

H4

FORMA-1 VERSENYAUTÓ ELEMÉK ÉS HENGER VIZSGÁLATA AZ NPL SZÉLCSATORNÁBAN

1. A mérés célja

Az ideális közeg áramlásába helyezett testekre nem hat ellenállás erő. Gyorsuló áramlás esetén, pl. egy személygépkocsi homlokfalán a határréteg vékony, ezért a homlokfal körüli áramlás hasonló a súrlódásmentes áramláshoz tartozó áramképhez, így a jármű homlokfali ellenállása (ami a homlokfali átlagos nyomástényezővel egyenlő) közel zérus, a homlokfal körüli áramlásban az össznyomás a faltól kissé távolabb állandó.

2. A mérőberendezés leírása

Tanszékünk egyik legkisebb szélcsatornája NPL (*National Physical Laboratory*) típusú, mérőterének keresztmetszete 0.5 x 0.5 m, hossza 2 m. 1941-ben készült, teljesen fából és főleg anemométerek kalibrációjára, valamint oktatási célokra használatos, de tudományos mérésekre is alkalmazható. A ventilátorral elérhető légsebesség maximálisan 15 m/s [[Varga, 2013](#)]. Az áramlásba helyezett testekre ható erőket, az erő- és ellenállás-tényezők definiálását Az áramlástan alapjai tankönyv [[Lajos, 2009](#)] 11. fejezete tárgyalja.

A nyomáskülönbséget kézi digitális manométerrel mérjük. A mérőtér után egy diffúzor található, majd a levegőt áramoltató ventilátor. A ventilátort egy egyenáramú motor hajtja, amelynek a fordulatszáma 0-1500 1/perc között változtatható egy potenciométerrel. A befúvási sebesség 0-15 m/s között változtatható. A mérendő testet egy, a csatorna tetejére

felszerelt mérleg mérőterébe nyúló karjára kell felszerelni. A másik kar egy elektronikus nyomásmérő mérlegre támaszkodik, ezzel mérhető a modellre ható ellenállás erő.

Az NPL szélcsatornában három különböző feladatot lehet elkészíteni. Az első kettő példa a járműiparból származtatható. A legintenzívebben Formula-1 versenyeknél lehet tapasztalni. A harmadik feladat is fontos témát feszeget, a csúsztató feszültség alakulását a testek körül.

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

„A” mérés feladat

Forma 1 versenyautó első kerekére ható ellenálláserő, nyomásmegoszlásból felhajtóerő meghatározása és nyíróréteg szabályozással történő csökkentése. A vizsgálat tárgya különböző méretű elemekkel befolyásolni az áramlást.

„B ” mérés feladat

Egyszerűsített, tükrözött autó homlokkal modell körüli áramlás és az ellenálláserő vizsgálata különböző karosszéria geometriáknál.

„C” mérés feladat

A homlokfali nyíróréteg szabályozás vizsgálata hossz tengelyével párhuzamosan megfújt hengernél.



„A” mérés feladat
[Gali et al, 2010]



„B ” mérés feladat
[Major et al., 2010]



