sebesség- és hőmérsékletmező ismerete. Az említett fizikai mennyiségek jelentősen befolyásolják a légátöblítés hatásosságát, az adott helyiségben tartózkodók komfortérzetét, valamint a szellőzés gazdaságosságát.

A résbefúvó anemosztátok jellegzetessége, hogy a levegő legtöbbször sík szabadsugárként hagyja el a kifúvási keresztmetszetet. A gazdaságos, komfortos és hatékony szellőzés biztosítása érdekében lényeges ismernünk ezen légsugarak viselkedését, melyek leírására különféle modellek léteznek a szakirodalomban. Fontos tudni azonban, hogy az ezekben rögzített törvényszerűségek túlnyomórészt általános, egyik oldalról sem határolt sugarakra érvényesek. A gyakorlatban legtöbbször alkalmazott érintőleges LVR sajátosságai miatt a légsugár egyik oldalról mindig érintkezésbe kerül valamilyen felülettel.

A fentiek miatt definiálható egy „tapadási pont” (síkban), vagy pedig „tapadási zóna” (térben), ahol egy átmeneti tartományt követően érvényesül a Coanda-effektus, így a szabadsugár feltapad a felületre, majd azon „kúszva” halad tovább.

Dolgozatunkban a BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékének Légtechnikai Laboratóriumában található résbefúvó anemosztáttal ellátott helyiség áramlási viszonyait vizsgáltuk. A kialakított, 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.

Célunk tűztük ki a helyiségbe belépő levegő sebesség- és hőmérsékletprofiljának meghatározását, továbbá a befűjt levegő térfogatáramának és hőmérsékletének „tapadási pontra” gyakorolt hatásának feltárását. Ezenkívül megkívántuk figyelni a falfelületre feltapadt légsugár viselkedését a térben. A vizsgálatok során izotermikus, anizotermikus (hűtött) és ferdeszögű izotermikus légbevezetés alkalmazásával változó térfogatáram melletti mérési sorozatokat végeztünk. Valamennyi sorozatnál mértük a légsebességeket, illetve a hőmérsékleteket a térben.

A kiértékelés során kapott eredményekből látható a szekunder áramlások zavaró hatása. A mért sebesség-, illetve hőmérséklet profilokból kimutatható a „feltapadási pont” változása a térfogatáram függvényeként. Megfigyelhető, hogy hűtött légbefúvásnál, csökkenő térfogatáram tartományban dominánssá válnak a gravitációból származó erők, ami jelentősen befolyásolja a „tapadási pont” helyzetét is. Látni fogjuk, hogy ferdeszögű befúvás esetén a falí levegőréteg hogyan válik le a térfogatáram csökkentésével. A mérési eredményeinkből ezenkívül becsülhető a résbefúvót elhagyó szabadsugar síkszöge is. A kiértékelést követően javaslatokat teszünk a mérési elrendezés módosítására, illetve további vizsgálatok lefolytatására.

1. Résbefúvók főbb jellemzői, alkalmazási területei

A résbefúvó anemosztátok a gépészeti gyakorlatban igen közkedvelt *érintőleges LVR* légbevezető szerkezetei. Ezen légvezetési rendszerek gyakori alkalmazásának három legfontosabb előnye a következő [4], [9]:

- 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 légbefúvás 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 befúvó- és elszívó anemosztátok túl közel kerülnek egymáshoz. Ebben az esetben a 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] .

A szellőztetett térben kialakuló áramlásokat tekintve beszélhetünk *primer- és szekunder áramlásokról*. Az elsődleges áramlások a falsíkok és más légsugarak határoló felületein jönnek létre. A primer áramlás keltette szekunder áramlások többnyire a helyiség közepén és a bevezetett légsugár körül jellemzők.

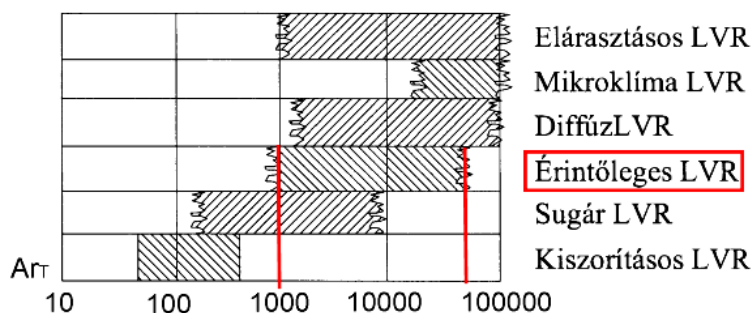
Ismeretes, hogy valamennyi LVR kiválasztásának alapja az adott helyiségre számított *Archimedes-szám* (Ar_T). Ezt általános alakban felírva kapjuk, hogy:

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

A mérnöki gyakorlatban azonban a fenti egyenlet egy speciális alakját alkalmazzák, amely tartalmazza a tervezési alapadatokat.

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

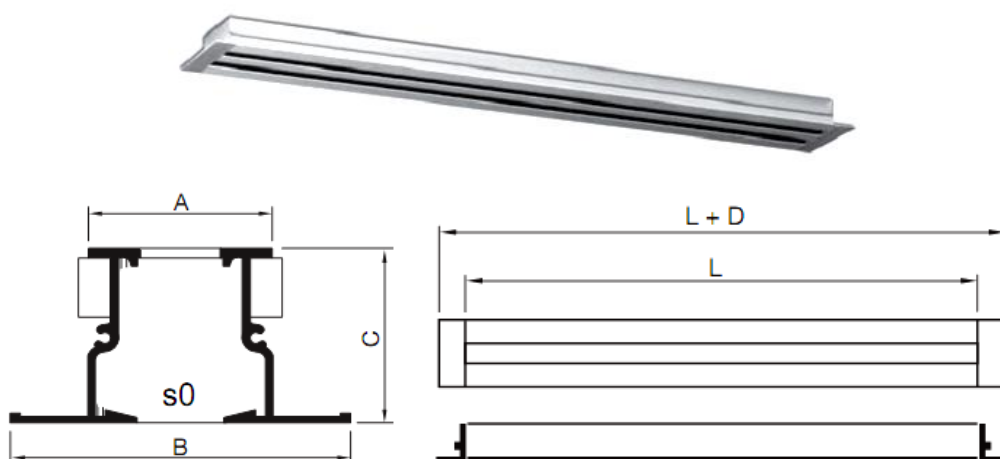
Abban az esetben tehát, ha a tervezés során többféle LVR is alkalmazható, a (2) összefüggés alapján történik a megfelelő megoldás kiválasztása az 1. ábra segítségével.



1. ábra: Légszűrési rendszerek kiválasztása

[9], [11]

Figyelembe véve a fentieket, résbefúvó anemosztátokat főként *irodaházakban, kiállítótermekben, bevásárlóközpontokban, lakóhelyiségekben* és egyes *ipari létesítményekben*, mint például *hűtőházakban, hűtőkamionokban* alkalmaznak [4]. A különböző gyártók katalógusaiból kiválasztható résbefúvók legfőbb paraméterei: *hossz (L), rés szélessége (s_0), valamint a rések száma* (2. ábra) [11].



2. ábra: Résbefúvó kialakítása és főbb méretei

2. Résbefúvó anemosztátok vizsgálatának módszerei és céljai

Az épületgépészeti gyakorlatban alkalmazott anemosztátok mindig egy adott LVR-hez tartoznak, így vizsgálatuk többnyire beépített állapotban a légvezetési rendszerrel együttesen történik. Ennek megfelelően a főbb vizsgálati módszerek a következők [3]:

1. analitikus módszer,
2. numerikus szimuláció alkalmazása,
3. mérési módszer.

2. 1. Analitikus módszerek [3]

A vizsgálat legkevésbé költséges módja az analitikus megoldás. Alkalmazásának feltétele az, hogy ismerjük a vizsgált rendszer matematikai modelljét, és ennek zárt formában előállítjuk a megoldását az adott egyértelműségi feltételek mellett. A matematikailag egzakt megoldás a felírt modell pontosságának függvénye.

Az analitikus módszer alkalmazásának legfontosabb lépései:

- a feladat megfogalmazása,
- matematikai modell megalkotása,
- a matematikai modell transzformációja (esetleg egyszerűsítése) megoldásra alkalmas formára,
- a megoldás egymás utáni lépéseinek rögzítése,
- a megoldást jelentő összefüggések meghatározása és
- a megoldás ellenőrzése.

Ebben az esetben nem végeznek méréseket és nincs szükség magas számítási kapacitást igénylő számítógépes programok alkalmazására. Természetesen a számítások könnyítésére itt is alkalmaznak szimbolikus matematikai szoftvereket (Maple, Mathematica, MathLab, stb.).

Előnye az eljárásnak, hogy kicsi a számítógépes erőforrásigénye. Hátránya, hogy a számítások egyszerűsítése miatt elhanyagolásokat kell alkalmazni az áramlásra nézve, így a nem megfelelő körütekintés a számítások pontatlanságát eredményezheti.

2. 2. Numerikus szimuláció alkalmazása [12], [13]

A XXI. századra a technika ugrásszerű fejlődése révén egyre elterjedtebbé vált a CFD (Computational Fluid Dynamics = Áramlások Numerikus Szimulációja) modellezés alkalmazása (pl. Ansys Fluent, FLOVENT szoftverek). A modellezés elve az áramlási – hőtani folyamatokat leíró differenciálegyenletek: *Navier-Stokes egyenlet, anyag- és energiaegyenletek, transzportfolyamatok* összefüggéseinek megoldásán alapul, bizonyos egyszerűsítések mellett. A differenciálegyenletek megoldásával adódik a vizsgált helyiségre vonatkozó *sebesség-, hőmérséklet- és nyomásmező*.

Az adott helyiség matematikai, geometriai modellezését követően az áramlási teret véges számú térfogatelemekre osztják fel (*diszkretizáció*), majd minden felosztott térfogategységre megoldják a fenn említett egyenleteket. A numerikus szimuláció során alkalmazható főbb egyszerűsítések a következők:

- stacionárius áramlás,
- síkáramlás: az áramlás állandó a harmadik irány mentén (2D-s egyenletek),
- szimmetria.

A CFD alkalmazások előnye a hagyományos módszerekhez képest az, hogy az esetleges változtatásokat dinamikusabban lehet elvégezni. Lehetőség van az áramlás szemléltetésére olyan helyeken is, ahol a mérési módszerrel erre nincs lehetőség. További előny, hogy viszonylag kényelmesebben végezhetők el a számítások. Hátrányként említhető, hogy magas a számítási erőforrás igénye. Minél pontosabb eredményt szeretnénk kapni a modellezés során, annál nagyobb számú elemfelosztás szükséges, ami pedig jelentősen növeli a számítógép erőforrás igényét. Mindazonáltal a peremfeltételek- és az alkalmazott turbulencia modellek nem megfelelő megválasztása ugyancsak a pontosság csökkenésével jár együtt.

2. 3. Mérési módszerek [10], [13]

Ennek a vizsgálati módszernek a lényege az, hogy a rendelkezésre álló szabványok, műszaki előírások alkalmazásával tapasztalati úton, mérésekkel elemzik a légvezetési rendszereket. Előfordul, hogy a vizsgált helyiségről egy prototípust (kisminta modellt) hoznak létre, majd a mérési adatok ismeretében módosításokat hajtanak végre a rendszeren. A változtatásokat követően ismételt szükség van ellenőrző mérések lefolytatására.

