

Áramlástan

Jegyzet a Vitorlás Szakédző Képzés számára

Összeállította: *Dr. Simongáti Győző*

Tantárgyi tematika

	Tananyagrészek órai bontásban
1 – 2 óra	<u>Áramlástan alapok 1</u> <ul style="list-style-type: none"> • fogalmak, • energiaegyenlet, • Bernoulli egyenlet, • kontinuitás törvénye, • áramlás konfúzorban, diffúzorban, • hidrosztatika
3 – 4 óra	<u>Áramlástan alapok 2</u> <ul style="list-style-type: none"> • súrlódásos áramlások alapjai, • a határréteg, a leválások mechanizmusa, • testek körüli áramlások
5 – 6 óra	<u>Egyensúly</u> <ul style="list-style-type: none"> • A vitorlás hajók egyensúlya • A keletkező erők és a sebesség összefüggése • Aerodinamikai és hidrodinamikai ellenállásszög
7 – 8 óra	<u>A hajótest áramlástan</u> <ul style="list-style-type: none"> • A hajótesten keletkező erők felbontása, áramlás a hajótest körül, a legfontosabb sebességet befolyásoló hidrodinamikai tényezők: <ul style="list-style-type: none"> ○ súrlódási ellenállás, nyomási (alak és hullám-) ellenállás; ○ optimális geometriai paraméterek; ○ a stabilitás hatása a sebességre.
9 – 10 óra	<u>Tökesúly, bulba és kormány hidrodinamikája</u> <ul style="list-style-type: none"> • profiltípusok; • 3D áramlás, indukált ellenállás; • A tökesúlyon keletkező erőket befolyásoló tényezők.
11 – 12	<u>A vitorlák áramlástan</u> <ul style="list-style-type: none"> • Vitorla- és vitorlázat típusok • A vitorla körüli áramkép, nyomásmegoszlás, az erők keletkezése • A vitorlákon keletkező erőket befolyásoló tényezők • A vitorlák egymásra-hatása

1 Áramlástan alapok

1.1 Fogalmak

Az áramvonal a folyadékok és gázok mechanikájában olyan görbe, amelyet egy adott pillanatban a folyadékreszecskek sebességvektora minden pontjában érint. Az egyes áramvonalak nem metszik egymást és összenyomhatatlan közegben törésmentesek. Az áramvonalak a nagyobb sebességű részekben sűrűbben helyezkednek el. Az áramlásba helyezett test egyetlen pontján az áramvonal megszakad, itt a közeg sebessége nulla értéket vesz fel (lefékeződik), ezt a pontot torlópontnak hívják (ebben a pontban mérhető a torlóponthoz tartozó nyomás, ld. később). Az áramvonalak alakja különböző koordináta-rendszerekben eltérő, így például a vitorláhajón levő ember más áramvonalakat észlelhet, mint egy földön álló megfigyelő.

Ha az áramlásra merőleges felületen egy zárt görbét jelölnek ki, annak pontjaihoz szerkesztett áramvonalak egy általában változó keresztmetszetű képzeletbeli csövet írnak le, ennek neve áramcső. Az áramcsőbe, illetve abból kifelé csak a véglapokon van áramlás.

A közeg egyes részecskéinek az áramlás folyamán befutott útját pályagörbének nevezik.

Nyomvonal az a görbe, melyen a tér valamely pontján áthaladt folyadékreszecskek egy későbbi pillanatban sorakoznak.

Stacionárius az áramlás, ha az áramlás időben nem változik, ebben az esetben az áramvonalak, a nyomvonalak és a pályagörbék egybeesnek. Ennek ellentéte az instacionárius áramlás, mely időben változó.

A nyomás fizikai mennyiség, állapotjelző. Jele: p . A nyomást az adott A nagyságú felületre ható F erő nagyságának és a felületnek a hányadosával definiáljuk. A nyomás skaláris mennyiség. A fenti meghatározás szerint a felületre ható erő iránya merőleges a felületelem irányára. Nyugvó folyadékban Pascal törvénye értelmében a folyadékra kifejtett nyomás egyenletesen terjed tovább, és iránytól független. Tekintettel arra, hogy ideális folyadékban a felületelem irányultsága nem jelölhető ki (bármilyen irányú lehet), emiatt a nyomásnak nincs irányultsága. Pascal törvénye a súlytalan környezetben található és súrlódásmentes folyadékra vonatkozik.

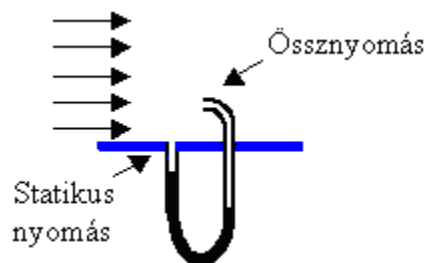
A természetes koordináta-rendszerben felírt Euler-egyenlet normális irányú komponens egyenlete segítségével kimutatható az áramvonalak és a nyomás változása közötti összefüggés is. Ha az áramvonalak párhuzamos egyenesek, akkor azokra merőlegesen nem változik a nyomás, ha

az áramvonalak görbültek, akkor azokra merőlegesen a nyomás változik, a görbületi középponttól kifelé növekszik. Mindez fontos lehet a hajótest és vitorlák körüli áramlások vizsgálatkor, hiszen kis gyakorlattal a kialakuló áramképet fel lehet rajzolni, ezzel pedig már képet kaphatunk a kialakuló nyomásokról, és a Bernoulli egyenletet szem előtt tartva (ld. később), a sebességekről is.

A nyomással kapcsolatban szólni kell még a statikus és dinamikus nyomásról, illetve az össznyomásról is.

A statikus nyomás a közeg részecskéinek rendezetlen hőmozgásából ered. Mivel a rendezetlen hőmozgásnak nincs kitüntetett iránya, ezért a statikus nyomásnak sincs kitüntetett iránya. A statikus nyomás legkisebb értéke nulla. Szilárd felületen a statikus nyomás a felületre merőlegesen keletkezik. Ebből következik az is, hogy a statikus nyomás egy felületre merőleges (elegetően kis átmérőjű) furat segítségével mérhető – ebbe a furatba ugyanis csak a rendezetlen mozgás következtében kerülnek be a részecskék.

A dinamikus nyomás a részecskék rendezett mozgásából származó, időegységre illetve felületegységre jutó mozgásmennyiség változás, ezért természetesen irányfüggő. A dinamikus nyomás közvetlenül nem mérhető. Mérhető viszont a dinamikus és statikus nyomás összegeként előálló össznyomás.



1. ábra: A különböző nyomások mérésének lehetősége

Az össznyomást mérni olyan nyomásmérő eszközzel lehet, amelynek érzékelője a mozgással szembe néz (pl. az áramlással szembefordított cső ilyen). Az 1.4. ábrán egy "U" csöves nyomásmérő eszköz látható. Ennek bal oldalán a statikus nyomás, a jobb oldali szárában pedig a megállított közeg nyomása, az össznyomás jelenik meg. Ennek megfelelően a folyadék-oszlop magasság különbsége a dinamikai nyomással arányos, a műszer ilyenképpen az össznyomás és a statikus nyomás különbségét mutatja, azaz mint egy analóg számológép működik.

A torlónyomás vagy össznyomás egy áramlásba helyezett test torlópontján mérhető nyomás.

Lamináris (réteges) áramlásról beszélünk abban az esetben, amikor a folyadékrétegek között nincs keveredés. Ennek következtében a helyi sebességvektorok megegyeznek a fő áramlás irányával.

Turbulens (gomolygó) áramlás esetén a fő áramlás irányára merőlegesen is van mozgás, az ilyen irányú sebességkomponens nem nulla, van keveredés és energia-csere a folyadékreszek között, a folyadékban emiatt örvények keletkeznek. A turbulencia a nagyobb energia transzport miatt esetenként hasznos is lehet, ld. a leválásokkal foglalkozó fejezetet. Azt, hogy egy közeg áramlása lamináris vagy turbulens, a közeg helyi áramlási sebessége határozza meg.