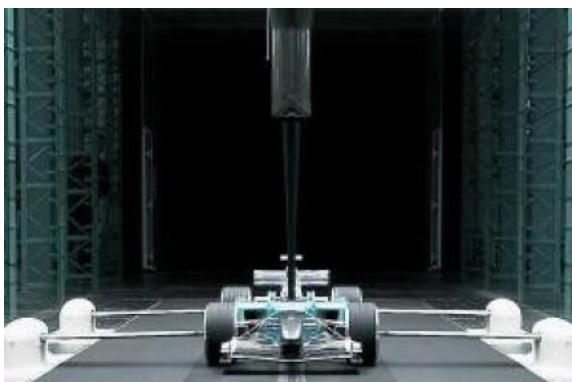
„C” mérés feladat

Az aerodinamikai fejlesztések során a mérnököknek lehetősége van arra, hogy az adott légtérrel elemek legyártása nélkül, számítógépes szimuláció segítségével vizsgálják a versenyautót érintő áramlási viszonyokat [Papp, 2012]. A numerikus szimuláció (CFD [Kristóf, 2014]) szinte felbecsülhetetlen értéket képvisel, hiszen ennek segítségével sokkal egyszerűbb rátalálni arra a kompromisszumos megoldásra, hogy miként rendelkezzen a versenyautó a lehető legnagyobb leszorító erővel és egyben a lehető legkisebb légellenállással. Ebben az esetben nagyon fontos, hogy kritikával vizsgáljuk meg a leírásokat. A CFD vizsgálatok másik fontos paramétere, hogy a kiválasztott, modellezendő teret mennyi numerikus cellára bontjuk fel. Célszerű nagy teljesítményű klaszter (Nagy et al, 2014) számítógép rendszereket használni a futtatásra. Az Áramlástan Tanszék is egy kb. 100 processzor magból álló rendszert használ 2005 óta.

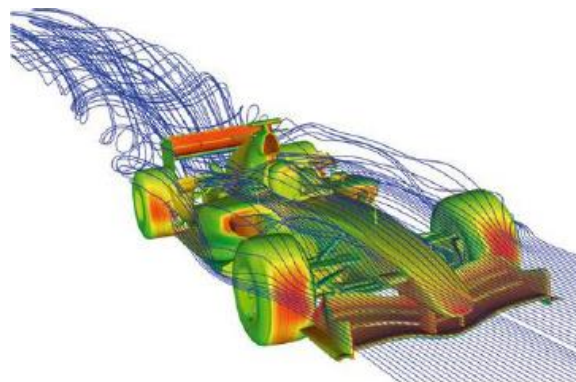
Az autó megfelelő méretarányban elkészített modellje egy acélból, illetve ma már inkább kompozitból készített szállítószalagon van elhelyezve. Ezzel, a versenypályát szimulálva szélcsatornában vizsgálják a járművet [Balczó et al., 2014]. Az Áramlástan Tanszéken is folytak vizsgálatok a mozgó talaj szimulálására (futószalaggal is), illetve jelenleg az NPL szélcsatornában is tesztelés alatt áll egy futószalag beépítése [Lajos et al., 2002]. A vizualizációs technikák folyadék, gázok testek körüli áramlásának láthatóvá tételét teszik lehetővé [Hári, 2013]. Az áramlások láthatóvá tétele szerepet játszhat áramlástan problémák

megoldásának elősegítésében, illetve pontos, precíz mérések előkészítésében. A kísérletek eredményének megfelelő dokumentálására, a konzekvenciák levonására használatos segédeszközök:

- Az emberi szem, mely ugyan térbeli látásra képes, azonban az általa feldolgozott információk mulandók.
- Fényképezőgép/videokamera, illetve mágnesszalag, melyek 2 dimenziós képet szolgáltatnak ([Mahmood, 2011](#)). 3D megjelenítést tesz lehetővé a Holográfia.
- A folyadékok áramlásának megjelenítése történhet többek között
 - a felületen: gyapjúsálakkal, illetve olaj bázisú anyaggal
 - a vizsgált test körül: füst, színezett áramlat.



Formula-1 szélcsatorna, mérés



BMW Sauber F1, CFD teszt

Számos tudományos cikk, értekezés, diploma született az évek során a tanszéken is. Célszerű a tanszéki honlapon is böngészni [[Publikáció tanszék](#)][[Régert et al., 2007](#)][[Ivady, 2013](#)][[Kurdi és Ivady 2012](#)].

4. A vonatkozó irodalom

A jármű modellek mérése iránt érdeklődők számára további szükséges ismeretek: [[Lajos, 2009](#)]

- Az áramlástan alapjai tankönyv 3. kiadásának CD, ill. DVD mellékletében szereplő **M.11.2.4.** Vehicle aerodynamics PP prezentáció.
- A tankönyv 4. kiadásában a DVD melléklet **M.11.3.1** prezentációja.
- **11.3.1.** A járműáramlástan feladatai és megközelítései.
- **11.3.2.** A jármű karosszériák körüli áramlási tér felosztása, a homlokfali ellenállás és csökkentése,
- **11.3.3.** A hátfali, a karosszéria alatti és az oldalfali ellenállás,
- **11.3.4.** Autóbuszok, kamionok körüli áramlás.

