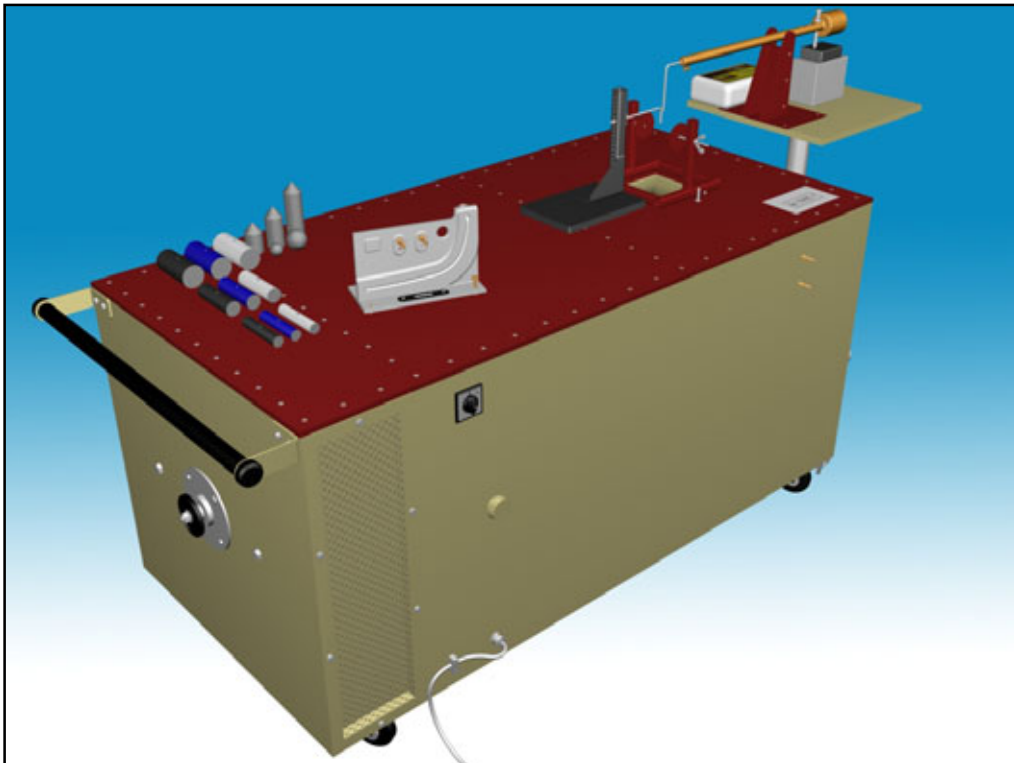


BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

ÁRAMLÁSTAN TANSZÉK



M1

TOMPA TESTEK ELLENÁLLÁSTÉNYEZŐJÉNEK  
VIZSGÁLATA

MÉRÉSI SEGÉDLET

2013/14. 1. félév

## 1. Elméleti összefoglaló

A folyadékáramlásban lévő, áramlásnak kitett testekre (pl. épületre, járművekre) áramlási eredetű erő hat. Ezen erőnek a zavartalan áramlás irányával párhuzamos komponensét ellenálláserőnek nevezzük. Tompa testnek nevezzük az olyan testeket, melyeken az ellenálláserő döntő részben a test szélfelőli és azzal ellentétes részén tapasztalható nagy nyomáskülönbség eredőjeként jön létre, a fali csúsztatófeszültségek eredője viszont elhanyagolható. (Áramvonalas testeknél a definíció fordított). Az ellenálláserő az áramlási sebességtől, a test méretétől és a test alakjától a négyzetes ellenállástörvény szerint függ:

$$F_e = \frac{\rho}{2} v^2 c_e A$$

ahol a sebesség négyzetét és a sűrűséget tartalmazó csoport definíció szerint a zavartalan áramlás dinamikus nyomása:

$$p_{din} = \frac{\rho}{2} v^2$$

Az ellenálláserő tehát egyenesen arányos a dinamikus nyomással, ezen kívül a test  $A$  jellemző felületével, és a  $c_e$  dimenziótlan ellenállástényezővel:

$$F = p_{din} c_e A$$

A test jellemző felülete tompa testeknél a test áramlásra merőleges vetületének területe. A tapasztalatok és elméleti megfontolások szerint a különböző tompa testek ellenállástényezője az általunk vizsgálandó sebesség- és mérettartományban a test pontos alakjától, zavartalan áramláshoz viszonyított térbeli helyzetétől, felületi érdességétől valamint a Reynolds-számtól függ:

$$c_e = f(\text{alak, helyzet, érdesség, Re})$$

A Reynolds-szám dimenziótlan csoport, melyet az áramlási sebességgel, a test jellemző méretével és az áramló folyadék kinematikai viszkozitásával alkotunk:

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu}$$

A test jellemző mérete az áramlásra merőleges vetületi kép két befoglaló mérete közül a kisebbik. A nevezőben szereplő kinematikai viszkozitás a dinamikai viszkozitás és a sűrűség hányadosa:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

A dinamikai viszkozitás az általunk vizsgálandó levegőáramlás sebesség- és mérettartományában a hőmérséklet függvényében empirikus képlettel meghatározható és diagrammal ellenőrizhető, a sűrűség pedig a laborban mért abszolút hőmérséklet és környezeti nyomásának függvényében az ideális gáztörvényből számolható:

$$\rho = \frac{p_0}{RT}$$

## 2. A mérés célja

A jelen mérés célja különböző, de valamilyen tulajdonságuk szerint összehasonlítható tompa testekre különböző sebességeken ható ellenálláserők meghatározása méréssel, melyekből az ellenállástényező Reynolds-számtól és az összehasonlított tulajdonságtól való függése megismerhető.

### 3. A mérőberendezés leírása

A levegőáramot, melybe a mérendő testeket helyezük egy mérőkocsival hordozható, nyitott mérőterű szélcsatornával hozzuk létre. A kocsiból kilépő levegő egyenletes sebességeloszlását a kilépőnyílás előtt elhelyezett konfúzor, szűrőréteg és egyenletesítő rács biztosítja.

A konfúzor belépő- és kilépő keresztmetszeténél egy-egy nyomáskivezetés kapott helyet, melyre a kocsi oldalán lévő két csonkon keresztül csatlakoztathatjuk nyomásmérő műszerünket, melynek segítségével közvetetten a dinamikus nyomást mérjük, illetve ebből sebességet számolhatunk. A konfúzort Venturi-csőként használva **a két csonk közt mérhető nyomáskülönbség közel a kilépő keresztmet dinamikus nyomásával egyenlő**. A kalibrációs mérések szerint, ahol a kilépő keresztmetszet közepe fölé, 140 mm magasságba helyezett Prandtl cső által mért dinamikus nyomást hasonlítottuk össze a mérőkocsin mérhető nyomáskülönbséggel, **az alábbi összefüggést kell használnunk:**

$$p_{din} = K \cdot \Delta p, \quad K = 0,908$$

**A kiáramlási sebességet a ventilátor szívóoldali fojtásával szabályozzuk.** A fojtás a szívó keresztmetszet előtt mozgatható körlappal van megoldva, melyet kívülről egy kerékkel, egy orsós mechanizmuson keresztül állíthatunk. A szívó keresztmetszetet a körlappal teljesen elzárva közel 0 Pa-t tudunk beállítani, míg a keresztmetszetet folyamatosan nyitva a kerék első 10 fordulatával a nyomás drasztikusan növekszik a maximális érték 90%-áig, további 8 fordulattal lassan nő a teljesen nyitott helyzetig. Befeszítés nélkül a mozgatóorsó úthossza a maximális nyitás és zárás között 18 fordulat a keréken, a kerék pedig könnyedén forgatható.

**Nagyon figyeljünk arra, hogy a végállások közelében ne feszítsük túl az orsót, mert eltörhet!**

**A testekre ható ellenállóerőt egy kétkarú emelős áttételen keresztül mérjük egy elektronikus erőmérő cellával.** Az emelő hosszabb karjának a végére tudjuk felcsavarozni a mérendő testet, míg a rövidebb karon egy közdarabon keresztül terheljük az erőmérő cella mérőtüskéjét. A mérőtüske után a rövidebb karon található mozgatható ellensúly az erőmérő cella előterhelésére szolgál a pontosabb mérés érdekében. Méréskor először álló szélcsatorna mellett **az erőmérő nullázásával a mérendő test, a kar és az ellensúly súlyerejét kiejtjük a mérésből.** Ezután a mérleg hosszabb karjának végén megjelenő bármely felfelé mutató erő megjelenésére az erőmérő cella mérőtüskéjén lefelé mutató **többleterő jelenik meg, melyet a kétkarú emelő nyomatéki egyensúlya alapján számíthatunk:**

