

SZÁRNYMETSZETEK KÖRÜLI ÁRAMLÁS SZIMULÁCIÓJA ALACSONY REYNOLDS-SZÁMOKON

Nagy Balázs

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék
MSc-hallgató, balazs.nagy.1994@gmail.com*

Balla Esztella

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék
PhD-hallgató, balla@ara.bme.hu*

Absztrakt

Az alacsony Reynolds-számok (Re) aerodinamikája gyakorlati jelentőséggel bír környezetünkben lévő áramlástechnikai berendezések esetében. Többek között alacsony Reynolds-számok mellett működnek a kisebb ventilátorok, illetve modell repülőgépek is. Amennyiben egy áramlástechnikai gépet ebben az intervallumban ($Re < 100\,000$) [1] szeretnénk alkalmazni, lehetőségünk nyílik egyszerűbb geometriák igénybevételére, mellyel aerodinamikailag ugyanazt a hatást érjük el, mint egy profilos szárny esetében. Ebben az esetben egy gyártástechnológiailag kedvezőbb megoldáshoz folyamodunk, mely gazdasági előnyöket is jelent.

Az alacsony Re-számok aerodinamikájának jobb megértése érdekében eme cikk a Schmitzféle mérés során használt három különböző geometria („Síklap”, „Ívelt lap” (417a), „Szárnyprofil” (N60)) [2] körüli áramlás 2D szimulációját mutatja be mérési eredményekkel összevetve. A szimulációban C-grid típusú numerikus háló blokkstruktúra és tr-k-kl- ω turbulencia modell használatára került sor, ANSYS FLUENT környezetben.

A tanulmány négy különböző megfúvási szög és három Reynolds-szám vizsgálatát mutatja be, mely így 36 darab RANS és 2 darab URANS futtatást jelent. A validációra az F. W. Schmitz által 1942-ben publikált eredményekkel került sor, melynél fény derült az időátlagolt módszer gyengeségeire, így láthatóvá vált, hogy az örvényleválások kezelésére ez a megoldás nem alkalmas, emiatt ezen esetekben időfüggő futtatás végrehajtására volt szükség.

A szimulációk kiértékelése összetett szempontrendszer alapján történt meg, melyben elsőként a nyomáseloszlások és az áramképek összevetésénél, a grafikonokban láthatóvá váltak az áramképben megjelenő örvényleválások és buborékok. Ezt követően a leválási buborékok kialakulásának tanulmányozása következett a sebesség- és turbulens kinetikus energia kontúrok, továbbá az áramvonalak segítségével. Itt azt a következtetést lehetett levonni, hogy a lamináris leválási buborék növekedik egyrészt a Reynolds-szám csökkenésével, másrészt a megfúvási szög növekedésével is, továbbá látható volt, hogy alacsony Reynolds-számok mellett nem történik meg a turbulens visszafekvés jelensége.

Végül a síklapszámok grafikonban való megjelenítése során egy átfogó kép alakult ki arról, mely esetekben érdemes javítani a szimulált eredményeken és a későbbiek folyamán más eljárást alkalmazni. Továbbá ezen eredmények ismeretében lehet javaslatot tenni arra, hogy mely esetekben érdemes a profilos szárny helyettesítése ívelt lappal. Az aerodinamikai tulajdonságok alapján az állapítható meg, hogy míg alacsony ($Re < 63\,000$) Reynolds-számok mellett – a -5° -os megfúvási szög kivételével – az összes esetben célszerű az ívelt lap alkalmazása, addig a $63\,000$ fölötti értékek esetében a szárnyprofil nagymértékben felülmúlta az ívelt lap síklapszám értékeit.

Kulcsszavak: numerikus szimuláció; aerodinamika; lamináris leválási buborék; szárnyprofil

Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
C_a, C_f	felhajtóerő-tényező (Auftriebsbeiwert)	1
C_w, C_e	ellenállás-tényező (Widerstandsbeiwert)	1
Re	Reynolds-szám	1
y^+	dimenziótlán faltávolság	1
U	áramlás sebessége	m/s
l	jellemző hossz	m
k	turbulens kinetikus energia	m^2/s^2

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
ε	turbulens disszipáció	m^2/s^3
ω	örvényfrekvencia	rad/s
ν	kinematikai viszkozitás	m^2/s
α	megfűvési szög	°

Rövidítések

Jelölés	Angol megnevezés	Magyar megnevezés
CFD	Computational Fluid Dynamics	Numerikus áramlástan
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes	Reynolds-átlagolt Navier Stokes
URANS	Unsteady RANS	Időfüggő RANS
SST	Shear Stress Transport	Csúsztatófeszültség hatás szállító turbulenciamodell

1. Bevezetés, a téma jelentősége

A vizsgált alacsony Reynolds-számokon ($Re=21\ 000$, $Re=63\ 000$) üzemelő áramlástechnikai gépek esetében felmerül az egyszerűbb lapát-geometriák alkalmazása. Ezen elemzés során 2 dimenziós numerikus szimulációs technikát használtunk. A numerikus szimuláció lehetőséget nyújt, hogy egy áramlástan folyamatot egy, vagy több paraméter változtatása mellett vizsgáljunk és mérések alapján történő validáció után akár egy valóságos mérést helyettesítsünk ezzel. Jelen feladatban – a később részletesen is bemutatásra kerülő – F. W. Schmitz kísérletében [2] használt három különböző geometriájú profil vizsgálatát végezzük el a Reynolds-szám változtatása mellett. Amennyiben a validáció sikeresnek bizonyul és sikerül reprodukálnunk a mérési eredményeket, abban az esetben – feltehetőleg - ez a módszer más geometriák esetében is használható lesz arra, hogy meghatározzuk az aerodinamikai jellemzőket, helyettesítve ezzel a sokszor összetett és hosszadalmas méréseket.

