

Nagyszámú befúvóelemmel ellátott légcsatorna opti- mális keresztmetszetének számítása

Czétány László¹

A cikk szerzője a BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék Komfort épületgépészeti MSc. szakirányának másodéves hallgatója. A cikkben ismertetett témával 2012 márciusa óta foglalkozik. 2012 novemberében az addig elért eredményeit ismertető dolgozatával a BME-n TDK első díjat nyert, és így jelen cikk megjelenésének idején az Országos Tudományos Diákköri Konferencián is szerepel. A folyamatban lévő kutatás a gyakorlat számára is jól hasznosítható további eredményeit remélhetőleg e lap hasábjain is ismerteti a későbbiekben.

Abstract

The blown in amount of air is always a function of the static pressure. Therefore the static pressure should be kept at a suitable value. In practice this is done through balancing. This process is increasing the costs of the investment because special elements (balancing dampers) are needed and the staff with the needed knowledge has to be paid. In this paper a sizing method is presented. This method makes possible to avoid the balancing. The advantage of this is that according to the calculations done before the air flow rate has almost no impact in the optimal cross section in the practical range of the flow.

Keywords: Air duct, Air duct optimization, huge number of ATD's, dynamic pressure regain

Összefoglalás

A légcsatornára csatlakozó anemosztátokon befúvott levegő térfogatárama minden esetben a statikus nyomás függvénye. A statikus nyomás megfelelő értéket tartását a gyakorlatban beszabályozással valósítják meg. A beszabályozás növeli a beruházási költségeket, hiszen be kell építeni a beszabályozáshoz szükséges szerelvényeket, és megfelelő szakértelemmel rendelkező munkaerőnek is kell végeznie a beszabályozást. Jelen munkában egy olyan méretezési eljárást mutatunk be, mely lehetővé teszi a beszabályozás elhagyását. Az eljárás egyik előnye, hogy bizonyos körülmények között az így meghatározott optimális keresztmetszet a legtöbb esetben változó térfogatáramú viszonyok között is optimális marad.

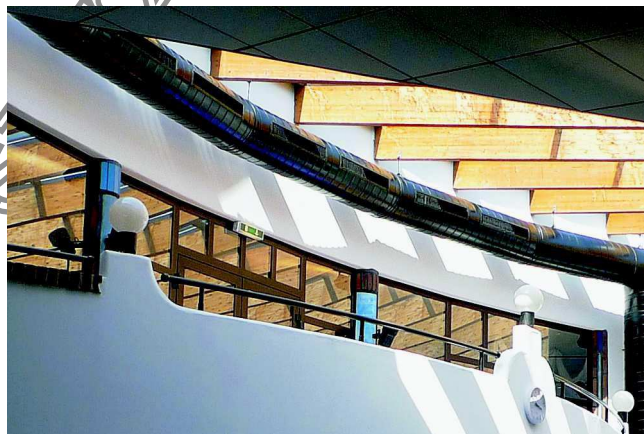
Kulcsszavak: légcsatorna; légcsatorna optimalizálás; nagyszámú befúvóelem; dinamikus nyomás visszanyerés



¹ MSc hallgató, BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék

1. Bevezetés és célkitűzések

Kutatási célunk olyan légcsatornák vizsgálata, amelyek nagyszámú befúvó elemet (sugárfúvókát, rácsot stb.) tartalmaznak (ld. **1. ábra**, **4. ábra**), vagy a befúvó keresztmetszet a légcsatorna tengelye mentén folytonosan húzódik (szövet légcsatornák, egyes résanemosztatók stb.). Ezek beszabályozása költséges, vagy esetleg egyáltalán nem is lehetséges. A nagyszámú befúvóelemen levegő lép ki, emiatt a légsebesség és azon keresztül a dinamikus nyomás is csökken, ami állandó keresztmetszetű légcsatorna esetében a statikus nyomás növekedését okozná. A statikus nyomást azonban csökkentik az áramlási veszteségek. Hagyományos kialakítás esetén a levegőnek a légcsatorna mentén csökkenő térfogatáramához csökkenő légcsatorna keresztmetszetet alkalmaznak, és ez a statikus nyomás csökkenését eredményezi.