A henger körüli áramlással foglalkozók számára ajánlott még:

- **11.1.2.** A körhengerre ható áramlási erő,
- **11.1.3.** Nem kör keresztmetszetű hengerekre, lemezcsíkra, gömbre ható áramlási eredetű erő.

Ajánlott még Az áramlástan alapjai tankönyv 4. kiadásából:

- **6.4.1.** A szélcsatornák alkalmazásának célja,
- **6.4.2.** A szélcsatornák típusai sebesség

- **6.4.3.** A szélcsatornák szerkezeti elemei, mérőtér kialakítások,
- **6.4.4.** A szélcsatorna mérések gyakorlata,
- valamint [[Mehta, 1979](#)].

Publikációs adatbázisok:

- Kutató intézetek, egyetemek linkjei,
- Scopus database <http://www.scopus.com/>,
- Web of Science <http://apps.webofknowledge.com>
- BME Publikációs adatbázis <http://mycite.omikk.bme.hu/www/>
- MATARKA - Magyar folyóiratok kereshető adatbázisa <http://www.matarka.hu/>

5. A mérőberendezés különböző mérési feladatok esetén

5.1. „A” mérés: *Forma-1 versenyautó első kerekére ható ellenállás-erő, nyomásmegoszlásból felhajtóerő meghatározása és nyíróréteg szabályozással történő csökkentése.*

A Forma-1 versenyautók áramlási ellenállásának nagy részét a két első kerékre ható erő teszi ki. A kerék előtt a talaj közelében elhelyezett, áramlásra merőleges lapról leválik a határréteg, és mögötte, a leválási buborékban depresszió van. Ez a depresszió csökkenti a kerék alsó részén lévő túlnyomást, és ez által a kerékre ható erőt (nyíróréteg szabályozás, *shear layer conditioning*).



„A” mérés feladat, üres eset (*Gali et al., 2010*)



„A” mérés feladat, elemmel (*Gali et al., 2010*)

Feladat két, a talaj modellezése érdekében szimmetrikusan elhelyezett kerék modell elé helyezett, különböző méretű és helyzetű lapok alkalmazásával megvizsgálni az ellenállás-erő csökkentésének lehetőségét. Az egyik keréken lévő nyomáskivezetés körbeforgatásával meghatározandó a nyomásmegoszlás a kerület mentén.

Elvégezendő feladatok: a kerék körüli áramlás vizsgálata, az ellenállás-tényezőjének mérése, az ellenállás-tényező nyíróréteg szabályozással történő csökkentési lehetőségének meghatározása.

Feladat:

- először a mérleget kell kalibrálni (súlyok segítségével 2-3 pontban),
- meghatározandó a mérlegkarra ható ellenállás-erő
- ezt követi az áramlás jellemzőinek megismerése pamutszálakkal, olajköddel történő láthatóvá tétellel,
- 3 különböző sebességnél meghatározandó a kerék modellekre ható ellenállás-erő, egy sebességnél mérendő a nyomásmegoszlás a kerék körül.

- a kerekre ható ellenállás mérendő két lap méretnél és két keréktől mért távolságnál
- egy változatnál mérendő a kerék kerülete menti nyomásmegoszlás, és ebből is számítandó az ellenállás és felhajtóerő közelítő értéke

Rendelkezésre áll

- a szélcsatorna mérőterébe benyúló mérleg, amely az áramlási iránnyal párhuzamos ellenállás mérésére alkalmas
- két F1 kerék, az egyik statikus nyomáskivezetésekkel
- a kerek közé rögzíthető, cserélhető lap
- olajköd generátor és olajköd bevezetésére alkalmas cső
- fonalas bot
- digitális manométer
- fényképezőgépet a mérőcsoport biztosít.

