

M11

TESTEK KÖRÜLI ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

1. A mérés célja, gyakorlati jelentősége

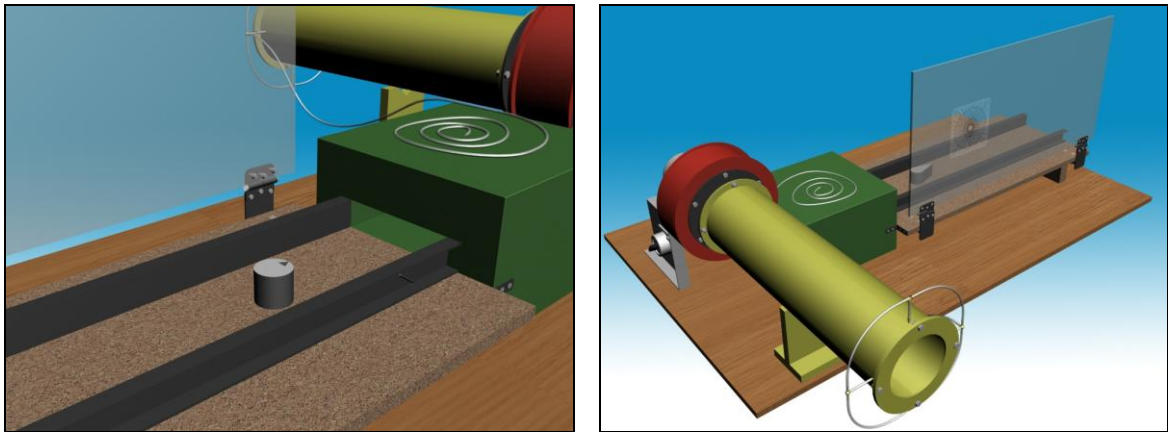
A mérés célja:

- különböző (négyzet, kör és dúcprofil) keresztmetszetű, oszlop alakú testek körül kialakuló áramkép vizsgálata áramlás megjelenítési módszer segítségével,
- a testek körül kialakuló nyomásmegoszlás meghatározása méréssel,
- a kialakuló áramkép és a fal menti nyomásmegoszlás közötti kapcsolat meghatározása,
- a mért nyomásmegoszlás alapján ellenállás tényezők számítása,
- a különböző alakú testek körül kialakuló áramkép jellemzőinek összehasonlítása.

A gyakorlatban sokszor van szükség az áramlásba helyezett testek körül kialakuló áramlási jellemzők ismeretére. Közülük a legfontosabbak az áramlás során a test körül kialakuló sebesség- és nyomásmegoszlás, illetve a testre ható áramlás eredetű erő. Ezeknek a jellemzőknek az ismerete igen fontos, például közúti járműveknél, repülőgépeknél a jármű dinamikai menettulajdonságainak meghatározásához, vagy épületszerkezetek szilárdsági méretezésnél a szél hatására keletkező erők miatt létrejövő terhelés meghatározásánál. A járművek körül kialakuló áramkép részletes ismerete például azért is fontos lehet, mert annak jellege szoros összefüggésben van a jármű falára felhordott szennyeződés mennyiségével és eloszlásával. A járművek külső felületének elpiszkolódása ellen a jármű körül kialakuló áramlás jellemzőinek befolyásolásával tudunk védekezni. Egy másik érdekes jelenség, hogy egyes testek körül bizonyos áramlási körülmények között periodikusan ingadozó áramkép alakul ki. Az időben periodikusan ingadozó sebességtérhez ingadozó nyomástér kapcsolódik.

Ha a test felülete mentén kialakuló nyomásmegoszlás időben periodikusan változik, akkor a testre ható eredő áramlási eredetű erő is periodikusan fog változni. Ha ilyen esetben az a kedvezőtlen helyzet alakul ki, hogy a gerjesztés periodicitása éppen megegyezik az áramlásba helyezett test mechanikai rezgéseinek sajátfrekvenciájával, akkor rezonancia alakul ki. Ekkor a mozgás amplitúdója addig nő, ameddig a mozgást segítő erők teljesítménye éppen megegyezik a mozgás során kialakuló veszteségi folyamatokban felemésztett teljesítménnyel. Ez az egyensúly azonban sok esetben olyan nagy amplitúdójú mozgásoknál áll be, ami a szerkezet mechanikai károsodásához vezethet. Ezért áramlásba helyezett, hosszúkás, lekerekített testeknél az áramkép statikus jellemzőinek vizsgálatát mindig ki kell, hogy egészítse a dinamikus jellemzők vizsgálata.