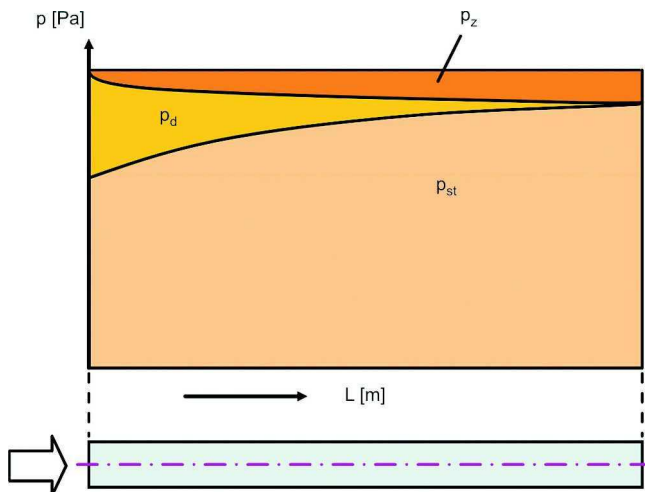


1. ábra. Légcsatorna légrácsokkal

A légcsatorna hálózatok méretezése során a legfontosabb bemenő paraméter a szállítandó légmennyiség, a cél pedig a légcsatorna keresztmetszetek meghatározása valamilyen méretezési módszerrel. A leggyakoribb módszer az áramlási sebességre való méretezés, de lehetséges a fajlagos nyomásesésre, vagy akár a statikus nyomás visszanyerésre is méretezni.

Ezeknek a méretezési eljárásoknak a hagyományos módon való alkalmazása az általunk vizsgált esetekben azonban nem lehetséges, ezért közvetlenül az áramlást leíró alap-egyenletekből kell kiindulnunk.

Befúvó légcsatornák esetében a problémát az jelenti, hogy a térfogatáram folyamatosan csökken. Ahogy az a következő oldalon lévő **2. ábrán** látható, állandó keresztmetszetű szövet légcsatornában a dinamikus nyomás nagysága a térfogatáram függvényében folyamatosan csökken, miközben a statikus nyomás folyamatosan nő; így a légcsatorna végén egységnyi keresztmetszeten több levegő lép ki, mint az elején. Nyilván-



2. ábra. A nyomás változása textil légcsatornában

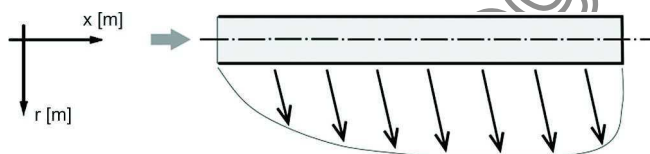
p_z : nyomásvesztés; p_d : dinamikus nyomás; p_{st} : statikus nyomás [1]

való, hogy ez a probléma megszüntethető a keresztmetszetek csökkentésével, ami szabványos méretek alkalmazása esetén nem minden esetben vezethet megfelelő eredményre.

Célunk olyan folytonosan változó keresztmetszetek meghatározása, amelyekkel ez a folyamat megakadályozható, és a kibocsátott térfogatáram a vezeték mentén állandó értéken tartható. A következőkben a komfort célú légtechnikai rendszerekben előforduló sebességtartományra (2 – 8 m/s ([7])) meghatározott eredményeket ismertetjük.

2. A jelenséget leíró alapegyenletek

A vizsgálandó feladatot a 3. ábra szemlélteti. A jelenséget állandósult állapotban vizsgáljuk. Elhanyagoljuk a sűrűség változását. A hőmérsékletet állandónak feltételezzük.



