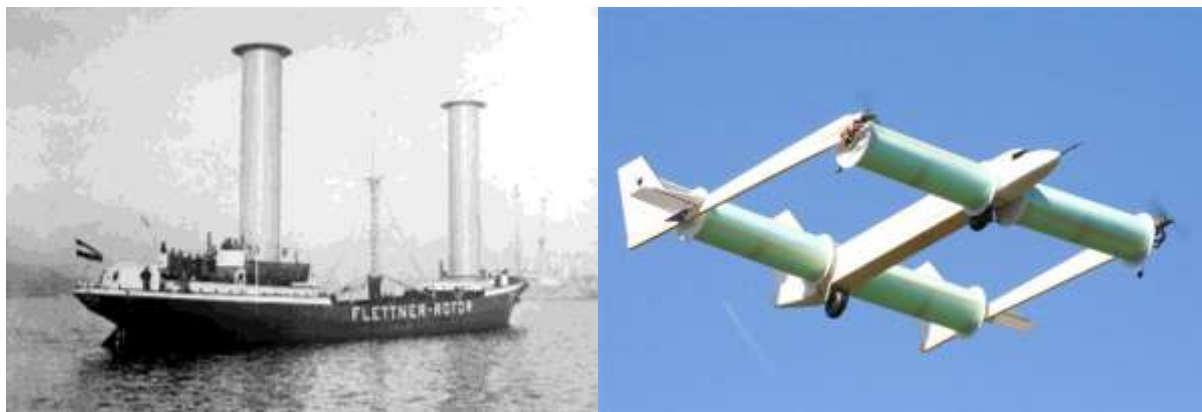


H04

FLETTNER ROTOR MÉRÉSE

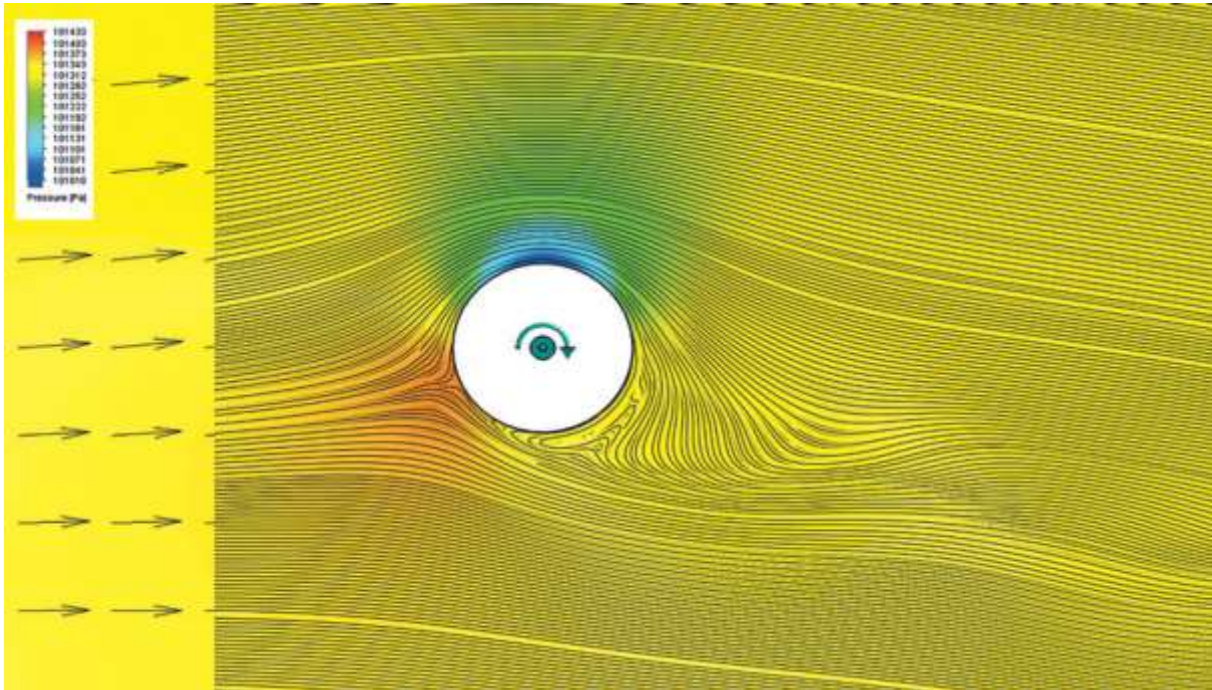
A Flettner rotor egy áramlásba helyezett forgó henger. A hengeren a forgás következtében aszimmetrikus nyomáseloszlás alakul ki, amelynek eredménye egy, a megfúvás irányára merőleges erő. Ez az erő felhasználható akár hajó mozgatására vitorlaként használva a Flettner rotort, de korai ipari alkalmazásban felmerült a rotor repülőgép szárnykét történő alkalmazása is.



1. ábra Flettner rotor korai alkalmazásai

1. A mérés célja

A mérés célja a Flettner rotor működésének vizsgálata mérések útján, különböző paraméterek (szélesség, fordulatszám) állításával. A rotor egy áramlásban (szélben) forgatott henger, aminek a felületén a Magnus-effektus miatt nyomáskülönbség alakult ki a két oldal között. A nyomáskülönbség pedig felhajtóerőt eredményez. A nyomáseloszlást a következő ábra mutatja.



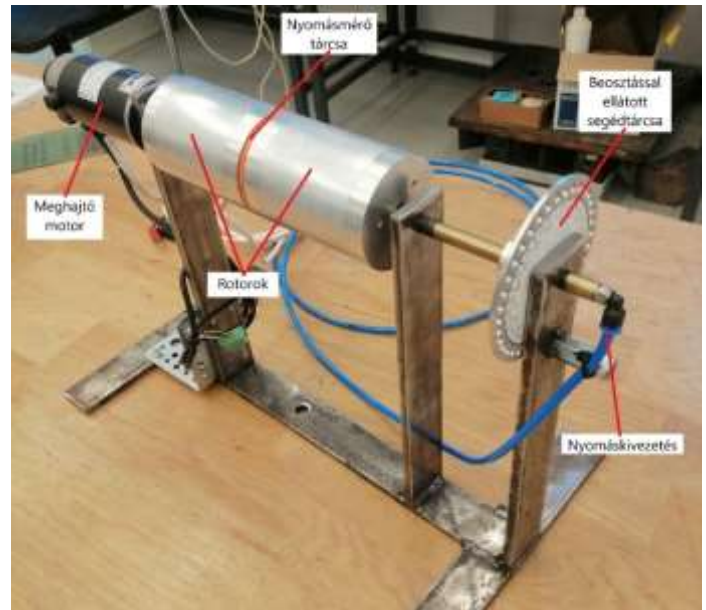
2. ábra Áramvonalak és nyomáseloszlás forgó henger körül

A Flettner rotor egy áramló közegben (leggyakrabban levegő vagy víz) forgatott henger, melynek mindkét vége síklapokkal határolt. A súrlódás hatására a forgó henger felülete folyadékrészecskéket ragad magával, ami cirkulációt kelt. A tapadás törvényének értelmében a felület közvetlen közelében azonos részecskesebesség alakul ki, mint a henger kerületi sebessége, tőle távolabb már alábbhagy ez a hatás. A henger mellett, a forgás irányával megegyezően elhaladó részecskék ennek következtében magasabb, míg a forgás irányával ellenkezően haladó részecskék alacsonyabb sebességre tesznek szert. A Bernoulli törvény értelmében a sebesség növekedésével a nyomás lecsökken. Ezek alapján belátható, hogy a henger az áramlásra és a forgatás tengelyére merőleges két oldala között nyomáskülönbség jön létre, ami pedig erőt fejt ki a hengerre. Ezt a hatást Magnus-effektusnak, a fellépő erőt Kutta-Joukowski erőnek nevezik. Ily módon hasonlóan működik, mint egy repülőgépszárny.

2. A mérési berendezés leírása

A mérőberendezés alapját két 70 mm átmérőjű henger képezi, amelyeket mágneses tengelykapcsoló köt össze és amelyeket rotornak nevezünk. A rotort egy 24 V-os egyenfeszültségű szervomotor forgatja meg az egyik végén. A szervomotort egy labor tápegység segítségével tápláljuk. Fontos, hogy a tápegységen 24 V-nál magasabb feszültséget véletlenül se állítsunk be, mert az a motor meghibásodásához vezetne.

A feszültség szabályozásával lehet a motor fordulatszámát változtatni. A fordulatszámot a motorral egybeépített optikai érzékelő és egy arduino segítségével tudjuk mérni és egy stroboszkóppal ellenőrzünk.



2. ábra Mérőberendezés

A két félhenger között egy 3D nyomtatott narancssárga műanyag tárcsa található egy kis átmérőjű radiális furattal. A furaton keresztül a hengerpaláston levő nyomást a középső sárgaréz tengelybe vezetjük be, amely a csővégen levő kivezetésre viszi a nyomást. Innen egy kék pneumatika cső vezeti ki a szélcsatornából a furatnál levő nyomást. Fontos, hogy a furaton kialakuló nyomást a csatorna statikus nyomásához viszonyítva érdemes mérni, mivel a szélcsatornában a csatorna üzeme közben légköri alatti nyomás, depresszió uralkodik! A mérőfurat helyének a változtatása segédtárcsa forgatásával történik. A mérőfurat helye és a segédtárcsán látható skála egymáshoz képest 90°-al elforgatott, a 0° a megfűvott henger oldalán, hozzávetőlegesen a torlópontban van.



4. ábra Mérőfurat a két forgó félhenger között

3. A mérés menete

A mérés kezdetén a berendezést el kell helyezni az NPL szélcsatorna belsejében. Át kell vezetni az elektromos és a pneumatikus kábeleket és ellenőrizni kell, hogy minden megfelelően rögzített-e! Ki kell választani a szélsébséget és a henger fordulatszámot!



5. ábra NPL szélesatorna

A rotoron uralkodó nyomáseloszlás méréséhez a rotor középtengelyének a forgatásával (segédtárcsa) tudjuk beállítani az egyes pozíciókba a mérőfuratot. Fontos, hogy a forgatáshoz az NPL szélesatornát le kell állítani, majd a pozicionálás után újra el kell indítani. Az indítás után érdemes megvárni, amíg a csatornában az áramlás kialakul.

A pozicionálást a beosztással ellátott segédtárcsával tesszük meg, ami a mérőtárcsával együtt forog és 10 fokként, ily módon 36 mérési pontra van felosztva. A szerkezet lehetővé teszi a reteszelést, használat közben érezhető, hogy egy beosztással való elfordításnál határozottan megáll az új pozícióban. A nyomáskivezetésen keresztül csatlakozhatunk a nyomásmérő berendezéshez.

A referencia mérés

A mérés megkezdése előtt ne felejtsük el rögzíteni a környezeti hőmérsékletet és nyomást. A szélesatornába helyezett Flettner rotor villanymotorját kezdetben ne helyezzük feszültség alá, ne forgassuk a rotort. A szélesatorna elindítását követően a maximális érték felére csökkentjük a szélsébséget. Ezt a csatornába épített Prandtl csővel ellenőrizhetjük. Ebben az állapotban mérjük végig mind a 36 mérési pontba uralkodó nyomásértéket, ezzel egy referencia adatsort létrehozva.

A Prandtl csővel mért dinamikus nyomásból számolt sebesség:

$$v = \sqrt{\frac{p_{din} \cdot 2}{\rho}} \quad (1)$$

ahol

v levegő sebessége [m/s]
 p_{din} a megfúvás dinamikus nyomása [Pa]
 ρ levegő sűrűsége [kg/m³]

A levegő sűrűsége:

$$\rho = \frac{p_0}{T_0 \cdot R} \quad (2)$$

ahol

ρ levegő sűrűsége [kg/m³]

p_0	környezeti nyomás [Pa]
T_0	környezeti hőmérséklet [K]
R	levegő specifikus gázállandója ($R = 287 \text{ J/kg/K}$)

Üzemállapotmérés

A referencia állapotbeli mérést követően különböző szélesség és fordulatszám esetén történnek a mérések. Mind a fordulatszámot, mind a szélességet több lépésben kell változtatni, hogy annak hatását lehessen vizsgálni. A szélesség szélső értékei 5-15 m/s kell beállítani lehetőleg egyenközüen változtatva. A fordulatszámot 1000 és 2000 fordulat/perc között állítsuk.

4. Kiértékelési feladatok

A kapott nyomáseloszlást számítsák át nyomástényezőre minden pontban, hogy összehasonlíthatóak legyenek a különböző szélességen mért eloszlások.

A nyomástényezőt az alábbi összefüggéssel határozhatják meg:

$$c_p = \frac{p_s}{\Delta p_{din}} \quad (3)$$

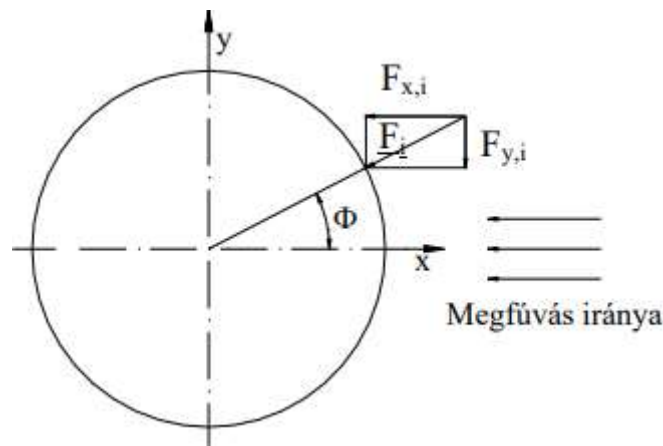
ahol

c_p	nyomástényező [1]
p_s	az adott pontban mért statikus nyomás [Pa]
Δp_{din}	a megfúvás dinamikus nyomása [Pa]

Készítsenek a nyomástényezők felhasználásával egy diagramot, ami bemutatja a kerület mentén a nyomástényezők alakulását (vízszintes tengelyen a mérési pont szöghelyzete, függőleges tengelyen a pontra számított nyomástényező). Célszerű a különböző szélességekre, valamint fordulatszámora meghatározott eseteket külön diagramon ábrázolni. Érdemes a szögértékeket úgy felvenni, hogy a diagram közepe a 0° -os szögpozíció legyen!

Ellenállástényező, felhajtóerő tényező meghatározása

A kiértékelési feladat során a hengerre ható ellenállás- és felhajtóerőt kell először meghatározni. Ennek első lépéseként az egyes szögpozíciókban lemerő nyomásértékekből erőt számolunk minden pontra. Ezt az erőt fel kell bontani megfúvással párhuzamos (ellenállás-erő) és arra merőleges (felhajtóerő) komponensekre. A következő ábrán szemléletesen látszik, hogy a az erő felbontása!



6. ábra A rotorra ható erők, F_i eredő erő és két komponense, az x irányú ellenállás-erő és y irányú felhajtóerő. Az egyes szögpozíciókra meghatározott kicsi erőket pedig össze kell adni a teljes kerületre! Fontos, hogy az összeadást előjelhelyesen kell megtenni!

Az alábbi összefüggés segítségével számíthatók az egyes komponensek értékei:

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{ix} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \cdot \frac{D\pi}{n} \cdot h \cdot \cos \Phi_i \quad (4)$$

$$F_f = \sum_{i=1}^n F_{iy} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \cdot \frac{D\pi}{n} \cdot h \cdot \sin \Phi_i \quad (5)$$

ahol

F_e	ellenállás-erő [N]
F_f	felhajtóerő [N]
Δp_i	szögpozícióban mért túlnyomás [Pa]
D	hengerátmérő [m]
n	szögpozíciók száma [1]
h	rotor hossza [m]
φ_i	szögpozíció [°]

A kiértékelés során az ellenállás- és felhajtóerőt dimenziótlanítani kell az alábbi összefüggések alapján:

$$c_e = \frac{F_e}{\Delta p_{din} \cdot D \cdot h} \quad (6)$$

$$c_f = \frac{F_f}{\Delta p_{din} \cdot D \cdot h} \quad (7)$$

ahol

c_e	ellenállástényező [1]
c_f	felhajtóerő-tényező [1]

Az egyes üzemállapotra meghatározott felhajtóerő és ellenálláserő értékeket ábrázolják a fordulatszám vagy szélsébsesség függvényében, attól függően, mi a vizsgált paraméter!

Érdemes megvizsgálni, hogy a Flettner rotort vitorlaként alkalmazva milyen szélirány esetében termel a járműre ható, a járművet előre felé mozgó erőt!

6. Hibaszámítás:

A mérés hibaszámítását a mérés eredményére (ellenállástényező, felhajtóerő-tényező) kell elvégezni:

A mért mennyiségek és a hozzájuk kapcsolódó mérési hibák:

$X_1 = \Delta p_i$,	illetve a nyomásmérés hibája	$\delta \Delta p_i = 2 Pa$
$X_2 = p_0$,	illetve a légköri nyomás mérési hibája	$\delta p_0 = 100 Pa$
$X_3 = T_0$,	illetve a hőmérséklet mérési hibája	$\delta T_0 = 1 K$

A mérés során nem szabad megfeledkezni

- A kiértékelés során meg kell határozni a számított adatokat terhelő, a mérési adatok pontatlanságából származó mérési hibát
- 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 felhasznált mérőműszerekről leolvasott értékek mértékegységének és a rájuk vonatkozó egyéb tényezők (Például a ferdecsöves mikromanométer mérőszál ferdítési tényezője.) feljegyzéséről.
- A felhasznált mérőműszerek típusának, gyártási számának és a benne lévő mérőfolyadék sűrűségének feljegyzéséről!
- A mérőműszerről leolvasott mennyiségek és a további számításoknál felhasznált mennyiségek mértékegységének egyeztetéséről.
- A nyomásmérő bekötésénél figyelmesen kell eljárni a csatlakozók "+" illetve "-" ágának és a méréshatár kiválasztásánál. Általában mindegyik manométer típusnál, de kiemelten a ferdecsöves manométernél, figyelni kell arra, hogy a nyomásmérő csatlakozó csomjaira a gumicsövet óvatosan, "ráközelítve", a mérőfolyadék szál viselkedését figyelemmel kísérve kell felhelyezni
- A nyomásközlő gumi, vagy szilikon csöveket mérés előtt, esetleg közben is célszerű ellenőrizni, nehogy 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.
- A jegyzőkönyv elején emeljék ki a saját mérési feladatukat, amelyet mértek.
- A mérési segédlet több feladatot tartalmaz, mint a személyre szabott feladat, amelyet kapnak.
- A jegyzőkönyv olyan legyen, hogy aki nem ismerné a mérést, és még nem járt a laborunkban, a leadott jegyzőkönyv alapján megérti a mérést, megtalál mindent, ami kell neki hozzá (Egyenleteket meg a kellékeket is), és ezek alapján ismételni tudja a mérést.
- A mintajegyzőkönyv meg a minta prezentáció azért színes, hogy látni lehessen, hogy melyik részeket kell átírni saját adatokkal. Tessék ezek kitöltése után valami rendes borító kinézetet adni neki.
- Szöveget a mérési segédletből nem szabad másolni. Csak saját megfogalmazásokat adjanak le. A büntetés a másolásért egyenértékű avval, mint amikor más csalást követnek el.
- A képleteket minden esetben egyszer jelekkel, egy példában meg behelyettesített értékekkel mutassák be.
- A hibaszámítás értékeit minden ábrán jelenítsék meg hibásávokkal, még a hibaszámítás előtt lévőkön is. A hibásávokat tessék hibásávként megadni, és nem oszlopdigramban!
- A hibaszámítás által egy bizonytalansági sávot kapunk az értékeinkre, és nem egy számértéket a mérés jóságára! Kérem így kezeljék ezeket az értékeket. Az összefoglalóban ne a hibásávokról beszéljenek, hanem a kapott eredményekről.
- A jegyzőkönyv tartalmi és terjedelmi követelményeit ellenőrizze leadás előtt! Amennyiben nincsenek betartva, nem elfogadható a jegyzőkönyv.
- A félig kész jegyzőkönyv leadása nem elfogadható. Ezek után pótdíjat kell fizetni.
- Amennyiben létezik ellenőrző felület egy méréshez, kötelező a használata.

- A Betz manométerhez való kalibrálást közölni kell a jegyzőkönyvben és még a számítások előtt figyelembe kell venni, amennyiben a két műszer eredményének eltérése indokolja.
- A leadott jegyzőkönyv fájl típus követelményeit ellenőrizze leadás előtt.
- A leadandó jegyzőkönyv megszabott határideit tartsa figyelemmel.
- Egyenleteket egyenletszerkesztővel és nem képként való beillesztéssel készítsék el
- Diagramokon a pontokat emeljék ki. Nem mérnek minden egyes pontban egy görbe mentén.
- Nagy és kevésbé lényeges táblázatokat, a beolvasott lapokat és más kötelező csatolmányokat a jegyzőkönyv végén található mellékletbe közölgék.
- Magyarázza meg bőven az eredményeit, következtetéseit, és hogy mit tanult a mérésből. Ezek alapján lehet megállapítani, hogy valaki mennyire sajátított el egy mérést. Ezeket érdemes a hivatkozott irodalomban találtakkal alátámasztani.
- Egy diagramban kell ábrázolni azokat az eredményeket, amelyeket érdemes összehasonlítani!
- A jegyzőkönyv leadása előtt erősen ajánlott a konzultációk igénybevétele.

Irodalom

- [1] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 9.9.3 és 11.1.2 fejezet
- [2] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 423.oldal
- [3] Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 488.oldal