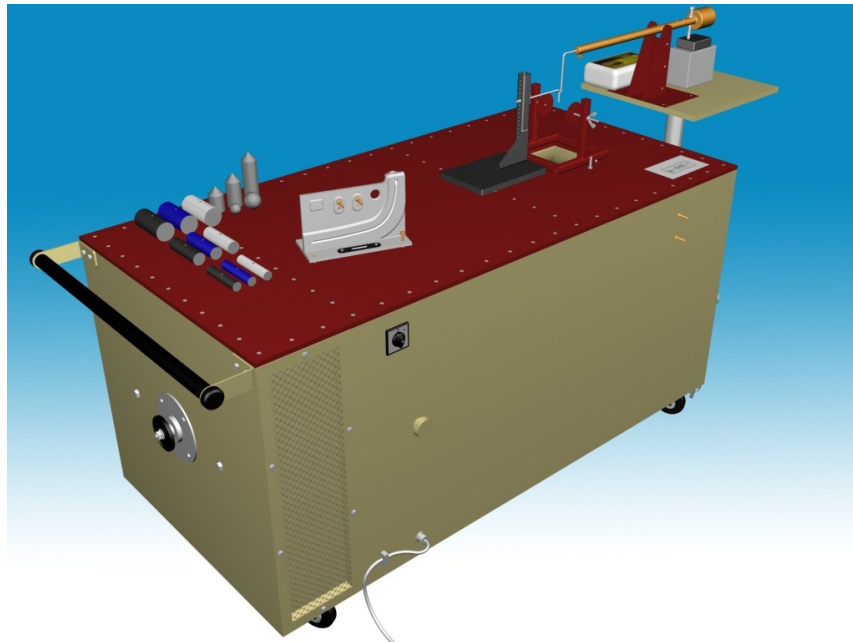


BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

ÁRAMLÁSTAN TANSZÉK



M1

**TOMPA TESTEK ELLENÁLLÁSTÉNYEZŐJÉNEK
VIZSGÁLATA**

MÉRÉSI SEGÉDLET

2013/14. 2. 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:

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

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 helyezzük 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 fordulataival 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 emelő átételen 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 helyezzük az áramlásba, ekkor a testre ható és a karra ható ellenállóerőt együttesen mérjük:**

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

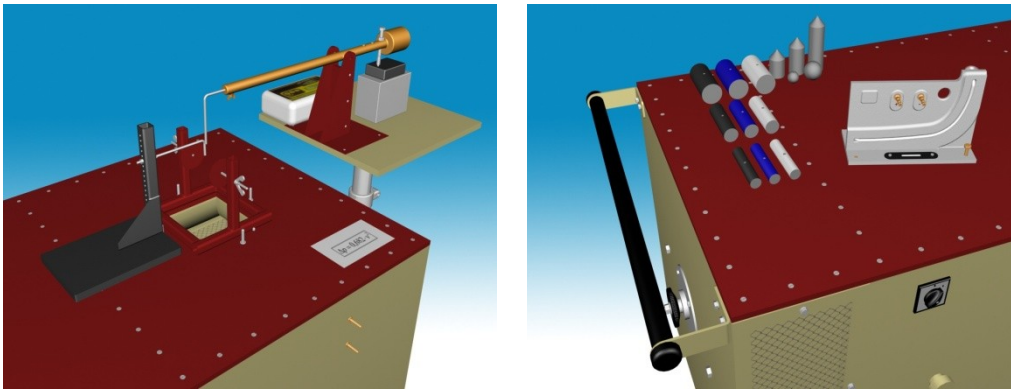
A második mérésben úgy változtatjuk meg a konfigurációt, hogy a mérendő testet a segédkaron rögzítjük és így helyezzük a mérőkar elé az áramlásba. Ekkor a mérőkar és a test közelítőleg ugyanolyan térbeli helyzetben van az áramlásban, ezáltal a kialakuló áramlási kép, a nyomáseloszlás és a karon ébredő ellenállás erő ugyanakkora lesz mint az előző esetben, de mivel a testre ható ellenállás erő 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 ezután az első és a második konfigurációban mért erők különbségeként 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 kiejtsük!



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, érdekességi jellemzőit, az alkalmazandó megfúvási irányt jegyzeteinkbe rögzítjük. A testek befoglaló méreteit tolmérővel 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 ventillátort. 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 érdekességük 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 szélcstornán 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 válasszuk 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, figyeli 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 leírtak 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 feldolgozása.

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 veendők figyelembe:

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

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

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

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

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

A korábban megállapított összefüggések szerint:

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

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:

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

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