5.2. „B” mérés: Egyszerűsített, tükrözött autó homlokfal modell körüli áramlás és az ellenállás vizsgálata különböző karosszéria geometriáknál

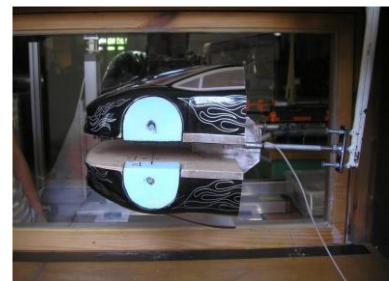
Az ideális közeg áramlásába helyezett testekre nem hat ellenállás. Gyorsuló áramlás esetén, pl. egy személygépkocsi homlokfalán a határréteg vékony, ezért a homlokfal körüli áramlás hasonló a súrlódásmentes áramláshoz tartozó áramképhez, így a jármű homlokfali ellenállása (ami a homlokfali átlagos nyomástényezővel egyenlő) közel zérus, a homlokfal körüli áramlásban az össznyomás a faltól kissé távolabb állandó.



Üres kerékszekrényel
[Major et al., 2010]



Kerek nélkül, lezárt
kerékszekrényel
[Major et al., 2010]



Felszerelt kerekkel
[Major et al., 2010]

Feladat: a fenti feltevések helyességének ellenőrzése és tapasztalat szerzése a személygépkocsi homlokfala körüli áramlásról. A talaj modellezése érdekében két egymáshoz képest szimmetrikusan elhelyezkedő, a B oszlopnál levágott autó homlokfal modell áll rendelkezésre, ezek közül egyiknek felszínén a szimmetriasíokban és a modell belsejében nyomáskivezetések vannak, így a homlokfali nyomásmegoszlás és a nyomás a leválási buborékban mérhető. Ugyancsak mérhető benyújtott Pitot csővel az össznyomás, és mérleggel a modellekre ható ellenállás erő. Utóbbiból kivonva a modell belsejében, azaz a leválási buborékban lévő depresszió és a modell keresztmetszetének (a B oszlopnál) szorzatát, becsülhető a homlokfali ellenállás (a kerek és kerék nélküli mérésből).

Elvégezendő feladatok: Nyomáskülönbség (Δp_{seb}) a szélcsatorna és az atmoszféra között. Erre a szélcsatorna konfúzora mögött kialakított körvezeték biztosít lehetőséget, a nyomást kézi digitális manométer segítségével mérjük. A kapott nyomásértékek segítségével számítható a dinamikus nyomás és a levegő áramlási sebessége a szélcsatornában.

Feladat:

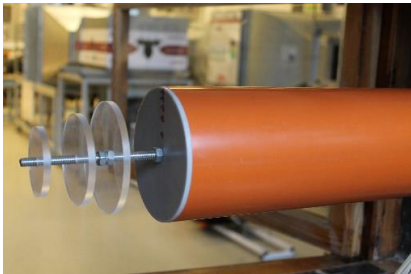
- először a mérleget kell kalibrálni (súlyok segítségével 2-3 pontban),
- meghatározandó a mérlegkarra ható áramlási ellenállás erő
- ezt követi az áramlás jellemzőinek megismerése olajköddel történő láthatóvá tétellel,
- 3 különböző sebességnél meghatározandó a modellekre ható ellenálláserő és a modellben lévő statikus nyomás (a mérőterben lévő nyomáshoz képest) kerekkel, majd kerek nélkül, valamint a kerékház kitöltésével,
- a b) vizsgálat és a modellekre ható ellenálláserő, valamint a modellben lévő statikus nyomás meghatározása, pl. spoiler a homlokfal alatt.

Rendelkezésre áll

- a szélcsatorna mérőterébe benyúló mérleg, amely az áramlási iránnyal párhuzamos ellenálláserő mérésére alkalmas, és amely mentén a modellben lévő statikus nyomás kivezethető,
- két, tükrözött autó homlokfal modell
- olajköd generátor és olajköd bevezetésére alkalmas cső
- manométer

5.3. „C” mérés: A homlokfali nyíróréteg szabályozás vizsgálata hossz tengelyével párhuzamosan megfűjt hengernél

A nyíróréteg szabályozás lehetővé teszi, hogy hossz tengelyével párhuzamosan megfűjt henger ellenállás-tényezőjét jelentősen csökkenthessük.