3. ábra. A modellezett jelenség sematikus vázlata

A probléma leírására a Navier-Stokes-egyenlet egyszerűsített, egydimenziós formáját használhatjuk [3]:

$$w(x) \cdot \partial w(x) / \partial x = -\partial p_{stat}(x) / \partial x / \rho + \lambda(x) / 2D(x) \cdot w(x)^2, \quad (1)$$

ahol:

w – az axiális átlagsebesség az adott helyen, [m/s],

ρ – a folyadék sűrűsége, [kg/m³],

p_{stat} – a statikus nyomás, [Pa],

x – a helykoordináta, a cső hossz tengelye mentén,

λ – a cső súrlódási tényező, [–],

D – a cső átmérője, [m].

Másik alapegyenletünk a *kontinuitási egyenlet*, amelyet a vizsgált esetben a következő alakban írhatunk fel:

$$w(0) \cdot D(0)^2 \cdot \pi / 4 - w(x) \cdot D(x)^2 \cdot \pi / 4 - \int_{A_{ki}(x)} w_{ki}(\zeta) d\zeta = 0, \quad (2)$$

ahol:

w – az axiális átlagsebesség az adott keresztmetszetben, [m/s],

$w_{ki}(\zeta)$ – a kiáramlási sebesség, amely a helytől függ, ha a csatorna anyaga áteresztő,

D – az átmérő nagysága az adott helyen [m],

A_{ki} – a kiáramlási felület, nagysága a helytől függ, ha a csatorna áteresztő [m²].

3. Megoldás nem áteresztő falú légcatorna esetén

Igen gyakori probléma, ha egy hagyományos légcatornára anemosztátok folytonos sora csatlakozik, és minden anemosztáton, azaz minden keresztmetszetben azonos térfogatáramot szeretnénk kibocsátani. Ugyanez a probléma olyan hossz- és résanemosztátok esetében is, ahol a levegő az anemosztátba a kifúvás irányára merőlegesen lép be. Ilyen, sok lég- ráccsal ellátott légcatorna látható a 4. ábrán.



4. ábra. Légcatorna sok befúvóelemmel

3.1. Megoldás kör keresztmetszetre

A fentiekben ismertetett egyenletek analitikusan nem oldhatóak meg, ezért valamilyen numerikus módszert kell alkalmazni. Mielőtt a numerikus megoldáshoz hozzákezdünk, a kifejezéseket mindenképpen egyszerűsíteniük kell. Ehhez először meg kell fogalmaznunk a peremfeltételeket, továbbá egyszerűsítésekre van szükség. Az első peremfeltétel, és egyben az egyik ilyen egyszerűsítés, hogy a térfogatáram a légcatornában folytonosan, lineárisan csökken. Ez a peremfeltétel összhangban van az eredeti célkitűzésünkkel, hogy t.i. a kifúvás térfogatárama minden keresztmetszetben azonos.

Másik egyszerűsítésünk a súrlódási veszteség számításához szükséges. Feltételezzük, hogy a Colebrook-White összefüggéssel a cső súrlódási tényező kiszámítható. Ezen túl egy további peremfeltételünk, hogy a légcatorna fala nem áteresztő, és a csatornán egyenletesen elosztott, azonos ellenállású, befúvóelemek találhatók. Mivel a kiáramló térfogat-

áram így nem függ a légcsatorna külső felületének nagyságától, ezért az egyenletes kiáramlás biztosítása érdekében a statikus nyomásnak a légcsatorna hossz tengelye mentén állandónak kell maradnia.

Ebből következően feltétel az is, hogy a csatornán azonos ellenállású, egyenletesen elosztott befűvőelemek legyenek. Ezek alapján az (1) – (2) alapegyenletekből kiindulva kör keresztmetszetű légcsatornára a következő összefüggés határozható meg [2]:

$$D'(x) = [\lambda(x)/2 - \delta/(1-\xi) \cdot D(x_0)/L]/2, \quad (3)$$

ahol:

$D'(x)$ – a légcsatorna átmérőjének deriváltja,

$D(x_0)$ – a légcsatorna átmérője a kiinduló keresztmetszetben, [m], (x_0 minden esetben a kiinduló keresztmetszetet jelenti),

$\xi = x/L$ – a dimenziótlan helykoordináta, [–],

$\delta = D(x)/D(x_0)$ – a dimenziótlan átmérő, [–].