$$F_2 = F_1 \frac{k_1}{k_2}$$

Mivel az erőmérő oldali kar lényegesen rövidebb, mint a másik, ezért **az ellenállóerőt az erőmérő cella felnagyítva méri.**

Mivel mérés során magára a mérőkarra is jelentős mértékű ellenállóerő hat, melynek nagysága a rá helyezett test által keltett áramlási zavarástól függ, ezért a mérendő test ellenállástényezőjének meghatározásához **minden sebességi beállítás mellett két mérést kell végeznünk.** Az első méréskor a testet a mérőkarra rögzítve helyezük az áramlásba, ekkor a testre ható és a karra ható ellenállóerőt együttesen mérjük:

$$F_{1test+kar} = F_{etest} + F_{ekar}$$

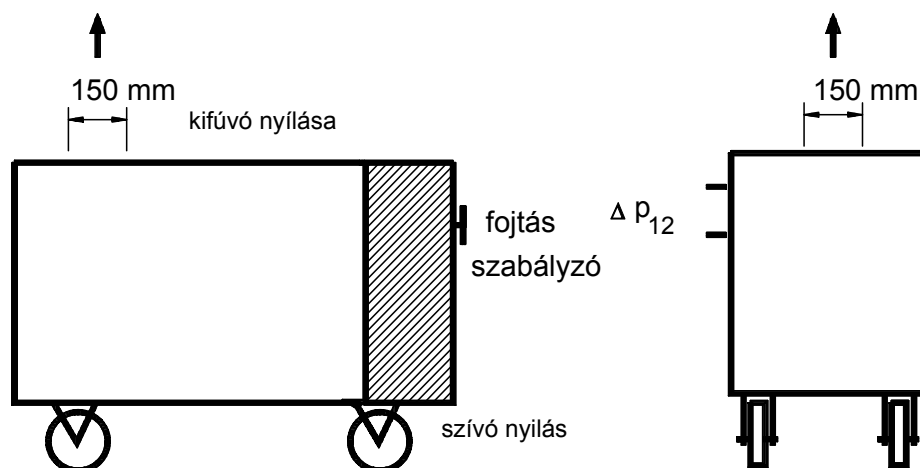
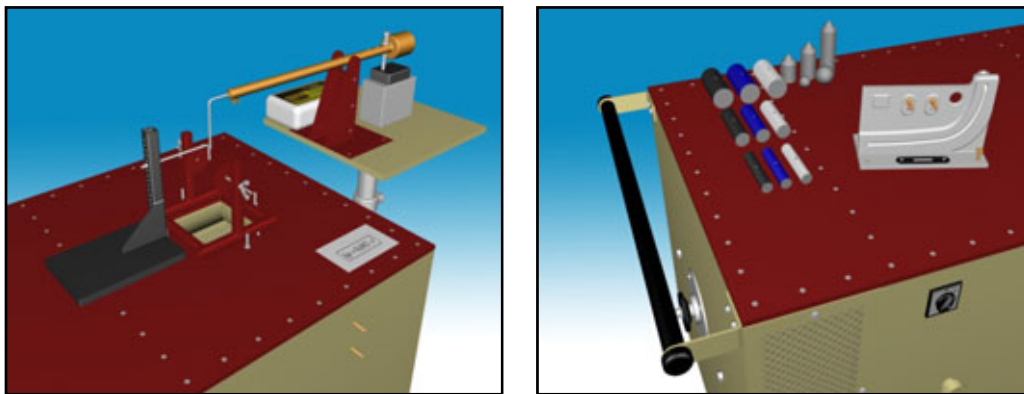
A második mérésben úgy változtatjuk meg a konfigurációt, hogy a mérendő testet a segédkaron rögzítjük és így helyezük a mérőkar elé az áramlásba. Ekkor a mérőkar és a test közelítőleg ugyanolyan térfeltöltésű helyzetben van az áramlásban, ezáltal a kialakuló áramlási kép, a nyomáseloszlás és a karon ébredő ellenállás erő ugyanakkora lesz mint az előző esetben, de mivel a testre ható ellenállás ebben a konfigurációban nem a mérőkart, hanem a segédkart terheli, most a karra ható ellenállás erő mérővel közvetlenül mérhető:

$$F_{1kar} = F_{ekar}$$

Külön a testre ható ellenállás erő után az első és a második konfigurációban mért erők különbségként számítható:

$$F_{etest} = F_{1test+kar} - F_{1kar}$$

Nagyon figyeljünk arra, hogy konfiguráció váltásakor vagy mérendő test váltásakor teljesen álló szélcsatorna mellett mindig nullázzuk az erőmérő cellát, hogy a súlyerőket kiegyenlítsük!



1. ábra: Mérőkocsi, mozgatható szélcsatorna

#### 4. A mérési feladat leírása és a mérés menete

##### 4.0 Otthoni felkészülés

A mérésre való felkészüléshez, elméleti alapjainak megértéséhez és a mért eredmények összehasonlításához ajánljuk a tankönyv (Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai) 11.1-11.3 leckéinek tanulmányozását.

A mérési útmutató alapos áttanulmányozása után **készítsük el a mérési munkatervet táblázatokkal, amelyekbe a mérendő adatokat rögzíthetjük.**

##### 4.1 Helyszíni előkészületek (párhuzamosan végezhető részfeladatokkal)

**1a) A kiválasztott testek alakját, méreteit, érdességi jellemzőit, az alkalmazandó megfűvási irányt jegyzeteinkbe rögzítjük. A testek befoglaló méreteit tolómérővel mérjük le. Feljegyezzük a mérőeszközök (mérőkocsi, nyomásmérő, erőmérő cella) típusát, sorozatszámát. A laborban elhelyezett fali műszerekről leolvassuk a teremben uralkodó hőmérséklet és légnyomás értékeit.**

**1b) A kocsi beindítása és próbája, a maximális és minimális nyomás lemérése.**

A nyomásközlő gumi- vagy szilikoncsöveket mérés előtt célszerű ellenőrizni, nehogy kis repedés, szakadás legyen rajtuk, mert lyukas mérőcső esetén az összes addigi mérési eredmény kárba vész. Az ellenőrzést szemrevételezéssel, vagy nyomástartási próbával végezhetjük el. **Kritikus pontok** a műszerekre ill. a nyomáskivezetésekre történő csatlakoztatás helyei.

Kössük a nyomásmérőt a mérőkocsi nyomáskivezetéseire, és **teljesen álló szélcsatorna mellett nullázzuk** azt. Fedetlen kifúvó nyílás mellett indítsuk be a ventilátort. A fojtás állításával járjuk be a megvalósítható teljes sebességtartományt. **Jegyezzük fel a maximális beállítható nyomáskülönbséget - ez fogja meghatározni a bejárható sebességtartományunk felső határát.**

##### 4.2 Kalibráció és mérési program meghatározása (párhuzamosan végezhető részfeladatokkal)

**2 a) A nyomásmérő kalibrálása:** a digitális manométert lekötjük a csatornáról, majd a Betz-féle mikromanométer segítségével, 0 és a mért maximális nyomáskülönbség között 5 mérési pont rögzítésével kalibráljuk. Egyszerűen beállítható, kerek vízoszlop-értékeket válasszunk.

**2 b) Az erőmérő cella kalibrálása:** a cella nullázása után a rendelkezésre bocsátott mérőtömeget a mérőtű fölé, a mérleg támadáspontjára helyezzük, a mért értéket lejegyezzük. A tömeg levételével és visszaheyezésével 5 mérést végzünk. Tolómérővel mérjük meg és jegyezzük fel a kétkarú emelő forgáspontja és a mérőtű közti rövidebb karhosszt, mérőszalaggal a hosszabb karhosszt.