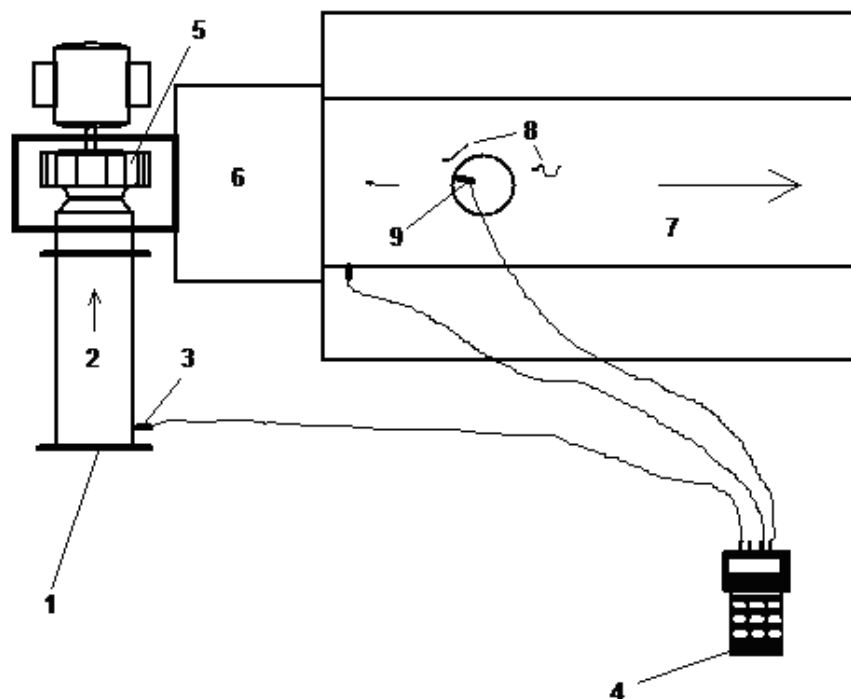
Jelen mérési feladat a témakör alapvető gyakorlati megismerésére ad lehetőséget laboratóriumi körülmények között.



1. ábra: A mérőberendezés 3D-s vázlata

2. A mérőberendezés leírása

A síkáramlás jellegű csatornaáramlások vizsgálatára alkalmas mérőberendezés két fő részből, az egyenletes kifúvási sebességprofil létrehozására alkalmas törpe szélcsatornából és a változtatható kialakítású mérőtérből áll. A teljes mérési kialakítást a rajta átáramló levegő áramlási iránya mentén, a 2. ábrának megfelelően a következő részek alkotják:



2. ábra: A mérőberendezés 2D-s vázlata

1. Térfogatáram mérésre alkalmas beszívó mérőperem.
2. A levegő bevezetésére szolgáló szívócső.
3. Nyomásmérési hely, amely nem más, mint a szívócső elején, közvetlenül a mérőperem után található kis keresztmetszetű megcsapolás. Nyomásméréshez a megcsapolás csatlakozó csövét vékony gumicsővel kötjük össze a nyomásmérő megfelelő kivezetésével. Az itt mért nyomásból a térfogatáram meghatározására nyílik lehetőség.
4. Kétsatornás digitális nyomásmérő
5. A levegő mozgását az elektromos motor hajtású radiális ventilátor végzi.
6. A szelláda feladata az egyenletes sebesség-megoszlású kilépő légsugár létrehozása. A szellárában a levegő először szűrőszöveten halad át, majd egy konfúzoron keresztül lép ki belőle. A szűrőszövet és a konfúzor is a radiális ventilátor nyomócsonkjából érkező egyenletes sebességprofil kisimítását szolgálja.
7. A mérőtér a vizsgálat tárgyát képező különböző csatornakialakítások létrehozására alkalmas. A szellárából kilépő közel egyenletes sebesség-megoszlású levegőáramot közvetlenül vezetjük a változtatható geometriai kialakítású mérőtérbe. A mérőteret alulról egy parafa borítású alaplap határolja (ebbe szűrhetők bele az áramlás megjelenítésre szolgáló zászlócskák (8)). Felülről egy átlátszó, plexiből készült fedőlap, oldalt pedig különböző hosszúságú, de azonos magasságú, változtatható helyzetű oldalfal elemek vannak. A kialakuló áramkép rajzolata az átlátszó fedlapon keresztül a légáramlás hatására szélirányba beálló zászlócskák segítségével válik megfigyelhetővé.

(Megjegyzés: A mérőtér alap- és fedőlapja egymással párhuzamos sík felületek, az oldalfal minden egyes keresztmetszetben ezekre merőlegesen helyezkedik el. Így első megközelítésben, a határréteg kiszorító hatásának elhanyagolásával úgy tekinthetjük, hogy az alaplap illetve fedőlap síkjára merőleges irányban a folyadékrezecskék nem térülnek el, illetve általában kimondható, hogy ebben az irányban sokkal kisebb mértékben változnak az áramlási jellemzők mint a mérőtér síkjában fekvő másik két irány mentén. A mérőteret ezen sajátossága teszi alkalmassá arra, hogy segítségével a viszonylag egyszerűbb, kétdimenziós síkáramlásokat vizsgálhassunk.

8. Áramlás megjelenítésre szolgáló zászlócskák.
9. Nyomásmérési helyek, amelyek segítségével a vizsgált test felülete mentén kialakuló nyomásmegoszlás lesz meghatározható.

Az előzőekben leírt alap-mérőberendezés mellett más kiegészítő berendezésekre, így például barométerre, hőmérőre és mérőszalagra is szükség lesz a mérés elvégzése során.

3. A mérési feladat részletes leírása, alapvető vizsgálati és a kiértékelési szempontok

A 1. pontban megfogalmazott probléma kiterjedt vizsgálata igen sok időt igényelne. Ezért a mostani mérési gyakorlat alkalmával a témához kötődő bevezető mérési feladat egyik lehetséges változata szerint három különböző alakú keresztmetszeten:

- A. négyzet,
- B. kör,
- C. dúcprofil

az alábbi vizsgálatokat célszerű elvégezni:

3.1. Az áramlásba helyezett test körül kialakuló áramkép vizsgálata áramlás megjelenítési módszer segítségével, sebességprofil mérése Prandtl-csővel a csatorna be- és kilépő keresztmetszetében

Első lépésként a mérőtér alaplapján a megfelelő oldalfalelemek összeillesztésével és a vizsgálat tárgyát képező test behelyezésével ki kell alakítani a mérőteret. Ezután az áramkép rajzolatának megfigyelését úgy végezhetjük el, hogy az alaplap parafa borításába a szabad áramlási térben elosztva olyan gombostűket szúrunk, amelyek végére 10-15 mm hosszú, lágy, bolyhos anyagból készült, vékony fonalat kötöttünk. A feladat jellegét figyelembe véve 10-15 mm-es gombostűk közötti távolság sűrűnek, 100-150 mm-es távolság ritkának tekinthető. Természetesen, ahol az áramkép kis távolságon belül nagyot változik (a vizsgált testhez közel) ott sűrűbben, míg a kiegyenlített területen (a vizsgált testtől távol) ritkábban érdemes elhelyezni az áramlás irányát jelző zászlócskákat. A gombostűn a cérnaszálat olyan magasan kell elhelyezni, hogy az megközelítőleg a csatorna középsíkjában helyezkedjen el. Az áramlás megindulása után a fonaldarabkák az áramlás irányába állnak be. Ha zászlócskákat megfelelően helyeztük el, a fonalak elhelyezkedéséből kirajzolódik a csatornaáramlás áramképe. A vizsgálat dokumentálásához szabadkézi rajzot kell készíteni a megjelenő áramképről, lehetőség esetén fényképet lehet készíteni róla. A rajz elkészítésénél különös figyelmet kell szentelni az áramképben mutatkozó iránytöréseknek, leválásoknak és azon helyeknek, ahol a fonaldarabkák visszaáramlást, vagy ingadozó irányú sebességet mutatnak. A kialakuló leválási buborékok körvonalát külön célszerű feltüntetni az ábrában.

A csatorna belépő keresztmetszetében Prandtl-csővel sebességmérést végzünk, és az abból kapott sebességprofil, ill. annak egyenletességét ellenőrzésképpen a mérőperemes térfogatáram mérésekből kapott átlagsebesség értékével összevetjük. Az átlagsebességet a Prandtl-csővel mért mennyiség mérésre vonatkozó előírások szerint határozhatjuk meg a keresztmetszetek pontjaiban mérve (lásd. pontonkénti sebességmérés). A mérőpontokat a belépő keresztmetszetben 7-15 mm-ként célszerű felvenni. A mérési eredményeket táblázatos formában és diagramban, a mérőperemes térfogatáram mérésekből kapott átlagsebességgel összevetve kell prezentálni.

3.2. Az áramlásba helyezett test felülete mentén kialakuló nyomásmegoszlás meghatározása méréssel

A sebességtér mellett folyadékáramlások másik fontos jellemzője az áramló közegben uralkodó nyomás értéke. Az áramképben bekövetkező változásokat általában hűen kíséri a nyomás módosulása. A mostani mérés alkalmával a vizsgált test felülete mentén kialakuló nyomás-megoszlást kell meghatározni, és a kialakuló áramkép, illetve a test fala menti nyomásmegoszlás közötti kapcsolatra kell megállapításokat tenni. A test fala mentén a nyomásokat a test felületén kialakított nyomásmérési megcsapolásoknál digitális nyomásmérővel határozhatjuk meg. A nyomásmérő egyik csatlakozóját gumicső segítségével össze kell kötni annak a pontnak a nyomásmegcsapolásával, ahol a nyomás értékét meg szeretnénk határozni. A manométer másik bekötését a csatorna bevezető szakaszának oldalán található nyomás megcsapolásokhoz kötve a nyomásmérőn mindig a környező zavartalan áramlás statikus nyomásához képest mérhető túlnyomás illetve depresszió értékét kapjuk meg az adott mérési pontban. Ilyen módon, a nyomásokat egyenként lemérve megkaphatjuk a teljes fal menti nyomásmegoszlást. A vizsgálathoz felhasznált mérőberendezést és a feladat jellegét figyelembe, henger esetén célszerű a mérési pontokat 5°-ként felvenni. Négyzet alapú hasáb esetén a mérési pontok elosztása a mérőberendezés kialakítása miatt korlátozott, fix távolságra vannak elosztva. A mérések eredményét diagramban kell feltüntetni. Az áramkép és nyomásmegoszlás birtokában célszerű azokat összevetni és a köztük mutatkozó kapcsolatot megkeresni és feljegyezni.

3.3. Az áramlásba helyezett testre ható ellenálláserő, a statikus nyomástényező és az ellenállás tényező meghatározása

A kiértékelés során a nyomásmérésekből nyomáskülönbséget kell számolni, amit a szög, vagy helykoordináta függvényében, diagramban kell ábrázolni.

Meg kell határozni a nyomástényező (c_p) értékeit (1) alapján, amit a fentiekhez hasonlóan, szintén diagramban kell ábrázolni.

$$c_{p,i} = \frac{p_i}{\frac{\rho_{lev} \cdot v^2}{2}} \quad (1)$$

ahol

| | | |
|--------------|----------------------|-------------------------------------|
| $c_{p,i}$ | [-] | nyomástényező az i-edik mérőpontban |
| p_i | [Pa] | nyomás az i-edik mérőpontban |
| ρ_{lev} | [kg/m ³] | áramló közeg (itt levegő) sűrűsége |
| v | [m/s] | zavartalan áramlási sebesség |

A 3.1 és 3.2 pontokban bemutatott vizsgálati módszerek a test körül kialakuló áramlási jelenségek részletes elemzését szolgálják. A napi mérnöki gyakorlatban azonban legtöbbször szükségtelen az ilyen részletes leírás. Helyette sokszor elegendő a testre ható ellenálláserő, illetve az ezzel összefüggésben meghatározott dimenziótlan mennyiség, az ellenállás-tényező ismerete.

Az áramlásba helyezett testre ható erőt úgy lehet meghatározni, hogy a test teljes körüláramlott felületét az egyes nyomásmérési pontoknak megfelelően részfelületekre osztjuk úgy, hogy a nyomásmérési pont a részfelület súlypontjába essék. A részfelületekre ható nyomásból származó erők vektoriális összege a testre ható teljes erőt adja:

$$\underline{F} = \sum_{i=1}^n \underline{F}_i = \sum_{i=1}^n p_i A_i \underline{e}_n = \sum_{i=1}^n p_i h_i L \underline{e}_n \quad (2)$$

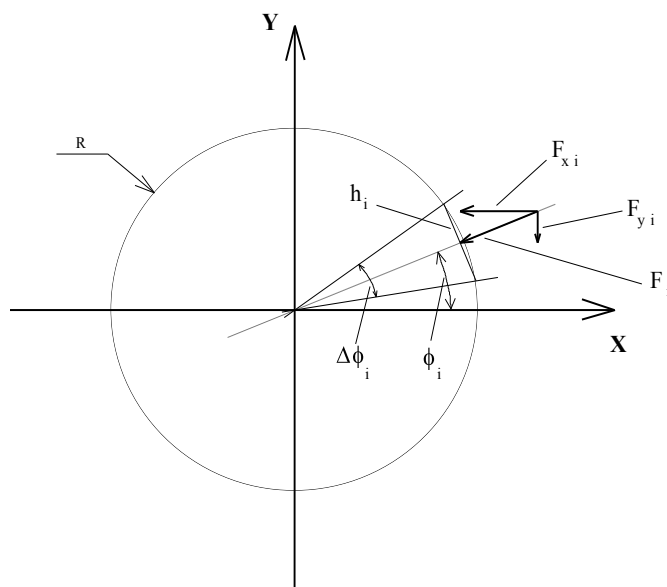
ahol: \underline{F} [N] Az áramlásba helyezett testre ható eredő erő.
 n [db] A mérési pontok illetve a részfelületek száma.
 F_i [N] Az i -edik részfelületre ható erő.
 p_i [Pa] Az i -edik részfelület környezetében uralkodó nyomás.
 A_i [m²] Az i -edik részfelület nagysága.
 \underline{e}_n A felületi normális irányú egységvektor.
 h_i [m] A részfelület darab szélessége
 L [m] A részfelület darab magassága.

Körhenger esetén az eredő erő x és y irányú összetevőjét az alábbiak szerint határozhatjuk meg:

$$F_x = \sum_{i=1}^n F_{ix} = \sum_{i=1}^n p_i L 2R \sin\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right) \cdot \cos\Phi_i \quad (3)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n F_{iy} = \sum_{i=1}^n p_i L 2R \sin\left(\frac{\Delta\Phi_i}{2}\right) \cdot \sin\Phi_i \quad (4)$$

A bevezetett változók értelmezéséhez lásd a 3. ábrát.



3. ábra: A változók értelmezése

Végül az eredő áramlási erő ismeretében annak bármilyen felbontását előállíthatjuk. Így például az áramlásban szokásos az eredő erő megfúvási iránnyal párhuzamos és arra merőleges összetevőjeként meghatározott ellenálláserő \underline{F}_e és felhajtóerő \underline{F}_f használata.

Jelenlegi vizsgálataink során az ellenálláserőt, illetve az ezzel összefüggésben bevezetett dimenziótlan jellemző, az ellenállás-tényezőt, c_e -t keressük. Az ellenállás-tényezőt az alábbi összefüggés segítségével határozhatjuk meg:

$$c_e = \frac{F_e}{\frac{\rho_{lev}}{2} v^2 A_o} \quad (5)$$

| | | |
|---------------------------------|----------------------|--|
| ahol: F_e | [N] | az ellenálláserő. |
| $\rho_{lev} = \frac{p_1}{RT_t}$ | [kg/m ³] | az áramló közeg sűrűsége. |
| p_1 | [Pa] | légtörési nyomás. |
| $R = 287$ | [J/kgK] | a levegő specifikus gázállandója. |
| T_t | [K] | közeg hőmérséklet |
| A_o | [m ²] | a test áramlás irányú vetületének a nagysága. |
| $v = \frac{q_v}{A}$ | [m/s] | az áramlásba helyezett test megfűvási sebessége. |
| A | [m ²] | a szabad csatorna-keresztmetszet nagysága. |
| q_v | [m ³ /s] | a mérőcsatornában áramló közeg térfogatárama |

A q_v térfogatáramot a radiális ventilátor szívócsövéhez csatlakozó beszívó mérőperemmel mérjük meg. Feltételezzük, hogy a rendszerbe levegő csak beszívó mérőperemen keresztül jut be, és a mérőtér kilépő keresztmetszetén lép ki. A mérőkialakítás egyéb részei légtömörök, így a sűrűség állandósága miatt a mérőrendszer bármely keresztmetszetében az átáramló térfogatáramok azonosak.

Beszívó mérőperemmel a q_v térfogatáramot az alábbi módon határozzuk meg. A beszívócső elejére koncentrikusan elhelyezett körlap alakú szűkítő elem után közvetlenül elhelyezett nyomásmegcsapolásnál megmérjük a légtörési nyomáshoz képest depresszió, Δp_{mp} értékét. A Δp_{mp} függvényében a q_v térfogatáramot az alábbi összefüggés segítségével határozhatjuk meg:

$$q_v = \alpha \varepsilon \frac{d^2 \Pi}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p_{mp}}{\rho_{lev}}} \quad (6)$$

ahol: q_v [m³/s] a mérőrendszeren átáramló térfogatáram [2].

α [-] átfolyási szám, amelynek értéke a keresztmetszet szűkítés viszonyától és a Reynolds-számtól függ. α értékét kísérletek alapján összeállított táblázatokról lehet meghatározni. Beszívó mérőperemnél, jelen mérés során az átömlési tényező értékét jó közelítéssel 0,6-nak vehetjük.

ε [-] expanziós szám, amelynek értékét a jelen mérés során előforduló viszonylag kis nyomásváltozások miatt 1-nek vehetjük.

d [m] a mérőperem átmérője.

Δp_{mp} [Pa] a mérőperemen kialakuló nyomáscsökkenés nagysága.

ρ_{lev} [kg/m³] az áramló közeg sűrűsége.

Ezek alapján az ellenállás-tényező számíthatóvá válik.

Az **1. táblázat** tájékoztató adatokat tartalmaz néhány test ellenállás-tényezőjéről a megfűvási irány függvényében.

3.4. Az elvégzett vizsgálatokról a mérési jegyzőkönyvet a [2]-es alapján kell elkészíteni.

3.4.1. A mérési jegyzőkönyvnek az alábbi ábrákat kötelezően tartalmaznia kell:

- $v_x(y)$ sebességprofil a belépő és kilépő keresztmetszetben az egyes mérési elrendezésekre, ahol x – a fő áramlási irány
- statikus nyomástényező (c_p) eloszlása a mért testek felületén a szög (henger esetén) ill. távolság (hasáb) függvényében az egyes mérési elrendezésekre ($c_p(\varphi)$, $c_{ps}(x)$)
- a testek körül kialakult áramkép fonalakkal megjelenített képe.

3.4.2. A hibaszámítást az alábbi mennyiség(ek)re kell a lent vázolt módon elvégezni:

Az ellenállás-tényező kifejezése:

$$c_e = \frac{\sum p_i A_i}{\frac{\rho_k}{2} \left(\frac{q_v}{A_{csatorna}} \right)^2 A_{test}} \quad (7)$$

az abszolút hiba számítása:

$$\delta c_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\delta X_i \cdot \frac{\partial c_e}{\partial X_i} \right)^2} \quad (8)$$

relatív hiba:

$$\frac{\delta c_e}{c_e} = ? \quad (9)$$

ahol az X_i mért mennyiségek:

$$\begin{aligned} X_2 &= p_0 \\ X_3 &= T_0 \\ X_3 &= \Delta p \\ X_4 &= \Delta p_{mp} \end{aligned}$$

hozzájuk kapcsolódó mérési hibák:

$$\begin{aligned} \delta p_0 &= 100 \text{ Pa} \\ \delta T_0 &= 1 \text{ K} \\ \delta p &= 2 \text{ Pa} \\ \delta p &= 2 \text{ Pa} \end{aligned}$$

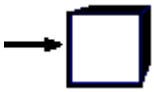
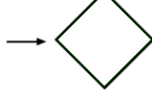
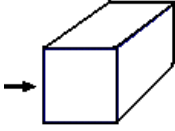

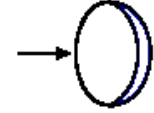
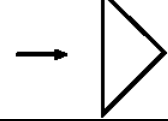
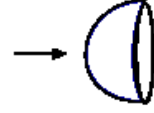
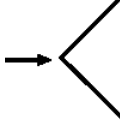
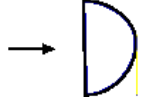
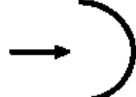
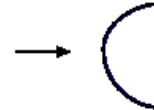
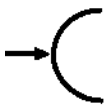

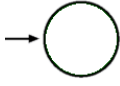
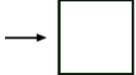
A mérés során nem szabad megfelelkezni

- A mérőberendezés bekapcsolása előtt, illetve általában a mérőberendezés üzeme során mindig meg kell győződni a balesetmentes munkafeltételek teljesüléséről. Ha ezek a feltételek nem teljesülnek, a mérést azonnal abba kell hagyni, és a hiányosságot meg kell szüntetni. Ilyen esetben a mérőcsoport mindig kérje a mérésvezető segítségét. A bekapcsolás és a mérés közben végrehajtott változtatásokról a berendezés környezetében dolgozókat figyelmeztetni kell.
- Minden mérési alkalommal a légköri nyomás és teremhőmérséklet feljegyzéséről!
- A felhasznált mérőműszerekről leolvasott értékek mértékegységének és a rájuk vonatkozó egyéb tényezők (Például a ferdecsvés mikromanométer mérőszál ferdítési tényezője.) feljegyzéséről.
- A felhasznált mérőműszerek típusának, gyártási számának és a benne lévő mérőfolyadék sűrűségének feljegyzéséről!
- A mérőműszerekről leolvasott mennyiségek, és a további számításoknál felhasznált mennyiségek mértékegységének egyeztetéséről.
- Az "U-csöves" nyomásmérő elvén működő mikromanométerek csak megfelelően kivízszintezve használhatók.
- A nyomásmérő bekötésénél figyelmesen kell eljárni a csatlakozók "+" illetve "-" ágának és a méréshatár kiválasztásánál. Általában mindegyik manométer típusnál, de kiemelten a ferdecsvés manométernél, figyelni kell arra, hogy a nyomásmérő csatlakozó csomópontjaira a gumicsövet óvatosan, "ráközelítve", a mérő folyadékszal viselkedését figyelemmel kísérve kell felhelyezni. Ha bekötőcsövek tömör rögzítése előtt a mérő folyadékszal kitérése megközelíti a maximális kitérést, úgy ha lehet méréshatárt kell változtatni a műszeren, ha ez nem segít, akkor nagyobb nyomások mérésére alkalmas műszert kell választani a méréshez. Ellenkező esetben a mérőfolyadék egy része a bekötőcsöbe áramlik meghamisítva, esetleg teljesen lehetetlenné téve a mérést.
- A mérőtérben a vizsgált csatorna összeállításánál vigyázni kell a légfőtör szerelésre, mert az esetlegesen kialakuló réseken távozó illetve beáramló levegő jelentősen megváltoztathatja az eredetileg szándékolt áramlás jellegét.

Irodalom

- [1] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest 2004
 [2] <http://www.ara.bme.hu/oktatas/labor/labor.htm>

1. táblázat Ellenállás tényezők $Re=10^3 \div 10^5$ Reynolds-szám tartományban

| 3D testek | | oszlopos testek | |
|---|-----------|---|-----------|
| Test típusa, megfúvás iránya | c_e [-] | Test típusa, megfúvás iránya | c_e [-] |
|  | 1.05 |  | 1.55 |
|  | 2.05 |  | 2.01 |
|  | 1.42 |  | 2 |
|  | 0.38 |  | 1.55 |
|  | 1.17 |  | 2.3 |
|  | 0.42 |  | 1.2 |
|  | 0.04 |  | 1.17 |
| | |  | 2.05 |