Az egyenlet megoldására a negyedrendű *Runge-Kutta* módszerrel használtuk fel, amelynek ismertetése a szakirodalomban [6] megtalálható. Az **5. ábrán** a megoldások láthatók a kiinduló keresztmetszetben feltételezett öt különböző belépési sebességre (vagy ami ezzel egyenértékű, öt különböző térfogatáramra). Az átmérő kezdeti értéke $D(0) = 315$ mm, a légcsatorna hosszúsága $L = 3$ m, $L/D = 9,52$. A csatorna falának érdességét elhanyagoltuk. Jól látható, hogy a különböző belépési sebességek, és ebből következően különböző befűvott térfogatáramok esetében nem változik az optimális átmérő nagysága.

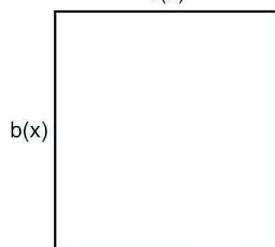
A **6. ábrán** az látható, hogy hosszú légcsatorna esetén ($L = 25$ m, $D(0) = 315$ mm, $L/D = 79,37$) ez az előnyös tulajdonság már nem mutatkozik meg, hasonlóan azokhoz az esetekhez, ahol a csővezeték érdességét nem hanyagoljuk el.

Jól látható, hogy az ilyen módon optimalizált légcsatorna alakja igen bonyolult, nagy valószínűséggel nem gyártható le, ezért a megvalósításhoz a geometria egyszerűsítése szükséges.

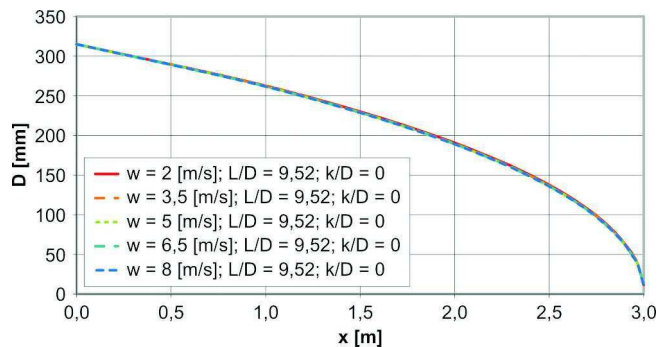
3.2. Megoldás négyszög keresztmetszetre

A korábbiakból nyilvánvalóan következik, hogy a kör keresztmetszetre vonatkozó optimális megoldás gyártástechnikai okokból nem valósítható meg pontosan. Ezért egy olyan megoldást kerestünk, amely nagyobb eséllyel vihető át a gyakorlatba. Ebben az esetben is a korábban felvázolt alapegyenleteket kell megoldanunk, olyan négyszög keresztmetszetet feltételezve, amelynek egyik oldala állandó, tehát csak a másik változik. Az egyes oldalak jelölésének definíciói a **7. ábrán** láthatók.

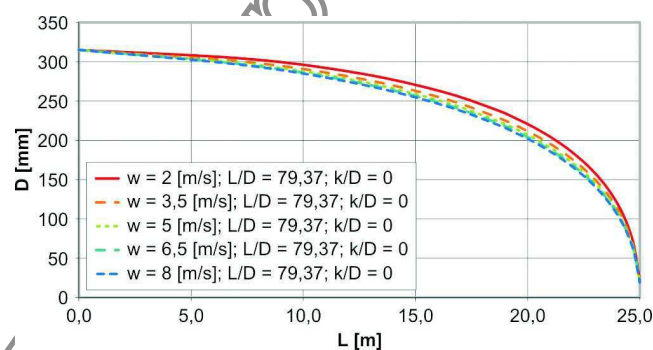
7. ábra. Definíciós vázlat, a négyszög keresztmetszet oldalainak jelölései



Feltételünk szerint $b(x) = \text{állandó}$. Így a következő megoldást kaphatjuk:



5. ábra. Az optimális átmérő változása azonos kezdeti átmérőjű légcsatornák esetén, különböző sebességek mellett (D a kiinduló keresztmetszet nagysága, w pedig a kiinduló keresztmetszetbeli sebesség jelen esetben)



6. ábra. Az optimális átmérő változása azonos kezdeti átmérőjű légcsatornák esetén, különböző sebességek mellett

$$c'(x) = \frac{1 + \omega(x)}{4} \cdot \lambda - \frac{\gamma(x) \cdot (1 + \omega(x_0))}{2(1-\xi)} \cdot \frac{D_h(x_0)}{L}, \quad (4)$$

ahol:

$\omega(x) = c(x)/b(x_0)$ – a két oldal aránya a hosszúság függvényében, [–],

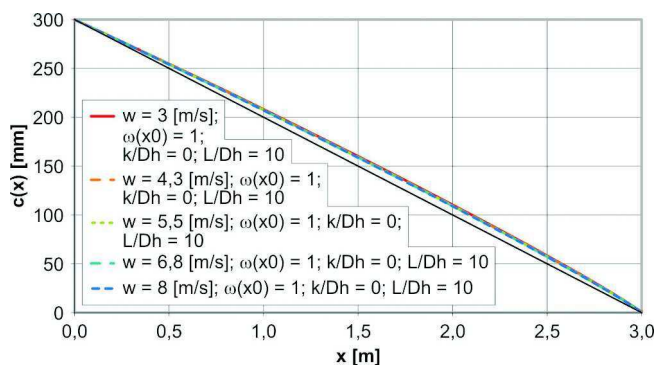
$\gamma(x) = c(x)/c(x_0)$ – a dimenziótlan, változó nagyságú oldal, [–],

$D_h(x_0)$ – pedig a hidraulikus átmérő, [m].

A csőszűrlődési tényezőt a *Colebrook-White* összefüggéssel lehet számítani az egyenértékű hidraulikus átmérő alapján. Meg kell jegyezni, hogy a szűrlődési veszteség számításához szükséges jellemző méretet egyes források máshogy állapítják meg [4]. Abban az esetben, ha a rövidebb és a hosszabb oldal aránya kisebb, mint 0,5, a *Reynolds*-szám korrekciója szükséges [5].

Az eredmények a következő oldalon bemutatott **8. ábrán** láthatók.

Az egyes oldalak $c(0)/b(0)$ aránya a kiinduló keresztmetszetben $c(0)/b(0) = 1$; a hosszúság 3 m; a hidraulikus egyenértékű átmérő nagysága $D(0) = c(0) = b(0) = 300$ mm, a csatorna falának érdessége pedig elhanyagolható. Az ábrán feketével behúzott egyenes vonal azt szemlélteti, hogy az eredményként kapott vonalaink a látszattal ellentétben a hosszúságnak nem lineáris függvényei.

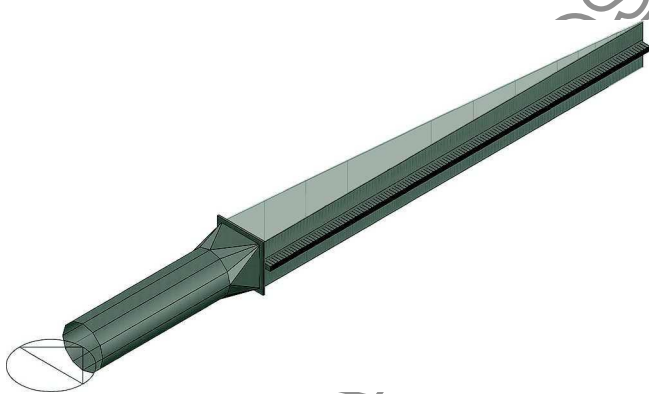


8. ábra. Az optimális átmérő változása 300 mm kezdeti átmérőjű légszatornák esetén, különböző belépő légsebességek mellett

4. Összefoglalás

A fentiekben olyan módszert mutattunk be, amelynek továbbfejlesztése után a sok befűvőelemet tartalmazó légszatornák méretezése lehetővé válik. Eredményeinket számos egyszerűsítést alkalmazva kaptuk meg, ezért a gyakorlatban is alkalmazható, négyzet keresztmetszetre vonatkozókat a későbbiekben mérések segítségével és CFD számítással is vizsgálni kívánjuk. A mérés tervezése során azt a célt is szem előtt tartva járunk el, hogy az eredmények segítségével a CFD számítást validálni lehessen. Ily módon a vizsgálat a későbbiekben a költséges és időigényes laboratóriumi mérések kiiktatásával tisztán számítógépes szimulációval is lehetővé válik.

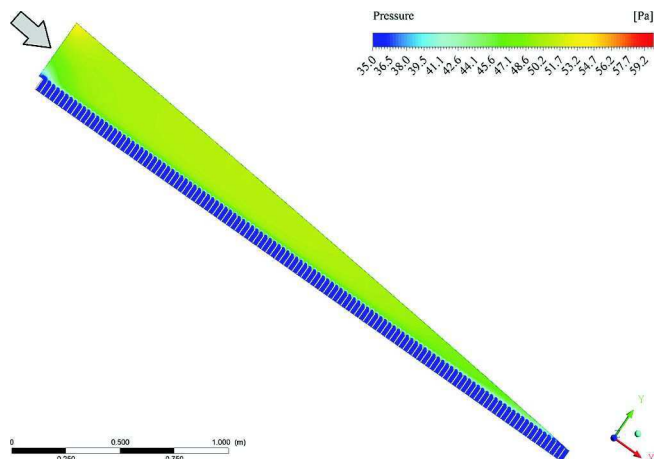
A 9. ábrán az elképzeléseink szerinti, jelenleg építés alatt álló mérőberendezés kialakítása látható.



9. ábra. A tervezett mérőberendezés felépítése

A mérésre felhasználandó légszatorna elem előlapján a fűvőkák folytonos sora helyezkedik el, ily módon az elméletileg megfogalmazott folytonos elvétel megvalósíthatóvá válik. A fedő- és alaplap alakját a (4) összefüggésből határozzuk meg; a hátlap a 7. ábrán láthatókhoz hasonló görbére simul rá. A későbbiekben egyes fűvőkák lezárásával a gyakorlatban előforduló, diszkrét elhelyezkedő befűvőelemekkel ellátott légszatornák vizsgálata is lehetséges.

A mérőberendezés elkészítését megelőzve a csatorna terveit felhasználva előzetes CFD számítást is végeztünk egy kereskedelmi szoftverrel (Fluent). Az eddigi eredmények kö-



10. ábra. Előzetes eredmények a statikus nyomáslaszásra vonatkozóan. Az értékek Pascal-ban értendők. Az átlagos sebesség a belépési keresztmetszetben 5 [m/s] volt

zül a legfontosabb a 10. ábrán látható. A kitűzött célnak megfelelően a közel állandó statikus nyomás eredményeként a hossztengety menti állandó egyenletes kifűvás jó közelítéssel megvalósul.

Források

- Zdeněk Příhoda, Michal Bureš: Reach of airflow from the textile diffusers, Příhoda s.r.o, Hlinsko, Czech Republic, 2006
- Czétány László: Nyomás változásának vizsgálata befűvásra alkalmazott légszatornában.
- TDK dolgozat, BME, témavezető: dr. Szánthó Zoltán, 2012
- Dr. Garbai László: Hidraulikai számítások az épületgépészetben és az energetikában.
- Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007, ISBN 978 963 05 8516 3
- Zhipeng Duan et al.: Pressure drop for fully developed turbulent flow in circular and noncircular ducts.
- Journal of Fluids Engineering, pp. 061201.1-061201.10, Vol. 134, ISSN: 0098-2202, 2012
- Dr. Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai.
- Budapest, 2008
- William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery: Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1992, Second Edition; ISBN 0-521-43108-5
- Recknagel, Sprenger, Schramek: Fűtés- és klímatechnika.
- Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, 2000