Lokálisnak nevezzük a fizikai mennyiségek (pl. gyorsulás, nyomás, stb.) időbeni változását, konvektívnek pedig az olyan változásokat, melyek amiatt következnek be, hogy a közeg más helyre kerül (az áramlás miatt).

1.2 A közeg energiájának összetevői, energiaegyenlet

A vitorlás áramlástanának tárgyalásához elengedhetetlen néhány olyan általános áramlástanhoz is köthető fontos összefüggés megtárgyalása. Az egyik ilyen összefüggés az energia-megmaradás elvének áramlástanai megfogalmazása, illetve az ebből levezethető, bizonyos egyszerűsítéseket tartalmazó egyenletek.

A vitorlás hajón ülve, vagyis a hajóhoz rögzített koordinátarendszertől szemlélve a hajótest és a vitorlák körül is kialakulnak áramlások. A hajó és a vitorlák ugyan nem jelentenek közvetlen energiabevitelt a közeg számára, de a hajót és a vitorlákat körüláramló közeg energiataralmának összetevői megváltoznak. Ezen összetevők megváltozása során a gyakorlatban is észlelt jelenségek mennek végbe, melyek megértéséhez szükséges ismerni, hogy milyen részekből adódik össze a közeg energiája.

Egységnyi tömegű közeg összes energiája a következőképpen írható fel:

$$i_{\text{e}} = \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + U + u \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

ahol $\frac{p}{\rho}$ a nyomáspotenciál (vagy áttolási munka), $\frac{c^2}{2}$ a mozgási (kinetikai) energia, U a potenciál (az erőterek munkavégző képessége), u pedig a belső energia. (Vigyázat: itt minden

menyiség fajlagos, a U nem keverendő össze a teljes rendszerre vonatkoztatott belső energiával!) Az összes energiátartalmat i_σ -vel jelölik és összentalpiának vagy teljes entalpiának is nevezik. Az első három tag összege pedig tulajdonképpen az egységnyi tömegű folyadék mechanikai energiátartalma. Az entalpia már a hőtanban is megjelent, ezért néhány fogalmat célszerű tisztázni. A hőtanból ismert ún. termodinamikai entalpia (melyet sokszor csak egyszerűen entalpiaként emlegetnek):

$$i = u + p \cdot v = u + \frac{p}{\rho} \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

A lefékezett (megállított) közeg entalpiája (a hőtanban alkalmazott jelölés szerint):

$$i^* = i + \frac{c^2}{2} \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Ezt torlóponti entalpiának is hívják. Hőtanban általában ez a közeg teljes entalpiája, hiszen ott a potenciálnak nincs jelentősége. Áramlástechnikai gépeknél viszont, ahol a közeg sűrűsége állandó, az összentalpiába bele kell venni a potenciált is. Ezt figyelembe véve:

$$i_\sigma = i^* + U = i + \frac{c^2}{2} + U \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Az áramló közeg tömegegységére felírva az energiaegyenletet, azt kapjuk, hogy:

$$\begin{aligned} q_{12} + w_{t12} = i_{\sigma12} &= [i_\sigma]_1^2 = \left[\frac{p}{\rho} + u + \frac{c^2}{2} + U \right]_1^2 = \\ &= \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} + u_2 - u_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + U_2 - U_1 = \\ &= \left(i_2 + \frac{c_2^2}{2} + U_2 \right) - \left(i_1 + \frac{c_1^2}{2} + U_1 \right) \end{aligned}$$

ahol q_{12} a fajlagos közölt hő, w_{t12} pedig a fajlagos technikai (vagy külső) munka. (Jelöléseinknél az 1-es index mindig a belépő, a 2-es a kilépő keresztmetszetet jelenti.) Mindez azt jelenti, hogy az 1-es és 2-es pontok között bevitt vagy onnan elvont fajlagos hő és a fajlagos külső munka a az 1-es és 2-es pontok között átáramló közeg összenergiájának megváltozását eredményezi. A technikai munka „+” ha mi végezzük a közegen, és „-” ha a közeg adja le számunkra. Ha a be-

és kilépő keresztmetszetek között nincs hőbevitel, akkor a folyadék összenergia-változását a fajlagos külső munka adja.

A potenciál általános alakja:

$$U = \pm g \cdot z \pm a \cdot x - \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2}$$

Az egyenlet első tagja a nehézségi erőtér, az második a gyorsuló, a harmadik pedig a centrifugális erőtér potenciálja. A potenciállal kapcsolatban meg kell említeni az előjel szabályt: ha a felvett koordináta tengely növekvő potenciál felé mutat, akkor a potenciál pozitív (pl. ha a z tengely felfelé mutat, akkor a nehézségi erőtérből származó potenciál pozitív, ha lefelé, akkor negatív).

Összenyomhatatlan közegnél $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, vagyis a sűrűség független a nyomástól, így a nyomáspotenciál, vagyis a növekvő nyomás ellenében végzett munka (vagy a nyomáscsökkenésből származó munkavégző képesség) a következő formára hozható:

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = \frac{1}{\rho} \int_{p_1}^{p_2} dp = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

Ezzel az általános energi egyenlet a következő alakban írható:

$$i_{\delta 12} = w_{t12} + q_{12} = u_2 - u_1 + U_2 - U_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

1.3 A Bernoulli egyenlet

A Bernoulli-egyenlet az előzőek alapján azt mondja ki, hogy áramló ideális, vagyis súrlódásmentes közegben egy áramvonal mentén a különböző energia-összetevők összege állandó, ha az áramlás két, kijelölt pontja között sem energia be- sem elvezetés (sem munka, sem hő formájában) nincs.

A Bernoulli egyenlet legáltalánosabb alakja (örvénymentes áramlás potenciális erőtérben) az alábbi:

$$i_{\delta 12} = u_2 - u_1 + U_2 - U_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} + \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = 0$$

Amennyiben a sűrűség is állandó, és a belső súrlódástól is eltekintünk, tehát ideális közeget feltételezünk, valamint az áramlás időben állandó, akkor a Bernoulli egyenlet igen egyszerű, de gyakran használt alakját kapjuk:

$$U_1 + \frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = U_2 + \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

Veszteségek figyelembe vétele – súrlódás

Mint említettük, a Bernoulli egyenlet ideális közegre érvényes, és igen fontos további feltétel, hogy a két pont között, amelyek közé az egyenletet felírjuk, nem lehet energia be- vagy elvezetés. A súrlódás energiaelvezetést jelent, ezért a Bernoulli egyenletet ki kell egészíteni az energia-megmaradás elvének megfelelően úgy, hogy a súrlódási veszteséget hozzáadjuk annak a pontnak a jellemzőihez, ahonnan az hiányozna. A súrlódási veszteség tulajdonképpen a belső energia megváltozására fordítódik, és ha a közeg összenyomhatatlan, akkor egyfajta nyomásvesztés formájában írható fel a következők szerint:

$$u_2 - u_1 = w_{súrl} = \frac{\Delta p'_{1,2}}{\rho}$$

Az ideális közegre felírt egyenletből kiindulva adjuk hozzá a „2”-es pont jellemzőihez a súrlódási veszteségeket összefoglalóan kifejező tagot:

$$U_1 + \frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = U_2 + \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p'_{1,2}}{\rho}$$

Az így felírt egyenletet nevezzük kiterjesztett Bernoulli egyenletnek. Itt igen fontos hangsúlyozni azt, hogy a felírási mód esetén az áramlásban az „1”-es pontot követi a „2”-es. A súrlódási veszteségek az „1”-es ponttól a „2”-es pontig lépnek fel. A veszteségek figyelembe vételével állítjuk helyre az egyenlőséget. Az így felírt összefüggés már valóságos közegekre is érvényes, de az továbbra is fennáll, hogy csak akkor alkalmazható, ha nincs semmilyen formában energiaátadás.