A mérési módszereket a geometriai modell mérete alapján két csoportra oszthatjuk. Egyik az ún. „*full scale*”, vagyis 1:1-es *modell*, melynek méretei azonosak a valóságos rendszer méreteivel. Másik típus a *kisminta modell*, ami a valódi rendszer kicsinyített mása. Utóbbi esetben dimenzió nélküli hasonlósági számok biztosítják a folyamatok közötti hasonlóságot. Ismeretes, hogy két fizikai folyamat akkor nevezhető hasonlónak, ha a sajátléptékben felírt (dimenzió nélküli) differenciálegyenletek és a peremfeltételi egyenletek azonosak, a geometria pedig hasonló [2].

A mérési vizsgálati módszerek előnye, hogy a megfelelően előkészített és lefolytatott mérés pontosabb eredményt ad a valóságos folyamatokról, mint a számítógépes szimuláció, ugyanis nem áll fenn a peremfeltételek rossz megválasztásának a lehetősége. Hátrányként elmondható, hogy a sorozatos mérés és prototípusgyártás költségessé teheti ezt a vizsgálati módszert, adott esetben pedig időigényesebb lehet a számítógépes eljáráshoz képest.

Valamennyi vizsgálati módszernél az áramlások időfüggését tekintve beszélhetünk *stacionárius* és *instacionárius* vizsgálatról. Utóbbi esetében az áramlási- és hőtani folyamatokat leíró differenciálegyenletek megoldásával meghatározható a sebesség-, hőmérséklet-, és nyomásmező a vizsgálati térben. Időben állandósult folyamatoknál a differenciálegyenletek algebrai egyenletekre egyszerűsödnek és a vizsgált fizikai jellemzők átlagértékeivel számolhatunk [10].

A befűvés- és elszívás irányát figyelembe véve legtöbbször három résbefűvő konfigurációt vizsgálnak [5]:

1. függőleges befűvés – függőleges elszívás,
2. vízszintes befűvés – vízszintes elszívás,
3. ferdeszögű befűvés – függőleges (vagy vízszintes) elszívás.

Miután már ismertek az érintőleges légvezetési rendszerek vizsgálatának főbb módszerei, következő lépés ezek alkalmazási lehetőségeinek áttekintése. Ellentétben a légkezelő berendezésekkel, légszűrőkkel, illetve egyes légtechnikai szerelvényekkel, a LVR-k vizsgálatára nem állnak rendelkezésre szabványok, hiszen itt nem egy adott termékről, hanem rendszerről van szó. Természetesen mérési vizsgálati módszer alkalmazása esetén minden fizikai mennyiség mérése az adott szabvány előírásai alapján történik.

2. 4. Általános vizsgálati célok

Általánosságban elmondható, hogy minden LVR-nél alapvető fontosságú a helyiségbe bevezetett levegőt jellemző sebesség- és hőmérsékletmező ismerete. Ezen fizikai jellemzők főként az *anemosztát*- illetve a *helyiség geometriájától*, a bevezetett levegő *turbulencia fokától* és *hőmérsékletétől* függenek. Az említett fizikai mennyiségek jelentősen befolyásolják a *légátöblítés hatásosságát*, az adott helyiségben tartózkodók *komfortérzetét*, valamint a *szellőzés gazdaságosságát* [5].

2. 4. 1. Anemosztátból kilépő légsugár vizsgálata

A befűvő anemosztátból a helyiségbe belépő légsugár viselkedésének ismerete lényeges a gazdaságos, komfortos és hatékony szellőzés biztosítása érdekében. A befűvás környezetében mért és/vagy számított *sebesség- és hőmérsékletmező* ismeretében tanulmányozható a helyiségben kialakuló légáramlás [5].

2. 4. 2. Hő- és huzatkomfort vizsgálata [9]

Hígítási légvezetési rendszerek esetében a bejuttatott levegő kényszeráramlása egyrészt biztosítja az adott helyiség légátöblítését, másrészt a benn tartózkodókból huzatérzetet válthat ki. A hőmérséklet nem megfelelő eloszlása a térben termikus diszkomfort érzetet okozhat.

A hőmérséklet, sebesség, és páratartalom mérésekből számíthatók többek között: *PMV* (**P**redicted **M**ean **V**ote = várható hőérzeti érték), *PPD* (**P**redicted **P**ercentage **D**issatisfied = hőérzettel elégedetlenek százalékos aránya), a *turbulencia fok* (*Tu*), *PD* (**P**ercentage **D**issatisfied = hőmérséklet-különbséggel elégedetlenek) és a *DR* (**D**raught **R**ate) huzatkritérium. Ezen nemzetközi gyakorlatban is használt jellemzők meghatározásával elvégezhető az adott helyiség értékelése hő- és huzatkomfort tekintetében.

2. 4. 3. Levegő minőségre vonatkozó vizsgálatok [9]

2. 4. 3. 1. Ipari létesítmények levegőminőségi vizsgálatai

Ipari célokat kiszolgáló helyiségekben a szennyezőanyagok jelentős része belső technológiai forrásból származik. A legjelentősebb szennyezőanyagok: *szén – dioxid*, *formaldehid*, *VOC (illékony szerves vegyületek)*, *radon*, *nitrogén – oxidok*, *porok*. A teremben alkalmazott LVR típusa és az anemosztátok elhelyezése hatással van a szennyezőanyagok térbeli eloszlására, melyek *koncentrációját*, *forráserősségét* meghatározva modellezhető a szennyezőanyagok viselkedése a szellőztetett térben.

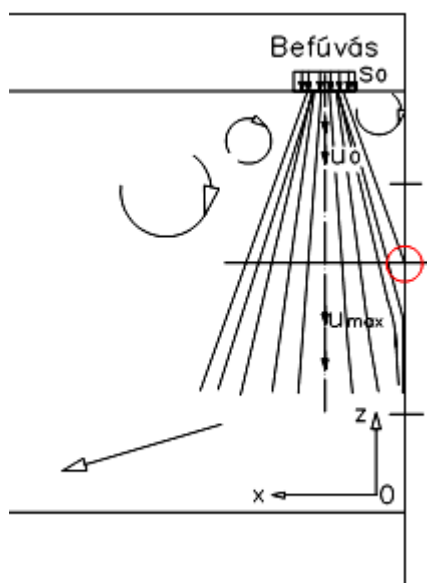
2. 4. 3. 2. Belső levegő minőség vizsgálata

A komforttérben felgyülemlett szennyezőanyagok térbeli eloszlását itt is jelentősen befolyásolja az alkalmazott légvezetési rendszer, illetve az anemosztátok elhelyezése. A szennyezők bejuthatnak a külső térből (ilyenek a *porok*, egyes *gázok*, *pollen*, stb.) és keletkezhetnek belső forrásokból (pl. *bútorok*, *ruházat*, *építőanyagok*, stb.). A szennyezőanyagok koncentrációjának, forráserősségének, valamint a szellőző levegő térfogatáramának meghatározásával leírható a szennyezőanyagok viselkedése a szellőztetett térben. Számítható többek között a *fajlagos frisslevegő ráta miatt elégedetlenek százalékos aránya (PD)*, az *érzékelhető levegőminőség miatt elégedetlenek százalékos aránya*, a *helyiség CO₂-koncentrációja miatt elégedetlenek százalékos aránya*, a *kontaminációs fok (μ)* és a *szellőztetés hatásossága (ϵ)*.

3. Résbefúvó anemosztátok mérési vizsgálata

3. 1. A vizsgálati célok megfogalmazása

A Bevezetésben már említettük a résbefúvó anemosztátok azon jellegzetességét, hogy a levegő legtöbbször *sík szabadsugárként* hagyja el a kifúvási keresztmetszetet. A szabadsugarak leírásával sokféle publikáció foglalkozik mind empirikus, mind pedig elméleti megközelítésben. Ezek a vizsgálatok többnyire nem veszik figyelembe azt, ha a szabadsugár egyik oldalról valamilyen felülettel érintkezik.



3. ábra: „Tapadási pont”

A mérnöki gyakorlatban alkalmazott résbefúvó anemosztátok elhelyezése az érintőleges LVR-re tekintettel többnyire *határoló felület* mellett történik, ami lehet *mennyezet*, *falfelület*, esetleg egy másik *légsugár határoló felülete* [9].

Az elmondottak alapján definiálható egy „*tapadási pont*” (síkban), vagy pedig „*tapadási zóna*” (térben), ahol egy átmeneti tartományt követően érvényesül a Coanda-effektus, így a szabadsugár feltapad a felületre, majd azon „*kúszva*” halad tovább (3. ábra). Ismeretes, hogy minél nagyobb a levegő „*kúszva*” megtett távolsága az adott felületen, annál jobb a helyiség légátöblítésének hatékonysága [6], [2]. Ennek megfelelően tehát lényeges

szempont, hogy ezeket a vizsgálatokat mindig az üzemeltetési állapotban, de legalább az anemosztátok beépített helyzetében szükséges elvégezni.

Tekintettel arra, hogy az általunk vizsgált függőleges befúvás – függőleges elszívás konfigurációhoz igen *kevés a referált szakirodalom*, a *mérési vizsgálati módszert* alkalmaztuk.

A fentiek ismeretében a megvalósítani kívánt vizsgálati céljaink a következők:

- sebesség- és hőmérséklet mérése a befúvás környezetében,
- sebesség- és hőmérsékletprofilok meghatározása a mért adatokból,
- a „tapadási pont” helyzetének vizsgálata a térfogatáram-, befúvási hőmérséklet- és a befúvási szög változtatásával,
- a szabadsugár síkszög-változásának feltárása a bejuttatott térfogatáram csökkentésével és

- a falra feltapadt levegősugár viselkedésének megfigyelése.

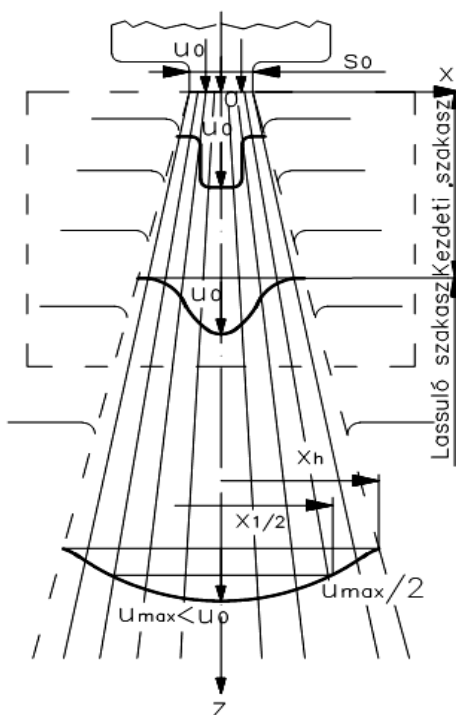
A megvalósítani kívánt céloknak megfelelően vizsgálatainkat a következő metodika szerint végeztük.

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 különböző mérési sorozatok felvétele *izotermikus*, *anizotermikus* (hűtött) és *ferdeszögű izotermikus légbefúvás* alkalmazása esetén.
5. Kiértékelés, összefoglalás, további vizsgálati célok meghatározása.