1.1. A Reynolds-szám és a lamináris leválási buborék

A Reynolds-szám az áramlástan és a hőátadás során használt dimenziótlán hasonlósági szám. E szám használatának nagy jelentősége van az áramlástan elven működő gépek tervezésénél, abban az esetben, amikor egy meglévő gép ismert jellemzőiből szeretnénk következtetni egy hasonló, de eltérő méretű gép tulajdonságaira. A Reynolds-szám az alábbi összefüggéssel adható meg:

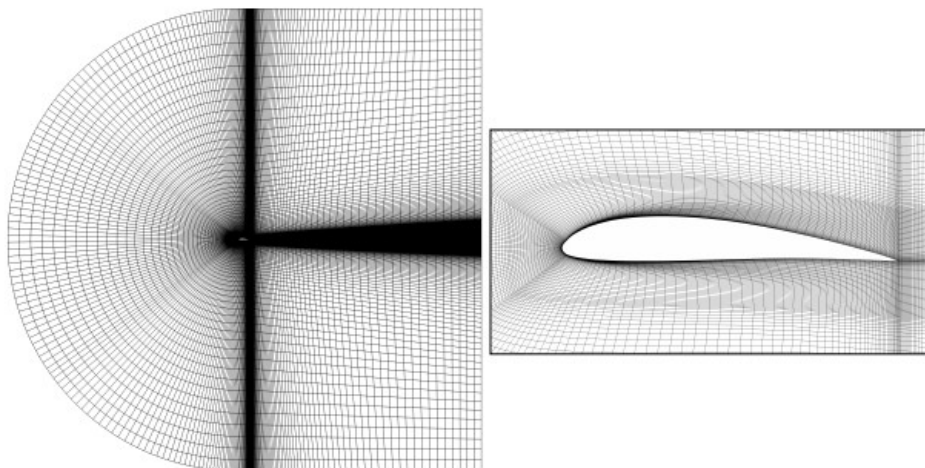
$$Re = \frac{U \cdot l}{\nu} \quad (1)$$

ahol U az áramlási sebesség, ν a kinematikai viszkozitás és l pedig a jellemző hossz. A Reynolds-szám a tehetetlenségi és a viszkozus erők arányát fejezi ki. Ezen dimenziótlan szám magas értékeinek esetében a tehetetlenségi erők hatása jelentősebb, míg alacsony számokon a viszkozus erők befolyásolják jelentősebben az áramlást. A Reynolds-szám csökkenésével fokozódik az arra való hajlam, hogy lamináris leválási buborék alakuljon ki. Profilos szárny esetében alacsony Re-számok mellett a belépőél környezetében lamináris leválás fog kialakulni. A profil vékonyításával azaz egy ívelt lap alkalmazásával az éles belépő él turbulencia generátorként hat, amely elősegíti a lamináris-turbulens átmenet létrejöttét a határrétegben. A vékonyabb profil miatt a határréteg visszafekvése korábban valósul meg a szívott oldalon, melynek következtében egy kisebb leválási buborék fog kialakulni. Ezen hatás eredményeképp – a kisebb leválási buborék miatt – egy erősebb szívóhatás és emiatt egy magasabb felhajtóerőtényező és egy alacsonyabb ellenállás-erő-tényező fog kialakulni, amely magasabb siklószámokat eredményez. [1]

A leválási buborék hátránya az aerodinamikában, hogy egyrészt csökken a felhajtóerőtényező maximuma, illetve megnő az ellenállás-tényező. Másrészt a sűrűlódási ellenállás növekedése figyelhető meg, amikor az áramlás a szárnyra visszafekszik. Ezeknek a jelenségeknek az eredményeképp egy igen kicsi siklószám (a siklószám a felhajtóerő-tényező és ellenállás-tényező hányadosa, mellyel ki tudjuk fejezni a szárny "jóságát" azaz, hogy adott ellenállás-erő "árán" annak hányszorosát kitevő felhajtóerő keletkezik) lesz jellemző alacsony Reynolds-számokon, melyeket a következőkben korábbi tanulmányok segítségével fogunk alátámasztani.

2. A numerikus modell beállításai

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes – Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletek) modellt alkalmaztunk, mivel a tervezés során legtöbbször egy közelítő áramképre vagy egy adott felületen vett integrálértékre – például a szárnyaknál felhajtóerőre – van szükség, a lehető legrövidebb idő alatt. A RANS turbulenciamodellek alkalmazásával, az apró örvényeknek csak a hatását vesszük figyelembe, nem szükséges felbontani azokat. A háló elkészítéséhez az ANSYS ICEM szoftver négyyszög hálóját használtuk. Az 1. ábrának megfelelően a C-grid típusú hálót 10 részre osztottuk föl a szívott, nyomott oldal illetve belépő- és kilépő élek mentén. A háló kialakítása során szem előtt tartottuk az Eriksson skewness (a cella térfogatának és az élek szorzatának a hányadosa) illetve az Aspectratio (a cella leghosszabb és legrövidebb oldalának a hányadosa) minőségi feltételeket [3].



1. ábra. A C-grid háló szerkezete a szárnyprofil esetében

A szimuláció során a $tr-k-kl-\omega$ turbulenciamodellt alkalmaztuk, melynél egyrészt a Moreau et al. [4] tanulmányt vettük alapul, amiben négy különböző turbulencia modellt vizsgáltak meg ($k-\varepsilon$, $k-\varepsilon$ alacsony Re-számokon, $k-\omega$ -SST és a $tr-k-kl-\omega$ modelleket) egy adott szárnyprofil (Valeo Motors and Actuators által kifejlesztett szabályozott diffúziós (Controlled Diffusion) szárnyprofil) esetében. A szimulációkat mérési eredményekkel vetették össze, melynek során a $tr-k-kl-\omega$ illetve a $k\omega$ -SST turbulenciamodell állt a legközelebb a mért eredményekhez. A szimuláció során a $tr-k-kl-\omega$ modell volt az egyetlen, amely azt mutatta, hogy a kilépő élnél az áramlás instabil. Másrészt Mustafa összehasonlítását vizsgáltuk meg [5], aki tanulmányában a $tr-k-kl-\omega$, $k-\varepsilon$ és a $k\omega$ -SST turbulencia modelleket hasonlította össze a NACA64A006 szárnyprofilon végzett mérési eredményekkel RANS szimuláció során. Az összehasonlítás alapján elmondható, hogy $tr-k-kl-\omega$ -val kapott eredmények állnak a legközelebb a mérési eredményekhez.