A Bernoulli egyenlet gyakorlati értelemben tehát azt jelenti, hogy ha a fenti feltételek teljesülnek (pl. egy vitorla körüli áramlás vizsgálatakor, hiszen itt nincs energia-bevezetés és a közeg valóságos), akkor a közeg sebességének változása mindenképpen fordított nyomásváltozást eredményez, ha a potenciálkülönbségtől eltekinthetünk (pl. azonos magasságban levő áramvonalon vizsgálódunk). Vagyis, ha a vitorla körül nő a közeg sebessége, ott biztosan csökken a nyomás,

vagy azon a részen, ahol nagy(obb) nyomás uralkodik, ott biztosan kis(ebb) sebesség lesz mérhető.

1.4 A kontinuitás törvénye

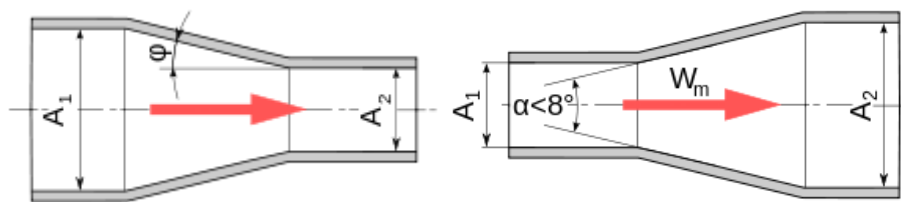
A kontinuitás, avagy magyarul a folytonosság törvénye az anyagmegmaradás elvének áramlástan felírásából következik. Azt fejezi ki, hogy ha a sűrűség az időben nem változik, akkor egy áramcső ki (2) és belépő (1) felületére felírt $\rho \cdot A \cdot c$ szorzat (vagyis a tömegáram) értéke nem változik (átlagsebességekkel számolunk, amelyek az áramcső keresztmetszeti felületeire merőlegesek).

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 = \dot{m}$$

vagy ha a sűrűség a hely szerint is állandó:

$$c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 = \dot{V}$$

A konfúzor az áramlás irányában csökkenő keresztmetszetű áramcső, csőszakasz.



2. ábra: Konfúzor és diffúzor

A folytonosság törvénye értelmében, ideális (súrlódásmentes) közeg esetén konfúzorban az áramlás sebessége nő a keresztmetszet csökkenése miatt. A klasszikus, szintén veszteségmentes esetre felírt Bernoulli egyenlet értelmében, ha a sebesség nő és a potenciálváltozástól az áramlásban eltekinthetünk, akkor a nyomásnak csökkennie kell. Valóságos közegnél a súrlódás miatt a tényleges nyomás a $\Delta p'$ nyomásvesztéssel kisebb lesz.

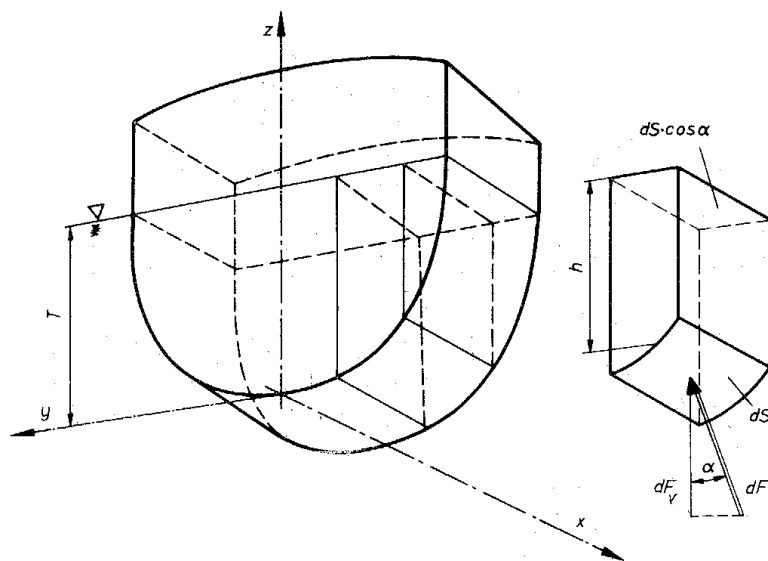
A diffúzor az áramlás irányában fokozatosan bővülő keresztmetszetű áramcső. A helyzet itt az előző fordítottja, az áramlás irányában nő a keresztmetszet, csökken a sebesség, ezért nő a nyomás, veszteséges esetben az ideális esethez képest kisebb mértékben. Viszont, mivel az áramlás irányában nő a nyomás, így fennáll a leválás veszélye, ld. később az 1.6.6. fejezetben. Mindezek miatt a diffúzoros áramlás mindig kényesebb, mint a konfúzoros.

1.5 Hidrosztatika, felhajtóerő, a hajó úszása

A folyadékokra, illetve gázokra vonatkozó legegyszerűbb feladat az, amikor, alkalmasan választott koordináta rendszerből nézve a közeg nyugalomban van. Ekkor hidrosztatika feladatáról beszélünk. A hidrosztatika alap differenciál egyenletét az Euler egyenletből kaphatjuk, úgy, hogy a sebességet és a gyorsulást is azonosan nullának választjuk. Az egyenlet a mozgásmenyiség megmaradás elvén alapul, közvetlenül azt mondja ki, hogy az egységnyi térfogatra ható, nyomásváltozásból illetve térerőből származó erő egyensúlyban van. Ha a közeg sűrűsége állandó, akkor a fenti differenciálegyenlet azt mutatja meg, hogy a folyadékban kialakuló nyomás változása a térerősséggel és a folyadék sűrűségével arányos. A térerősség nyugvó folyadékokban a nehézségi gyorsulásból származik, így végső soron a hidrosztatikai nyomás alábbi sokkal egyszerűbb formára írható:

$$p = \rho gh$$

A felhajtóerő nagysága álló hajónál:



3. ábra: magyarázó ábra a felhajtóerő levezetéséhez

A dS felületre a víz oldaláról hidrosztatikai nyomás hat, minden irányban, mindig a felületrészre merőlegesen, de ha a hajó szimmetrikus, akkor az x és y irányú erőkomponensek kiegyenlítik egymást. Ezért a nyomásokból csak z irányú erő keletkezik!

A dS felületre ható túlnyomás a hidrosztatikai nyomásból származik: $p = \rho gh$

A felületelemre ható erő: $dF = p \cdot dS = \rho gh \cdot dS$

Az erő függőleges komponensét kifejezve, a geometriai sajátosságokat figyelembe véve írható hogy: $dF_V = dF \cdot \cos\alpha = \rho gh \cdot dS \cos\alpha$

ahol a $dS \cdot \cos\alpha$ a felületelem vízszintes vetülete, ennek h-val való szorzata pedig a kiválasztott hasáb térfogatát adja, vagyis írható, hogy az elemi kis felületre ható függőleges erő: $dF_V = \rho g dV$

A teljes vízbemerülő hajófelületre összegezve (precízebben integrálva) az eredő erő alakja a következő:

$$F_V = \int dF_V = \int \rho g dV = \rho g V$$

Ez a nyugalomban levő hajóra ható, hidrosztatikus felhajtóerő.

1.6 Súrlódásos áramlások alapjai

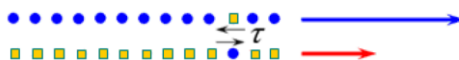
1.6.1 Csúsztatófeszültségek, folyadéksúrlódás

A folyékony folyadék részecskéi egymáshoz olyan közel helyezkednek el (a „s” távolságnál nem sokkal nagyobb távolságra), hogy közöttük lényeges vonzó hatás jut érvényre – ezt kohézióknak is nevezzük. Erre a tényre a későbbiekben, a viszkozitás vizsgálatakor visszatérünk.

A gáznemű közegek részecskéi között lévő átlagos távolság sokkal nagyobb, mint a folyadékok részecskéi közötti távolság. Ezért a gázok részecskéi közötti vonzóerő is sokkal kisebb, ezt a hatást a továbbiakban elhanyagolhatóan kicsinek tekintjük.

A csúsztató feszültség keletkezésének fő oka – folyékony folyadék réteges áramlásának esetében, amikor a részecskék elég közel vannak egymáshoz – a részecskék között keletkező fent említett kohéziós erő.

A gáznemű közegek réteges és gomolygó áramlásában egyaránt, valamint a folyékony folyadék gomolygó áramlásában a csúsztató feszültség keletkezésének fő oka a részecske cserével létrejövő mozgás-mennyiség csere (mozgásmennyiség transzport). A lassabb részecskék (4. ábra, alsó részecske sor) átlépve a gyorsabbak közé, azok mozgását fékezik, a gyorsabbak pedig (felső sor) a lassabbak közé kerülve, azok mozgását gyorsítani igyekeznek.



4. ábra: Különböző sebességű, egymás melletti rétegek

A részecske csere oka réteges áramlásban a hőmozgás, gomolygó (turbulens) áramlásban ehhez adódik még a turbulens sebesség-ingadozások miatti – esetenként sokkal intenzívebb – részecske csere. **A csúsztató feszültség keletkezésének szükséges feltétele a folyadékrészek közötti sebesség különbség.** A nem áramló (azaz nyugvó) tehát folyadékban nincs csúsztató-feszültség, a folyadék nyugvásbeli súrlódása zérus. (Ezért lehet – persze csak igen lassan – eltolni kézzel a parttól egy több tonnás hajót.)

1.6.2 Viszkozitás

Newton viszkozitási törvénye szerint folyadékokban létrejövő csúsztató feszültség az ún. dinamikai viszkozitással és a deformáció sebességgel egyenesen arányos. A legegyszerűbb esetben ez az alábbi alakban írható:

$$\tau = \mu \frac{dc_y}{dx}$$

ahol μ a dinamikai viszkozitás, mértékegysége: kg/ms vagy Ns/m².

(Mindez csak az ún. newtoni folyadékokra igaz. Vannak olyan közegek is, melyeknél nem állandó a viszkozitás értéke, nem pusztán a hőmérséklet, hanem a deformációsebesség és a csúsztatófeszültség függvénye is. Ezeket nem-newtoni közegeknek nevezzük.)

A viszkozitás, avagy a belső súrlódás egy gáz vagy folyadék belső ellenállásának mértéke a csúsztató feszültséggel szemben (itt látható a fenti kapcsolat a csúsztatófeszültséggel). Így a víz folyékonyabb, kisebb a viszkozitása, míg az étolaj vagy a méz kevésbé folyékony, nagyobb a viszkozitása. Minden valóságos folyadéknak vagy gáznak van viszkozitása, az ideális folyadék és ideális gáz viszkozitása nulla. A köznyelvben általában a nagy viszkozitású anyagokat sűrűn folyónak vagy egyszerűen sűrűnek, a kis viszkozitásúakat pedig könnyen mozgónak vagy hígnek nevezik, azonban a sűrűség, mint fizikai fogalom mást jelent, illetve a „híg” kifejezést helyesebb az ’alacsony koncentráció’ értelemben használni.

A dinamikai viszkozitás a folyadék jellemzőitől függő érték, méréssel meghatározható anyagjellemző. A műszaki gyakorlatban a dinamikai viszkozitás helyett inkább a kinematikai viszkozitást használjuk, mely a dinamikai viszkozitás és a sűrűség hányadosa:

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

ahol ν a kinematikai viszkozitás, mértékegysége: m^2/s . A kinematikai viszkozitás a nevét onnan kapta, hogy dimenziójában csak kinematikai mértékegységek szerepelnek.

Összehasonlításként: a levegő kinematikai viszkozitása $20\text{ }^\circ\text{C}$ -on, 1 bar nyomáson kb. $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, dinamikai viszkozitása pedig $1.84 \times 10^{-5} \text{ Ns / m}^2$. A víz kinematikai viszkozitása $20\text{ }^\circ\text{C}$ -on $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, dinamikai viszkozitása pedig $1 \times 10^{-3} \text{ Ns / m}^2$. A levegő kinematikai viszkozitása több mint tízszerese a vízének, de mivel a víz sűrűsége kb. 800-szorosa a levegőjének, így a víz dinamikai viszkozitása, mely a csúsztató feszültséget közvetlenül meghatározza, kb. 50-szer lesz nagyobb, mint a levegőénél. Vagyis általában a folyadékokban ébredő csúsztató feszültség – ha az egyéb tényezők azonosak – sokkal nagyobb, mint a gázokban keletkező csúsztató feszültség.

1.6.3 A súrlódási tényező

A csúsztató feszültségek ismeretében már meghatározható a súrlódási tényező, mellyel könnyen kifejezhető, hogy a folyadék és a test szilárd fala között mekkora folyadéksúrlódásból származó erő hat. Mint az az előzőekből nyilvánvaló, a súrlódási tényező az áramlási sebesség függvénye, de nagyságrendjére vonatkozóan elmondható, hogy értéke a néhány ezred tartományába esik. Egyelőre itt nem részleteztük, de a nyomáskülönbségekből származó erők, pl. a vitorla két oldalán keletkező nyomáskülönbségből származó felhajtóerő nagyságrendjéhez képest ez 2-3 nagyságrenddel kisebb érték, tehát a testre ható erők vonatkozásában elmondható, hogy a súrlódásból származó erők a nyomáskülönbségből származó erőkhöz képest tulajdonképpen elhanyagolhatóak.

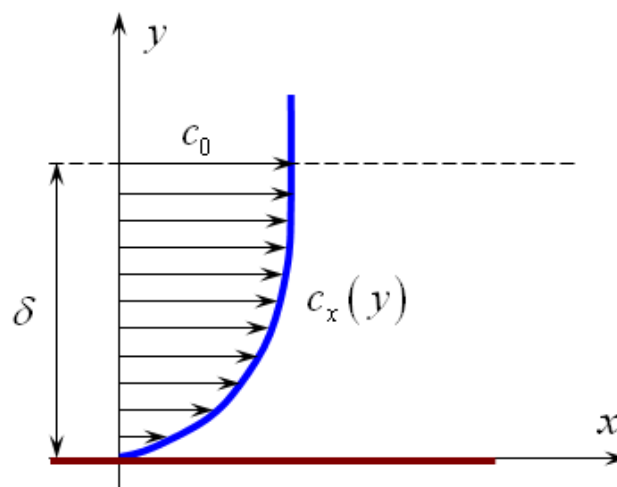
Ugyanakkor, a különböző közegekhez tartozó viszkozitás értékekből és az ebből következő súrlódási tényező értékekből látható, hogy a vízben keletkező súrlódási ellenállás, mely a vitorlázás gyakorlatában is fontos szerepet játszik, lényegesen nagyobb ugyanakkora felületen, mint pl. levegőben. Azonos felületet alapul véve tehát egy hajótest súrlódási ellenállása jóval nagyobb, mint egy vitorláé, a különböző dinamikai viszkozitással rendelkező áramló közegek miatt.

1.6.4 A határréteg

A határréteg egy olyan, általában jól körülhatárolható áramlási zóna, ahol a csúsztató feszültség hatása jelentős. Ahogy korábban láttuk a csúsztató feszültség keletkezésének két, szükséges és elégséges feltétele van: egyrészt a közegnek kell legyen viszkozitása (ez mindig van, de esetenként eltekintünk tőle \Rightarrow ideális közeg), másrészt kell legyen sebesség-különbség a folyadékrétegek között.

A gyakorlatban létrejövő áramlásokban sokszor igen kiterjedten találhatók olyan zónák, amelyekben a sebesség alig változik. Ezekben a zónákban a csúsztató feszültség elhanyagolhatóan kicsi – itt ideális közeggel számolhatunk. Az áramlások fennmaradó része a határréteg, ahol a sűrűdés hatását feltétlenül figyelembe kell venni. Másik oldalról közelítve a határrétegben jelentős sebességváltozást találunk. Ilyen pl. egy szilárd test felszínéhez közeli réteg, hiszen a szilárd fallal érintkező folyadék sebessége közvetlenül a falnál megegyezik a fal sebességével (ezt az általánosan alkalmazott tapasztalatot a tapadás törvényének szoktuk nevezni).

A következőkben a leggyakoribbnak tekinthető, a szilárd fal mellett kialakuló határrétegről lesz szó. Ilyen pl. a hajótest mellett, vagy a vitorlák körül kialakuló határréteg is.



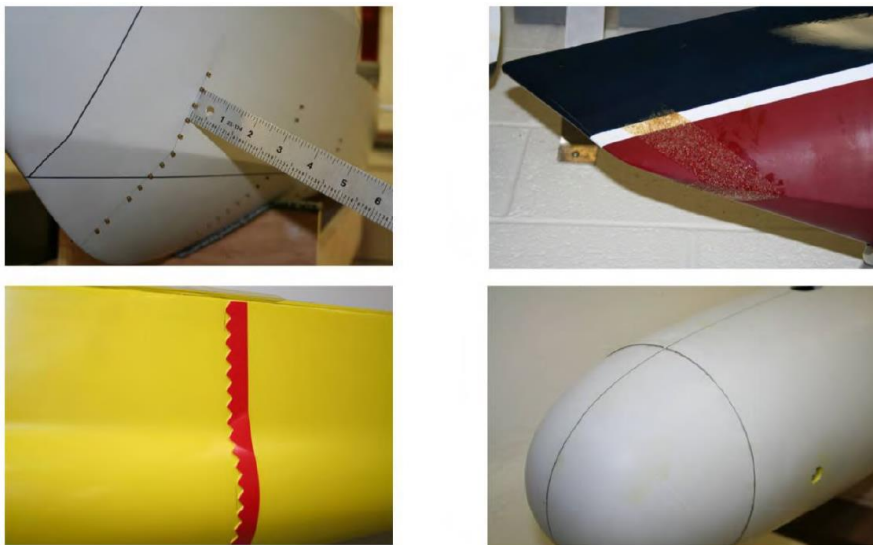
5. ábra: A határréteg sebesség profilja

A határréteg vastagsága (δ) többféleképpen definiálható. Az első definíció szerint azt az „ y ” koordináta értéket tekintjük a határréteg vastagságának, ahol a sebesség már csak (pontosan) 1%-kal tér el a zavartalan áramlási sebességtől. Ezt a vastagságot a szakirodalomban „99%-os vastagság”-nak is nevezik. Ez a vastagság általában az „ x ”, fal menti koordináta függvénye, még hozzá mind lamináris, mind turbulens határréteg esetén ez a vastagság az áramlási hosszal definiált Reynolds szám értékének növekedésével nő.

A szilárd fal és a közeg között kialakuló csúsztató feszültség, amely az áramlást (általában) fékezi, egyúttal energiát is elvon a közegtől. (Speciális esetekben, megfelelő módon mozgó fal energiát is közölhet.) További, igen fontos energia igényt jelent a nyomásnövekedés.

1.6.5 A határréteg felépítése

A határréteg a kialakulásának kezdetétől (ahol torlópont alakul ki) mért távolságtól függően különböző jellemzőkkel bír. A fal kezdete után (pl. a hajóorr után) a határréteg alapvetően réteges (lamináris) jellegű, ahogy korábban írtuk, itt csak minimális, molekuláris szintű energiacsere van az egyes rétegek között. Mivel így a fal mellett áramló közegrészeknek a faltól távolabb levő közegtől nem érkezik kellő energia fal fékező hatásának kompenzálására és az áramlás fenntartására, így tovább haladva egy átmeneti rész után a határrétegben az áramlás turbulensre változik, és a turbulencia révén a fali közegrészek újra energiához jutnak. A turbulens határrétegben a falhoz közeli, kis sebességgel bíró részeken, ahol a fal simító hatása is érvényesül, megmarad egy lamináris áramlási jelleget mutató alapréteg. Az átmenet helye nem egyértelmű, több tényezőtől (sebesség, felületi érdesség, viszkozitás, turbulencia mértéke, stb.) is függ, inkább egy zóna, mintsem egy pont, de általában meg lehet határozni egy relatív sebességtartományt, melynél várhatóan bekövetkezik. A lamináris-turbulens átmenet a határréteg vastagodása miatti energiaigény-növekedés miatt illetve a test geometriájából következő esetleges nyomásnövekedés miatti további energiaigény okán következik be (egyszerűen belátható, hogy a növekvő nyomás irányában való áramlás fenntartásához nagyobb energiára van szükség). Ha nincsen nyomásnövekedés, vagy éppen csökkenés van, pl. mert a test alakja egyre szélesedő (hajó orra), a lamináris határréteg tovább fennmaradhat. Olyan esetben, ahol ez fontos, az átmenetet mesterségesen is elő lehet idézni, pl. egy, a felületen elhelyezett turbulenciát keltő objektummal. (Ilyen lehet például a hajókísérleti intézetekben vizsgált hajómodellek orránál elhelyezett huzal, vagy csiszolópapír jellegű szalag, amely az igen kis sebességű – ezért lamináris – határréteget turbulenssé teszi. De ezt a célt szolgálják a golflabda mélyedései is.)

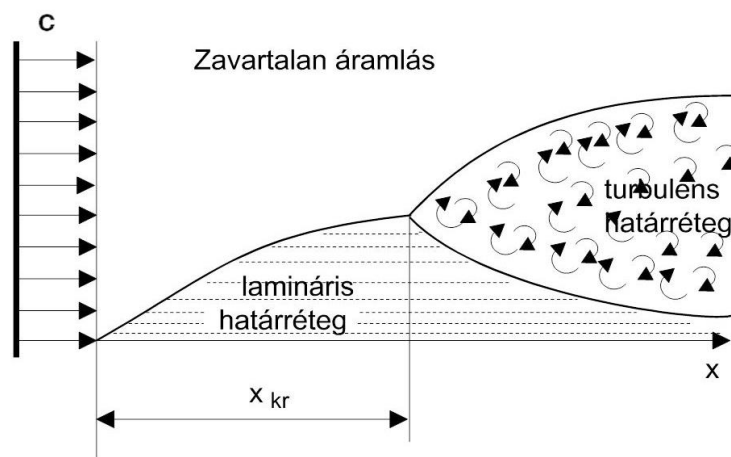


6. ábra: Különböző turbulenciakeltők hajómodelleken

A határréteg további jellemzője, hogy a torlóponttól távolodva folyamatosan nő a vastagsága, a viszkozitás miatt egyre több közegrésszel érvényesül a fal fékező hatása.

A turbulens határrétegben létrejövő energia átadás sok esetben a teljes kontúr menti áramlás követéséhez elegendő, illetve ilyenkor az áramlás nem válik le, végig követi egy áramvonalas test alakját. Ilyen lehet például egy mérsékelt állásszögre beállított vitorla körüli áramlás.

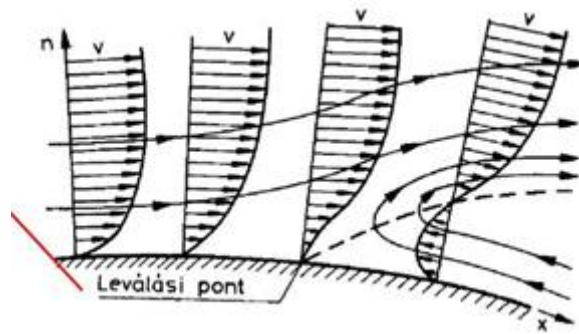
Amennyiben az áramlás fenntartásához az áramlás turbulens voltából következő energiaátadás sem elegendő, akkor jön létre a leválás. A leválásban makroszkopikus méretű örvénylések alakulnak ki, minderről a következő fejezet szól részletesebben.



7. ábra: A határréteg felépítése

1.6.6 A leválás

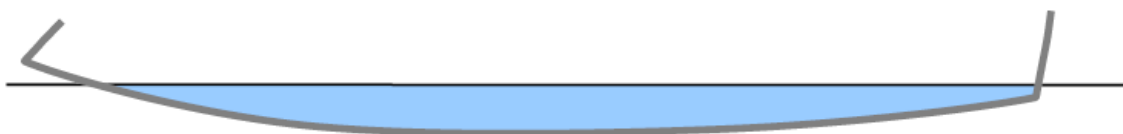
Előfordul azonban, hogy a test kontúrja mentén olyan erősen növekszik a nyomás, hogy a turbulens energia transzport sem képes az áramlást fenntartani. Az energia fogyását a határréteg sebesség profilja jelzi: a testhez közeli rétegekben a sebesség és ezzel a kinetikai energia csökken – a 16.4 ábra szerinti, a „Leválás kezdete” jelzésű helyen a sebesség-profil érintője a falra merőleges lesz. Ez azt jelenti, hogy itt a csúsztató feszültség értéke nullára csökken. Ettől a ponttól kezdve alakul ki a leválási zóna, ahol akár makroszkopikus méretű örvények is előállhatnak.

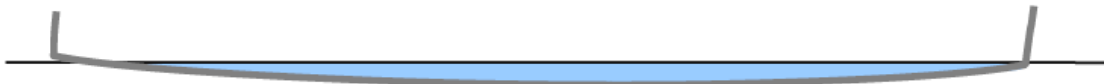


8. ábra: Sebességmező a leválás után

A leválási zónában, az igen intenzív örvénylés elegendően nagy energia áramot biztosít, így ez az áramlási forma már mindenütt elegendő. Az áramlás leválása alapvetően változtatja meg az áramképet egy test körül, ezáltal a nyomáseloszlás és az ebből származó erők is jelentősen változhatnak. Sok esetben ez jelentős ellenállás-növekedést eredményez, mely a sebesség csökkenéséhez vezet.

A leválás késleltetésének már a tervezés fázisában alkalmazható egyik leggyakoribb módszere az, hogy a szilárd fal alakját (pl. a hajótestet, vagy kormánylapátot, tökesúly profilját, vitorlát) a legszélesebb pont után csak nagyon fokozatosan kezdik el csökkenteni (áramvonalas forma) annak érdekében, hogy a közegben a nyomás lehetőség szerint csak nagyon kis mértékben növekedjen, és ennek ellenére a közeg tudjon tovább áramolni (ld. a diffuzoros áramlásnál leírtakat). Hajótest esetén jól nyomon követhető ez a gerincgörbület kialakításában: túrahajóknál, melynél nem a sebesség az elsődleges szempont, a tervezők nyugodtan alkalmazhatnak nagyobb gerincgörbületet, mely hirtelenebb alakváltozást és egyben a leválások nagyobb kockázatát hordozza magában, de lehetővé teszi a túra-funkciók kielégítésével együtt járó nagyobb vízkiszorítás igényt is. Versenyvitorlásoknál pont fordított a helyzet: mindent a sebesség dominál, ezért a gerincfelhajlást igyekeznek minimális értéken tartani, ez viszont lapos, kisebb vízkiszorítású hajót eredményez – mindez persze összhangban van azzal, hogy a versenyhajóknál egyébként sem célszerű a nagy tömeg, tehát a hajótest vízkiszorításának sem kell nagyok lenni.





Túra és versenyvitorlás gerincvonalala

Tökesúlyok, kormányok profiljainál a fokozatosan csökkenő keresztmetszet-változás teljesen egyértelmű, de későbbi témakörökben fogunk erre több példát látni.

A leválás késleltetésének egy másik módja a hosszan lamináris határréteg turbulenssé tétele, vagy a turbulencia növelése. Ennek alkalmazását láthatjuk a golflabda példáján: a kiképzett mélyedésekkel a határréteg turbulensbe váltását még a leválás előtt elérik, melynek eredményeképpen a leválási buborék (a leválási pont után kialakuló térrész, szélárnyék) sokkal kisebb, az áramkép közelebb van az ideális (súrlódásmentes) áramlás képéhez, és ami a legfontosabb, ennek eredményeképpen a nyomáskép is az ideálishoz hasonlít, melynek során nincs áramlás irányú, azaz ellenállás jellegű erő.

A leválást más módszerekkel is lehet szabályozni, késleltetni, ezek azonban olyan mesterséges beavatkozást jelentenek, melyet vitorlásoknál nem alkalmaznak (egyelőre). A határréteg elszívásával például az energiáját vesztett közeg helyére friss közeg kerül. Egy másik lehetséges eljárás szerint a határrétegbe nagy energiájú (rendszerint nagy sebességű) közeget juttatva szintén késleltethető a leválás. Ezt az eljárást határréteg lefúvásnak is nevezik.

1.7 Testek körüli áramlások

A test körüli áramlásnak az olyan áramlást nevezzük, amikor a szóban forgó testet egy elvileg végtelen folyadéktér veszi körül és vagy a folyadék, vagy a test, esetleg mindkettő mozog. Ez utóbbira példa egy vitorlás hajó vitorlája, amely mozgó levegőben (pl. turbulens atmoszféra) mozog.

Áramlástani szempontból, számunkra csak az egymáshoz képesti mozgás az érdekes – a következőkben, amint azt a cím is jelzi, úgy tekintjük, hogy a közeg áramlik a test körül. Erre egy gyakorlati példa lehet egy ún. szélcsatorna, ahol a szélcsatornában létrehozott (mesterséges) légáramlásban valamely testet (modellt) vizsgálunk. A testek körül kialakuló áramlás áramképét általában a testhez kötött rendszerben vizsgáljuk.

A testek és az áramló közegek között többféle kölcsönhatás is keletkezhet: a mi szempontunkból a legfontosabb az erőhatás. Az erőhatások a test felületén jelentkező nyomás- és csúsztató feszültség eloszlás eredményeképpen állnak elő.

A testek lehetnek áramvonalasak és nem áramvonalasak. Az áramvonalasság azonban relatív: bizonyos megfúvási (áramlási) irányok esetén a test lehet áramvonalas, más megfúvási irányok esetén pedig ugyanaz a test esetleg már nem áramvonalas. A nem áramvonalas testeket tompa testnek is nevezik. Az alapvető különbség az, hogy a tompa test felületének nagy részén jellemző a leválás, és az ezt követően létrejövő ún. leválási buborék, mely térrészre jellemző, hogy benne a sebesség kicsi, a turbulencia nagy, a nyomás is általában kicsi, de egyenletes. Az áramvonalas testeken is kialakulhat a határréteg-leválás jelensége, de ez a tompa testekhez képest általában jóval kisebb felületen jelentkezik.

A testek körüli áramlások vizsgálatakor Az egyik legérdekesebb kérdés a nyomás és a csúsztató feszültség eloszlása a test felületén, ezekből lehet ugyanis megállapítani a testekre ható áramlási eredetű erők nagyságát. Mint arra korábban már utaltunk, a csúsztató feszültségekből származó súrlódási erő a súrlódási tényező segítségével számítható, a hajótesten keletkező további jellemző erőkomponensek pedig a nyomáskülönbségekből származnak. A vitorlákon keletkező erők esetében hasonló a helyzet, csak itt elsősorban aerodinamikai eredetű erőkről beszélhetünk, a hajótesten keletkező hidrodinamikai erőkkel szemben (a hajótesten keletkező aerodinamikai erőket általában az előzőekhez számítják. Ezekről részletesebben később szó lesz, itt most csak az erők tényezőkkel való megadásának hátterét, mint áramlástani vonatkozású alapismereteket tárgyaljuk.

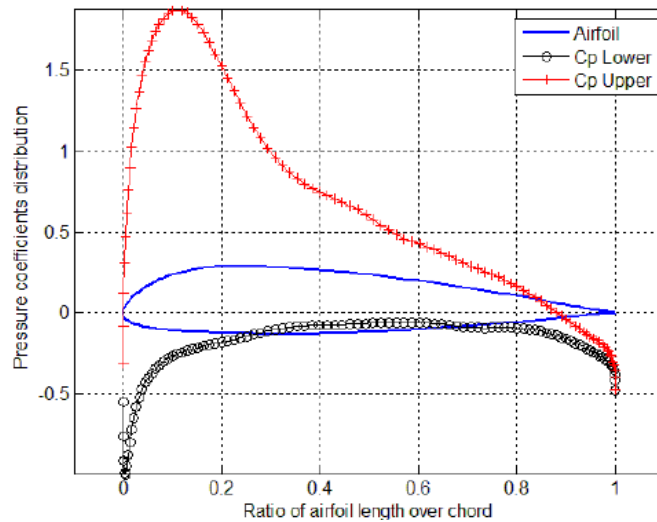
A súrlódási erőt a súrlódási tényező segítségével lehet számítani, mely a τ csúsztató feszültségekből számítható, mégpedig a fali csúsztatófeszültségnek és a zavartalan áramlás sebességével meghatározott dinamikus nyomás hányadosaként.

$$c_f = \frac{\tau_0}{\frac{\rho}{2} c^2}$$

Az áramlásba helyezett test felületén keletkező nyomásra jellemző c_p nyomástényezőt a következőképpen definiáljuk:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} c^2}$$

ahol a p_∞ a zavartalan áramlásban uralkodó nyomás. Ennek segítségével könnyen szemléltethető is a test oldalai közötti nyomáskülönbség, mely rögtön utal az adott irányban keletkező erő nagyságára is. Az alábbi kép egy szárnyprofil hossza mentén mutatja a nyomástényező változását.



9. ábra: A nyomástényező alakulása egy szárnyprofil mentén

A keletkező erőnek általában két, egymásra merőleges összetevőjét szokás vizsgálni: az egyik a zavartalan áramlás irányába eső ellenálláserő, a másik az arra merőleges felhajtóerő. Mindkét erőkomponenst a tényezője segítségével szokás felírni, ezek a következők:

ellenálláserő tényező:

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

felhajtóerő tényező:

$$c_f = \frac{F_f}{\frac{\rho}{2} c^2 A}$$

A tényezőket pl. (szélcsatorna) mérés alapján lehet meghatározni: megmérjük a vizsgált testen keletkező ellenállás - ill. felhajtó erőt, majd ezt az erőt elosztjuk a zavartalan áramlás sebességével számított dinamikai nyomás és a test áramlásra merőleges, legnagyobb keresztmetszeti felületének szorzatával.

1.8 Összefoglalás

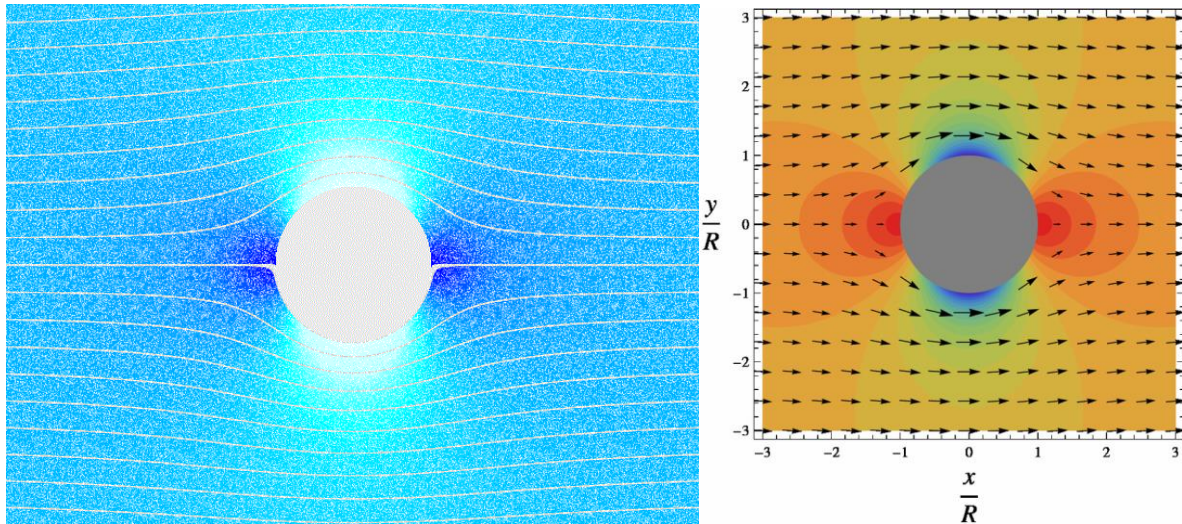
Az előző fejezetekben a valóságos folyadékban jelen levő csúsztatófeszültségekről és ennek hatásairól szoltunk részletesebben. Annak érdekében, hogy a sok új információ között ne vesszen el a lényeg, egy rövid összefoglalóban visszaidézzük a legfontosabb összefüggéseket.

Mint láttuk, a folyadékrészek között levő csúsztatófeszültség kialakulásának fő oka a folyadék-részek közötti kohéziós erő és a sebességkülönbség. Láttuk, hogy ennek mértéke a dinamikai ill. kinematikai viszkozitással jellemezhető. Definiáltuk az áramlási tér azon részét, ahol a folyadékrétegek között jelentős sebességkülönbség van, így számottevő csúsztatófeszültség jelentkezik. A tapadási törvényt figyelembe véve láttuk azt is, hogy ilyen tér alakul ki mindig egy szilárd fal mellett, hiszen a fal melletti nulla sebességről a sebesség a névleges értékre változik. Ezt a térrészt határrétegnek nevezzük. Láttuk továbbá, hogy a határrétegben az ott kialakuló sebességviszonyoknak megfelelően az áramlás lehet lamináris, de egy bizonyos távolság után biztosan turbulensre vált, miközben egy lamináris (viszkózus) alapréteg mindig megmarad. Az energiaviszonyokat szemlélve megállapítottuk, hogy előfordulhat olyan térrész, ahol a közegnek a fal mellett nincs már elég energiája, és a belsőbb részek turbulenciája révén sem nyer annyit, hogy tovább tudjon áramolni a fal mellett is a fő áramlás irányába, ezért ott visszafordul, leválik, örvények keletkeznek. Megállapítottuk azt is, hogy a csúsztató feszültségekből származó súrlódási erők a nyomáskülönbségből származó erőkhöz képes szinte elhanyagolhatóan kicsik. Itt fontos azonban kiemelni, hogy bár a csúsztatófeszültségek közvetlen hatása a testen keletkező erőkre kicsi, közvetetten azonban épp a csúsztatófeszültségek jelenléte miatt kialakuló határréteg és különösen annak leválása alapvetően változtatja meg a hajótest, vitorlák, stb. körül kialakuló áramképet, ezzel pedig drasztikus hatást gyakorol a nyomásképre és így végső soron a nyomáskülönbségekből származó erőkre. A határréteg leválásának elkerülése, vagy a leválás késleltetése tehát elemi érdekünk, ha a hajó teljesítményének fokozását tűzzük ki célul. Mindez igaz a vitorlák, mind pedig a hajótest körüli áramlásra, de bármire, ami egy vitorlás hajón ki van téve a szél hatásának (pl. rudazat, kötélzet, legénység).