3. 2. Elméleti háttér

3. 2. 1. Szabadsugarak [2]

Szabadsugárnak nevezzük azt az áramlást, amely valamilyen résen, nyíláson keresztül a nyugvó levegőjű térbe fúj be.



4. ábra: Sík szabadsugár

A kifúvási keresztmetszet alakjától függően beszélhetünk hengeres- illetve sík szabadsugarokról. A levegő bevezetése történhet a befúvás keresztmetszetére merőleges irányban, vagy azzal szöget bezárva (ferdeszögű befúvás). Résbefúvó anemosztátok alkalmazása esetén a levegő többnyire sík szabadsugárként lép be a térbe, így a továbbiakban ennek vizsgálatával foglalkozunk Descartes-koordináta rendszerben (4. ábra).

A rés s_0 szélességű keresztmetszetében a sebesség a fal melletti vékony határretegétől eltekintve állandó. Az innen kilépő levegő egyrészt felgyorsítja, magával ragadja a helyiség nyugvó levegőjét, ami ugyanakkor lassítja a szabadsugarat, tehát érvényesül a hatás – ellenhatás törvénye.

Azt a kb. $5s_0$ hosszúságú szakaszt, ahol a sugár keresztmetszetének legalább egy pontjában a sebesség azonos a kifúvási sebességgel, kezdeti szakasznak nevezzük. Egy átmeneti tartomány után az ezt követő lassuló szakaszban az axiális irányú sebesség nagysága fokozatosan csökken.

A szabadsugárban mért térfogatáram a kifúvástól távolodva azonban növekvő tendenciát mutat, mivel áramlása során adott mennyiségű környezeti levegőt ragad magával a tengelyére merőleges irányban. Az innen elvont környezeti levegő helyére újabb légmennyiség áramlik, ez pedig elősegíti az *örvények* kialakulását a sugár környezetében.

Későbbiek során látni fogjuk, hogy a szabadsugár körüli turbulencia jelenléte elsősorban a sebességprofil torzulásában nyilvánul meg.

Tapasztalat, hogy a sugár áramvonalai kevésbé széttartóak, illetve görbültek, mivel a közeg lassulása mérsékelt ütemű. Az áramvonalhoz rögzített, természetes koordináta rendszerben felírt *Euler-egyenlet*:

$$\frac{u^2}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} \left[\frac{m}{s^2} \right]. \quad (3)$$

A (3) összefüggés alapján belátható, hogy ha a szabadsugárban az áramvonalak közel párhuzamosak, R végtelen nagy lesz, így az egyenlet bal oldalának határértéke nullához tart. Ennek következménye, hogy az áramvonalakra merőlegesen a nyomás változása elhanyagolható, tehát a szabadsugárban a nyomás állandónak tekinthető.

Miután a lassuló szakaszban a szabadsugár vastagsága jó közelítéssel lineárisan nő a kifúvástól mért z vertikális távolság függvényében, és a dimenziótlan sebességmegoszlások egybeesnek, belátható, hogy fennáll:

$$x_{1/2} = k \cdot z \text{ [mm]}. \quad (4)$$

A sebességmegoszlások és a kifúvástól mért távolság változása közötti kapcsolat ismerete lényeges a szabadsugár vizsgálatának szempontjából. Az összefüggés felírásához Newton II. axiómájából levezetett impulzustétel általános alakjából indulunk ki (5).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho \cdot \underline{u}) dV + \int_A \underline{u} \rho (\underline{u} dA) = \int_V \rho \underline{g} dV - \int_A p dA - \underline{R} + \underline{S} \text{ [N]}. \quad (5)$$

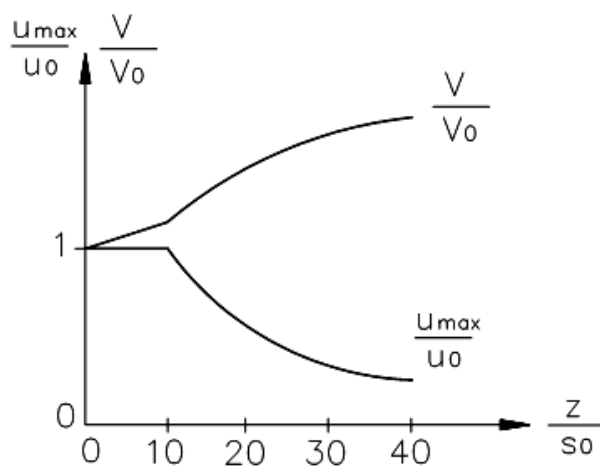
Az egyenlet jobb oldalán az ellenőrző felületben (4. ábra) lévő folyadékra ható erőket összegezzük. A $\rho g dV$ a súlyerő, $p dA$ a nyomásból származó erő, $\underline{R}$ a folyadékról a szilárd

testre ható erő, $\underline{S}$ pedig az ellenőrző felületen a folyadékra ható, súrlódásból származó erő vektora. Az összefüggés bal oldalának második tagja az $\underline{I}$ impulzusáram vektor.

A további vizsgálatokhoz a következő elhanyagolásokat tesszük:

- az áramlás stacionárius síkáramlás,
- az ellenőrző felületen belül nincs szilárd test,
- a súrlódásból származó erők elhanyagolhatók,
- a szabadsugárban a nyomás is állandó,
- izotermikus vizsgálatnál a gravitációs térerő hatását elhanyagoljuk.

Felhasználva az elmondottakat és a levezetést mellőzve, a dimenziótlan sebességmegoszlásra a következő összefüggés adódik:



$$\frac{u_{\max}}{u_0} = \frac{\text{Konstans}}{\sqrt{\frac{z}{s_0}}}. \quad (6)$$

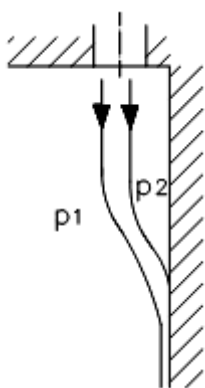
A dimenziótlan térfogatáram-megoszlás pedig:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} = \text{Konstans} \cdot \sqrt{\frac{z}{s_0}}. \quad (7)$$

A (6) és (7) összefüggések grafikus ábrázolása az 5. ábrán látható.

5. ábra: Dimenziótlan sebesség- és térfogatáram megoszlás sík szabadsugárban

3. 2. 2. A Coanda – effektus [2]



6. ábra: Coanda-effektus

A jelenség értelmezéséhez a természetes koordináta-rendszerben felírt Euler-egyenletet használjuk fel (3). A résbefűvő 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 *depressziós tér*, aminek hatására a levegő *feltapad* a falfelületre. A falon „kúszó”, meghatározott vastagságú levegő rétegre érvényes a tapadás törvénye: a felület közvetlen közelében a sebesség értéke zérus, majd attól távolodva az áramlás jellegétől függően fokozatosan növekszik.

3. 3. A sebesség- és hőmérséklet mérésére vonatkozó főbb követelmények

A légtechnikai mérésekhez kidolgozott szabványok az egyes fizikai mennyiségek mérésére többféle műszert kínálnak fel. Az MSZ EN ISO 5167-1:2003 szerint a sebesség- és hőmérséklet mérésére bármilyen, erre alkalmas mérőműszer használható azzal a feltétellel, hogy az áramlás képében nem okozhat számottevő zavarást. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy minél kisebb az adott mérési keresztmetszet, annál kisebb műszert kell alkalmazni. További követelmény, hogy a mérőműszereket meghatározott időközönként kalibrálni kell, melynek eredményét a kalibrálási jegyzőkönyv tartalmazza. Az MSZ EN 24006:2002 előírja, hogy a levegő áramlási sebességének normális irányú komponense merőleges legyen a műszer mérési síkjára.

A mérőszobában kialakuló sebesség- és hőmérsékletmező mérésére a 7. ábrán látható tanszéki gyártmányú, *hődrótos anemométert* alkalmaztuk. Ezen műszer működési elve egy fűtött hődróton alapszik, amiből a fellépő hidegebb áramlás miatt hő elvonására kerül sor. Szabályozással a hőmérséklet állandó értéken tartható, a szabályozó áram pedig arányos a

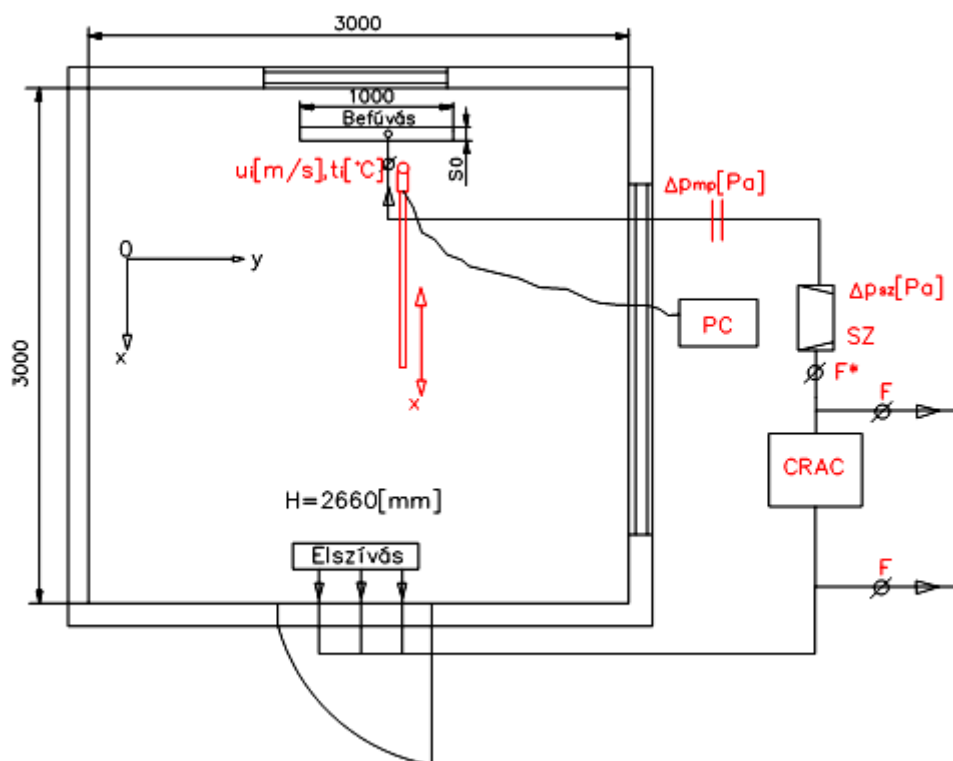


7. ábra: Hődrótos mérőszonda

légsebességgel és a hőmérséklettel. A hődrótos anemométerek hátránya a szárnykerekes műszerekkel szemben az, hogy nagyobb az irányérzékenységük, vagyis a kisebb elmozdulásokra – a mért érték pontosságát tekintve – érzékenyebben reagálnak. A mérési eredmények pontosságának szempontjából nagyon lényeges a műszer tisztán tartása. A kevésbé körültekintő használatból eredő szennyeződés a hődrót meghibásodását eredményezheti, melynek igen költséges tisztítása többnyire laboratóriumi körülmények között végezhető el [14].