Az összes henger bemutatása



A hátnyomás mérése



Egy mérési konfiguráció

Elvégezendő feladatok: a nyíróréteg szabályozás mechanizmusának megismerése, valamint „éles” be- és kilépő éllel rendelkező henger ellenállás-tényezőjének csökkentése a homlokfalra erősített különböző méretű, és homlokfalhoz képest változtatható távolságú kör alakú lemez segítségével.

Feladat:

- először a mérleget kell kalibrálni (súlyok segítségével 2-3 pontban),
- meghatározandó a mérlegkarra ható ellenállás erő
- ezt követi az áramlás jellemzőinek megismerése olajköddel történő láthatóvá tétellel nyíróréteg szabályozás nélkül és a statikus nyomásmegoszlás meghatározásával a modell homloklapján.
- nyíróréteg szabályozás nélkül és két, különböző méretű körlapot a homlokfaltól 3-3 különböző távolságban rögzítve meghatározandó az ellenálláserő
- a legkisebb ellenálláserőnél az áramlás jellemzőinek megismerése olajköddel történő láthatóvá tétellel, és nyomásmegoszlás mérés

Rendelkezésre áll

- a szélcsatorna mérőterébe benyúló mérleg, amely az áramlási iránnyal párhuzamos ellenállásérő mérésére alkalmas
- henger alakú test a homlokfal elé felszerelhető kör alakú lemezekkel és a homlokfalon statikus nyomáskivezetésekkel
- olajköd generátor és olajköd bevezetésére alkalmas cső
- manométer

6. A mérési bizonytalanság és mérési hiba meghatározása

A mérés bizonytalanságot a modell ellenállás-tényezőjére kell elvégezni az alábbi módon:

A mért mennyiségek és a hozzájuk tartozó mérési hibák:

- F a mért erő, és annak hibája: $dF = 0,02$ [N]
- p_o a légköri nyomás mérési hibája: $dp_o = 100$ [Pa]
- T_o a hőmérséklet mérési hibája: $dT_o = 1$ [K]
- p_k a nyomásmérő műszer mérési hibája: $dp_k = 2$ [Pa].

Részleteket a BSc képzésben használt leírások tartalmaznak: [Áramlástan BMEGEATAG11](#).

A mérés során nem szabad megfeledkezni

- A mérőberendezés bekapcsolása előtt, illetve általában a mérőberendezés üzeme során mindig meg kell győződni a balesetmentes használat feltételeinek teljesüléséről. A bekapcsolásról, illetve a mérés közben végrehajtott változtatásokról a berendezés környezetében dolgozókat figyelmeztetni kell.
- Minden mérési alkalommal a légköri nyomás és teremhőmérséklet feljegyzéséről a mérés előtt és után is!
- A felhasznált mérőműszerekről leolvasott értékek mértékegységének és a rájuk vonatkozó egyéb tényezők (Például a mintavételezés sebessége, a nullpontok ellenőrzésének időpontja.) feljegyzéséről.
- A felhasznált mérőműszerek típusának, gyártási számának feljegyzéséről!
- A mérőműszerről leolvasott mennyiségek és a további számításoknál felhasznált mennyiségek mértékegységének egyeztetéséről.
- A digitális manométer kalibrációjáról.
- A nyomásmérő bekötésénél figyelmesen kell eljárni a csatlakozók "+" illetve "-" ágának és a méréshatár kiválasztásánál. Figyelni kell arra, hogy a nyomásmérő csatlakozó csomópontjaira a szilikonsövet óvatosan kell felhelyezni.
- A ventilátorhoz csatlakozó csatorna összeállításánál vigyázni kell a légtömör szerelésre, mert az esetlegesen kialakuló réseken távozó illetve beáramló levegő jelentősen elronthatja a mérések eredményeit.
- A jegyzőkönyv leadása előtt erősen ajánlott a [konzultációk igénybevétele](#).