Ezen összefoglaló alapján tekintsük át két példán keresztül az ideális és súrlódásos áramlás jellegzetességeit egy henger körül.

Tekintsünk egy végtelen hosszú henger körüli áramlást, amelynek a végtelen kiterjedése miatt minden metszetében egy jobban ábrázolható és könnyebben megérthető kétdimenziós áramképet vizsgálhatunk. A 10. ábra bal oldalán a henger körül kialakuló áramlás látható az áramvonalak megjelenítésével és a kék színek árnyalatai a nyomástmegoszlást mutatják (sötétkék a

nagy, világoskék a kis nyomást). A jobb oldalon az áramvonalak helyett az azok mentén kialakuló sebességek vektorai láthatók, melyekkel nem csak az áramlás iránya követhető, hanem a sebességek nagysága is (a nagyobb nyomást is a meleg színek, a kisebbet a hideg színek jelölik).



10. ábra: 2D áramlási kép egy henger körül

A képeket vizsgálva elmondható, hogy a henger, mint akadály a legszélesebb pontjánál összehúzza az áramvonalakat. Eddig a pontig a közeg számára rendelkezésre álló keresztmetszet a henger jelenléte miatt csökken, ezért a sebesség a kontinuitás törvénye értelmében nő. A Bernoulli egyenletet felhasználva ennek megfelelően elmondható, hogy a nyomás csökken. Mindezeknek megfelelően az A pont torlópont, itt nagy nyomás (piros rész) és 0 sebesség uralkodik, a B pontban pedig létrejön a henger körüli áramlás legnagyobb sebessége és legkisebb nyomása (kék rész). Mivel a közeg súrlódásmentes, leválás nincs. A B ponttól továbbhaladva a közeg számára rendelkezésre álló keresztmetszet nő, a terület mentén a sebesség csökken, a nyomás pedig nő, a C pontban pedig kialakul a hátsó torlópont. Mind az áram- (áramvonalak), és nyomáskép (nyomáseloszlás), valamint a c_p nyomástényező megoszlása szimmetrikus, vagyis a hengerre ideális folyadék esetén semmilyen irányból nem hat erő.

Súrlódásos folyadék esetén a henger felülete mentén kialakul a határreteg, mely az áramlás jellemzői által meghatározott helyen le is fog válni. kis Re számú Lamináris áramlás esetén a henger áramlással szembenező felén már jelentkezik a leválás, a henger után pedig kialakul egy leválási buborék. Ebben a leválási buborékban az ábrán láthatóan a nyomás kisebb, így a nyomástényező, illetve a henger körüli nyomáseloszlás aszimmetrikussá vált. Nagyobb Re szám esetén a határreteg még a leválás előtt turbulenssé válik, amely a nagyobb mozgási energiája révén képes a nyomásnövekedéssel szemben áramlani, így a leválási pont a henger áramlás

irányába néző felére tolódik. Ezáltal csökken a leválási buborék mérete, és kismértékben nő a nyomástényező értéke. A henger hátsó feléről ekkor periodikusan válnak le az örvények a henger alsó és felső feléről, amelyet ennek leírójáról, Kármán Tódorról, a híres magyar kutatóról Kármán-féle örvénysornak neveztek el.

A súrlódásos áramlás lényege tehát, hogy a súrlódás miatt módosult áramképben aszimmetrikusan módosult a nyomás a henger körül, amelynek következtében a folyadékról hengerre az áramlás irányában erő adódik át, vagyis a hengerre az áramlás irányú erő hat. Látható, hogy a vízszintes tengely mentén az áramlás szimmetriája megmarad, erre merőleges irányban (y tengely) nem is ébred erő. Megjegyezzük, hogy ha a hengert forgatnánk, akkor az áramkép minkét tengely mentén aszimmetrikus lenne, tehát keletkezne az áramlás irányára merőleges erő is, amit megállapodás szerint felhajtó erőnek hívunk. Ezt a jelenséget használják ki a Flettner rotornál, amely tulajdonképpen egy speciális vitorlának tekinthető.

A következő témakörökhöz a jelen oktatási rendszerben nem készül jegyzet. A témakörökhöz viszont rendelkezésre áll használható írott tananyag, mely elsősorban a hajótervező-mérnök képzés számára íródott, a mérnök jelöltek matematika, fizika, mechanika, áramlástan stb. területeken megszerzett előzetes kompetenciáira is építve. Ezt figyelembe véve több olyan témát is részletesen tárgyal viszont, melyet egy vitorlázó számára nem kell részletezni. Mindemellett, reménység szerint az edzőképzés hallgatói számára is érthető és használható tananyagként szolgálhat.

2 Egyensúly

Ezzel a témakörrel a Kishajók jegyzet foglalkozik, a téma feldolgozásához áttekintendő részek a Simongati_Kishajok.pdf-ből: 3.1 és 3.2 fejezetek

3 A hajótest áramlástana

Ezzel a témakörrel a Kishajók jegyzet foglalkozik, a téma feldolgozásához áttekintendő részek a Simongati_Kishajok.pdf-ből: a 4.1 teljesen, a 4.2-ből az 1-3 alfejezetek, a 4.3-ból az 1-2 alfejezetek.

4 Tőkesúly, svert, bulba, kormány hidrodinamikája

Ezzel a témakörrel a Kishajók jegyzet foglalkozik, a téma feldolgozásához áttekintendő részek a Simongati_Kishajok.pdf-ből: a teljes 5. fejezet

5 A vitorlák áramlástana

Ezzel a témakörrel a Kishajók II. jegyzet foglalkozik, a téma feldolgozásához áttekintendő részek a Simongati_Kishajok_II_B5_v3.pdf-ből: opcionális a 2.1 fejezet, kötelező a 2.2, 2.3 és 2.4 fejezetek.

6 Felhasznált irodalom

Pattantyús Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve 2. kötet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961.

Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai. Előadási jegyzet. Budapesti Műszaki Egyetem Áramlástan Tanszék. Budapest, 1992. Kézirat. Magyar Elektronikus Könyvtár

Dr. Gausz Tamás: Áramlástan, Műegyetemi jegyzet, Budapest, 2012, 7DE.7.1.

http://www.vitorlasszotar.hu/vitorlazaselmelet_hatarreteg_levalasa.php

wikipedia

7 Ajánlott irodalom

L. Larsson, R. E. Eliasson, Principles of Yacht Design, 2nd edition, Adlard Coles Nautical, London, 2000;

C. A. Marchaj, Aero- and Hydrodynamics of Sailing, Adlard Coles Nautical, London, 1979;

C. A. Marchaj, Sail Performance – Theory and Practice, Adlard Coles Nautical, London, 1996;

D. Gerr, Nature of Boats, International Marine, 1992;

Claughton, Wellicom, Sheno, Sailing Yacht Design – Theory, Addison Wesley Longman, 1998;

Claughton, Wellicom, Sheno, Sailing Yacht Design – Practice, Addison Wesley Longman, 1998;

S. Killing, D. Hunter, Yacht Design Explained, W. W. Norton & Company, New York, 1998;

Arvel Gantry, The aerodynamics of sail interaction, Proceedings of 3rd AIAA Symposium, California, 1971

Arvel Gantry, More on slot effect, SAIL Magazine, 1973

Arvel Gantry, A review of modern sail theory, Proceedings of 11th AIAA Symposium, Seattle, 1981

Lajos T., Simongáti Gy. *A tőkésúly áramlástan*, HAJÓ Magazin, 44. szám;

Simongáti Gy. *Tőkésúly-variációk a sekély Balatonra – I. rész*, HAJÓ Magazin, 105. szám;

Simongáti Gy. *Tőkésúly-variációk a sekély Balatonra – II. rész*, HAJÓ Magazin, 106. szám;

D. Vacanti, *Keel and rudder design*, Professional Boatbuilder Magazin, 95. szám;

Abbott, Doenhoff, *Theory of Wing Sections*, New York, McGraw & Hill, 1949;