3. 4. A légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata [1]

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



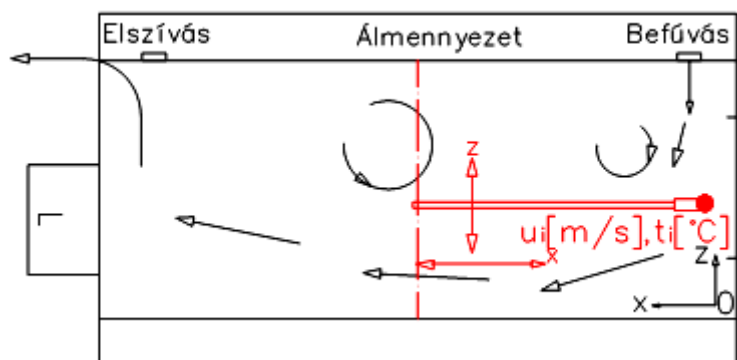
8. ábra: A mérőhelyiséget kiszolgáló légtechnikai rendszer kapcsolási vázlata

Jelmagyarázat:

CRAC = Computer Room Air Conditioning (precíziós klímasekrény); F^* – fojtás a szabad áramlási keresztmetszet csökkentésével; F – fojtó elem; SZ – légszűrő; PC – adatgyűjtő számítógép; Δp_{mp} – a mérőperemmel mért nyomáskülönbség [Pa], Δp_{sz} – szűrőn mért nyomáscsökkenés [Pa].

A befúvó- és elszívó légszűrők az álmennyezetben kerültek kialakításra. A levegőellátást biztosító precíziós klímasekrény névleges térfogatárama 4000 [m³/h]. A mellékágakban lévő pillangószelepeket (F) nyitott állásba helyezve, valamint szűrő előtti „fojtást” (F^*) alkalmazva a helyiség méreteinek megfelelően körülbelül 100...200 [m³/h] mennyiségű levegőt juttatunk a térbe. A légtechnikai rendszer teljes mértékben recirkuláltatott.

A mérőműszer pozicionálása az x-z síkban történik a beállított lépésközzel, megfelelően szerkesztett számítógépes program segítségével (9. ábra).

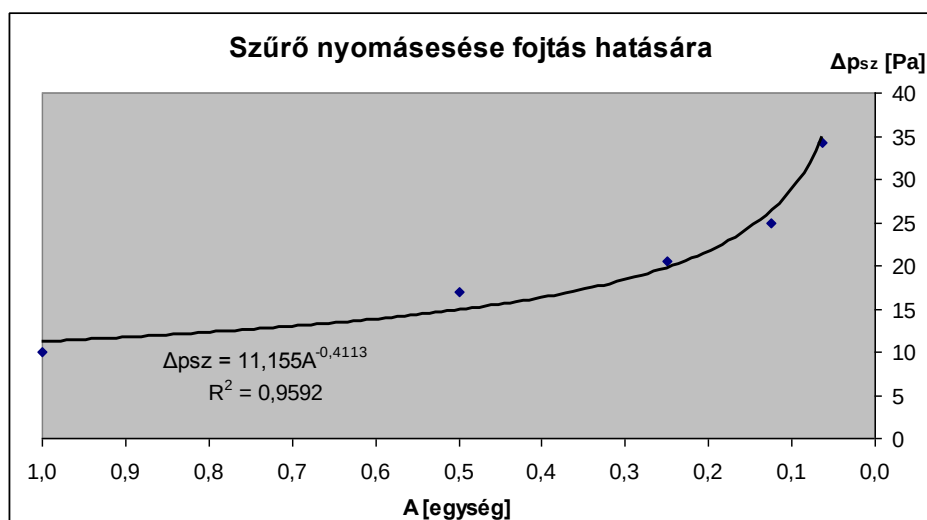


9. ábra: A vizsgált helyiség előlnézeti képe

3. 5. A mérések lefolytatása [1]

Az *előmérések lefolytatása során* a helyiség geometriájának megfelelően 1071 mérési pontot vettünk föl a 9. ábrán jelölt x-z mérési síkban. Vízszintes irányban a lépésköz 20 [mm], $x = 0 \dots 1000$ [mm]-es távolságon. Függőleges irányban az osztás 100 [mm], $z = 0 \dots 2000$ [mm] között. Lényeges megemlíteni, hogy az $x = 0$ és $z = 0$ pontok *lokális értékek*, vagyis a mérési síkra vonatkoznak és nem a helyiség sarokpontjától mérendők. A beállításoknak megfelelően egy mérési sorozat lefolytatásának időtartama körülbelül 2 [óra]. A hődrótos mérőszonda minden pontban azonos időben mérte a levegő száraz hőmérsékletét (t_i) és sebességének abszolút értékét (u_i) SI mértékegységben. Az előméréseket izotermikus légbefúvás mellett végeztük stacionárius állapotban. A mérési adatokat a program txt fájlalba rögzítette. Az előmérések során kapott eredményeket az *M1. számú melléklet* tartalmazza, amiket szakirodalmi adatokkal hasonlítottuk össze. Ennek eredményeként megállapítottuk, hogy az arányosan felvett mérési pontok száma első körben megfelelő a pontos kiértékelés elvégzéséhez. Az előméréseket követően 5 *mérési sorozatot* vettünk föl a térfogatáram csökkentésével *izotermikus, anizotermikus és ferdeszögű izotermikus* befúvást vizsgálva.

A térfogatáram csökkentéséhez alkalmazott fojtási mód a szűrő előtti szabad áramlási keresztmetszet csökkentését jelentette. Ennek során a mindenkor szabad keresztmetszetet (1 egység) felezéssel csökkentettük 5 ponton keresztül, mialatt mértük a szűrő nyomáscsökkenését (8. ábra). A szabad felület nagyságának csökkenése és a szűrő után mért nyomásvesztés kapcsolata a 10. ábrán látható az *M6. sz. melléklet*nek megfelelően. A szabad keresztmetszet és a térfogatáram csökkenés közötti függvénykapcsolat hatványos, 0,95 feletti korreláció négyzettel, aminek értéke a kiértékelés szempontjából megfelelő [10].



10. ábra: Szabad áramlási keresztmetszet csökkenése és a szűrő nyomásesése közötti kapcsolat

Függőleges befűvást és függőleges elszívást alkalmazva tehát háromféle beállításban végeztük a méréseket időben állandósult állapotra.

Izotermikus légbefűvásnál a mérőhelyiségbe juttatott levegő hőmérséklete közel azonos volt a környezeti levegő hőmérsékletével. A névleges térfogatáramot fojtással fokozatosan csökkentettük 5 ponton keresztül. A 8. ábrán látható mérőperemmel mértük a szobába belépő levegő nyomáskülönbségét (M7. melléklet), digitális termométerrel a hőmérsékletét, melyekből számítható a levegő térfogatárama (1. táblázat). Az izotermikus légbefűvásnál mért adatokat és az ezekből készített diagramokat az M2. melléklet tartalmazza.

Δp_{mp} [Pa]	t_0 [°C]	ρ_0 [kg/m ³]	$\dot{V}_0$ [m ³ /h]	Mérés s.sz.
6,0	30,5	1,16	161,3	1
4,8	30,4	1,16	144,2	2
4,5	29,8	1,16	139,5	3
3,9	28,1	1,17	129,5	4
3,2	29,2	1,17	117,5	5

1. táblázat: Beállított térfogatáramok izotermikus állapotban

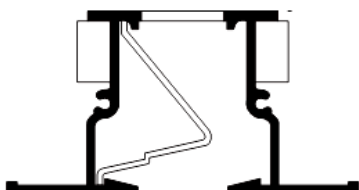
Anizotermikus vizsgálatnál a precíziós klímasekrennyel állandó, $t_0 \approx 25$ [°C]-os hűtött levegőt juttatunk a 30 [°C] hőmérsékletű helyiségbe. A térfogatáram mérése itt is megegyezik az izotermikus vizsgálatnál bemutatott módszerrel (2. táblázat). A klímaberendezés nem tartalmaz frekvenciaváltót, így a kívánt térfogatáramokat az előző beállításhoz képest nem tudtuk pontosan reprodukálni. A különböző konfigurációkhoz tartozó térfogatáram-párok közötti eltérés ennek ellenére elfogadható, maximum $\pm 3,3$ [%] (3. táblázat). A mérési eredményeket az M3. melléklet tartalmazza.

Δp_{mp} [Pa]	t_0 [°C]	ρ_0 [kg/m ³]	$\dot{V}_0$ [m ³ /h]	Mérés s.sz.
6,1	25,6	1,18	161,3	1
5,0	25,6	1,18	146,0	2
4,6	25,5	1,18	140,1	3
4,2	25,6	1,18	133,8	4
3,1	26,0	1,18	115,1	5

2. táblázat: Beállított térfogatáramok anizotermikus állapotban

Eltérés a beállított térfogatáramok között			
Mérés ssz	Izoterm vizsgálat	Anizoterm vizsgálat	Eltérés [%]
	$\dot{V}_0$ [m ³ /h]	$\dot{V}_0$ [m ³ /h]	
1	161	161	0,0
2	144	146	1,2
3	136	140	2,7
4	130	134	3,3
5	118	115	2,0

3. táblázat: Százalékos eltérés a beállított térfogatáramok között



11. ábra: Terelőlemezzel ellátott résbefúvó [11]

Ferdeszögű izotermikus légbefúvásnál műanyag terelőlemezek beépítésével a befújt levegőt a falfelület irányába kényszerítettük és megismételtük az előzőekben bemutatott méréseket, melynek eredménye az M4.

mellékletben található. A terelőlemez kialakítás a 11. ábrán látható. A beállított térfogatáramok itt is közel azonosak az izotermikus és anizotermikus vizsgálatnál

beállított értékekkel (5. táblázat), a maximális eltérés $\pm 3,6$ [%].