A turbulens határretegben a turbulencia jellemzőit legfőképpen a fal közelsége befolyásolja, ennek figyelembe vételére a numerikus szimulációk során használatos a dimenzióatlan faltávolság (!"). Ezen értéktől függ, hogy a választott turbulencia modellünk jól használható-e. Jelen esetben az alacsony Reynolds-számú falkezelés a lamináris alaprég megfelelő finomságú felbontása esetén alkalmazható, azaz, ha az első fali cella középpontjában (!" $< \sim 1$).

A szimulációhoz az ANSYS FLUENT R17.2 Academic verzióját használtuk. A FLUENT nyomás alapú megoldója az impulzus egyenleteket számítja ki, a nyomás mezők becslésének segítségével. A SIMPLE számítási módszert használtuk a futtatás során, mellyel eredményeink konvergáltak és reális tartományba estek. A megoldó beállításait egy korábbi tanulmány [5] szerint állítottuk be. A belépő peremfeltételnek velocity-inlet-et, kilépőnek pressure-outlet-et alkalmaztunk. A megfűvás sebességét 1 m/s-nak adtuk meg, továbbá a turbulencia intenzitását a fent említett tanulmány szerint [5] 0,1 százalékknak, a sűrűséget 1 kg/m³ -nek vettük, így a viszkozitás változtatásával lehetőségünk volt beállítani a különböző Reynolds-számokat. A megfűvási szög állítását a belépő peremfeltétel segítségével adtuk meg, emiatt láthatjuk majd mindig vízszintes síkban a profilokat a későbbi ábrákon.

A hálófüggetlenségi vizsgálat alapján elmondható, hogy az eredeti háló elegendő cellából áll, a felhajtó- és ellenálláserő értékekben nem tapasztalható számottevő eltérés a két finomabb hálón. Fontos azonban megemlíteni, hogy a függetlenségi vizsgálatot csak egy adott megfűvási szög és Reynolds-szám mellett végeztem el, így a többi esetben nem tudjuk az ebből adódó szimulációs hibákat.

3. Az eredmények kiértékelése

Ezen fejezetben az általunk lefuttatott szimulációk kiértékelését, a Schmitz-féle mérési eredménnyel való összehasonlítását, valamint a profilok közötti különbségeket fogjuk szemügyre venni. A validáció elvégzése előtt fontos megnéznünk a mérési eredmények hibáját melyet az 1. táblázat mutat be az ívelt lap esetében, a legmagasabb felhajtóerő-tényező, illetve az ehhez tartozó ellenállástényezőnél.

1. táblázat: A szimulációs eredmények hibái a méréssel összevetve az ívelt lap esetében (Re= 21 000, $\alpha=10^\circ$)

	C_e	C_f
$\alpha=5^\circ$	0,03	0,898
Relatív hiba	246,42%	8,37%
Abszolút hiba	0,0739	0,0752

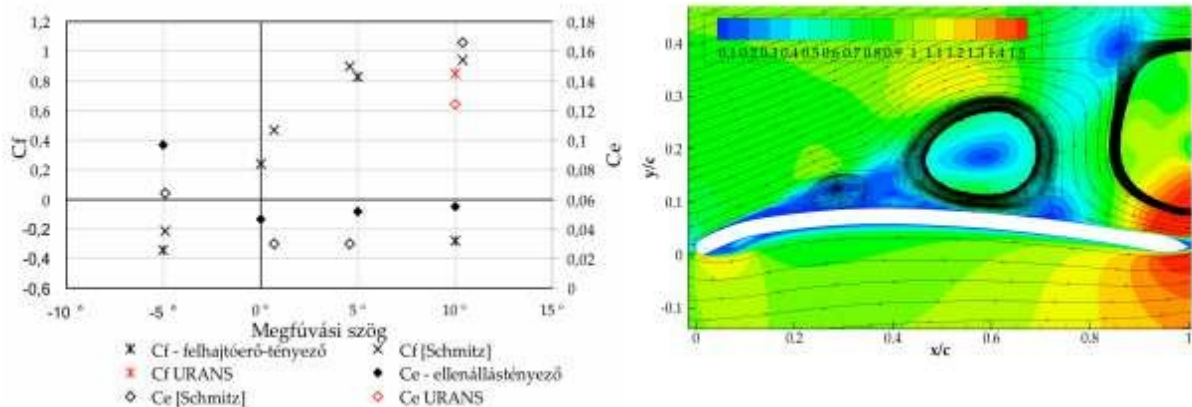
Először a RANS időátlagolt vizsgálatot fogjuk elvégezni. Kezdetben mindhárom geometriát elemeztük (síklap, ívelt lap, szárnyprofil) három különböző Reynolds-számon (21 000, 63 000, 168 000) és négy megfúvási szög (-5° , 0° , 5° , 10°) mellett mely összesen 36 darab szimulációt jelentett. Mivel az időátlagolt módszer egyes pontokban nem bizonyult kellő pontosságúnak, ezért azoknál az eseteknél, ahol a siklószám vagy a felhajtóerő-tényező mérésekhez képesti relatív hibája meghaladta a 30%-ot – mely egy általunk önkényesen megválasztott érték - időben változó szimulációt is futtattunk.

Az előző fejezetben tárgyalt, a falfüggvények működési tartományához tartozó dimenziótlan faltávolságot, az y^+ értékeket megjelenítve megfigyelhető volt, hogy a legmagasabb érték az N60-as profil szívott oldalának kilépőélénél van és ez is alig haladja meg az 1 értéket, (1,06643) tehát a szimulációnkat ebből a szempontból elfogadhatónak tekinthettük.