**2 c) A mérési program elkészítése, célnyomások meghatározása.**

**Ha a mérendő testeket több különböző sebesség tartásával kell vizsgálni, vagy ha a vizsgált testek minden mérete egyforma (csak érdességük különböző) akkor a dolgunk egyszerű: vegyük figyelembe, hogy a beállítható nyomás és a majd ebből számolt sebesség összefüggése négyzetes, így fele akkora sebességet negyed akkora nyomással állíthatunk be. A beállítandó mérési pontokat nyomás szerint, körülbelül egyenletes eloszlással vegyük**

**föl. Kerüljük a 20 Pa-nál alacsonyabb, vagy a maximális 90%-ánál nagyobb nyomásértékeket**, mivel ezeket már nehéz biztonsággal beállítani, illetve reprodukálni. A sebességek a mérés feldolgozásakor adódnak majd.

**Ha három testet öt különböző Reynolds-számon kell megmérni úgy, hogy ezt a különböző testek esetében a sebességek alkalmas megválasztásával érjük el**, ebben az esetben összesen 15 különböző mérési pontunk lesz. A szélcsatornán közvetlenül nem a sebességet, hanem a dinamikus nyomással arányos nyomáskülönbséget tudjuk beállítani, tehát ezeket a nyomás-célértékeket kell előre kiszámítanunk. A célnyomásokat egy 3 sorból és 5 oszlopból álló táblázatba rendezve számítjuk ki, ahol az oszlopok egy-egy Reynolds számhoz, a sorok egy-egy testhez tartoznak. **A gyors számolás érdekében maguk a Reynolds-számok csak a mérés feldolgozásakor fognak kiadódni, a módszer csak az azonosságukat és a megvalósíthatóságukat biztosítja. A következőképp járunk el:**

- 1) A legnagyobb jellemző méretű test legkisebb Reynolds-számhoz tartalmazó célnyomás lesz a beállítandó legkisebb. Ezt választjuk 20 Pa-ra, mert ez még kényelmesen beállítható és elfogadható relatív mérési hibával mérhető.
- 2) A legkisebb jellemző méretű test legnagyobb Reynolds-számhoz tartozó célnyomása a beállítandó legnagyobb, ez legyen a beállítható maximális nyomás 90%-a, mert ez még biztonsággal reprodukálható.
- 3) A legkisebb célnyomásból számoljuk ki az azonos oszlopban, vagyis azonos Reynolds-számhoz tartozó célnyomásokat a másik testekre is. A Reynolds-szám és a dinamikus nyomás definíciójából levezethető alábbi képlet megadja a célnyomások arányát azonos Reynolds-szám esetére két különböző jellemző méretű test között:

$$\Delta p_B = \Delta p_A \frac{l_A^2}{l_B^2}$$

Feltételeztük a levegő sűrűségének, a kinematikai viszkozitásnak és a kalibrációs tényezőknek állandóságát is a mérés során.

- 4) A legnagyobb testre most már adott a legnagyobb és legkisebb Reynolds-számhoz tartozó nyomás. Válasszuk meg erre a testre a közbenső nyomásértékeket is, közelítőleg egyenletes felosztást használva.
- 5) A 3) pontban használt képlettel oszloponként számítsuk ki a célnyomásokat a legnagyobb testnél meghatározott célnyomásokból. Kész vagyunk.

#### 4.3) Mérési program végrehajtása

##### Javasolt feladatmegosztás 4 főre:

- 1 fő állítja a fojtást, figyeli a beálló nyomásértéket a műszeren.
- 1 fő egyszerre figyeli az erőmérő cellát és a nyomásmérőt, jegyzőkönyvezi a mért értékeket.
- 1 fő szereli illetve átszereli a mérendő testeket, figyel a testekre mérés közben, indítja és zárja a csatornát.
- 1 fő felügyeli a mérési programban a haladást, diktálja a mérendő testet és konfigurációt és a célnyomás értékét.

A mérési programban mindegyik testet több sebességen, és kétféle konfigurációban: egyszer a mérőkarra rögzítve, egyszer pedig a segédállványra rögzítve – kell lemérnünk. A mérési pontok bejárását célszerű a lehető legkevesebb átszereléssel, csatornaleállítással és nullázással megoldani, ezért a **javasolt sorrend:**

1. test felszerelése a mérőkarra, mérőcella nullázás, csatorna bekapcsolása,
1. test mérése a mérőkaron 5 különböző Reynolds-számon, csatorna kikapcsolása,
1. test átszerelése a segédkarra, mérőcella nullázás, csatorna bekapcsolása,
1. test mérése a segédkaron 5 különböző Reynolds-számon, csatorna kikapcsolása.