Δp_{mp} (Pa)	t_0 (°C)	ρ_0 (kg/m ³)	V_0 (m ³ /h)	Mérés ssz
5,9	30,0	1,16	159,8	1
4,6	29,5	1,17	141,0	2
4,2	29,5	1,17	134,7	3
3,6	30,0	1,16	124,8	4
3,0	29,5	1,17	113,9	5

4. táblázat: Beállított térfogatáramok ferdeszögű befúvás esetén

Eltérés a beállított térfogatáramok között			
Mérés ssz	Izoterm vizsgálat	F.sz. izot.v.	Eltérés (%)
	V_0 (m ³ /h)	V_0 (m ³ /h)	
1	161,3	159,8	0,9
2	144,2	141,0	2,2
3	139,5	134,7	3,4
4	129,5	124,8	3,6
5	117,5	113,9	3,1

5. táblázat: Százalékos eltérés a beállított térfogatáramok között

4. Kiértékelés

4. 1. Mérési sorozat kiértékelése [10]

A mért adatokból számított átlagos légsebesség:

$$u_{\text{átlag}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (8)$$

Az átlagos száraz hőmérséklet pedig:

$$t_{\text{átlag}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_i \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (9)$$

Az egyes mérési eredmények eltérése a középértéktől (deviancia):

$$\Delta u_i = u_i - u_{\text{átlag}} \text{ [m/s]}, \quad (10)$$

és

$$\Delta t_i = t_i - t_{\text{átlag}} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (11)$$

A devianciából meghatározható a mérési adatok szórása:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta u_i^2} \text{ [m/s]}, \quad (12)$$

és

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta t_i^2} \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (13)$$

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

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

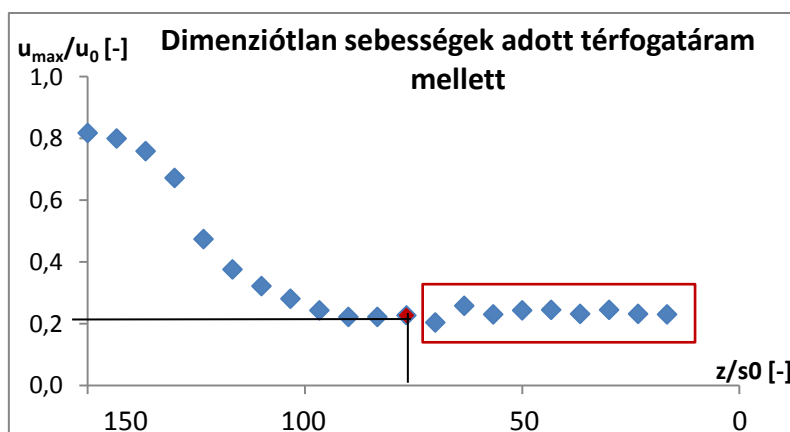
$$\text{Mért mennyiség} = \text{Átlagérték} + t \cdot \text{szórás [mértékegység]}. \quad (14)$$

A kifúvási keresztmetszetben lévő sebesség [2]:

$$u_0 = \frac{\dot{V}_0}{A_0} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (15)$$

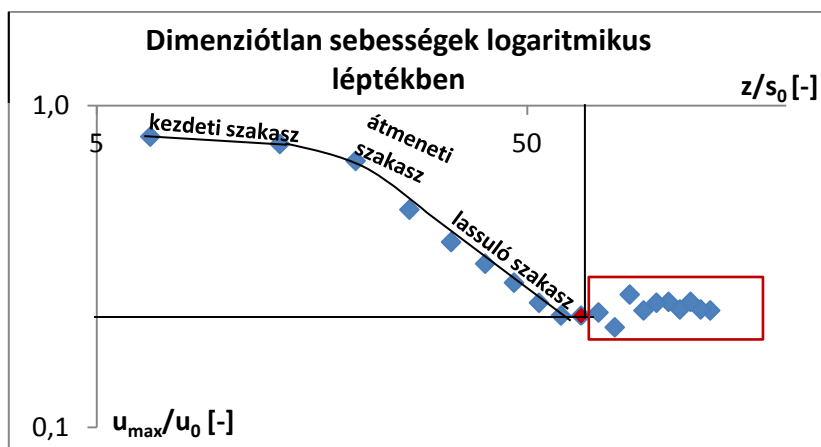
4. 2. Izotermikus légbevezetés [1]

A mérési síkon belül különböző magasságokban (z irány) mért maximális sebességeket ($u_{\max}$) osztva a kifúvási keresztmetszetben lévő sebességgel (u_0), a z/s_0 dimenzió nélküli távolság függvényében a 12. ábrán látható dimenziótlan sebességeloszlást kapjuk [2], [5]. A diagramban megfigyelhető, hogy a befúvás közelében ($z/s_0 \approx 150$) a szabadsugárban mért maximális sebesség közel azonos a befúvási sebességgel (kezdeti szakasz). A belépő éltől távolodva a sebességprofil leépülése tapasztalható, ami a pirossal jelzett „tapadási pont”-ig fél Gauss haranggörbével írható le. A tapadási pontot követően a mért sebességértékek ingadozása figyelhető meg, melynek okát hamarosan ismertetjük. A dimenziótlan sebességeloszlás minden mérési sorozatra vonatkozóan megtalálható az M2.1 – M2.7. ábrán.



12. ábra: Dimenziótlan sebességek állandó térfogatáramon

A dimenziótlan sebességeloszlást a 13. ábrán logaritmikus léptékű koordináta-rendszerben ábrázolva elkülöníthető a szabadsugár kezdeti-, átmeneti- és lassuló szakasza. A kezdeti- és lassuló szakaszban mért pontok lineáris egyenessel, míg az átmeneti szakaszhoz tartozó pontok másodfokú görbével közelíthetők. A lassuló szakasz egy meghatározott pontjától (piros pont) itt is megfigyelhető a mért sebességeloszlás inhomogenitása.



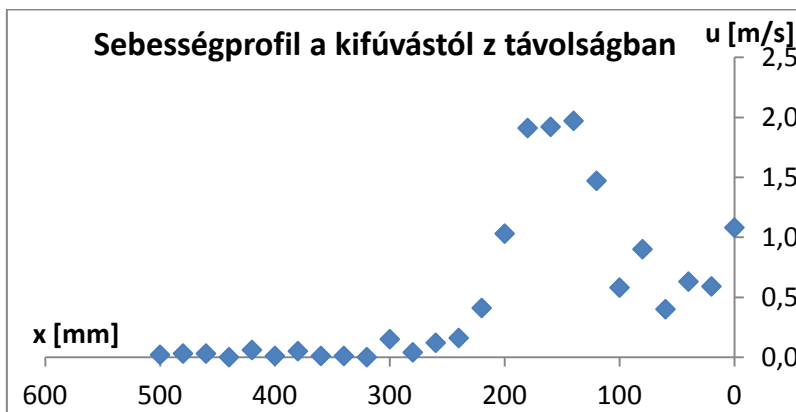
13. ábra: Dimenziótlan sebességek logaritmikus léptékben ábrázolva

A befúvás közvetlen közelében, a mérési sík $z = 2000$ [mm] magasságában mért sebességprofil közel ideálisnak tekinthető (14. ábra), ebben a keresztmetszetben még nem jelentkezik sem a szekunder áramlások-, sem pedig a fal „torlasztó” hatása [2]. Itt lényeges megemlíteni, hogy az ábrán látható sebességprofil csak látszólag hasonlít a Gauss-haranggörbéhez. A normális eloszlás sűrűségfüggvényét a jelen mérési adatokkal elkészítve ugyanis azt tapasztaltuk, hogy jelentős eltérés mutatkozik a két görbe között. Ennek oka legfőképpen az, hogy a 14. ábrán a profil csúcspontja és a többi mérési pont között igen nagy a sebességeltérés, tehát a görbe szélein nagyobb a pontok sűrűsége. Az egyes mérési sorozatokra meghatározott sebességprofilok az M2.30 – M2.40. ábrán láthatók.



14. ábra: Sebességprofil a kifúvási keresztmetszetben

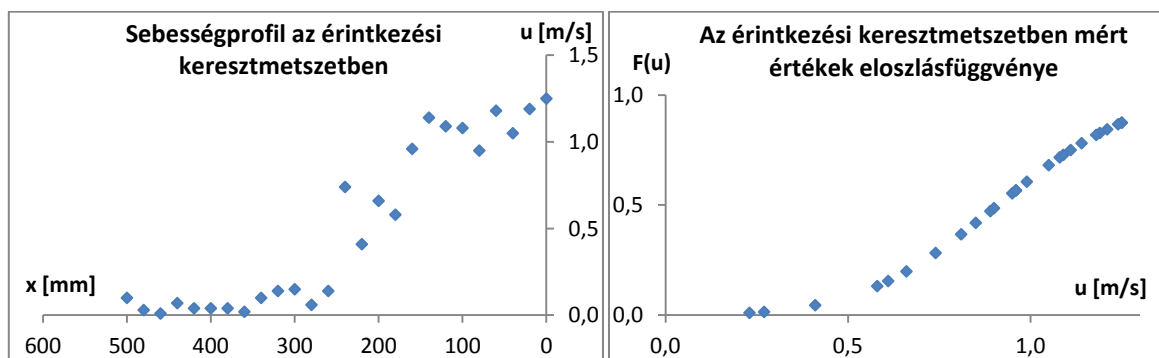
A kifúvástól egyenletes lépésközökkel z irányban távolodva a sebességprofil fokozatos torzulása tapasztalható a szabadsugar fal felőli oldalán (15. ábra) $x \approx 0 \dots 100$ [mm] között. Ezen a szakaszon a görbének minimuma van, ami egyrészt az örvények által elvont légmennyiségnek, másrészt a közeli fal „torlasztó” hatásának köszönhető. Ebben a keresztmetszetben ugyanis már kialakulóban van az a depressziós tér, ami a légsugarat a falhoz „szívja”.



15. ábra: A sebességprofil torzulása a kifúvástól távolodva

A 12-13. ábrán a sebességértékek szóródása a lassuló szakaszt követően, valamint a 15. ábrán látható sebességprofil inhomogenitása tehát főként a szabadsugar körül jelentkező szekunder áramlásoknak köszönhető, melyek kialakulásának okát a 3. 2. 1. pontban írtuk le.

Ezek a másodlagos áramlások a befűvástól egyre nagyobb z távolságban, a „tapadási pont”-hoz közeledve erősödnek. Mindennek hatására a tapadási ponthoz tartozó érintkezési keresztmetszetben a 16. ábrán látható módon egy meglehetősen egyenetlen sebességprofilt kapunk. Ezen megfigyelhető, hogy a fal közelében az $x = 0 \dots 100$ [mm] tartományban a sebességmező közel homogén, majd a faltól távolodva leépül, $x \approx 500$ [mm]-es távolságban pedig közel zérussá válik. Az érintkezési keresztmetszetben azonban már nemcsak a szekunder áramlások jelenléte okozza a sebességek inhomogenitását, hanem a fal „torlasztó” hatása is [4]. Ennek legfontosabb jellemzője, hogy a falfelülettel érintkező áramvonalak görbülnek, aminek hatására a 3. 2. 2. pontban bemutatott módon a fal közelében csökken a légnyomás, kialakul egy depressziós tér a légsugar és a falfelület között. Ennek hatására a tapadási pontban megindul a levegő feltapadása a falfelületre, majd azon kúszva halad tovább [2].

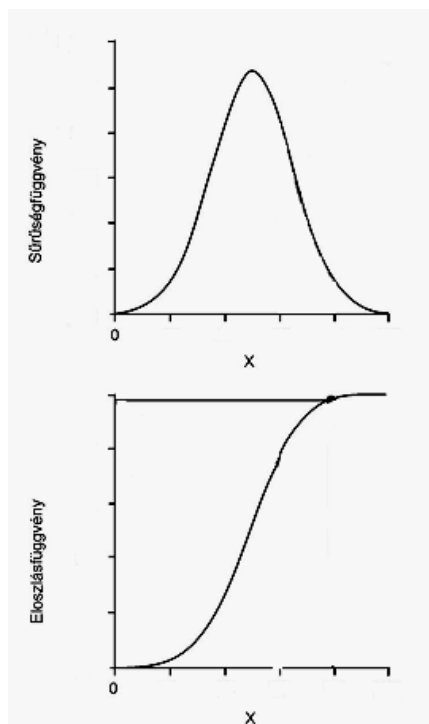


16. ábra: Sebességprofil az érintkezési keresztmetszetben és az eloszlás függvény

A 16. ábrán látható „tapadási pont”-hoz tartozó érintkezési keresztmetszetben mért sebességértékekre jól illeszthető a normális eloszlás eloszlásfüggvénye.