3.1. A mérési eredmények összevetése a RANS szimulációval

A RANS szimuláció Schmitz-féle méréssel történő validálása során az összehasonlítás alapját az ellenállás-tényező valamint a felhajtóerő-tényező alkotta, a megfúvási szög függvényében. A RANS futtatás során 2000 iterációs lépést alkalmaztunk ezután már a reziduumból, illetve a felhajtó- és ellenállás-tényező oszcillációja minimális mértékű volt, és azok egy érték körül ugráltak. Az időátlagolt szimuláció eredményeiről az N60-as profil esetében elmondható, hogy jellegre helyes eredményeket kaptunk azonban számértékileg – főleg a nagyobb szögek esetében – jelentősebb eltérések tapasztalhatók, így ezeknél érdemes időfüggő megoldással próbálkozni. Az eltérés egyik oka az lehet, hogy Schmitz-féle mérésnél nem ismerjük a turbulencia intenzitását így ezt korábbi tanulmány alapján [5] 0,1 százaléknak vettük.

A 417a (ívelt lap) esetében alacsony Reynolds-számokon azt tapasztaltuk, hogy az ellenállástényező mért értékei – a 10° -os eset kivételével - közel állnak a szimulált eredményhez, itt a relatív hiba 30%-on belül maradt. A felhajtóerő-tényezőt vizsgálva megfigyelhető volt, hogy - 5° , 0° , 5° esetben a mért eredmény nem áll messze a szimulációtól, azonban 10° -nál egy feltűnően nagy eltérés adódott, illetve negatív tartományba esett az eredmény a RANS futtatás során. A sebesség kontúrokat megvizsgálva egy anomáliát kaptunk - melyet a 2. ábra szemléltet - emiatt ebben az esetben ugyancsak URANS időfüggő szimuláció lefuttatása javasolt. Ennek a jelentős eltérésnek egy lehetséges magyarázata, hogy örvényleválások alakulnak ki, és ilyen esetben az időben átlagolt megoldás nem ad megfelelő eredményt.



2. ábra. A szimulációs eredmények összevetése a Schmitz-féle eredménnyel RANS futtatás során az ívelt lapra, illetve az áramvonalak és a sebességkontúr 10°-os esetben [m/s] $Re=21000$ esetén

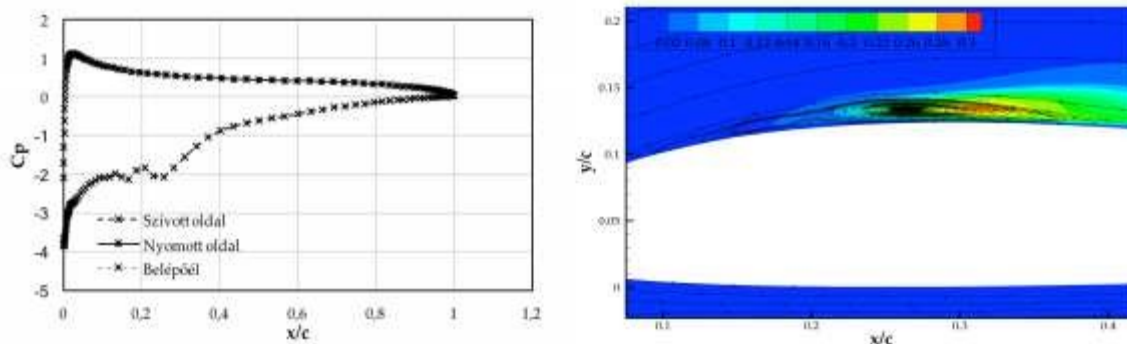
A viszonyítási alapként használt síklap RANS szimulációjánál, a Schmitz-féle mérésrel összevetve, azt állapítottuk meg, hogy az ellenállás- illetve felhajtóerő-tényezők mindenütt a 30%-os hibahatáron belül maradnak, így ezeket az értékeket elfogadhatónak tekintettük, így itt nem volt szükséges időfüggő futtatás végrehajtása.

3.2. Az időfüggő (URANS) szimuláció eredményei

Vizsgálatunk során több időfüggő futtatást is végeztünk, azokban az esetekben, ahol a szimuláció által megkapott eredmények nem lettek kellő pontosságúak, azaz a relatív hiba értéke meghaladta a 30%-ot. Az URANS szimuláció futtatása során » 1 áramlási téren való átfolyási időtartamot követően periodikusság mutatkozott, így egy időátlagolás segítségével meg tudtuk állapítani a felhajtóerő-tényező értékét.

A fent ismertetett esetben (ívelt lap, $Re=21\ 000$, 10°-os megfúvási szög mellett) melynél a felhajtóerő-tényező negatív tartományba került, az URANS szimuláció használatával 10 %-ra sikerült csökkenteni a hibát a Schmitz-féle mérésrel összehasonlítva. A pillanatnyi áramképet illetve a felhajtóerő-tényező periodikus konvergenciáját elemezve valószínűsíthető, hogy ezen pontban örvényleválás alakult ki.

A nyomáseloszlásnak fontos szerepe van a leválási buborékok vizsgálatánál, ezt támasztja alá Russel [6] tanulmánya is, aki a leválási buborékok nagyságát tanulmányozta a nyomástényező függvényében. Ez alapján a 3. ábrán láthatjuk az URANS futtatás során kialakult nyomástényezőt a profil mentén, melynél megfigyelhetjük, hogy a buborék lamináris felében (0,1c és 0,25c között) közel konstans nyomásérték, míg a turbulens részben (0,25c és 0,4c között) egy növekvő nyomás jelenik meg, és ez egyezik a tanulmányban [6] leírtakkal. A leválási buborék a lamináris turbulens átmenetnél a legnagyobb [7], ezt szemlélteti a 3. ábra jobb oldala a turbulens kinetikus energia megjelenítésével.