Irodalom

- [1] Varga Árpád (mérés felelős): *Áramlástan Tanszék M04-es mérési leírás. Az NPL szélcsatornában készített BSc hallgatói mérés leírása.* (2013). <http://www.ara.bme.hu/oktatas/labor/M4.pdf>
- [2] Lajos Tamás *Az áramlástan alapjai.* ISBN 978-963-06-6382-3. Budapest (2008). http://simba.ara.bme.hu/aktualis/hirek/ujtankonyv_2008.htm
- [3] Vad János (tantárgy felelős) *Tantárgy adatlap és tantárgykövetelmény. Hő- és Áramlástan.* <http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATMG01> (2014)
- [4] Áramlástan Tanszék (2013). *EMB-001 kézi digitális nyomásmérő berendezés leírása* http://simba.ara.bme.hu/oktatas/labor/EMB-001_manual.pdf

- [5] **R.D. Mehta and P. Bradshaw.** *Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels*, Aero. Journal (Royal Aeronautical Society), Vol. 73, p. 443 (1979).
<http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/LowSpeedTunnels.pdf>
- [6] Gali István Márk, Király Anett, Székely Róbert István *N2. számú mérés Forma-1 versenyautó első kerekére ható ellenálláserő, és nyíróréteg szabályozással történő csökkentése*, (2010)
- [7] **Papp István** *Szélcsatorna, szenzorok és speciális festés az aerodinamika eszköztárában* (2010).
<http://www.motorsportal.hu/magazin/szelcsatorna-szenzorok-es-specialis-festes-az-aerodinamika-eszkoztaraban-c32523.html>
- [8] **Kristóf Gergely** *Áramlások numerikus modellezése*, ISBN 978-963-08-1212-2, (2014)
<http://www.ara.bme.hu/~kristof/CFDjegyzet/>
- [9] **Nagy László, Lohász Máté Márton, Tóth Péter, Erdei Csaba** *Az Áramlástan Tanszék Klaszter leírása*. Csak intraneten elérhető. (2014)
<http://152.66.21.40/wiki>
- [10] **Balczó Márton** *Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratórium* (2014).
<http://www.ara.bme.hu/cms/>
- [11] **Lajos Tamás, Rékert Tamás, Dávid Norbert** *Az áramlástan jelentősége az autóbussz karosszéria tervezésben* In: 33. Autóbussz Szakértői Tanácskozás és Nemzetközi Gépjármű biztonsági Konferencia. Keszthely, Magyarország, pp. 1-8. (2002)
<http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATMG10/2012-2013-II/ea/Buszprob.pdf>
- [12] **Hári Kristóf**, *Szárnyszegmens vizsgálata Lézer Doppler Anemométerrel az NPL szélcsatornában* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, Mechatronikai mérnök alapszak / Gépészeti modellezés szakirány. (2013).
http://www.ara.bme.hu/~nagy/thesis/meres/Hari_Kristof_BSc_2013_kivonat.pdf
- [13] **Mahmood, M.** *Flow Visualization in Wind Tunnels*, InTech. (2011).
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/16669.pdf>
- [14] **Áramlástan Tanszék Ph.D. értekezések**
<http://simba.ara.bme.hu/kf/publikacio/publikacio.htm>
- [15] **Rékert, T., Lajos, T.:** *Description of flow field in the wheelhouses of cars*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol . 28, Issue 4, pp 616-629, August 2007
- [16] **Daniel Bence Ivady** *Aerodynamic Force Modification via Base Roughness* Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Fluid Mechanics, MSc in Mechanical Engineering Modelling Fluid Mechanics major / Fluid/Solid Mechanics. (2013)
http://www.ara.bme.hu/~nagy/thesis/cfd/Daniel_Bence_Ivady_MSc_2013_abstract.pdf
- [17] **Kurdi Péter és Ivady Dániel Bence** *Formula 1-es első szárny tervezése* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék.,Megjelent: CNC Media, Hírek a szerszámgépek világából, Kurdi Péter: 2012/06/29. (2012)
<http://www.cnc.hu/2012/06/forma-1-es-versenyauto-elso-szarnyanak-tervezese/>
- [18] **Major Gábor, Zsedely Balázs, Balczó Bálint** *N2. számú mérés Formula1 versenyautó első kerekére ható ellenálláserő, és nyíróréteg szabályozással történő csökkentése*, (2010)