Ismeretes, hogy a mérnöki gyakorlatban nagyon sok mért paraméter normális eloszlással írható le. Egy X valószínűségi változó – jelen esetben a sebesség (u) és a hőmérséklet (t) – normális eloszlású akkor, ha sűrűségfüggvénye:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}. \quad (16)$$



17. ábra: A sűrűség- és az eloszlásfüggvény kapcsolata

Ha az eloszlás folytonos, de a sokaság nem feltétlenül véges, akkor az X valószínűségi változó az X_i értéket P_i valószínűséggel vegye fel. Ekkor az X valószínűségi változó $\mu(X)$ várható értékén a következő összeget értjük:

$$\mu(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} X \cdot f(X) \cdot dX. \quad (17)$$

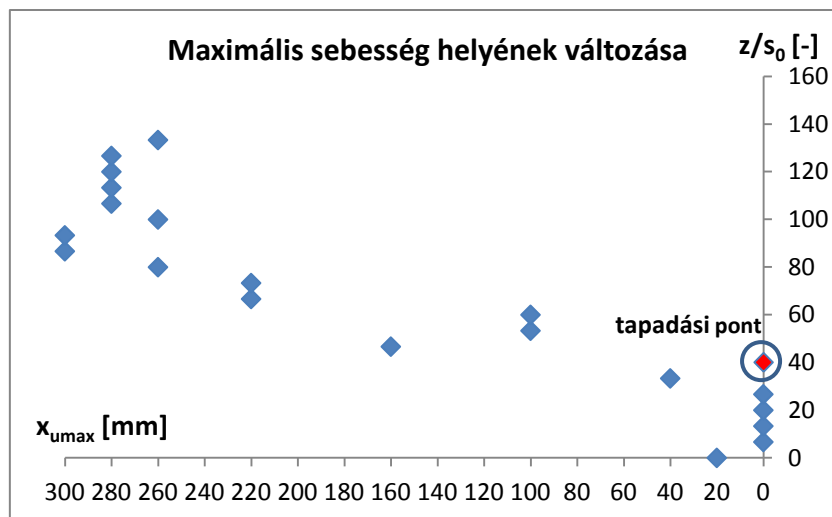
A sűrűségfüggvény (16) X szerinti integrálásával előállítható az eloszlásfüggvény:

$$F(X) = \int_{-\infty}^X \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} dX. \quad (18)$$

A (16) és (18) összefüggéseket grafikusán ábrázolva a 17. ábrán látható eredményt kapjuk.

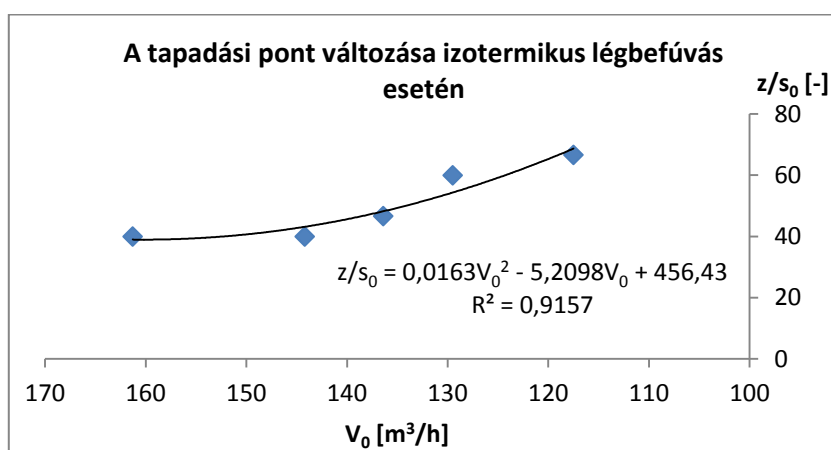
[10]

Igen szemléletes képet kapunk a helyiségben kialakuló sebességmező- és a tapadási pont változásáról, ha az egyes keresztmetszetekben mért maximális sebesség helyének változását ábrázoljuk a kifúvástól mért dimenziótlan távolság függvényében [4]. A 18. ábrán jól látható, hogy a szabadsugáron belül mért maximális sebességek közel egy függőleges egyenesre esnek, $x_{\text{umax}} \approx 300 \dots 260$ [mm] között. Ezen a szakaszon tehát a bevezetett levegő még szabadsugárként viselkedik. A lassuló szakaszban a függőleges egyenes körüli sebességszóródás egyrészt a sebességmérés hibájának, másrészt a korábban már tárgyalt szekunder áramlásoknak és a közeli fal hatásának köszönhető. A tapadási ponthoz közelebb eső átmeneti tartományban $x_{\text{umax}} \approx 260 \dots 40$ [mm] között a maximális sebességek fokozatosan közelednek a falhoz, távolodva a befúvástól. Látható, hogy ezen a szakaszon megindul a légsugár feltapadása a falfelületre. Jól megfigyelhető, hogy a $z/s_0 = 40$ tapadási pontnál a légsugár feltapad a felületre, majd azon kúszva haladva a maximális sebességek ismét egy függőleges egyenesre esnek ($x_{\text{umax}} = 0$; $z/s_0 = 0 \dots 40$), tehát a sebességeloszlás ebben a tartományban közel homogén.



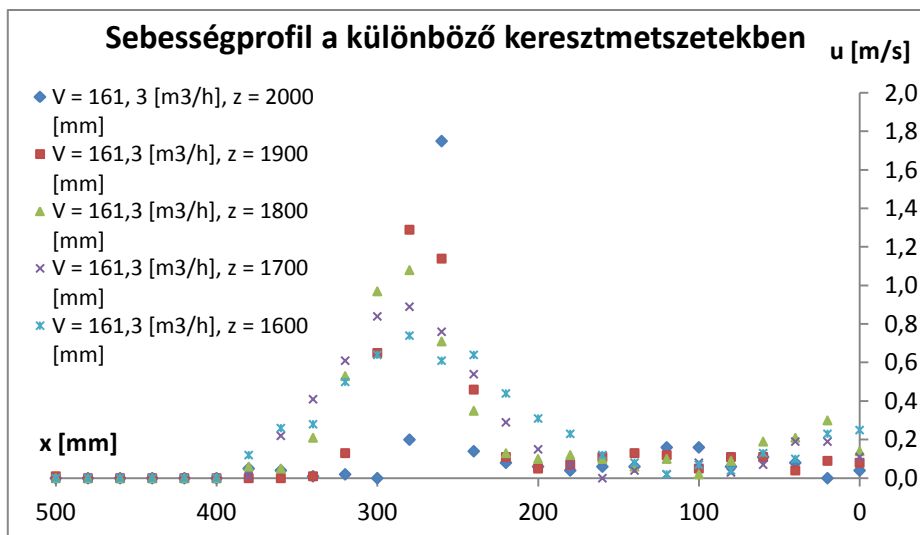
18. ábra: Maximális sebesség helyének változása állandó térfogatáramon

Az M2.14 – M2.29. ábrán minden mérési sorozatra elkészítettük a 18. ábrán bemutatott diagramot, melynek segítségével meghatározható a tapadási pont helyzetének változása a térfogatáram csökkentés hatására [1].



19. ábra: A tapadási pont változása izotermikus befúvásnál

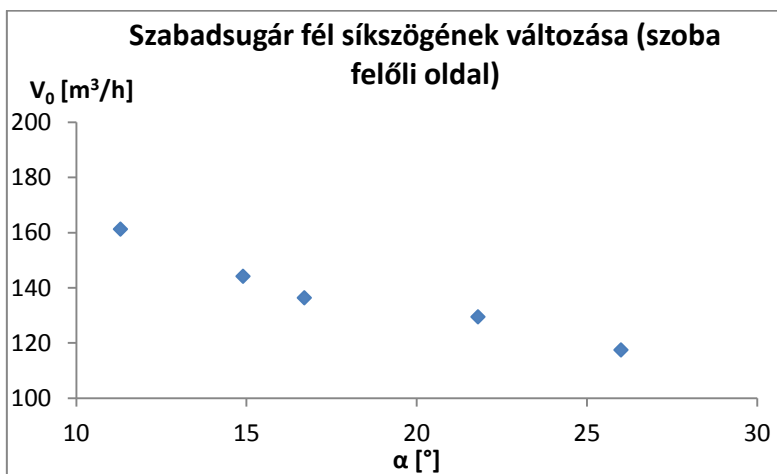
Izotermikus légbefúvás esetén a tapadási pont változása a 19. ábrán látható. Ezen megfigyelhető, hogy a térfogatáram csökkentésével a tapadási pont egyre közelebb kerül a befúvási keresztmetszethez, tehát minél kisebb a bejuttatott levegő mennyisége, annál hamarabb megindul a légsugár feltapadása a falfelületre. Ebben az esetben a sebességből származó erők dominánsak, a gravitációs térerő hatása izotermikus állapotban elhanyagolható. Az elhanyagolás oka egyrészt a kis hőmérséklet- (és sűrűség) különbség a befúvási- és a helyiség hőmérséklet között, másrészt pedig a levegő alacsony sűrűsége izotermikus állapotban ($\approx 1,2$ [kg/m³]) [2]. A tapadási pont változására tett megállapítások könnyen beláthatók, ha a szabadsugar síkszögének változását ábrázoljuk a térfogatáram csökkenés függvényében.



20. ábra: Sebességprofil a különböző keresztmetszetekben

A 20. ábrán a z irányban mért sebességprofilokat ábrázoltuk egy állandó térfogatáramon. Látható, hogy a befúvástól ($z = 2000$ [mm]) távolodva a sebességek csökkenésével a szabadsugár vastagodik, a sebességprofilok szélesednek [2].

A sebességprofil talppontjának a szimmetriatengelyétől való távolságát és a sebességprofil magasságát felhasználva, megfelelő léptékezés után tangens szögfüggvénnyel számítható a szabadsugár síkszöge állandó térfogatáram esetén. A csökkenő térfogatáramoknál megismételve a számítást, a 21. ábrán látható végeredményt kapjuk. Szükséges megemlíteni, hogy az így meghatározott síkszög csak a szabadsugár szoba felőli oldalára érvényes, hiszen a fal felől tapasztalható szekunder áramlások és a fal „torlasztó” hatása a 15. ábrához hasonlóan torzítja a sebességprofilot. A 21. ábrán tapasztalható, hogy a befűjt légmennyiség csökkentésével a szabadsugár síkszöge növekszik, így a sugár vastagodik. Ennek alapján tehát belátható, hogy a térfogatáram csökkentésével a légsugár egyre hamarabb találkozik a falfelülettel, vagyis a tapadási pont közeledik a befúváshoz.

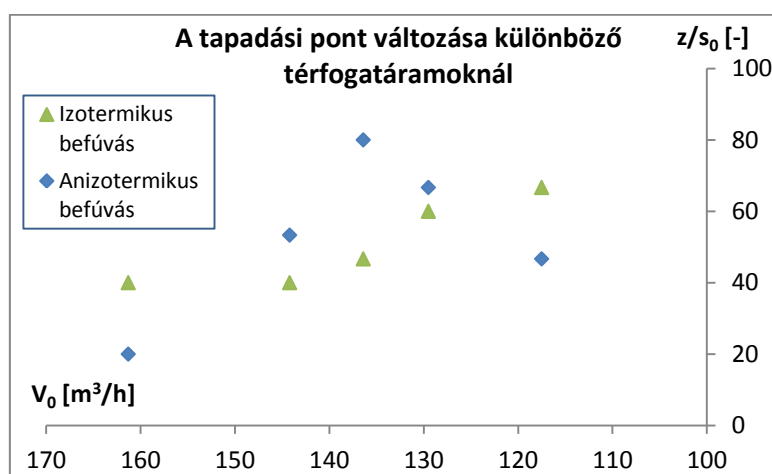


21. ábra: Szabadsugár síkszögének változása

A teljes mérési keresztmetszetben érvényes sebességeloszlás az *M2.8. – M2.13. ábrán* látható.

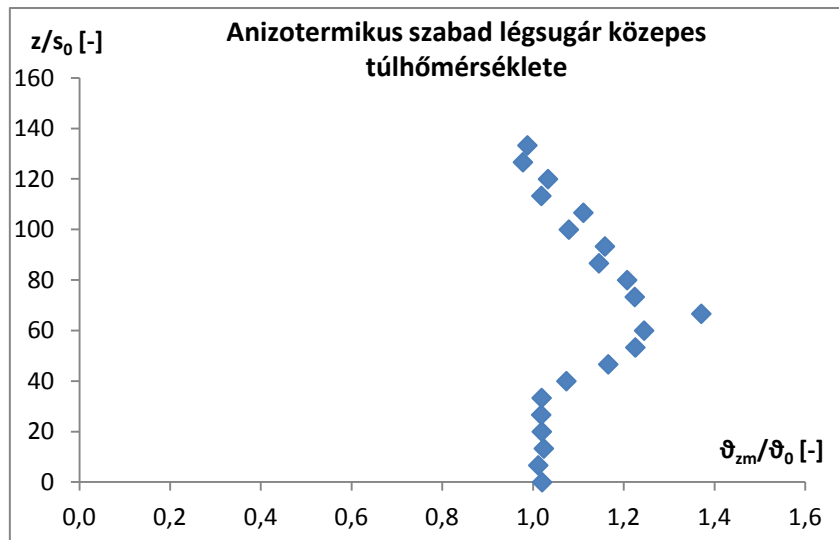
4. 3. Anizotermikus légbevezetés

Anizotermikus vizsgálat esetén megismételtük az előző pontban bemutatott kiértékelést, amelynek eredményeként a *22. ábrán* a tapadási pont változását ábrázoltuk az izotermikus állapottal összehasonlítva [1].



22. ábra: Tapadási pont helyzetének változása a befűjt térfogatáram függvényében

A *22. ábrán* az anizotermikus tapadási pont növekedési tendenciája csak egy meghatározott pontig érvényes. A függvénynek egy inflexiós pontja van, melytől a tapadási pont a térfogatáram csökkenésével távolodik a befűvéstől. A görbületváltás oka egyrészt a befűvási hőmérséklet csökkenésében, másrészt a Re-szám változásában keresendő. A befűvási hőmérséklet csökkentésével a befűjt levegő sűrűsége növekszik, aminek hatására az izotermikus befűvéssal szemben már nem hanyagolható el a gravitációs térerő hatása [2], [8]. A térfogatáram csökkentésével a sebességből származó erők is csökkennek, a gravitációs erő pedig dominánssá válik, ami a tapadási pont „visszaesését” okozza a kifűvási keresztmetszettől. Másik oka az inflexiós pont kialakulásának a Re-szám csökkenése a kifűvéstől távolodva. Ennek hatására az áramlás már nem lesz tisztán turbulens, hanem a lamináris – turbulens átmeneti tartományhoz közelít, instabillá válik [2].



23. ábra: Anizotermikus légsugár közepes túlhőmérséklete

Anizotermikus légbevezetésnél további érdekesség a befűjt levegő közepes túlhőmérsékletének változása a befűvástól mért dimenziótlan távolság függvényében (23. ábra).

A befűvási túlhőmérséklet:

$$\vartheta_0 = t_k - t_0 \text{ [K]}. \quad (19)$$

A bevezetett légsugár közepes túlhőmérséklete:

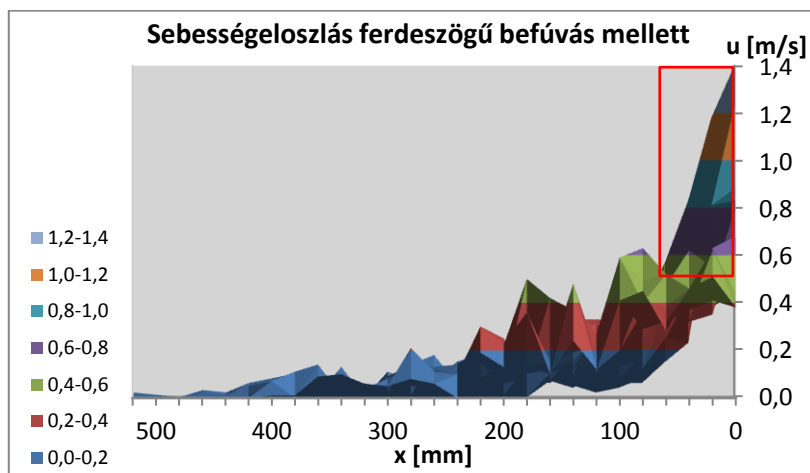
$$\vartheta_{zm} = t_k - t_{zm} \text{ [K]}. \quad (20)$$

[7], [8]

A (20) összefüggés segítségével belátható, hogy ha a befűjt levegő közepes hőmérséklete (t_{zm}) csökken, állandó t_k környezeti hőmérsékletet feltételezve a ϑ_{zm} közepes túlhőmérséklet növekszik a 23. ábrán látható módon.

Az ábra alapján a bevezetett légsugár hőmérsékletprofilja a falfelület irányába „elhajlik”, követi a maximális sebesség helyének változását egészen a tapadási pontig, így ennek irányába tehát csökken a hőmérséklet. Látható, hogy a tapadási pont hatása nemcsak a sebesség-, hanem a hőmérsékletprofil segítségével is kimutatható. A 23. ábrán $z/s_0 \approx 0 \dots 40$ közötti tartományban a dimenziótlan hőmérsékletek jó közelítéssel függőleges egyenesre esnek. Ez az egybeesés azzal magyarázható, hogy a falra felpadadt levegőréttegben a hőmérséklet eloszlás közel homogén. A dimenziótlan hőmérséklet eloszlások az egyes mérési sorozatoknál az M3.38 – M3.42. ábrán láthatók.

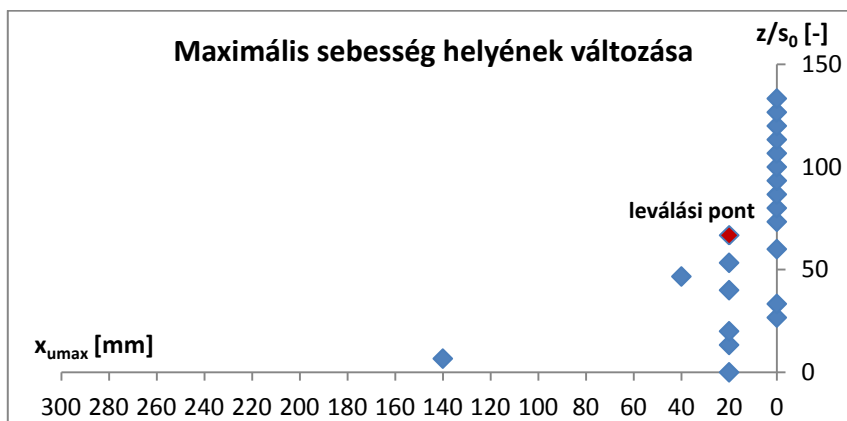
4. 4. Ferdeszögű, izotermikus légbefúvás



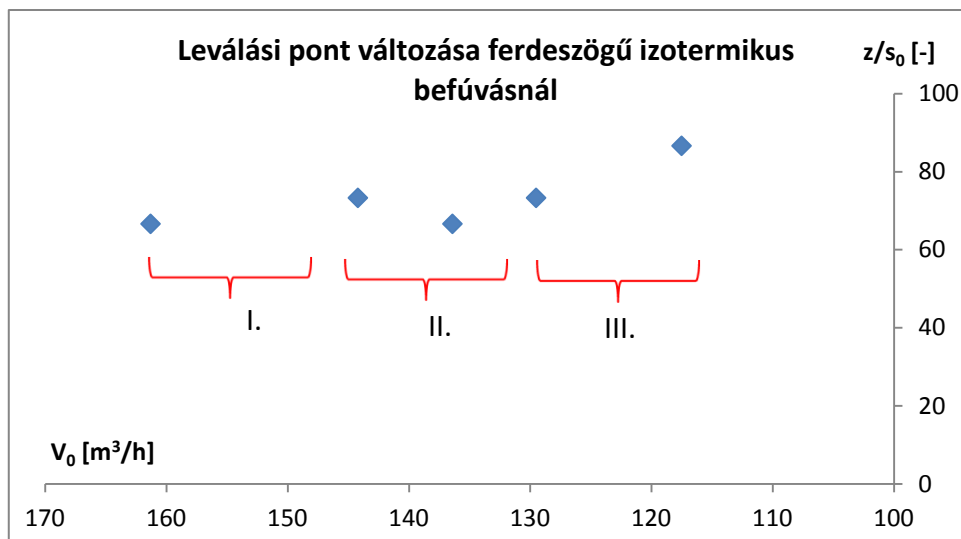
24. ábra: Ferdeszögű befúvás sebességeloszlása

Ferdeszögű izotermikus légbefúvásnál a falfelület irányába kényszerített levegő kezdetben a falra feltapadva, azon „kúszva” áramlik, adott vastagsággal jellemezve (24. ábra, piros téglalap). Az izotermikus- és anizotermikus vizsgálatokkal szemben itt nem tapadási-, hanem *leválási pontot* kell keresnünk. Ennél a pontnál a levegő elválk a falfelülettől, majd sebességprofilja a faltól távolodva fokozatosan leépül és $x \approx 500$ [mm]-es távolságban közel zérussá válik. Az egyes mérési sorozatoknál meghatározott sebességeloszlások az M4.8. – M4.40. ábrán láthatók.

Hasonlóan az előző két mérési beállításhoz, a maximális sebesség helyének változása itt is szemléletes képet ad a leválási pont helyzetének változásáról. A 25. ábrán megfigyelhető, hogy a befúvástól a leválási pontig a maximum sebességértékek függőleges egyenesre esnek, tehát a sebességprofil itt közel homogén, a légsugár a falon kúszik. A leválási pontot követően azonban már kevésbé egyenletes a maximális sebesség eloszlása. A különböző mérési sorozatokra elkészített diagramok az M4.14. – M4.29. ábrán láthatók.



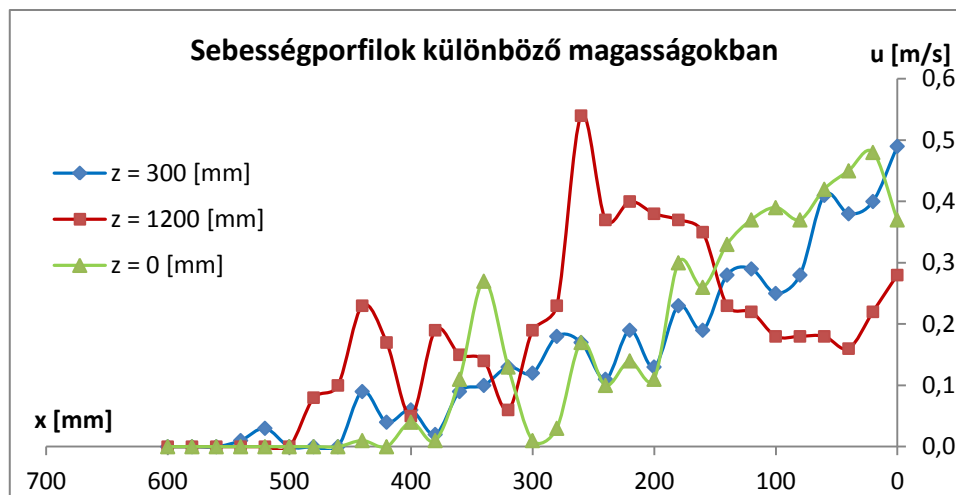
25. ábra: Maximális sebesség helyének változása ferdeszögű befúvásnál



26. ábra: Leválási pont helyének változása ferdeszögű befúvásnál

Hasonlóan az előző vizsgálatokhoz, itt is a maximális sebesség helyének változását bemutató diagram segítségével figyeltük meg a leválási pont változását a térfogatáram függvényében. A 26. ábrán látható görbeseregnek két inflexiós pontja is van. A térfogatáram csökkentésével a I. szakaszon a befúvási keresztmetszet felé mozog a leválási pont. Az ezt követő II. szakaszon azonban csökkenő tendencia mutatkozik, majd egészen kis térfogatáramoknál ismételten a befúvás felé közeledik a leválási pont (III. szakasz). Az I. és II. szakasz közötti inflexiós pontot okozhatja mérési hiba, hiszen ebben a tartományban még nem csökken annyira a sebesség értéke, hogy a mérési pontok a lamináris – turbulens átmeneti tartományba tartozzanak. Ennek megfelelően a továbbiakban javaslatot teszünk a mérési síkon belüli felosztás sűrítésére és további mérési sorozatok fölvételére a mérési pontosság növelése érdekében.

Az eddigi vizsgálatoknál láthattuk, hogy a falfelületen minden esetben kialakul egy meghatározott vastagságú, „kúszó” levegőréteg, melynek vastagságát legkönnyebben a fal közelében mért sebességeloszlás segítségével tudjuk meghatározni. Ez a vizsgálat jelen esetben azonban a következő problémákat veti föl. A 27. ábrán különböző z magasságokban mért sebességprofilokat ábrázoltuk izotermikus állapotban. A $z = 1200$ [mm]-es magasság a tapadási pont előtti, míg a $z = 300$ [mm] és $z = 0$ a tapadási pont utáni keresztmetszet. Az ábrán látható, hogy a fal közelében $x \approx 0 \dots 200$ [mm] között a sebességprofilok meglehetősen egyenetlenek. Ebből kimutatható ugyan a szekunder áramlások és a fal „torlasztó” hatása, azonban a jelenlegi sebességprofilok nem alkalmasak a fali levegőréteg vastagságának becslésére.



27. ábra: Különböző magasságokban mért sebességprofilok

További érdekesség a $z = 0$ [mm]-nél végzett sebességmérés eredménye (27. ábra). Mint azt a 3. 5. pontban is részleteztük, a $z = 0$ csak a mérési sík nullpontja, a helyiség padlószintje ettől a lokális ponttól körülbelül 150 [mm]-es távolságra található. Ennek közelében végzett sebességmérés kiértékelésekor már nemcsak a fal, hanem a padlózat „torlasztó” hatását is figyelembe kell vennünk, hiszen a falon kúszó levegőréteg elérve a padló szintjét körülbelül 90° -os szögben befordul és azon kúszva halad tovább. A 27. ábrán $z = 0$ -nál mért sebességprofil kiemelkedései és mélypontjai tehát nemcsak a szekunder áramlásoknak és a fal torlasztó hatásának köszönhető, hanem a közeli padló hatásának is.

4. 5. Javaslatok

A kiértékelés során láttuk, hogy az előmérések lefolytatásához fölvetett mérési pontok száma ugyan elegendő arra, hogy kimutassuk a szekunder áramlások- és a falfelület torlasztó hatását. Szintén megfelelő volt a mérési pontok száma a tapadási pont-, a leválási pont- és a szabadsugár síkszög változásának vizsgálatára. Mint tapasztaltuk, abban az esetben, ha a falhoz- és a padlóhoz közeli levegőréteg viselkedését szeretnék vizsgálni, már finomabb léptékezés szükséges a mérési pontok fölvételekor. Tovább növelhető a pontosság a mérési sorozatok számának növelésével, így a tapadási pont- és a síkszög változásának meghatározása is pontosabbá, megbízhatóbbá válik.

A fentieknek megfelelően tehát a következő javaslatokat tesszük a kiértékelés finomítása érdekében.

1. Vízszintes (x) és függőleges irányú (z) lépésközök sűrítése a falfelület és a padló közelében lefolytatott mérésekhez.
2. A mérőszonda saját tengelye körüli 180 [°]-os elforgatásával lehetőség nyílik a padlón kúszó levegőréteg sebesség- és hőmérsékletmezőjének mérésére.
3. A mérési sorozatok számának duplázása már elegendő lehet a tapadási- és leválási pont változásának minél pontosabb leírására.

Összefoglalás

A dolgozatban ismertettük a résbefűvő anemosztátok főbb jellemzőit, alkalmazási területeit valamint az érintőleges légvezetési rendszerek vizsgálatának alapvető módszereit és céljait. Bemutattuk, hogy az általunk vizsgált résbefűvő konfigurációhoz igen kevés a referált szakirodalom, így első körben a méréses vizsgálati módszert alkalmaztuk.

A vizsgálati céljainknak megfelelően meghatároztuk a helyiségbe belépő levegőt jellemző sebesség- és hőmérsékletmezőt. Az előmérések során fölvetett mérési pontok száma első körben elegendőnek bizonyult, így a térfogatáram csökkentésével öt mérési sorozatot vettünk föl izotermikus, anizotermikus és ferdeszögű izotermikus befűvás alkalmazásával.

Az egyes mérési sorozatokra elvégzett kiértékelés során a sebességprofil változásán keresztül bemutattuk a szekunder áramlások légsugárra gyakorolt zavaró hatását. A különböző mérési keresztmetszetekben mért maximális sebesség helyének változásából meghatároztuk a tapadási pont vándorlását a térfogatáram csökkentésének függvényében. Láttuk, hogy izotermikus állapotban a befűjt légmennyiség csökkentésével a tapadási pont közeledik a befűvási keresztmetszethez. Anizotermikus légbefűvásnál ez a tendencia csak egy meghatározott térfogatáramig tapasztalható, ugyanis a csökkenő térfogatáram tartományban a gravitációból származó erők dominálnak a sebességből származó erőkkel szemben. A különböző keresztmetszetekben mért sebességprofilokból meghatároztuk a belépő szabadsugar sákszögét. Bemutattuk, hogy a térfogatáram csökkentése a sákszög növekedését eredményezi. Ferdeszögű izotermikus légbefűvás alkalmazása esetén már nem tapadási-, hanem leválási pontot kerestünk. Tapasztaltuk, hogy a leválási pont változása és a térfogatáram csökkenés közötti kapcsolatot szemléltető görbének két inflexiós pontja is van, emiatt a leválási pont változásának tendenciája nem határozható meg egyértelműen. A fali levegőréteg vastagságának meghatározásához valamennyi beállításnál a sebességprofil vizsgálatából indultunk ki. Láttuk azonban, hogy a fal közelében mért sebességprofil egyenetlensége nem teszi lehetővé a fali levegőréteg vastagságának becslését.

A kiértékelés pontosságának növelése érdekében javaslatokat tettünk a mérési pontok közötti lépésköz sűrítésére, továbbá a mérési sorozatok számának növelésére. Bemutattuk, hogy a mérőrendszer átalakításával lehetőség nyílik a padló közelében kialakuló áramlás vizsgálatára is.

A mérőhelyiség kedvező kialakításából lehetőség adódik további mérési vizsgálatok elvégzésére a résbefúvó anemosztát helyzetének változtatásával. Ebben az esetben vizsgálható, hogy a résbefúvó faltól különböző távolságokban történő elhelyezésével hogyan változik a tapadási- és a leválási pont, a szabadsugár síkszöge, valamint a fali levegőréteg vastagsága. További céljaink között szerepel a dolgozatban bemutatott vizsgálatok elvégzése numerikus szimuláció alkalmazásával. Ennek során a mérési eredményekkel történő validálást követően lehetőség nyílik olyan vizsgálatok lefolytatására is, amelyek a mérési módszerrel csak körülményesen végezhetők el. Ezek közé tartozik többek között az áramlás vizualizációja, valamint a helyiségben kialakuló szennyezőanyag-eloszlás vizsgálata.

Irodalom

- [1] *Both Balázs, Goda Róbert*: Résbefűvő anemosztátok méréses vizsgálata érintőleges légvezetési rendszer alkalmazása esetén. Magyar Épületgépészet, LX. évfolyam, 2011/11. szám.
- [2] *Lajos T.*: Az áramlástan alapjai, 4. kiadás. Budapest, Lajos Tamás, 2008.
- [3] *Szücs Ervin*: A modellezés elmélete és gyakorlata.
Forrás: <http://web.t-online.hu/eszucs7/modell/Modell.htm#Tartalom>
- [4] *J. Moureh, D. Flick*: Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. International Journal of Heat and Fluid Flow 26 (2005) 12–24.
- [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] *Jean Moureh, Denis Flick*: Wall air-jet characteristics and airflow patterns within a slot ventilated enclosure. International Journal of Thermal Sciences 42 (2003) 703–711.
- [7] *Fekete – Menyhárt*: A légtechnika elméleti alapjai. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [8] *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.
- [9] *Dr. Magyar Tamás*: Légtechnikai rendszerek (MSc), egyetemi előadás jegyzet (kézirat) Budapest, 2011.
- [10] *Dr. Huba Antal – Dr. Halász Gábor*: Mérés és jelfeldolgozás, BME előadás jegyzet (kézirat), Budapest, 2008.
- [11] Lindab tervezési segédlet, 2007. Elérhetőség: <http://www.lindab.hu/dokumenter/HU-04-Theory.pdf>
- [12] *Szekeres Gábor*: A légtechnikai fejlesztések során alkalmazott hő- és áramlástan szimulációs eljárások. Buderus-Rosenberg szakmai napok, Visegrád, 2008. május 26-27.
Forrás: http://www.rosenberg.hu/hungary/content/software/Energiatakarékossagi_fejlesztések_Szekeres_Gabor.pdf
- [13] *Goda Róbert – Szekeres Gábor*: Légkezelőgép fejlesztése numerikus szimuláció alkalmazásával. Forrás: http://www.rosenberg.hu/hungary/content/misc/cikk-CFD_2007-03-09.pdf

[14] *Dr. Vad János*: Az áramlástan válogatott fejezetei (MSc), BME előadásjegyzet (kézirat), 2011.