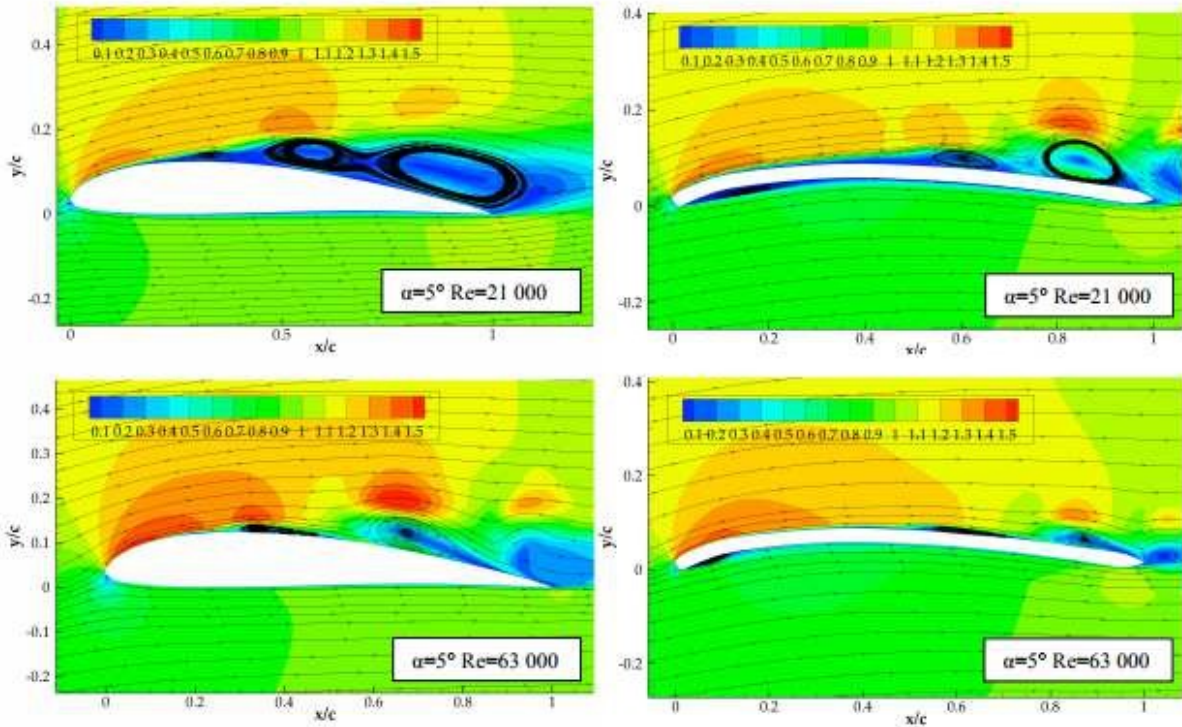


3. ábra. A nyomástényező alakulása (bal oldal) illetve a turbulens kinetikus energia kontúrok [m²/s²] és áramvonalak (jobb oldal) az URANS futtatás során a szárnyprofil esetén $\alpha=10^\circ$ megfúvási szögnél (Re=21 000)

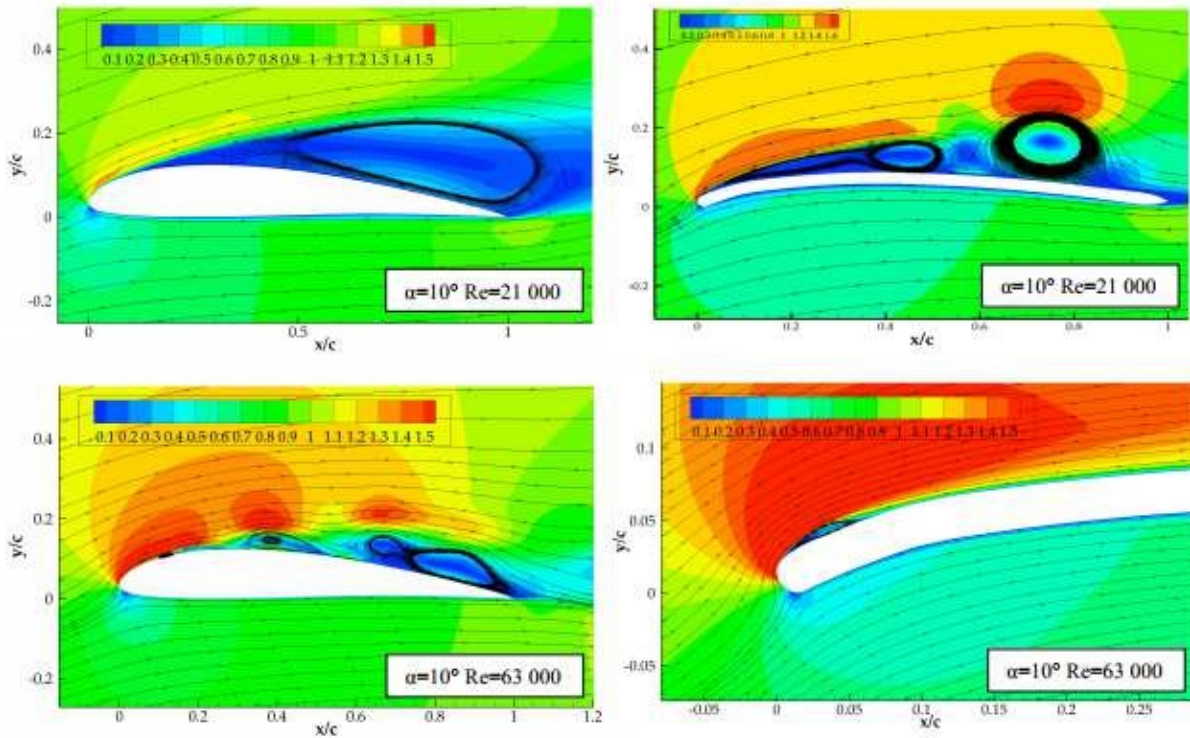
3.3. A leválási buborékok kialakulásának vizsgálata

Az alábbiakban a leválási buborékok megjelenését fogjuk elemezni a különböző Reynoldsszámok és megfúvási szögek esetében, időátlagolt és időfüggő eredmények bemutatásával. Ezzel a jelenséggel már foglalkoztunk az előző részben is. Ezzel kapcsolatban végzett tanulmányokat Michael Selig is az „Airfoils at Low Speeds” tanulmányában [8], melyben a szárnyprofilok viselkedését vizsgálta alacsony Reynolds-számokon. További fontos kutatást végzett ezen témakörben Jan Windte [9], aki alacsony Reynolds-szám mellett (60 000) végzett PIV (részecskék képének elemzésén alapuló sebességtér vizsgálati módszer) méréseket és ennek segítségével validálta a numerikus szimulációit. Az összehasonlítást az N60-as profil illetve az ívelt lap között fogjuk elvégezni 5°-os és 10°-os megfúvási szög esetében, kis (Re=21 000) illetve nagy (Re=168 000) Reynolds-számok mellett a sebességkontúrok illetve az áramvonalak segítségével.