Ezután ugyanígy járunk el a többi testtel is.

**A segédkaros konfigurációban az állvány és a test behelyezésekor ügyelnünk kell arra, hogy a beállítás a lehető legjobban közelítse azt az állapotot, amikor a test ténylegesen a mérőkaron volt, és hogy a test, illetve a segédállvány ne érjen a mérőkarhoz.**

**Az 5 különböző Reynolds-számot a célnyomás-táblázatban előre meghatározott nyomásértékek beállításával kell biztosítani.** A beállítás nagy nyomásoknál 5 Pa-on belül, kis nyomásoknál akár 1 Pa-on belül megoldható. Vegyük figyelembe, hogy a mért nyomás csak 5-10 másodperc után áll be a fojtás eltekerése után.

**Minden mérési pontra jegyezzük föl:**  
**a test sorszámát**  
**jellemző méretét**  
**a megvalósított mért nyomásértéket**  
**a leolvasott erőértéket.**

#### 4.4) Ellenőrzés

**Ellenőrizzük a feljegyzett adatokat, ne legyen hiány vagy első ránézésre is gyanús mért érték.**

**Ellenőrizzük a célértékek és a megvalósított mérési pontok táblázatát, ne legyen durva eltérés.**

**A miliméterpapírra egy diagramban ábrázoljuk az összes test+kar erőmérő cellán leolvasott értéket a mért nyomás függvényében. Az elméleti összefoglalóban leítak szerint ha helyesen jártunk el, akkor a pontok testenként különböző meredekségű, de az origóból induló egyenes vonalakra illeszkednek. A durva hibák ezzel kiszűrhetők: például: egy számjegy elírása, a mérleg nullázásának kihagyása, ezáltal súlyerő belemérése.**

#### 4.5) Rendrakás, a jegyzőkönyv kézzel írott formájának aláírása.

**A mérésvezető oktató ellenőrizheti a mérőstandhoz tartozó eszközök leltárját.**

## 5. Amérési feladat kiértékelése

### 1. táblázat. A nyomás-célértékek táblázata.

**2. táblázat. A nyomásmérő kalibrálása:** A Betz-manométeren leolvasott vízoszlopértékeket számítsuk át Pa-ba:

$$\Delta p_{\text{Betz}} = \rho_{\text{víz}} g \Delta h_{\text{Betz}}$$

ezen értékeket diagramon ábrázoljuk a digitális nyomásmérőn leolvasott értékek függvényében. Lineáris összefüggést feltételezünk, melyet regressziós egyenessel közelítünk:

$$\Delta p_{\text{Betz}} = c_p \Delta p_{\text{Dig}} + \Delta p_{0,\text{Dig}}$$

Mivel a nyomásmérő műszeren azonnali nullázási lehetőség van, amit a mérés elején, sőt akár közben is többször használtunk, ezért a regressziós egyenes konstans tagját elhanyagoljuk. A pontokra illesztett regressziós egyenes meredekségét viszont a továbbiakban a digitális nyomásmérőnk kalibrációs tényezőjének tekintjük, mely segítségével **a mért nyomás a digitális nyomásmérőn leolvasott nyomásból számítandó:**

$$\Delta p = c_p \Delta p_{\text{Dig}}$$

**3. táblázat. Az erőmérő cella kalibrálása:** a kalibrációs tömeg számított súlyának és a mért értékek átlagának hányadosa a mérleg kalibrációs tényezője:

$$c_F = \frac{mg}{\frac{1}{5} \sum F_{i\text{Dig}}}$$

Ezzel, és a mért erőkarokkal **a mért erőérték a digitális erőmérőn leolvasott erőértékből így számítandó:**

$$F_1 = \frac{k_2}{k_1} c_F F_{2\text{Dig}}$$

**4. táblázat. A környezeti állandók kiszámítása:** kiszámítjuk a levegő sűrűségét és viszkozitását. Táblázatban rögzítjük az eredményeket.

**5. A leolvasott értékek táblázatos rögzítése:** a test megnevezése, jellemző mérete, jellemző felülete, és a testre+karra, illetve csak a karra ható leolvasott erők, ezek mérésekor beállított leolvasott nyomások.

**6. táblázat. A mérés feldolgoása.**

**6.1) A mért értékek kiszámítása a leolvasott értékekből a kalibrációs képletekkel.** Az egy Reynolds-számhoz és egy testhez tartozó két nyomásérték számtani átlagát vesszük, és innentől kezdve ezt tekintjük a mérési ponton mért nyomásnak. Táblázatban rögzítjük az értékeket.

**6.2) A nyomásokból meghatározzuk a dinamikus nyomásokat és ebből a sebességeket.** Táblázatban rögzítjük az értékeket.



**6.3) Az erőértékekből kiszámítjuk a testre ható erők értékeit.** Táblázatban rögzítjük az értékeket.

**6.4) Kiszámítjuk a megvalósított, mért Reynolds-számokat minden egyes mérési pontra.** Táblázatban rögzítjük az értékeket.

**6.5) Kiszámítjuk az ellenállástényezőket.** Táblázatban rögzítjük az értékeket.

**6.6) Az ellenállástényező abszolút és relatív hibáinak kiszámítása a függelék alapján.** Táblázatban rögzítjük az értékeket.

**1. diagram. A nyomásmérő kalibrációja.**

**2. diagram. Az erőmérő kalibrációja.**

**3. diagram. A mért testre ható erők a mért dinamikus nyomás függvényében.**

**4. diagram. A számított ellenállástényező-értékeket minden testre diagramon ábrázoljuk a Reynolds-szám függvényében, a jellemző paraméter feltüntetésével.** Az ellenállástényező-diagramon ábrázoljuk az ellenállástényező abszolút hibáit fel- és lenyúló hibasávokkal vagy külön adatsorokkal, a jellemző paraméter jelölésével.

**Értelmezzük a kapott eredményeket, megállapításainkat rögzítsük a jegyzőkönyvben, adjuk elő a prezentáción. Vessük össze eredményeinket az irodalommal. Külön értékeljük az eredmények pontosságát.** Tegyük javaslatot a mérési eljárások pontosítására, esetleg további mérésekre.

## Függelék

### Az ellenállástényező hibaszámítása

A hibaterjedés számításakor az alábbi  $X_i$  függetlenül mért mennyiségek és a hozzájuk kapcsolódó mérési hibák veendőek figyelembe:

$X_1 = F_{2_{test+kar}}$  az erőmérőn mért érték akkor, mikor a test és kar együttes ellenálláserejét mértük,

$X_2 = F_{2_{test}}$ , az erőmérőn mért érték akkor, mikor a kar ellenálláserejét mértük,

$X_3 = \Delta p$ , a konfúzor nyomáskivezetéseinek mért nyomáskülönbség.

Az ellenállástényező, mint számított eredmény a fenti, egymástól függetlenül mért mennyiségek függvénye:

$$c_e = f(F_{2_{test+kar}}, F_{2_{test}}, \Delta p)$$

A korábban megállapított összefüggések szerint:

$$c_e = \frac{F_{etest}}{\frac{\rho}{2} v^2 A} = \frac{F_{1_{test+kar}} - F_{1_{kar}}}{p_{din} A} = \frac{k_1}{k_2 KA} \frac{F_{2_{test+kar}} - F_{2_{test}}}{\Delta p}$$

Feltételezzük, hogy a kiemelt konstans-csoportban, illetve a test mért jellemző keresztmetszetében (továbbá a kalibrációs tényezőkben) elhanyagolható a mérési hiba.

A fenti mennyiségek abszolút mérési hibájának meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a gyártó által megadott hibaérték valójában a műszer által kijelzett érték hibája, a műszer által kijelzett érték és a mért érték között viszont a kalibrációs tényező teremt kapcsolatot, ezért ez kismértékben módosítja a műszer abszolút mérési hibáját:

$$\delta \Delta p = c_p \delta \Delta p_{dig}$$

$$\delta F_2 = c_F \delta \Delta F_{2dig}$$

A gyártók által megadott értékek:

$$\delta \Delta p_{dig} = 2 Pa$$

$$\delta \Delta F_{2dig} = 0,02 N$$