4. ábrából kitűnik, hogy alacsony Reynolds-szám mellett jóval nagyobb buborékok alakulnak ki az N60-as profil szívott oldalán, mint magasabb Reynolds-számon. Láthatjuk továbbá, hogy alacsonyabb Reynolds-számokon az ívelt profil mentén a buborékok kisebb méretűek, mint a profilos szárny esetében. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy kisebb Reynoldsszámokon jóval nagyobb siklószám jellemző az ívelt lapra, mint az N60-as profilra. A következőkben a 10°-os megfúvási szög mellett kialakult áramképek vizsgálatára kerül sor.



4. ábra. Sebességkontúrok [m/s] és áramvonalak a szárnyprofil és ívelt lap esetében $\alpha=5^\circ$ -nál

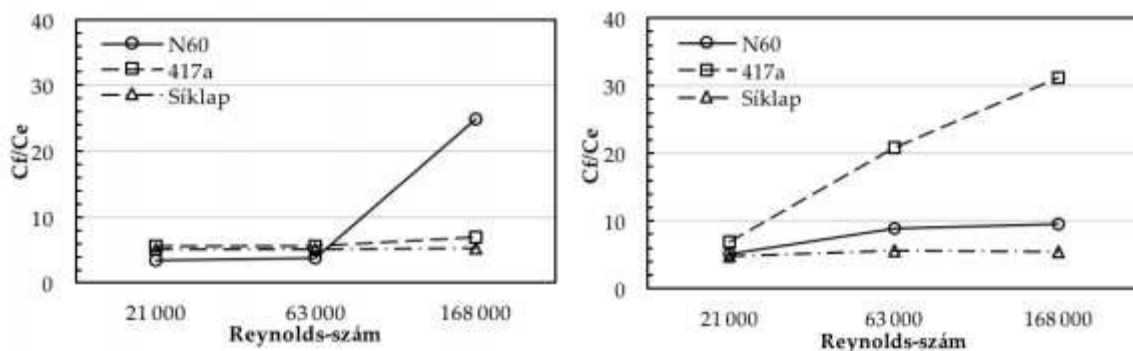


5. ábra. Sebességkontúrok [m/s] és áramvonalak az N60 profil és ívelt lap esetében $\alpha=10^\circ$

Az 5°-os megfúvási szöghöz képest megfigyelhetjük a 5. ábrán, hogy az N60-as profil esetén a leválási buborék mérete jóval nagyobb lesz a 10°-os szög mellett. Továbbá ezen áramképekből szembetűnik, hogy a Reynolds-szám növelésével a buborék mérete ismét jelentősen csökken. Ezzel összhangban van az a megállapítás, hogy a Reynolds-szám $\alpha=5^\circ$ $Re=21\ 000$ $\alpha=5^\circ$ $Re=21\ 000$ $\alpha=5^\circ$ $Re=63\ 000$ $\alpha=5^\circ$ $Re=63\ 000$ $\alpha=10^\circ$ $Re=21\ 000$ $\alpha=10^\circ$ $Re=63\ 000$ $\alpha=10^\circ$ $Re=63\ 000$ $\alpha=10^\circ$ $Re=21\ 000$ növekedésével egy adott pozitív megfúvási szög mellett növekszik a siklószám is, melynek bemutatására a következő részben kerül sor. A kisebb megfúvási szöghöz képest látható továbbá, hogy míg ott $Re=168\ 000$ esetében az ívelt lap szívott oldalán jelent meg a leválási buborék addig a 10°-os esetben a nyomott oldalon mutatkozik. Az áramképek alapján elmondható, hogy a lamináris leválási buborék növekedik egyrészt a Reynolds-szám csökkenésével, másrészt a megfúvási szög növekedésével is. Továbbá megállapítható, hogy alacsony Reynolds-szám mellett a visszafekvés nem történik meg – ez összhangban van a Mueller-féle tanulmánnyal [10] – illetve az áramlásban csak kismértékű turbulencia jelentkezik.

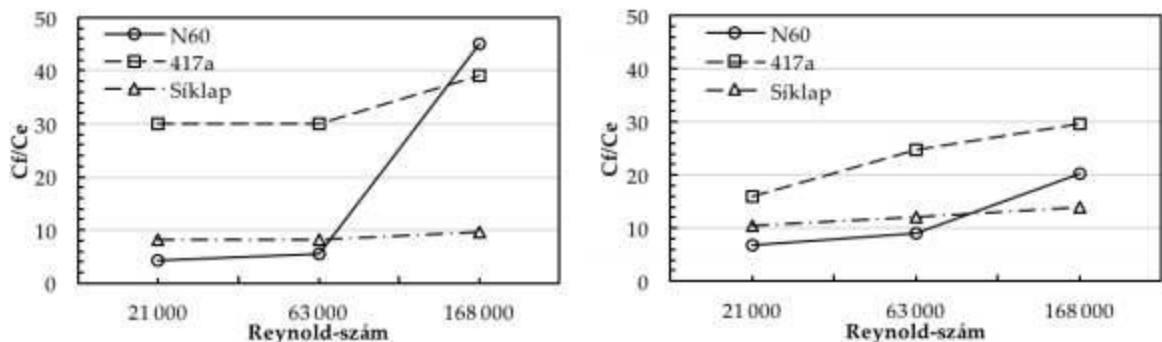
3.4. Profilok összevetése siklószám alapján

Végül a három vizsgált profil összehasonlítását fogjuk elvégezni a siklószám alapján. Az összehasonlítás után világos képet kaphatunk arról, hogy mely Reynolds-számok illetve szögek esetén, mely profil alkalmazása célszerű. A kiértékelés során a Schmitz-féle mérési eredményeket párhuzamba állítottuk a szimuláció során megkapott értékekkel.



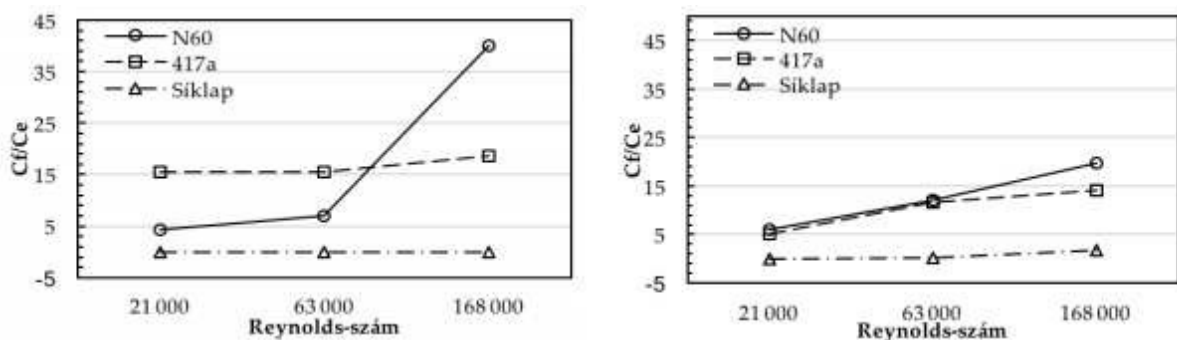
6. ábra. A siklószámok alakulása a Reynolds-szám függvényében 10°-os megfúvási szög esetén (bal oldal: Schmitz-féle eredmény; jobb oldal: szimulációs eredmény)

A 6. ábra alapján látható, hogy mind a mérési, mind a szimulációs eredmény igazolja, hogy 10°-os megfúvási szög esetén, 63 000 alatti Reynolds-számon ajánlott az ívelt lap használata, a jobb aerodinamikai jellemzők miatt. 63 000 felett azonban jelentősen eltér egymástól a két eredmény, míg a mérési adatok alapján itt a profilos szárny siklószámánál szignifikáns javulás tapasztalható és az ívelt lap esetében közel konstans értéken marad a siklószám, addig a szimulációs eredménynél az ívelt lap siklószáma növekszik és az N60-as profil kismértékű növekvést mutat a Reynolds-szám fokozásával. A síklapnál jó egyezést kaptunk a mérési és a szimulációs eredmény között, és mindkettőnél közelítőleg Reynolds-szám függetlennek mondhatjuk az eredményt.



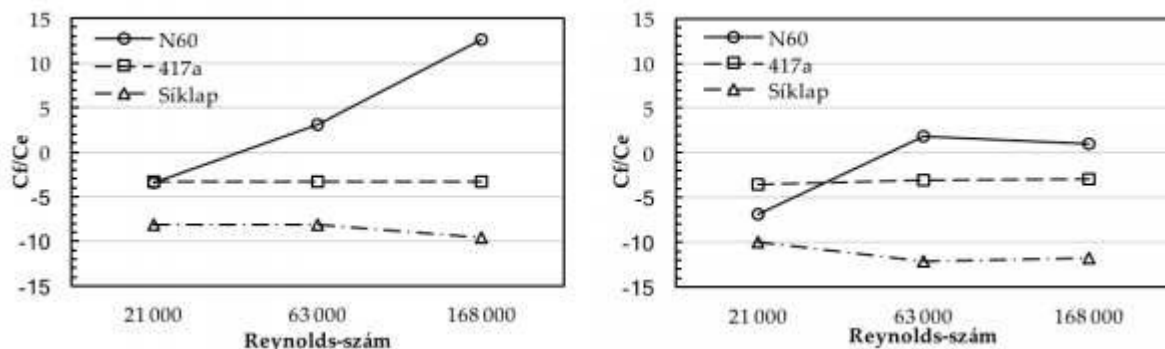
7. ábra. A siklószámok alakulása a Reynold-szám függvényében 5°-os megfúvási szög esetén (bal oldal: Schmitz-féle eredmény; jobb oldal: RANS futtatás eredménye)

5°-os megfúvási szög mellett a 7. ábra alapján azt tapasztaljuk, hogy alacsony Reynoldsszámokon ismét jobb tulajdonságokat mutat az ívelt lap, melynek siklószáma $Re=63\ 000$ alatt mind a szimulált, mind a mérési eredményeknél 2-3-szorosával meghaladja az N60-as profil siklószámát. Ezen érték fölött azonban eltérő a két eredmény, mivel a Schmitz által kimért adatok alapján $Re=168\ 000$ előtt megtörténik az ívelt lap és a profilos szárny görbéinek keresztezése, azaz innentől az N60-as profil siklószáma az ívelt lap siklószáma fölé kerül, és a továbbiakban meredek növekedés látszik. A RANS szimuláció során kapott eredményen ez a növekedés ugyan megjelenik, de a növekedés mértéke csekélyebb, mint a mért esetben, így a görbék keresztezése nem történik meg.



8. ábra. A siklószámok alakulása a Reynold-szám függvényében 0°-os megfúvási szög esetén (bal oldal: Schmitz-féle eredmény; jobb oldal: RANS futtatás eredménye)

A 8. ábra mutatja a 0°-os megfúvási szög mellett a siklószámok alakulását. Ez alapján konstatálhatjuk, hogy ebben az esetben, magasabb Reynold-számokon ($63\ 000$ felett) már a profilos szárny mutat jobb aerodinamikai tulajdonságokat mind a RANS mind a mért esetben, míg ezen érték alatt közel olyan jó tulajdonságot mutat mindkét geometria. A két eredmény eltérésének mértéke azonban ebben az esetben is jelentős a $63\ 000$ feletti értékeknél.



9. ábra. A síklószámok alakulása a Reynolds-szám függvényében -5° -os megfúvási szög esetén (bal oldal: Schmitz-féle eredmény; jobb oldal: RANS futtatás eredménye)

A -5° -os megfúvási szög esetében kialakult síklószámokat szemlélteti a 9. ábra. Ezen észrevehetjük, hogy az ívelt illetve a síklap jó közelítéssel visszaadja a mért eredményeket. Az N60-as profil esetében azonban ismét jelentős eltérés van. Ennek ellenére azt tisztán láthatjuk a síklószámokból, hogy eme negatív megfúvási szögnél már közepes Reynolds-számon is érdemes a profilos szárnyat használni. Az ismertetett eredmények alapján az alábbi következtetéseket tudjuk levonni. A vizsgált alacsony Reynolds-számok ($Re = 21\ 000$, $Re = 63\ 000$) mellett – a -5° -os megfúvási szög kivételével – az összes esetben érdemesnek bizonyult az ívelt lap alkalmazása a profilos szárnyal szemben. Azonban az ezen érték feletti tartományokban összességében jobb aerodinamikai tulajdonságokat mutatott a N60-as profil. Azon kérdés eldöntésére, hogy adott probléma esetén, mely profilt célravezető alkalmazunk gyártástechnológiából adódó egyszerű gazdasági számítások is segítenek

4. Összefoglalás

Munkánk során létrehoztunk három numerikus háló blokkstruktúrát a kiválasztott N60-as szárnyprofil, a 417a ívelt lap illetve a síklap körüli áramlás 2D szimulációjához. Ezzel különböző irodalmi forrásokat felhasználva létrehoztunk egy jól strukturált C-grid hálót ANSYS ICEM szoftver segítségével, amely így többféle minőségi követelménynek is eleget tett. A tr-k-kl- ω turbulencia modell került alkalmazásra, mely az irodalom alapján a legmegfelelőbbnek bizonyult az általunk vizsgált esetben. A számítást négy különböző megfúvási szögon és három Reynolds-számon végeztük el, mely így 36 darab RANS továbbá 2 darab URANS futtatást jelentett. A validációt az F. W. Schmitz által 1942-ben publikált eredményeivel végeztük el, melynek során fény derült az időátlagolt módszer gyengeségeire, így láthatóvá vált, hogy az örvényleválások kezelésére ez a megoldás nem alkalmas, emiatt időfüggő futtatást kellett végrehajtanunk. A szimuláció megoldásait összetett szempontrendszer alapján vizsgáltuk meg, melyben elsőként a nyomáseloszlásokat vettettük össze az áramképpel. Itt azt tapasztaltuk, hogy az áramlástanai jelenségek (buborékok és örvényleválások) látványosan megjelennek a nyomáseloszlások grafikonjaiban. Mindezek után a leválási buborékok kialakulását tanulmányoztuk melyeknél a sebesség- és kinetikus energia kontúrok továbbá az áramvonalak alakulását vettük szemügyre. Itt arra a következtetésre jutottunk, hogy a lamináris leválási buborék növekedik egyrészt a Reynolds-szám csökkenésével, másrészt a megfúvási szög növekedésével is, továbbá látható volt, hogy alacsony Reynolds-számok mellett nem történik meg a turbulens visszafekvés jelensége. A síklószámok megjelenítése során egy átfogó képet kaptunk arról, mely esetekben érdemes javítani a szimulált eredményeken és a későbbiek folyamán más eljárást alkalmazni. Továbbá ezeknek az eredményeknek az ismeretében tudtunk javaslatot tenni, arra, hogy mely

esetekben van lehetőségünk a profilos szárny helyettesítésére az ívelt lappal. Az aerodinamikai tulajdonságok alapján azt a következtetést tudtuk levonni, hogy míg alacsony ($Re < 63\,000$) Reynolds-számok mellett – a -5° -os megfúvási szög kivételével – az összes esetben célszerű az ívelt lap alkalmazása, addig a $63\,000$ fölötti értékek esetében az N60-as profil nagymértékben felülmúlta az ívelt lap siklószám értékeit.

5. Javaslatok, fejlesztési lehetőségek

A validáció során felmerült szignifikáns relatív hibák rámutatnak a szimuláció fejlesztési lehetőségeire és megmutatják mely esetekben érdemes további időfüggő megoldás alkalmazása. A turbulencia intenzitás befolyásának elemzése ugyancsak fontos vizsgálandó tényező, amivel fény derülhet arra, hogy ez milyen mértékű hibát eredményezett a szimuláció során.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megjelenését az NKFI K 112277 projekt támogatta.

Irodalomjegyzék

- [1] Balla, E., Vad, J., Beamforming studies on basic models of low-speed axial fan blade sections”, ETC’12 - The 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Stockholm, Sweden 3-7 April 2017, Paper ID: ETC2017-119.
- [2] Schmitz F. W. (1942): Aerodynamics of the model airplane. Part I. Airfoil measurements, translation Branch, Redstone Scientific Information Center, Redstone Arsenal, Ala-bam
- [3] ANSYS ICEM CFD User's Manual, Southpointe November 2013
- [4] Moreau, S., Wu, H., Prateek J., Laffay, P. (2015): Numerical Study of the Installed Controlled Diffusion Airfoil at Transitional Reynolds Number, Proceedings of Conference „CFD Canada” Waterloo, June 2015
- [5] Mustafa S. G. (2010): Numerical Simulation of Flow over a Thin Aerofoil at a High Reynolds Number Using a Transition Model, Article in ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996, 2010/11, pp. 203.-210.
- [6] J. Russell. (1979): Length and Bursting of Separation Bubbles. A physical Interpretation, Science and Technology of Low Speed Motorless Flight, CP2085, Part 1, NASA Langley Research Center, Hampton, pp. 177.-202.
- [7] Mayle, R. E. And Schulz, A. (1997): The path to predicting bypass transition. ASME J. Tur-bomach., pp. 405.-411.
- [8] Selig M. S., Donovan J. F., And Fraser D. B. (1989): Airfoils at Low Speeds, Soar Tech Publ., Virginia Beach, VA
- [9] Jan Windte, Ulrich Scholz, Rolf Radespiel (2006): Validierung der RANS-Simulation laminarer Ablöseblasen auf Profilen. Institute of Fluid Mechanics, Technical University Braunschweig, Germany
- [10] Mueller, T. J., And Batill, S. M. (1982): Experimental studies of separation on a two dimensional airfoil at low Reynolds numbers. AIAA Journal, Vol. 20, No.4, pp. 457.-463.

Lektorálta: Dr. Vad János, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék