

KISHAJÓK



A projekt címe: „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés”

A megvalósítás érdekében létrehozott konzorcium résztvevői:



[KECSKEMÉTI FŐISKOLA](#)

[BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM](#)

[AIPA ALFÖLDI IPARFEJLESZTÉSI NONPROFIT KÖZHASZNÚ KFT.](#)

Fővállalkozó: [TELVICE KFT.](#)



Szerkesztette:

SIMONGÁTI GYŐZŐ

Írta:

SIMONGÁTI GYŐZŐ

Lektorálta:

HARGITAI L. CSABA

Rajzoló:

SIMONGÁTI GYŐZŐ

KISHAJÓK

Egyetemi tananyag

COPYRIGHT: © 2012-2017, Dr. Simongáti Győző, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

LEKTORÁLTA: Hargitai L. Csaba

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)
A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

ISBN 978-963-279-643-7

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszachenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

KULCSSZAVAK:

Kishajó, vitorlás, motoros, tervezés, hajótest, stabilitás, ellenállás, tőkesúly, bulba, áramlástan, kishajók építése, kompozit anyag, gyanták, szálanyagok, vákuumtechnológia, infúziós eljárás.

ÖSSZEFOGLALÁS:

A jegyzet elsődleges célja, hogy a Járműmérnöki B.Sc. képzés hallgatóit megismertesse a vitorlás és motoros kishajók működésével és tervezésével, építésével kapcsolatos alapvető tudnivalókkal. A kishajók számos területen hasonlítanak a hajósképzés más tárgyaiban ismertetett nagyhajókhoz, így sok tekintetben lehet támaszkodni az ott elhangzottakra. Ugyanakkor nagyon sok vonatkozásban olyan speciális jellemzőkkel bírnak, melyek miatt külön is foglalkozunk velük. Az e jegyzetbe foglalt ismertetés a szerteágazó témakörök miatt csak részleges. A nagy anyagból az első részbe került a kishajók működésének bemutatása, a hajótesttel (annak formájával, stabilitásával és ellenállásával) és a vitorlások tőke-súlyával kapcsolatos részek, valamint a kishajók legnagyobb részének alapanyagául szolgáló kompozit anyagokat és az ebből készülő kishajók építését bemutató fejezetek. A kormányzással, a kishajók vitorlázatával és rudazatával, gépes hajtásának módjaival, valamint teljesítménybecsléssel (optimalizálással) és ergonómiával foglalkozó részek tervek szerint egy következő részt alkotnak majd.

Tartalomjegyzék

Előszó.....	7
1. Bevezető a kishajók részhez	8
2. A kishajók csoportosítása és felépítése.....	9
2.1 Csoportosítási szempontok, különböző típusok.....	9
2.2 Vitorlások és motorosok felépítése.....	11
2.3 Kishajók jellemző sebességtartományai, működési módok.....	13
3. Egyensúly	16
3.1 Az erők és nyomatékok egyensúlya vitorlások esetében.....	16
3.2 A vitorlások kiegyensúlyozásának mértéke.....	19
3.3 Az egyensúlyi helyzet motorosokon.....	22
4. A hajótest.....	24
4.1 Jellegzetes hajótest-formák.....	24
4.1.1 Profil	25
4.1.2 Bordametszet.....	31
4.2 Stabilitás.....	35
4.2.1 A vitorlások stabilitásáról általában.....	35
4.2.2 Formastabilitás.....	38
4.2.3 Súlystabilitás.....	43
4.2.4 A kishajók stabilitására vonatkozó előírások.....	52
4.3 A kishajók ellenállása	56
4.3.1 Az ellenállásról általában.....	56
4.3.2 A vitorlások ellenállását befolyásoló hajótest-paraméterek	60
4.3.3 A motorosok ellenállását befolyásoló hajótest-jellemzők	66
5. A tőkesúly.....	75
5.1 Bevezetés	75
5.2 Jellegzetes tőkesúlyok, uszonyok	78
5.3 A tőkesúlyon keletkező erők.....	83
5.4 A tőkesúly geometriai jellemzői	86
5.5 A tőkesúlyon keletkező erőket befolyásoló tényezők.....	89
5.5.1 Profilformák, profilvastagság	89
5.5.2 Felület	95
5.5.3 Oldalnézeti alak (karcsúság, „kihegyezés” és nyilazási szög).....	96
5.5.4 A hajótest-tőkesúly kölcsönhatása.....	101
5.5.5 Szárnyak (winglet-ek).....	101
5.6 Bulbák.....	103
6. Bevezető a kishajók építése részhez	108
7. A kishajók alapanyagai.....	110
7.1 Szerkezeti műanyagok	110
7.1.1 A kompozitokkal kapcsolatos általános tudnivalók.....	111
7.1.2 Gyanták.....	115
7.1.3 Szálalapanyagok	122
7.1.4 Száltermékek, szövedékek	126
7.1.5 Maganyagok.....	130
8. Műanyaghajók építése	135
8.1 Hajóépítés sorozatban	135
8.1.1 Ősminta és sablon készítése.....	135

8.1.2	Kézi felrakóeljárás	138
8.1.3	Szórás.....	140
8.1.4	Vákuumeljárás	141
8.1.5	Infúziós eljárás.....	143
8.1.6	Előimpregnált anyagok (prepreg) használata	146
8.2	Egyedi műanyaghajók építésének technikái.....	147
8.2.1	Héjazat készítése tömör laminátból.....	147
8.2.2	Héjazat készítése szendvics-szerkezettel.....	150
9.	Ábrajegyzék.....	154
10.	Irodalomjegyzék	160

ELŐSZÓ

A jegyzet elsődleges célja, hogy a Járműmérnöki B.Sc. képzés hallgatóit megismertesse a vitorlás és motoros kishajók működésével és tervezésével, építésével kapcsolatos alapvető tudnivalókkal. A kishajók számos területen hasonlítanak a hajósképzés más tárgyaiban ismertetett nagyhajókhoz, így sok tekintetben lehet támaszkodni az ott elhangzottakra. Ugyanakkor nagyon sok vonatkozásban olyan speciális jellemzőkkel bírnak, melyek miatt külön is foglalkozunk velük. Az e jegyzetbe foglalt ismertetés a szerteágazó témakörök miatt csak részleges. A nagy anyagból az első részbe került a kishajók működésének bemutatása, a hajótesttel (annak formájával, stabilitásával és ellenállásával) és a vitorlások tökesúlyával kapcsolatos részek, valamint a kishajók legnagyobb részének alapanyagául szolgáló kompozit anyagokat és az ebből készülő kishajók építését bemutató fejezetek. A kormányzással, a kishajók vitorlázatával és rudázatával, gépes hajtásának módjaival, valamint teljesítménybecsléssel (optimalizálással) és ergonómiával foglalkozó részek terv szerint egy következő részt alkotnak majd, mely elkészülte után a BME, Repülőgépek és Hajók Tanszékének honlapján lesz elérhető.

a Szerző

1. BEVEZETŐ A KISHAJÓK RÉSZHEZ

Ma a nemzetközi előírások szerint kishajónak minősül minden 24 m-t meg nem haladó testhosszúsággal rendelkező hajó. Ebbe a kategóriába tartozik a kedvtelési- és sportcélú hajók nagy többsége, valamint a kisebb munkahajók. Mi ezekből a továbbiakban csak a kedvtelési és sportcélú hajókkal foglalkozunk, és az egyszerűség kedvéért *kishajó*knak nevezzük őket.

Kifejezetten kikapcsolódásra és sportcélokra hajót a 16.-17. század fordulójától kezdve építenek. Természetesen ez nem jelenti azt, hogy korábban az emberek mindig csak szükségyszerűségből hajóztak volna, hiszen korabeli feljegyzések beszámolnak arról, hogy egyesek kalandvágyból vagy pusztán kedvtelésből szálltak tengerre. De az igazi rekreációs célú hajózás akkor kezdődött, amikor az emberek elkezdtek olyan hajókat építeni, melyek elsődleges funkciója az volt, hogy a tulajdonos örömeire és szórakozására szolgáljanak. Az első kedvtelési célokat szolgáló hajók olyan, már meglevő típusokból fejlődtek ki, melyek relatíve kisméretű, gyors, mozgékony hajók voltak. Az ilyen hajókat az észak-európai (dán, svéd, észak-német, holland) nyelvterületen *yagd* vagy *yagt* kifejezéssel illették – innen származik a kishajókra később általánosan elterjedt angol *yacht* kifejezés. (Az eredeti szó a *vadászni* igével fordítható le.) Az első yacht-ok megjelenése után a kedvtelési célú vitorlázás, mint úri szokás gyorsan elterjedt az arisztokrácia körében. A yacht-ok birtoklása és a velük való vitorlázás azonban csak a kezdetek kezdetén elégítette ki a tulajdonosokat, így nagyon hamar megjelent a versenyszellem kifejezése is: az első kihívás után kezdetét vették a vitorlásversenyek is. A vitorlázás már nem csak kedvtelés, hanem sportcél is volt: legyőzni a másikat, gyorsabbnak lenni, nagyobb teljesítményt produkálni. A kishajózás több mint 300 éves történelmén ez vonul végig, mindig az aktuális kor technikai fejlettségi szintjén. Így jutunk el a Földet 45 nap alatt megkerülni képes vitorlás versenytrimaránoktól a csapatos és egyéni, megállókkal tarkított, vagy megállás nélküli földkerülő, vagy éppen olimpiai, tókerülő és partközeli tengeri versenyeken vagy az offshore Formula 1-es motoros hajók versenyén át a szinte népünnepélynek számító, a túravitorlázók számára az Atlanti-óceán átkelésére kiírt „versenyig” vagy éppen a csendes, esti balatoni „csúszkálásig”.

A következőkben e sport- és kedvtelési célokat szolgáló hajók jellegzetességeit mutatjuk be.

2. A KISHAJÓK CSOPORTOSÍTÁSA ÉS FELÉPÍTÉSE

2.1 Csoportosítási szempontok, különböző típusok

A kishajók igen sokféle szempont szerint csoportosíthatók. A főbb szempontok a következők: működés módja, a felhasználás és hajtás jellege, építési anyag, testek száma, ballasztolás, motor típusa, kihajtás jellege, hajtómű típusa. Működés szempontjából megkülönböztetünk vízkiszorításos, fél-sikló és siklóhajókat.



forrás: www.haberyacht.com és www.oystermarine.com

2.1.1. ábra: Vízkiszorításos motoros és vitorlás kishajó



forrás: [en.wikipedia.org/wiki/Planing_\(sailing\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Planing_(sailing)) és www.globalmarinesystems.com

2.1.2. ábra: Sikló vitorlás és motoros

Felhasználás szerint két csoport van alapvetően: túra- és versenyhajók. Versenyhajónak azokat a hajókat nevezzük, amelyeknél a teljesítmény (sokszor egyenrangú a sebességgel) az elsődleges tervezési szempont. Túrahajóknál ezzel szemben a kényelem és a biztonság preferált. (Marketing anyagokban sokszor jelenik meg kategóriaként a túra-verseny – cruiser-racer – megnevezés. Mivel azonban a túra- és versenycélok szinte mindig egymásnak ellentmondó követelményeket támasztanak így ezeket a tervezés során – csak kompromisszumok árán – lehet egyszerre figyelembe venni. Mivel versenyhajókkal nem lehet kényelmesen túrázni, ezért a cruiser-racer megnevezéssel többnyire olyan elsősorban túra-

célokra épített hajókat jelölnek, amelyekkel szoktak versenyezni is.) A hajtás jellege szerint megkülönböztetünk elsősorban evezős, vitorlás és motoros kishajókat, de elenyésző számban léteznek ún. motor-vitorlások is, melyeknél mindkét hajtási mód egyenlően fontos.



forrás: www.boatdesign.net és www.odin-marine.com

2.1.3. ábra: Tipikus motor-vitorlások



forrás: charterworld.com és www.oceanshaker.com

2.1.4. ábra: Vitorlás trimarán verseny- és túraváltozatban



forrás: www.sail-world.com és www.fbdesign.it

2.1.5. ábra: Katamarán túramotoros flybridge-el és offshore versenykatamarán

Az építési anyag lehet fa, fém (jellemzően acél és alumínium), szálerősített műanyag, vagy éppen speciális gumi. Külön kategóriát képeznek a RIB-ek (rigid inflatable boat), melyeknél a merev alsóhéjhoz egy rugalmas, gumiból készülő nagy átmérőjű (40-60cm)

henger csatlakozik. A hajótestek száma lehet 1,2 vagy 3, az utóbbiak neve katamarán ill. trimarán. A ballasztolás szempontjából csak a vitorlásokat választják szét uszonyos és tőkesúlyos kategóriákra. A motoros hajók motorja ma jellemzően belsőégésű vagy elektromos, és mindkét esetben lehet beépített- vagy külmotoros kialakítást találni. A kihajtás elrendezése is többféle lehet: a klasszikus egyenes kihajtás mellett használnak V és Z-, illetve a vitorláhajókra jellemző S-elrendezést. A hajtómű lehet Z, vízszög- vagy ún. Arneson hajtómű, de akár légcsavar is.



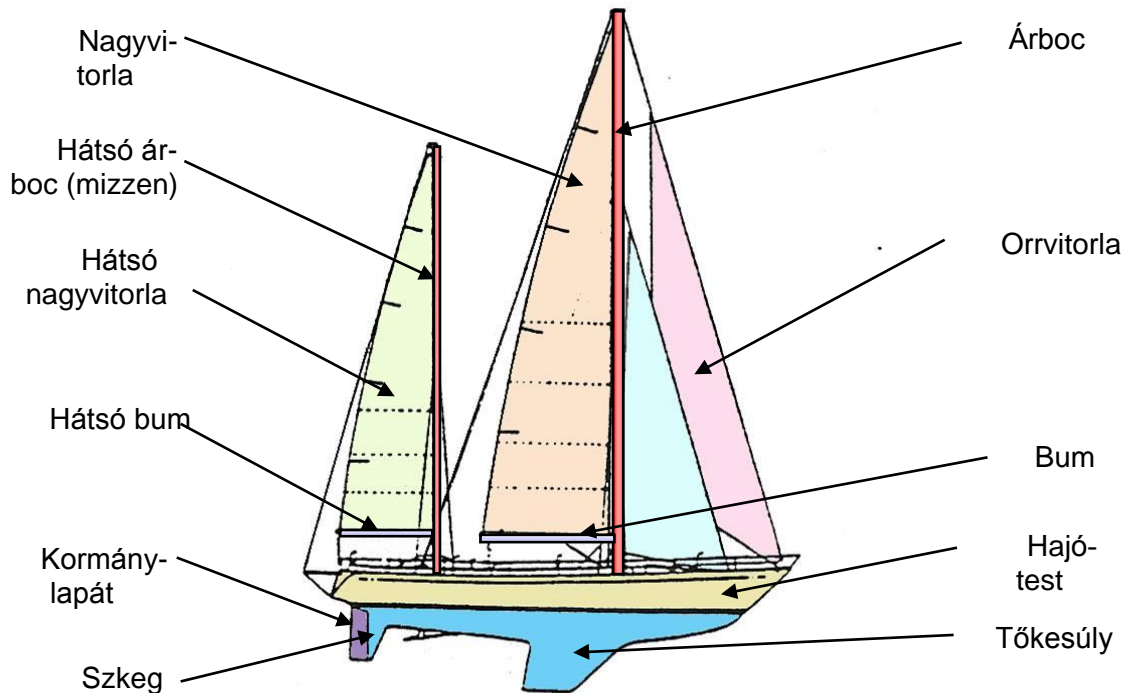
forrás: www.tidel.biz

2.1.6. ábra: RIB-ek

2.2 Vitorlások és motorosok felépítése

A 2.2.1. ábra egy tőkesúlyos vitorláhajó felépítését mutatja. A mai hajók többsége egy árboccal rendelkezik, de a bemutatás kedvéért itt egy kétárbocos változatot és ennek elemeit szemléltetjük.

A tőkesúlyos hajóknál a hajótest külhéja és fedélzete egy zárt, (mérettől függően esetleg több részre osztható) belső teret hoz létre, ez a hajó kajütje. A hajó hajtását a vitorlákon keletkező erők adják. A vitorlázaton keletkező erőt az árboc és bum vezet át a hajótest szerkezetére, ezek összefoglaló neve a rudazat. A tőkesúly feladata egyrészt a hajó eredő tömegközéppontjának minél alacsonyabbra koncentrációja, másrészt a hajó túlzott mértékű oldalcsúszásának megakadályozása. Minden fontosabb elemről a későbbiekben részletesen is beszélünk.



2.2.1. ábra. Tőkesúlyos vitorlás jellegű

A vitorláshajók másik típusa az uszonyos hajó (más néven jolle). Ennél nincs tőkesúly, a hajó stabilitását a legénység tömegének célszerű elhelyezésével és a megfelelő formával lehet biztosítani. Az oldalcsúszás megakadályozására itt az uszony (svert) szolgál (2.2.2. ábra). Az uszonyos hajók rendszerint kisebbek tőkesúlyos társaiknál, fedélzetük túlnyomó részben nyitott, ezek főleg napközbeni vitorlázásra használhatók. Vannak azonban olyan változatok is, melyek rendelkeznek nagyobb komfortot biztosító kajúttal, ezeket hívják túrajollénak (a sekély vizű Balatonon igen kedvelt és célszerű hajótípus).



forrás: www.keptar.hu



2.2.2. ábra: Klasszikus fa túrajolle kívülről és belülről

A motoros hajók között a kisebbek szintén nyitott jellegűek (ezek a runabout-ok), de találunk felépítménnyel és kajúttal rendelkezőket is (lobster-ek). A nagyobb hajók természetesen mindig kajúttal rendelkeznek. A nyitott hajókat, ha azok külmotorosak, a motor mel-

lől, hátulról szokták kormányozni, de készülnek olyan változatok is, ahol van kifejezett kormányállás, jellemzően a hajó középrészén. A kormányállás itt általában csak egy kisebb kormánykonzol, amelyet keresztirányban vagy valamelyik oldalon, vagy középen helyeznek el. Nagyobb motorosok specialitása az ún. flybridge, mely a legfelső, általában kisméretű, de kormányállással is ellátott fedélzetet jelöli. Ezeknél természetesen a belső védett részben is található egy kormányállás.



forrás: www.bandbyachtdesign.com és www.evworld.com

2.2.3. ábra: Lobster és runabout típusú hajók



forrás: www.newboatsblog.blogspot.com

2.2.4. ábra: Motoros flybridge-el

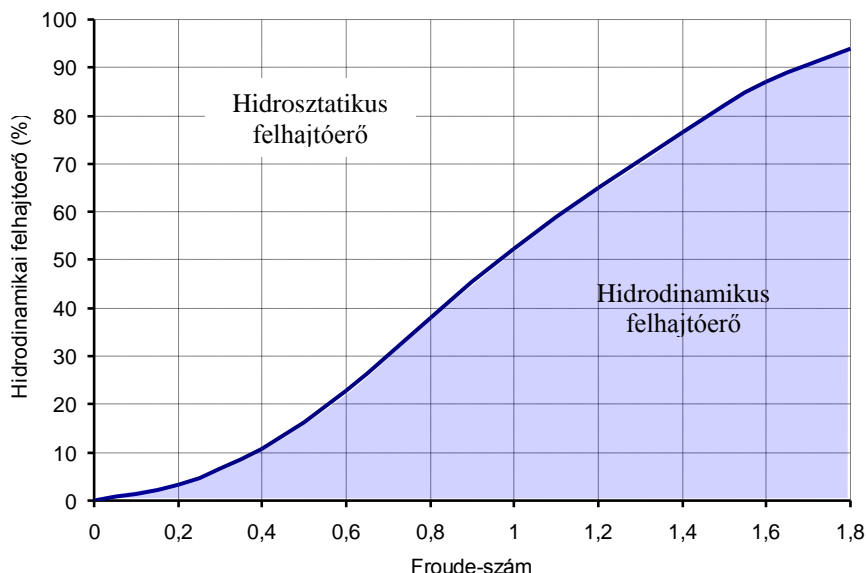
A következőkben a vitorlások és motorosok fontosabb részeit – hajótest, tőkesúly, kormány, hajtóművek, rudazat, vitorlázat – külön is tárgyaljuk.

2.3 Kishajók jellemző sebességtartományai, működési módok

A hajó jellemző sebességétől függően megkülönböztetünk ún. vízkiszorításos üzemben fél-sikló állapotban és siklásban működő hajókat. A vízkiszorításos hajóknál a hajó tömegét a hidrosztatikus felhajtóerő kompenzálja. A nagyhajóknál általában csak ezzel számolunk, nagyobb sebességnél és megfelelő forma esetén azonban a hidrosztatikus felhajtóerő mellett az ún. hidrodinamikus felhajtóerő is jelentkezik. A hidrodinamikus felhajtóerő nagyobb sebességeknél lényegesen nagyobb lehet a sztatikusnál, és ezért a hajótest a sebesség növekedésével egyre jobban kiemelkedik a vízből (hiszen a sztatikus felhajtóerő csökkenése a merülés csökkenésével jár). Azt a hajót, amelyet elsősorban a dinamikus felhajtó-

erő tart fenn, sikló hajónak nevezzük. Egy nagy sebességre tervezett tipikus motoros hajótest súlyának kompenzálásához szükséges felhajtóerő két összetevőjének megoszlását a Froude-szám függvényében a 2.3.1. ábra mutatja.

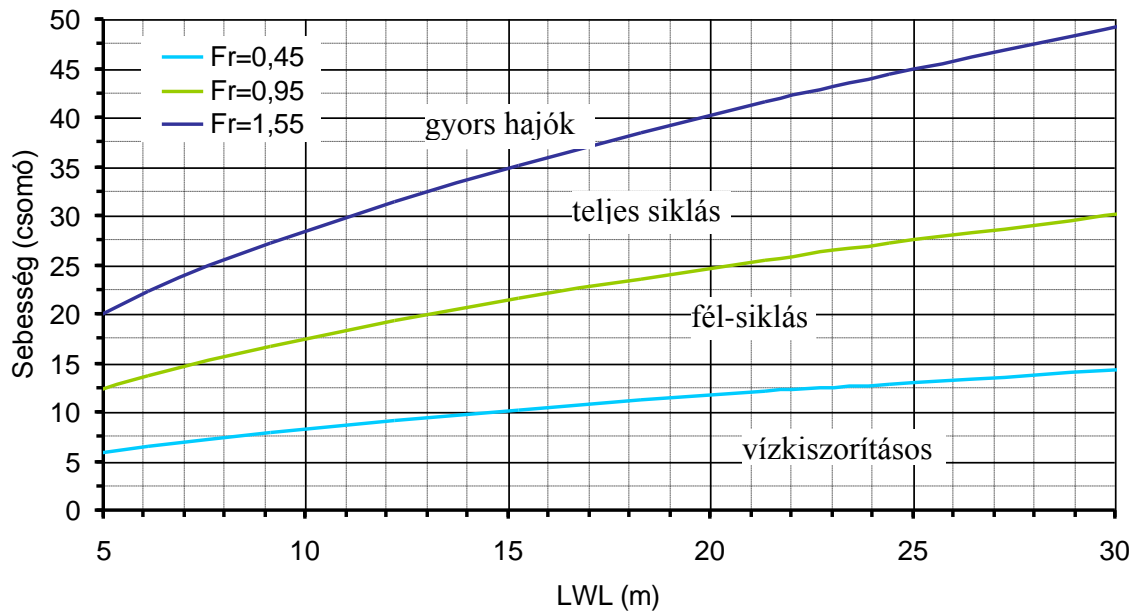
A siklás azonban egy folyamat eredménye. Ha van elegendő teljesítmény, akkor az erre alkalmas hajónál a sebesség növekedésével először a tükör – a siklásra tervezett hajók rendszerint igen nagy vízbe merülő tükörrel rendelkeznek – meglehetősen nagy víztömeget „húz magával”, mintegy holt súlyként, az ellenállás ilyenkor nagy. Ahogy a sebesség tovább nő (átlépjük a testsebességet), a hajótestről leszakad a farhullám egy nagy keresztirányú hullámot produkálva így a hajótest mögött. A tükör kitisztul („száraz” lesz), de a trimmszög drasztikusan megnő. A hajótest hátsó részén a növekvő sebesség hatására felfelé mutató hidrodinamikus felhajtóerő kezd kialakulni, mely a hajót visszabilentti, a trimmszög csökken és a hajót egyre inkább a hidrodinamikus felhajtóerő tartja. Ezt az állapotot nevezzük teljes (tökéletes) siklásnak, ez előtt a hajó fél-sikló üzemben dolgozik (az angol terminológia ezt az állapotot semi-planing vagy semi-displacement nevekkel illeti).



forrás: Larsson

2.3.1. ábra: A hidrodinamikus felhajtóerő részaránya a Froude-szám függvényében

Mint említettük, a hidrodinamikai felhajtóerő keletkezése a sebesség függvénye. Azonban különböző méretű (hosszú) hajóknál mindez különböző sebességeknél játszódik le. A hajóelmélet ugyanakkor megmutatta, hogy a jelenség minden hajónál ugyanannál a Froude-számnál jelentkezik, ezért is célszerű mindent ennek függvényében vizsgálni. A Froude-szám tulajdonképpen nem más, mint a hajó relatív (hosszához viszonyított) sebessége. Tapasztalat szerint a hajók $Fr=0,45-0,5$ -ig vízkiszorításos, $Fr=0,95-1,0$ -ig fél-sikló, e felett a teljes siklás állapotában vannak. A különböző hajómérethez az egyes üzemmódok határait és a hozzá tartozó tényleges sebességeket a 2.3.2. ábra mutatja.



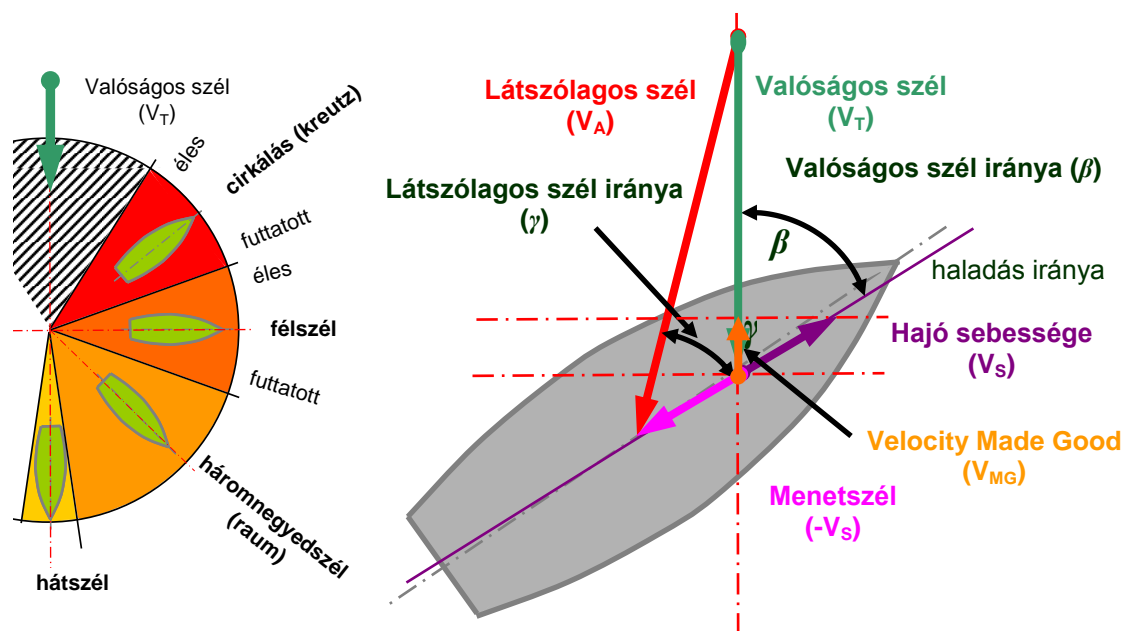
2.3.2. ábra: Kishajók üzemállapotai

Két dolgot szeretnénk ezzel kapcsolatban megjegyezni. Az egyik, hogy a Froude-számot egyes ellenállás-számítási módszereknél nem a hajó hosszához, hanem pl. a vízkiszorításhoz vagy a tükör-merüléshez viszonyítják, természetesen úgy, hogy dimenziótlan jellege megmaradjon. A másik, hogy egyes szakirodalmak előszeretettel használják a *sebesség-hossz arányt* különböző hajók összehasonlításakor viszonyítási alapként. Ehhez a csomóban kifejezett sebességet osztják a lábban kifejezett hossz négyzetgyökével, mely relatív sebesség ugyan, de nem dimenziótlan. Így használata – a nem megfelelő mértékegységben kifejezett értékek behelyettesítésével – kavarodáshoz vezethet.

3. EGYENSÚLY

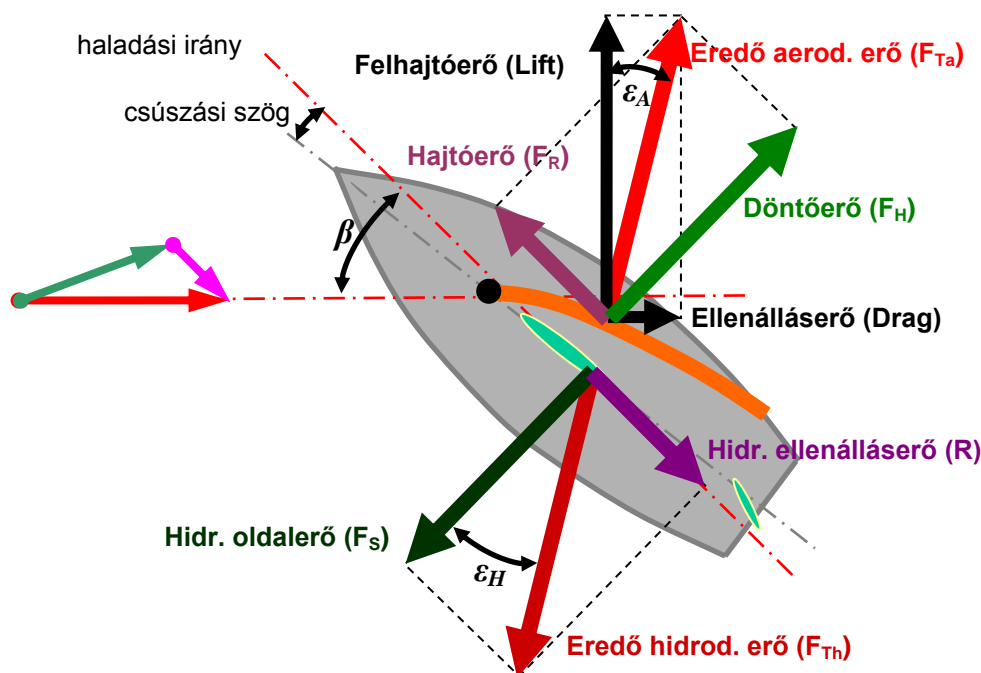
3.1 Az erők és nyomatékok egyensúlya vitorlások esetében

A vitorláshajó haladását a vitorlákon keletkező haladásirányú erő biztosítja. Ezt az erőt a vitorlák által érzékelhető szél kelti, ez azonban nem azonos a ténylegesen fújó széllel, sem irányra, sem nagyságra nézve. A különbség a haladó hajó menetszeléből származik. E kettő eredményeképp kialakuló látszólagos szél a valódi szél és a hajó menetszelének vektori eredője (3.1.1. ábra). A vitorláshajó a valódi szél irányához képest különböző irányokon haladva különböző látszólagos szélben működik még akkor is, ha az egyes irányokon a valódi szél nagysága nem változik. Az irány mellett a látszólagos szél nagyságát a hajó menetszele is befolyásolja, amit viszont a látszólagos szél által keltett erők befolyásolnak. Az egyensúlyi állapot – ha nem is könnyen, de – mindig egyértelműen meghatározható. A versenyvitorlázásban igen fontos jellemző a hajó sebességének valódi szél irányába eső komponense, a v_{MG} (velocity made good to windward), ezért az ábrán ezt is feltüntettük. A valódi szélhez viszonyított haladási irányok megnevezését a 3.1.1. ábra bal oldalán szemléltettük.



3.1.1. ábra: A haladási irányok megnevezése és a sebességvektorok

Ha egy vitorlás hajó egyenes vonalú pályán, egyenletes sebességgel mozog akkor – Newton I. tétele értelmében – a rá ható erők és nyomatékaik egyensúlyban vannak. Miután a vitorlás két különböző halmazállapotú közeg határán mozog, ezek az erők aerodinamikai és hidrodinamikai eredetűek. Az aerodinamikai erők legnagyobb része a vitorlákon, kisebb része a hajótest vízből kiálló részén keletkezik, a hidrodinamikai erők pedig a hajótesten, a tőkesúlyon és a kormányon lépnek fel. A 3.1.2. ábrán látható, hogy az aerodinamikai és a hidrodinamikai eredetű erők eredője (rendre F_T és R_T) az előzőek értelmében megegyező nagyságú, de ellentétes irányú.



3.1.2. ábra: A vitorláshajón keletkező erők I.

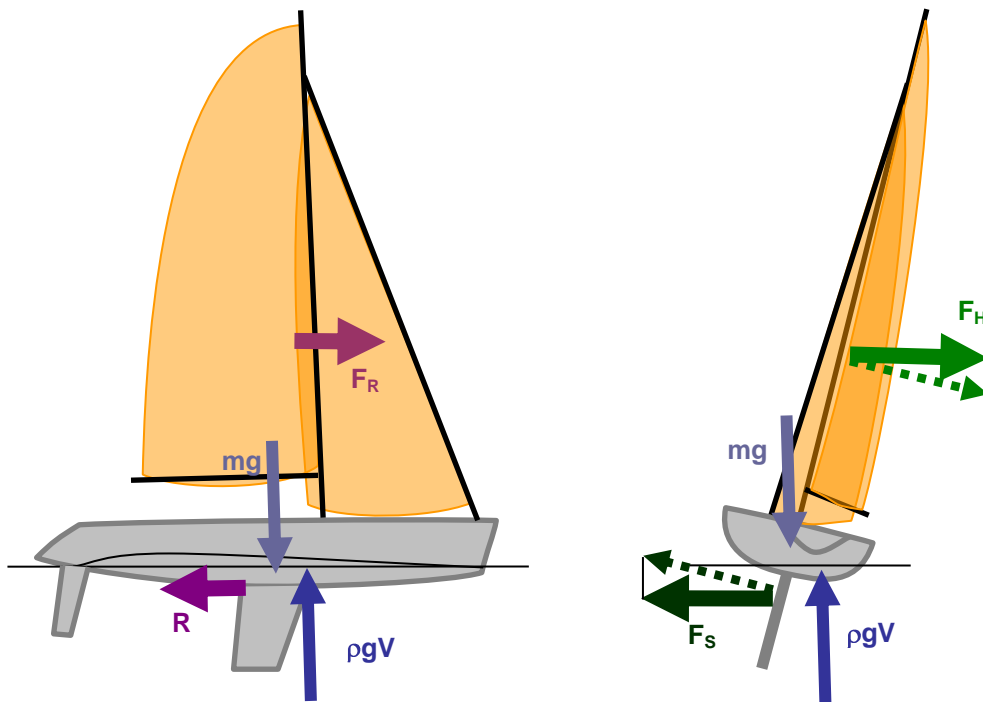
Ha ezeket az erőket haladási iránnyal párhuzamos (F_R és R) illetve arra merőleges irányú (F_H és F_S) komponensekre bontjuk fel, akkor – a törvény értelmében – e komponensek is páronként egyenlő nagyságúak és ellentétes irányúak ($F_R = R$ és $F_H = F_S$). Megjegyezzük továbbá, hogy a F_R , R , F_H , F_S erők az eredő erők vízszintes síkba eső komponensei (ld. a 3.1.3 ábrán).

Tehát amekkora F_R előrehajtó erő keletkezik a vitorlázaton, ugyanakkora R ellenálláserő fékezi a hajót. Hasonlóan amekkora F_H oldalirányú döntőerő ébred a vitorlázaton, ugyanakkora F_S oldalerőnek kell keletkeznie a hajó víz alatti részén. F_S tulajdonképpen a hajót testen, tőkesúlyon és a kormányon keletkező oldalirányú hidrodinamikai erők eredője. Az F_S merőleges a haladási irányra, ezért ez tulajdonképpen egy hidrodinamikai felhajtóerő. Ennek a kialakulásához, ugyanúgy ahogy a vitorlákon, valamekkora állásszögre van szükség. Ez az állásszög a hajót testen úgy alakul ki, hogy a hajó nem arra megy, amerre az orra néz, hanem az ábrán látható módon ettől eltérő irányban (a hajó tengelye a haladási irányhoz képest az oldalcsúszás szögével szél felé fordul, „abdrift”-je van). Minél hatékonyabban működnek a hajó víz alatti részei, annál kisebb állásszöggel (oldalcsúszási szöggel) képesek a vitorlák által meghatározott döntőerőt kiegyensúlyozó oldalerőt előállítani. A λ oldalcsúszási szög a mai vitorlásoknál kb. 3-7 fok.

Egyensúly esetén az egyes erőkomponensek nyomatékainak is ki kell egyenlíteni egymást. Az ábrából látható, hogy a hajtóerő és ellenálláserő – mint erópár – a hajót szél felé igyekszik fordítani, ennek tart ellen a döntőerő és a hidrodinamikai oldalerő. (A hajó szél felőli vagy luv oldala az, amely felől fúj a szél, a másik pedig szokásos nevén a szél alatti vagy lee oldal.)

Az F_R és R erőknek ugyanakkor oldalnézetben (3.1.3. ábra bal oldala) is van egy nyomatéka, amely a hajót orra billenti, hiszen F_R magasan, az R pedig a vízvonal alatt ébred. Az elbillenés következtében a hajó víz kiszorításának súlypontja előrébb vándorol, éppen

annyira, hogy a vízkiszorításból származó felhajtóerő és a hajó súlyereje által adott erőpár a billentő nyomatékot kompenzálja. Ez tulajdonképpen egy hosszirányú stabilizáló nyomaték, és mivel a hajó vízvonalának hosszirányú másodrendű nyomatéka relatíve nagy, ezért az így kialakuló trimmszög viszonylag kicsi, sokszor nem is észrevehető. Egyes versenycatamaránoknál, ahol a hajótest keresztmetszete igen kicsi, a hajó ezen billentőnyomaték hatására képes „lefürni” az orrát. Ha a hajót a haladás irányába tekintve vizsgáljuk, akkor jól látható, hogy az F_H és az F_S is erőpárt alkot, ez a nyomaték a hajót oldalirányban dönti meg. Ennek kompenzálása a hajó keresztirányú stabilitása révén valósul meg (3.1.3. ábra jobb oldala).



3.1.3. ábra: A vitorláhajón keletkező erők II.

Az egyensúly megvizsgálása után a 3.1.2. ábráról még egy érdekes és fontos következtetést lehet levonni. Az ábra értelmében az eredő aerodinamikai erőt (F_T) felbonthatjuk úgy is, hogy az egyik komponens a látszólagos szél irányába esik (ez a D aerodinamikai ellenálláserő), a másik pedig erre merőleges (ez az L aerodinamikai felhajtóerő). Az ábrán látható két nagyon fontos szög: az aerodinamikai felhajtóerő L és az eredő erő F_{Ta} által bezárt szög, az ún. ε_A aerodinamikai ellenállásszög, valamint a hidrodinamikai felhajtóerő F_S és az eredő erő F_{Th} között bezárt szög, az ún. ε_H hidrodinamikai ellenállásszög. Mindkét szög azt fejezi ki tulajdonképpen, hogy adott felhajtóerő mellett mekkora ellenálláserő keletkezik. Értelemeszerűen a minél kisebb értékek a jók. Az ábra geometriájából az is látható, hogy e két szög összege éppen a β élességet, a tényleges haladási irány és a látszólagos szél iránya által bezárt szöget adja, azaz $\beta = \varepsilon_A + \varepsilon_H$.

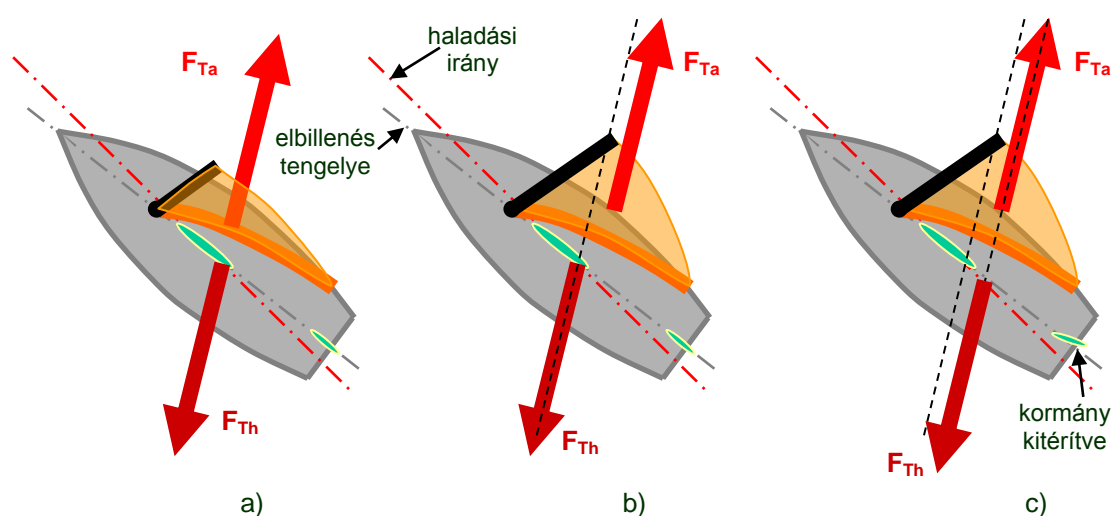
Mindebből az következik, hogy a vitorlás élességét a vitorlázat és a víz alatti részek hatékonysága egyenlő mértékben befolyásolja. Nem elég a vitorlázatot és annak beállítását minden lehetséges módon az optimumon tartani, a tökesúly és kormány kialakításánál is a lehető legjobb megoldást kell kiválasztani, hiszen jelentőségük pontosan ugyanakkora.

Utóbbiak fontosságát tovább növeli, hogy a tökesúly és kormány alakját, áramlástani jellemzőit az építés után nem tudjuk olyan egyszerűen változtatni, mint a vitorlák beállítását és ezzel ε_A értékét. Vagyis az élességet nagymértékben befolyásoló ε_H értéke a hajó tervezése, építése során dől el! Hiába állítjuk be tökéletesen a vitorlákat, nem fogunk tudni elég élesen vitorlázni, ha a hajó tökesúlya áramlástani szempontból nem elég hatékony, azaz túl nagy ellenállás mellett szolgáltatja a szükséges oldalerőt.

Mindkét élességet meghatározó résszel részletesen foglalkozunk a későbbi fejezetekben.

3.2 A vitorlások kiegyensúlyozásának mértéke

Térjünk egy kicsit vissza a vitorlások kiegyensúlyozásának kérdésére. Az előzőek alapján nyilvánvaló, hogy az egyensúly érdekében egy vizsgált dőlésszögnél a vitorlázon keletkező és a víz alatti részekben kialakuló eredő erők hatásvonalának egy egyenesre kell esnie. Az erők hatásvonalát (és támadáspontját) a vitorlázat és a hajótest-tökesúly-kormány együttesének geometriája – vagyis ezek egymáshoz képesti helyzete – határozza meg. Egy adott kialakítás azonban csak egy adott dőlésre tudja biztosítani a kiegyensúlyozottságot. A hajó tovább dőlésével ugyanis az aerodinamikai és a hidrodinamikai erőközéppont is kifelé mozdul el és mivel a dőlés tengelye (mely a hajó hossz tengelyével egyezik meg) nem merőleges a két erő hatásvonalára, így az erők hatásvonala többé nem esik egy egyenesbe, és a két erő a szél felé fordítja el a hajót. Ezt kiegyensúlyozni úgy lehet, hogy a hajó kormányosa elfordítja a kormányt, ezzel a hidrodinamikai erőközéppontot hátrafelé mozdítja el olyan mértékben, hogy a hatásvonalak egybeessenek.



3.2.1. ábra: A dőlés hatása a kiegyensúlyozottságra

A kormány kitérítése azonban ellenállással jár, így ez a hajót valamilyen mértékben lassítja. Ha tehát az egyensúlyt csak folyamatos kormánykitéréssel lehet fenntartani, akkor folyamatosan fellép a sebességet csökkentő ellenállás-többlet is, ami versenyben igen hátrányos. Mégis a vitorláshajókat több okból is úgy tervezik, hogy csak a kormány minimális szél alá fordító kitérésével legyenek tökéletesen kiegyensúlyozva.

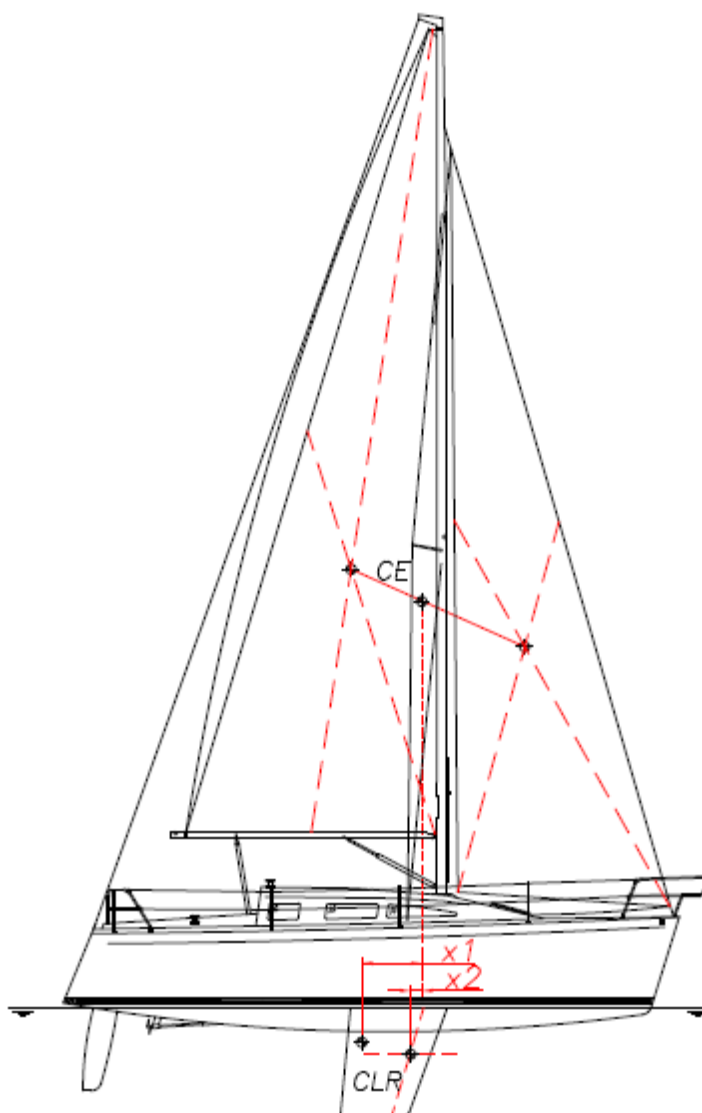
Ennek oka részben az, hogy a kormány a tökesúly sodorvonalában így dolgozik a minimális ellenállás mellett, másrészt a kormány így tud részt venni az oldalerő előállításában. Szempont az is, hogy ilyen geometria mellett egy széllekés hatására a hajó többledőlésével a hajónak szélbe futó, és így a vitorlák is tehermentesítő hajlama legyen, ami nagyobb biztonságot jelent. Nem utolsó sorban pedig a kormányosnak is jó, ha „érzi az kormányt” vagyis a többleterőt a kormányon, amikor egy széllekés (pöff) jön. Mindezek miatt a vitorlázat és a víz alatti elemek elhelyezésénél (relatív helyzetük meghatározásánál) úgy kell eljárni, hogy a hajó kormányának kb. 5° -os kitérítése mellett legyen kiegyensúlyozott a hajó. Ez a kis dőlésszögekre állítandó be, hiszen az ellenállás szempontjából is igyekszünk a hajó dőlését minimalizálni. Az erősebb szélben, nagyobb dőléseknél pedig elfogadjuk, hogy a kiegyensúlyozáshoz jobban ki kell a kormányt téríteni.

Már csak az a kérdés, hogyan helyezzük el egymáshoz képest a vitorlázatot és a tökesúly-kormány együttesét?

Az egyik régóta elterjedt és egyszerű megoldás, hogy a vitorlázat illetve a laterálfelület geometriai súlypontját vesszük fel bizonyos távolságra egymástól. A tapasztalatok azt mutatják, hogy ha a vitorlafelület súlypontja (*CE*- centre of effort) a laterálfelület geometriai súlypontja (*CLR* – centre of lateral resistance) előtt helyezkedik el a vízvonalhossz 10-11%-ának megfelelő távolsággal (jele: *x*, angol megnevezése: „lead”), akkor jól kiegyensúlyozott hajót kapunk.

A 3.2.2. ábrán ezt a távolságot *x1*-gyel jelöltük. Nyilvánvaló, hogy az így meghatározott *CE* és *CLR* távol esik a tényleges aerodinamikai és hidrodinamikai erőközponttól, de ezeket pusztán elméleti alapokon igen nehéz meghatározni. E módszer nagyszerűsége az egyszerűségében rejlik, de az is egyértelmű, hogy az egyes hajótípusoknál meglevő, a hajótest, tökesúly, kormány alakjában levő különbségek miatt egyes hajókhoz jobban, másokhoz kevésbé használható. A különálló szárny-tökesúllyal rendelkező hajókra ma már elérhető egy másik, szintén egyszerű módszer is. Ennél feltételezik, hogy a hajótest elülső része és a kormány által generált oldalerő nagyjából kiegyenlíti egymást, így a támadáspont meghatározásában nem kell figyelembe venni. Ez után az erő középpontját a vízvonalig meghosszabbított tökesúly negyed-húrhossz-vonalának és a merülés 45%-át reprezentáló vízszintes vonalnak a metszéspontjába veszik. Az így kapott távolság az *x2* a 3.2.2. ábrán.

A vitorlázatnál hasonlóan nehéz a helyzet, mert a támadáspontot a haladási irány, a vitorlák állásszöge, öblössége is befolyásolja. A szakirodalmi adatok azt mutatják, hogy a vitorlák belépőélétől mérve a támadáspont távolsága a vitorla húrhosszának 30-50% között változik. Itt az egyszerűség kedvéért megmaradtak a geometriai súlypont használatánál. (Az eredő meghatározásánál az ún. 100% vitorlafelületet – vagyis az árboc előtti orrvitorla háromszög és a nagyvitorlát denevér nélkül figyelembe vevő háromszög felületét – számítják.)



3.2.2. ábra: A „lead” meghatározása

Akármelyik módszerrel határozzuk is meg az erőközpontokat, mindegyikre igaz, hogy a jó kiegyensúlyozottsághoz a CE -nek a CLR előtt kell lennie. Az alkalmazandó módszert illetően és a „lead” mértékére nézve a szakirodalom a következőt javasolja:

- a hosszúgerinces hajóknál a geometriai súlypontok meghatározása után a „lead” legyen
- árboccsúcsra szerelt szlup vitorlázat esetén az L_{WL} 12-16%-a
- frakcionális szlup rigg esetén az L_{WL} 10-14%-a
- ketch-eknél a L_{WL} 11-15%-a.
- Szárny-tökesúlyos hajóknál a negyed-húrhossz-vonalas módszerrel a „lead” legyen
- árboccsúcsra szerelt szlup vitorlázat esetén az L_{WL} 5-9%-a
- frakcionális szlup rigg esetén az L_{WL} 3-7%-a

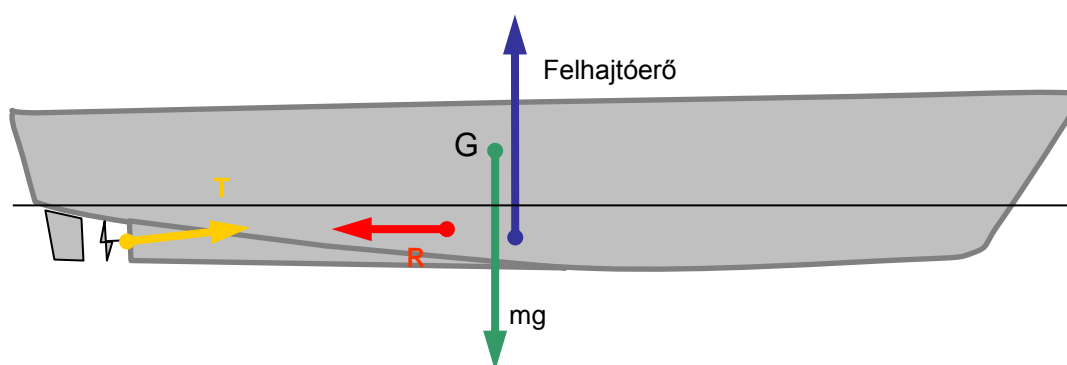
Ezeket az értékeket azonban célszerű megnövelni, ha

- a hajó széles (mert a széles hajó megdőlve aszimmetrikus lesz, így nagyobb szél felé fordító nyomatékokat generál)
- a hajónak hosszú tőkesúlya van (minél hosszabb a tőkesúly, a valóságban annál előrébb van a CLR)
- a hajónak igen magas a vitorlázata (nagyobb dőlésnél az aerodinamikai erőközpont jobban eltávolodik a hidrodinamikaitól, nagyobb szélbefutó hajlamot okozva ezzel)
- a hajónak kicsi a stabilitása (a hajó nagyobb dölésekre hajlamos, ami szél felé fordítja a hajót).

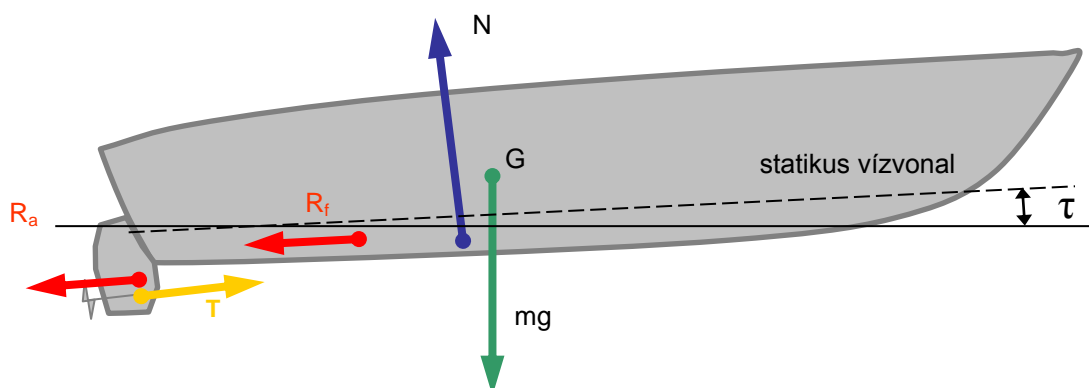
Az említett módszerek mellett ma már sokszor igen komoly számítástechnikai háttér áll a tervezők rendelkezésére, melynek segítségével a tényleges erőközpontok kielégítő pontossággal meghatározhatók. Az ilyen esetekre a szakirodalom azt ajánlja, hogy a CE a vízvonalhossz 2-4%-val legyen a tőkesúlyon keletkező oldalero támadáspontja mögött(!).

3.3 Az egyensúlyi helyzet motorosokon

Motoros kishajóknál a vitorlásokkal ellentétben a hajótest víz feletti részén keletkező erők sokkal kisebbek, mint a víz alatti részen keletkezők, a hajó jellemzően dőlés nélkül üzemel, a hajtást egy vízvonal alatt elhelyezkedő propeller biztosítja, és egyenes vonalú pályán haladva a hajó hossz tengelye azonos irányú a haladás irányával. Mindezekből kifolyólag az erők egyensúlya vízkiszorításos üzemi állapotban lényegesen egyszerűbb: a víz alatti részen keletkező R ellenállást a T tolóerő, a hajó tömegét (mg) pedig a felhajtóerő ($Disp.$) egyenlíti ki (3.3.1 ábra). Az erők hatásvonalai azonban általában általában nem esik egybe, így az R és T által alkotott erőpárból keletkezik egy nyomaték is, amelyet a vízkiszorítás súlypontjának vándorlása révén a hosszirányú stabilizáló nyomaték kompenzál. A tolóerő hatásvonalai a tengely elhelyezésének megfelelően lehet a G tömegközéppont alatt vagy felett, és ettől függően a hajó orrát emelheti, vagy süllyesztheti. A tolóerő függőleges komponense természetesen az egész testet emeli, így hozzájárul a vízkiszorítás kismértékű csökkenéséhez. A pontos egyensúly a mindenkori elrendezésnek megfelelően egyszerűen megtalálható.



3.3.1. ábra: Erők motoroson kis sebességnél



3.3.2. ábra: Sikló hajón keletkező erők

A 3.3.2. ábra egy sikló hajót mutat a rajta keletkező legfontosabb erőkkel. Az N a teljes felhajtóerőt (sztatikus és dinamikus összegét), mg a súlyerőt, T a tolóerőt, R_a a toldalékok (hajócsavar, hajtómű, tengely, tengelybak, stb.) ellenállását, az R_f a súrlódási erőt jelöli. Látható, hogy pl. a G pontra a súlyerőn kívül minden más erőnek van nyomatéka, az ellenállások és az N orrtrimmet, a tolóerő pedig az orrt kiemelő nyomatékot produkál. Egyensúly esetén a nyomatékok eredője zérus kell legyen. A rendszerben az R_f és az N támadáspontja és nagysága tud változni a trimmszög függvényében: ha alaphelyzetben nagy az orrtrimmet adó nyomaték, akkor az N előrébb vándorol addig, amíg egyensúly nem lesz. Ha kezdetben az orrt kiemelő nyomaték a nagyobb, akkor a növekvő fartrimmel az N hátrébb kerül, míg egyensúly nem lesz.

A hajó egyensúlyi helyzetére a G pont is befolyással lehet. Ha az optimális helyzethez képest a hajó súlypontja túlságosan előre kerül, akkor az így kialakuló kisebb trimm hatására a hidrodinamikai erő csökken. Eközben a nedvesített felület nő, így a felhajtóerő még elég lehet a sikláshoz. Ha nem, akkor a hajó merülése elkezd nőni addig, amíg a hidrodinamikai erőt kipótló hidrosztatikus felhajtóerő ki nem alakul. Akárhogy is történik, a súrlódási ellenállás mindkét esetben növekszik, amit a hidrodinamikai erők függőlegesebb állásából következő kisebb nyomási ellenállás sem kompenzál.

Ha a súlypont túlságosan hátra kerül, akkor megnövekszik a fartrimm. Ennek hatására megnő a nyomás (hidrodinamikai erő) a hajótest felületén, és csökken a nedvesített felület. A hajótest jobban kiemelkedik a vízből, ami kedvező, mert kisebb a súrlódási ellenállás, de mindeközben a nagy trimm miatt az N erőnek jelentős vízszintes komponense keletkezik, mely az össz-ellenállást mégis növeli. Ez a jelenség azonban sokszor dinamikus játszódik le, a hajó gyors bólogató lengéseit eredményezve (porpoising). A nagy fartrimm révén ugyanis az N erő hátrafelé vándorol és a hajó orrát lefelé billenti, aminek következtében az N erő támadáspontja újra előre kerül, ez pedig fartrimmet generál. A jelenség ismétlődik és „megöli” a hajó sebességét.

A haladás szempontjából tehát meghatározható egy optimális trimmszög, amelyet célszerű fenntartani a jó menettulajdonságok és a kezelhetőség érdekében

4. A HAJÓTEST

4.1 Jellegzetes hajótest-formák

A szükséges stabilitás, a tervezett sebesség (kis ellenállásra való törekvés), a belső elrendezés ergonómiája, a biztonság, a komfortra vonatkozó igények, az esztétika mind-mind befolyásolja a kishajó formáját. Ezek aránya minden hajónál változó, míg egy versenyhajónál minden más szempont a sebességnek van alárendelve, egy túrahajónál a komfort, a biztonság, a belső térkialakítás játszanak elsődleges szerepet.

Az uszonyos vitorlások esetében a legfontosabb szempontok a szükséges formastabilitás, a kis tömeg, és a kis ellenállásra való törekvés. Ezek miatt az uszonyos hajók többsége relatíve széles, lapos, kis merülésű hajótesttel rendelkezik, melynél a vízvonalhossz alig kisebb a legnagyobb testhossznál és a tükör általában függőleges.

A tókesúlyos hajókra régen a nagy(obb) tömeg és a nagy súlystabilitás és tengerállóság volt jellemző. Ezért ezek a hajók hosszukhoz képest többnyire keskenyek voltak, ami az alak és hullámellenállás (ld. később) szempontjából kedvező volt. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a tókesúlyos hajók mindig sokkal karcsúbbak, mint a jollek. Sőt, manapság megfigyelhető az a tendencia, hogy a tókesúlyos hajóknál is a hajó alakja és az ebből származó formastabilitás adja a stabilitás nagy részét, mert a tömeget a sebesség-növelés érdekében igyekeznek kivenni a hajóból. Így a mai tókesúlyos hajók – különösen a versenyhajók – sok tekintetben olyanok, mint egy nagy jolle. A túrahajóknál is megjelenik ugyanez, de sokkal konzolidáltabban: a komfort rendszerint tömeget is jelent. Viszont a régi, igen karcsú – ma már klasszikusnak nevezhető – vitorlások kora letűnt.

A versenyvitorlások alakját a mindenkori felmérési vagy előnyadási szabályok is befolyásolják. Itt a tervezőknek a szabályok adta keretek között kell megtalálni a legjobb előnyszámot és közben legnagyobb sebességet adó főméret-variációkat. Ez egyes rosszul megszerkesztett felmérési rendszereknél (ilyen volt pl. az IOR – International Offshore Rule) igen extrém és sajnos a jó tengerállóságot nélkülöző hajóformákat eredményezhet, amelyekkel esetleg lehet versenyt nyerni az adott értékelési rendszerben, de hajózni egyáltalán nem komfortos, és sokszor nem is biztonságos.

A jellemző sebesség és hossz meghatározzák, hogy alapvetően sikló vagy vízkiszorítós üzemben működik-e a hajó. Vitorlásoknál az üzemállapotot és így a mindenkori sebességet nem a hajó vezetője, hanem az időjárási körülmények határozzák meg, így csak siklásra nem lehet a hajót tervezni. Motorosoknál viszont ez minden további nélkül megtehető. Sikláshoz a hajó hátsó részén széles, lapos felületre van szükség, akár a vízbe érő tükörrel (pl. sikló motorosok). A gerinc hátrafelé emelkedése egyébként sem kedvez a siklási tulajdonságoknak, mert így nagyobb üzemi trimmje lesz a hajónak. A vízkiszorítós üzemhez ezzel szemben keskeny fenék vagy lapos, de fokozatosan csökkenő keresztmetset az optimális. Ebben az esetben nem is célszerű a tükör (kenu-far), de ha más szempontok miatt szükséges (pl. szélesebb fedélzet hátul), akkor semmiképpen sem szabad, hogy a vízbe érjen. Egyes vitorlásoknál, melyek akár siklásba is jöhetnek, ezek az ellentmondó követelmények igen komoly kihívást jelentenek a tervezőknek.

A továbbiakban a hajó formáját leginkább szemléltető oldalnézet és bordametszetek szokásos alakjait tárgyaljuk annak érdekében, hogy képet adjunk a mai kishajók formai jellegzetességeiről.

4.1.1 Profil

A hajó oldalnézetének legmeghatározóbb vízvonal feletti paraméterei a far alakja, a szabadoldal mértéke, a fedélzetfelhajlás, és az orr alakja. A víz alatti rész alakját a gerincvonal determinálja. (Vitorláshajóknál, régen a tőkesúly nem vált el a hajótesttől, annak szerves része volt, a kormány pedig közvetlenül a hajótőke mögött helyezkedett el, azzal egyfajta egységet alkotva (ld. később a tőkesúlynál levő 4.3.2. és 4.3.3. ábrát). Mára ezek teljesen különálló elemként vannak jelen a hajókon, kialakításukkal külön fejezetben foglalkozunk. Motorosoknál ilyen elemek nincsenek, a gerinc mellett a hajó oldalnézeti képét ritkán egy szkeg befolyásolhatja még.)

A hajótest gerincvonalának alakja alapvetően a vízkiszorítástól és a hajó üzemének jellegétől (vízkiszorításos vagy sikló) függ, és a minimális ellenállásra való törekvés határozza meg. A vízkiszorítás elosztásáról, a víz alatti rész teltségéről az ellenállás kapcsán a későbbiek során részletesen is lesz szó. Itt csak annyit jegyzünk meg, hogy a vitorlásokra általában az íves gerincvonal jellemző, mert a tükörnek a többnyire vízkiszorításos üzem miatt nem célszerű a vízbe érnie. Túrahajóknál a legénység a szokásosan hátul kialakított kockpitba koncentrálnak, ezzel a hajó hátsó része menet közben jobban terhelt. Annak érdekében, hogy a hajó tükre ne érjen a vízbe, vagy teltebb hátsó részt, vagy magasabban levő tükröt kell kialakítani. Mindkettő nagyobb gerincgörbületet eredményez, ami viszont nem kedvez a siklási tulajdonságoknak. Ezért azoknál a hajóknál, melyeket nagyobb sebességre (siklásra is) terveznek, igyekeznek lapos, kis ívű gerincet rajzolni. Ez kis merülést vagyis kis vízkiszorítást követel meg, ami általában csak a kifejezett versenyhajóknál oldható meg.



4.1.1. ábra: Túravitorlás gerincvonala

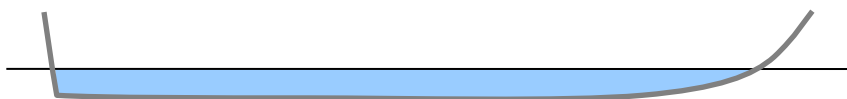


4.1.2. ábra: Versenyvitorlás gerincvonala

Motorosoknál pont fordított a helyzet: sokkal kevesebb a vízkiszorításos hajó (vagy a sikló hajók vízkiszorításos üzemének ideje). A vízkiszorításos motorosokra igazak az előbb elmondottak, sikló motorosoknál azonban a mélyen vízbe merülő, széles tükör és így a vízszintes gerincvonal szokásos, elől határozottan előredőlő egyenes, vagy enyhe ívű (konvex vagy konkáv) orrtőke. Speciális, igen nagy sebességre tervezett hajóknál szokták alkalmazni a lépcsős fenék-kialakítást, amely értelemeszerűen a gerincet is lépcsőssé teszi. Ennek lényege, hogy a hidrodinamikus felhajtóerő több felületre oszlik el, melyek a hajó hossza mentén egyenletesebb erőeloszlást és így kisebb trimmet jelentenek. A lépcsők száma akár több is lehet a hajó hossz-szélesség arányától függően: minél nagyobb az arány, annál inkább célszerű több lépcsőt kialakítani a szükséges hidrodinamikus felhajtóerő érdekében.



4.1.3. ábra: Vízkiszorításos túramotoros gerincvonal

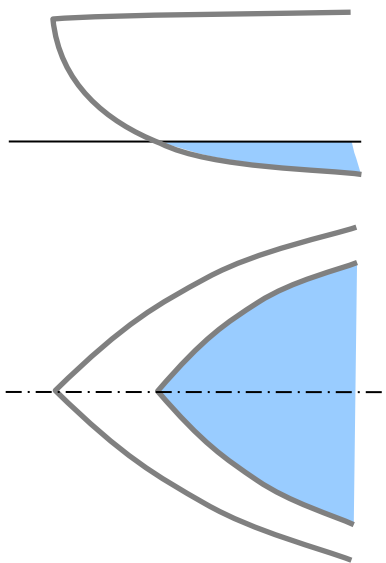


4.1.4. ábra: Síkló motoros gerincvonal



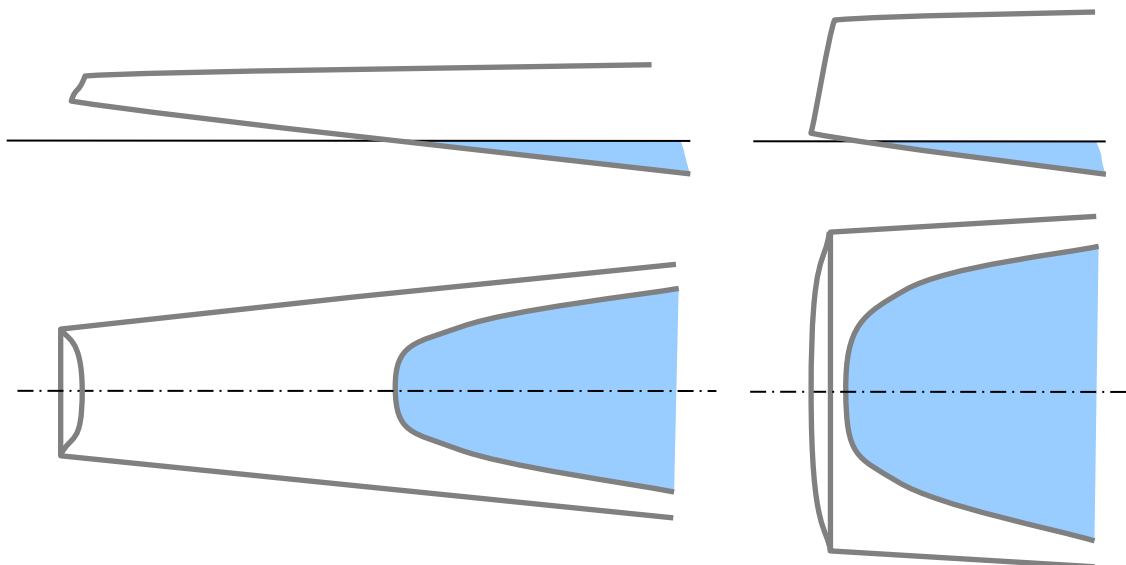
4.1.5. ábra: Nagysebességű hajó lépcsős gerince

Az orr és a far kialakítását a túlnyúlás mértéke határozza meg. Túlnyúlásnak a vízvonallal és a fedélzet végpontjai közötti szakaszt nevezzük. A túlnyúlások a hajó mindkét végén tartalék vízkiszorítást adnak, ami hullámos vízen komfortosabb mozgást biztosít (kisebb bólogató lengés). A vitorlás kishajók ritkán készülnek tükör nélkül, a tükör mérete általában összefüggésben van a fartúlnyúlással: minél kisebb a túlnyúlás, annál nagyobb a tükör (fordítva is igaz: minél nagyobb túlnyúlást akarunk, annál kisebb tükröt szokás rajzolni). A hosszú far a víz felett megdőlt helyzetben hozzájárul a vízvonalak meghosszabbodásához, ami az elméleti maximális sebességet növeli.



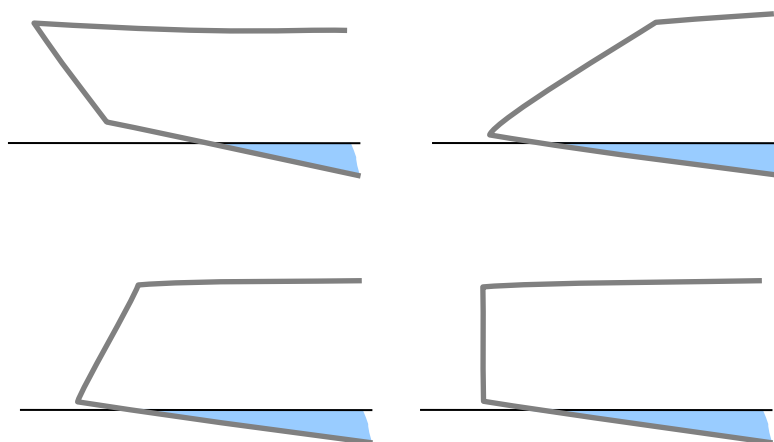
4.1.6. ábra: Tükör nélküli (kenu-) far

Így olyan hajóknál, ahol a vízvonalhossz – pl. a felmérési szabály miatt – korlátozott, ezzel a módszerrel tudták a sebességpotenciált növelni. Ugyanakkor, bizonyos orrkialakításoknál dőlés során a vízvonalak hátrébról kezdődnek, így ez a növekmény akár el is veszhet.

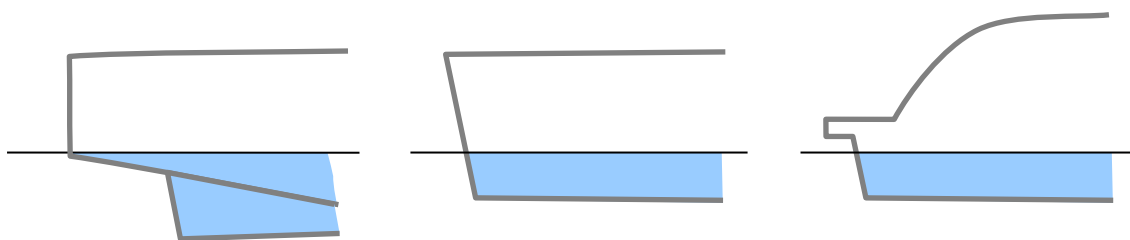


4.1.7. ábra: A fartúlnyúlás és a tükör viszonya

A far jellegére a tükör dőlése is hatást gyakorol. Klasszikus a hátradőlő – ez nagyobb fedélzetet, hátrébb elhelyezhető kockpítot jelent, az előre dőlő ennek éppen fordítottja, melynek előnye, hogy kisebb a tömeg hátul, ahol egyébként nem jó, ha nincs a hajótestnek hátul vízkiszorítása. Ez a forma a régi versenyhajókra jellemző, így a legénység is a hajó közepe felé koncentrált. Korunk vitorlásai közelmúltban még kismértékben előredöntött tükörrel készültek, ma azonban a függőleges kialakítás a divat. Motorosoknál, ha a motor beépített és a kihajtás egyenes, a széles tükör rendszerint függőleges, Z-hajtómű és külmotor esetén enyhén hátradőlő. Egy-egy régebbi hajótípusnál azonban a vízvonalt felett – főleg esztétikai megfontolásokból – alkalmazták az előredőlő, íves tükröt is (pl. Riva).

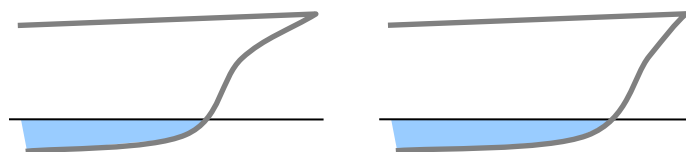


4.1.8. ábra: Vitorlások jellegzetes farkialakításai

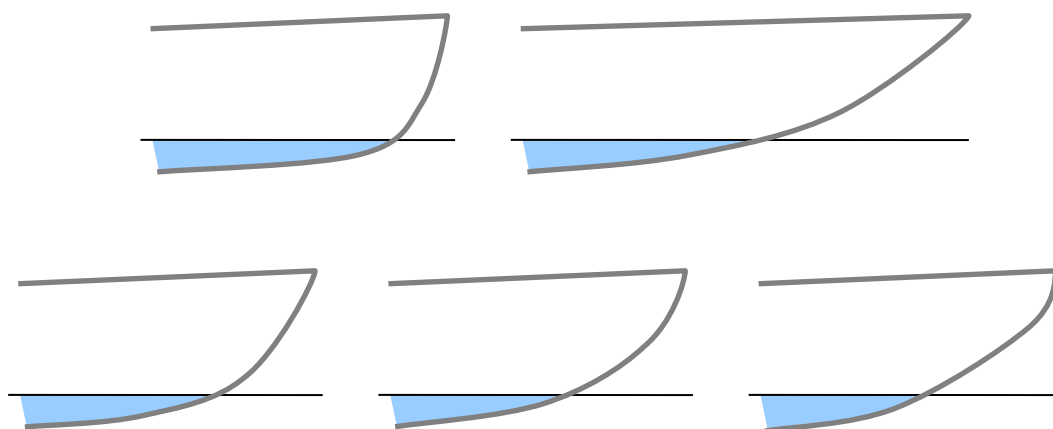


4.1.9. ábra: Motorosok farkialakításai

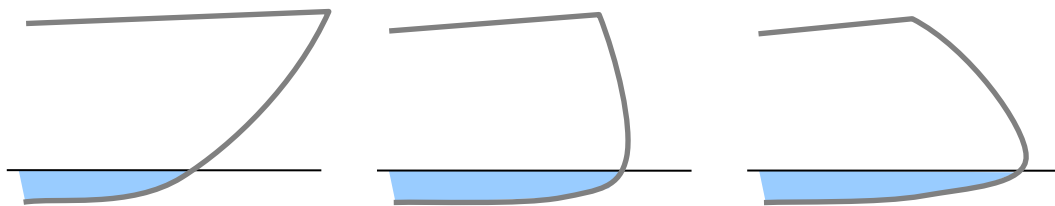
A vitorlások orrformája nagyon változó, a divat és a felmérési szabályok nagyban meghatározzák. Klasszikus formavilágot kölcsönöz a klipper-orr, és a kanál-orr, melynek a túlnyúlástól függően vannak hosszabb és rövidebb változatai. A kanál-forma lehet egyenletes görbületű (kör) vagy változó, alul vagy felül nagyobb görbületű. Ezek a megoldások elsősorban a hajó esztétikai megjelenésén változtatnak. Egyes régebbi katamaránokon (pl. Hobbie Cat) is alkalmazták a kanál-formát, ma azonban egyre inkább függőleges, sőt hátrahajló orrtőkével készítik ezeket a gyors hajókat. Ennek oka, hogy a modern katamaránok sokkal inkább átvágják magukat a hullámokon, mintsem azokon haladnak. Annak érdekében, hogy a hullám minél kisebb ellenállást fejtessen ki a hajótestre, a vízvonal feletti rész nem egy klasszikus hajóé, mely a fedélzetig valamilyen módon szélesedik, hanem tulajdonképpen a víz alatti rész fordítottja: felfelé is egyre keskenyedő, élben összefutó bordák egy a víz alatti részhez hasonlóan hátradöntött orrtőkével.



4.1.10. ábra: Klipper orr

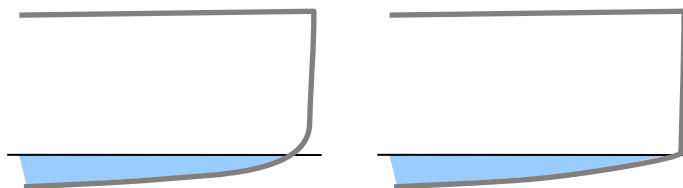


4.1.11. ábra: Kanál-orr változatai (rövid, hosszú, alul, közepén és felül görbülő változatok)

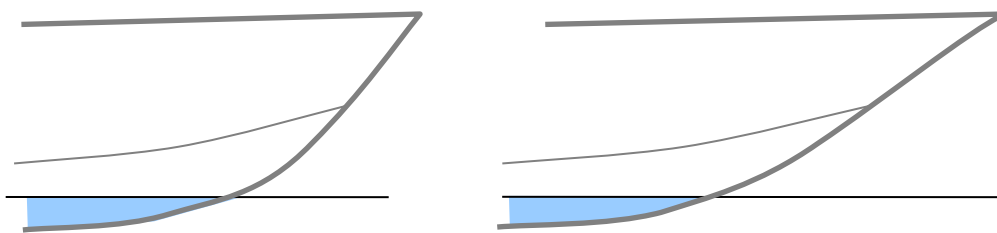


4.1.12. ábra: Katamaránok orrkialakítása

Függőleges orrtőkével nemcsak új, de nagyon régi vitorlásoknál is találkozunk, ezeket akkor alkalmazták előszeretettel, ha a testhosszúság (és nem az L_{WL}) volt maximalizálva. Így biztosítható adott testhossz mellett a legnagyobb vízvonalhossz, és ezzel potenciálisan gyorsabb hajót építhettek. E mellett a mai vitorlásokra azért is jellemző az ilyen kialakítás, mert pl. egy 38 lábás hajóba egy 42 lábás komfortját akarják beletenni, ami csak függőleges orrtőkével és függőleges tükörrel oldható meg. Egyes nagy sebességű új típusú motorosoknál is látni ilyen kialakítást, amelyet elsősorban a modern kor geometrikus formákat előszeretettel alkalmazó minimál-design stílusa és nem a hasznosság diktál. A függőleges orrtőke ugyanis nagy sebességnél, különösen hullámos vízen úgy viselkedik, mint egy kormány, és az ilyen hajó hajlamos a kitörésre, ami nagy sebességnél igen veszélyes. Ezért a sikló motorosok nagy többsége egyenes, vagy enyhén ívelt, határozottan, hosszan előredőlő orrtőkével készül, melynél az orrtőke és a gerinc között is nagy ívű az átmenet.

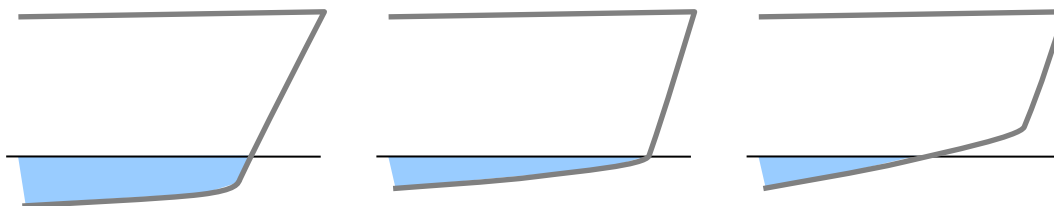


4.1.13. ábra: Vitorlások függőleges orrtőkével



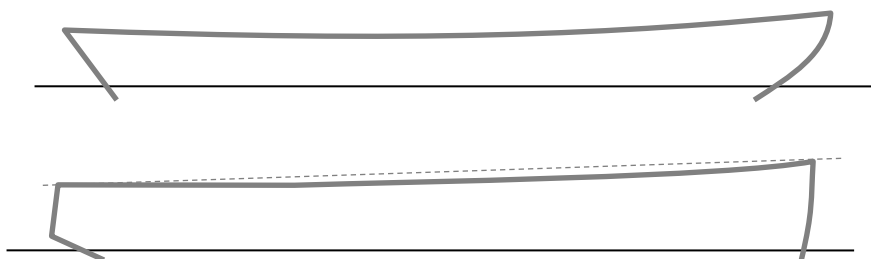
4.1.14. ábra: Motorosok orrkialakításai

Az éles sarokkal (az orrtőke és a gerinc találkozási pontja) rendelkező egyenes, előredőlő orrtőke a régebbi IOR hajókra volt jellemző. Ezeknél a sarok eléggé a vízvonallal alatt volt, ami ugyan jó volt a felmérés szerint, de az ilyen hajót hullámos vízen nehéz kormányozni. Később a sarokpontot egyre feljebb hozták – akár a vízvonallal fölé is.

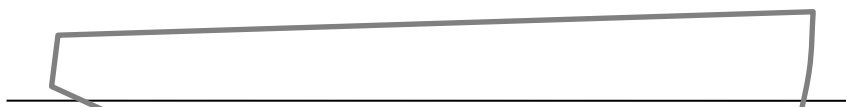


4.1.15. ábra: Sarkos orrtőkék

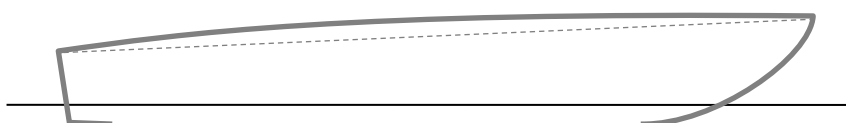
A hajó szabadoldal-magasságainak aránya megadja a fedélzetszéle-vonalat és a hajó karakterét is. Emellett azonban a különböző jellegű vonaloknak vannak fontos műszaki vonatkozásai is. Az elől-hátul nagyobb, közepén kisebb szabadoldal értékek íves fedélzetvonalat adnak, a klasszikus hajóknál az orrnál nagyobb a magasság, mint hátul. A végeken nagyobb szabadoldal hullámos vízen szárazabb hajót eredményez, és az elől levő belső terekben nagyobb a belmagasság.



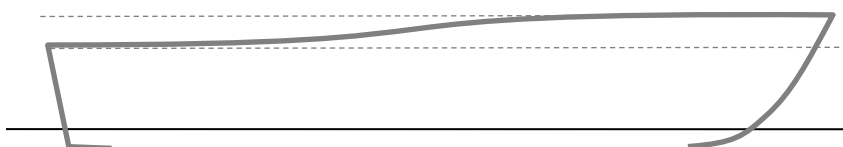
4.1.16. ábra: Íves fedélzetű vitorlások (klasszikus és modernebb)



4.1.17. ábra: Egyenes fedélzetvonal



4.1.18. ábra: Fordított fedélzethajlással rendelkező motoros



4.1.19. ábra: S alakú fedélzetszél

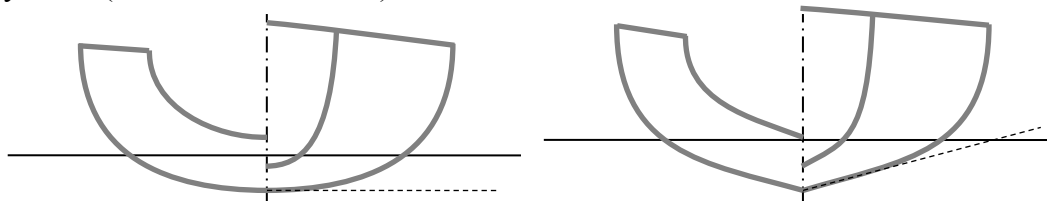
Modern hajókhoz jobban illik az egyenesebb vonal, akár egyforma szabadoldallal. Nagy sebességű motorosok fordított fedéltívvel szoktak rendelkezni, ez optikailag is sebességet kölcsönöz a formának. Túramotorosoknál gyakori az emelt orrfedéltet, és az S alakú fedéltetvonal. Versenyvitorlásoknál a szabadoldalt igyekeznek minimalizálni, mert felesleges súly, így kisebb lehet a szélnek kitett felület is, és alacsonyabbra kerülhet az eredő súlypont. Ugyanakkor az ilyen kialakítás nedvesebb menetet ad, és nagyobb dőlésnél esetleg hiányozhat a nagyobb magasságból adódó formastabilitás. Különösen igazak mindezek, ha a kis szabadoldal nem megfelelő súlystabilitással párosul. A szabadoldal minimális értékét a felmérési szabályok/osztályelőírások is szokták tartalmazni, de a szükséges hossz-szilárdság is befolyással lehet rá. (Volt olyan America's Cup versenyhajó, amely a kis oldalmagasság miatt egy verseny alatt két hullámhegyre felülve összetört, majd 2 percn belül el is süllyedt.) Túrahajóknál sokszor a belső tér növelése (állómagasság) érdekében nagyobb szabadoldal-magasságot erőltetnek, mint amekkorát a hajóhosszból származó arányok megengednének, így születnek nagyon csúf, aránytalan hajók is.

4.1.2 Bordametszet

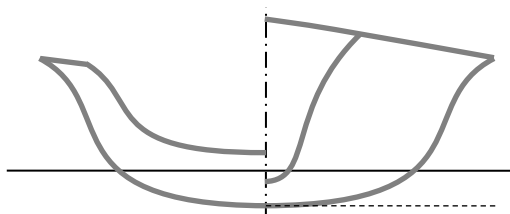
A borda alakjának sokféle jellemzője lehet: íves (kerek vagy U alakú) vagy sarkos, konkáv, sima vagy konvex vonal, kieső (nagy a fedéltet- és vízvonalszélesség aránya), a fenékfelhajlási szög, stb. Mindezeknek számos hatása lehet a hajó tulajdonságaira.

A kerek, körív bordaforma főleg vitorlásokra jellemző, előnye a kis nedvesített felületből származó relatíve kis súrlódási ellenállás és a megdőlt helyzetben is majdnem szimmetrikus vízvonalak. Hátrány a kis stabilitás, így az ilyen formák kifejezetten gyenge szélre optimálisak.

Az íves bordaformák általában konvex (alulról nézve domború) kialakításúak, esetleg S alakúak: a felső részen homorúak. A konvex bordákat szokták enyhén V alakúra (kis fenékfelhajlási szöggel) is rajzolni. Ez éles gerincet és így nagyobb iránystabilitást, nagyobb merülést eredményez. A homorú kialakításnak az uszonyos vitorláshajóknál van különösen jelentősége, ugyanis a fedéltetszélességet növelve erős szélben jobb kiülési lehetőséget biztosít. Az elől levő homorú bordák ugyanakkor minden hajón szárazabb fedéltetet eredményeznek (erős hullámszásban is).



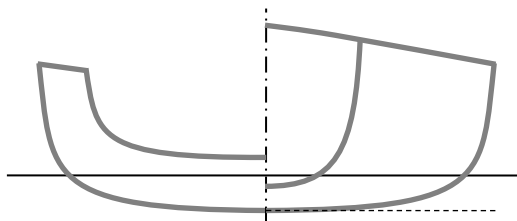
4.1.20. ábra: Kerek és íves-V bordák



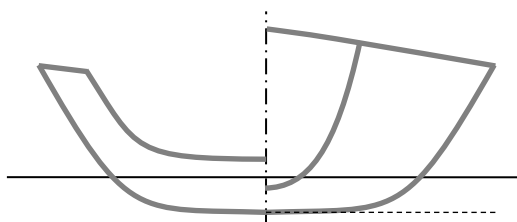
4.1.21. ábra: Homorú bordák

Az U alakú bordák révén a test- és vízvonalszélesség nagyjából megegyezik. Emiatt az ilyen kialakításnak a legnagyobb a formastabilitása (a vízvonalak igen teltek).

A kieső bordáknál a fedélnet- és vízvonalszélesség között nagy különbség van. Ez ugyanakkora szélesség mellett a korábban említettekhez képest kisebb ellenállást és stabilitást ad, ugyanakkora vízvonalszélesség mellett azonban a hajótest szélesebb, miáltal a légénység tömege kijjebb kerülhet.

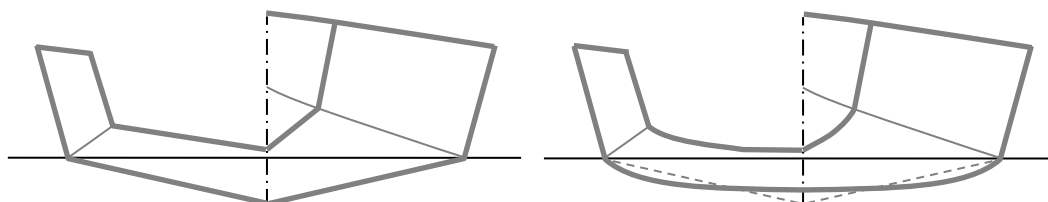


4.1.22. ábra: U bordák

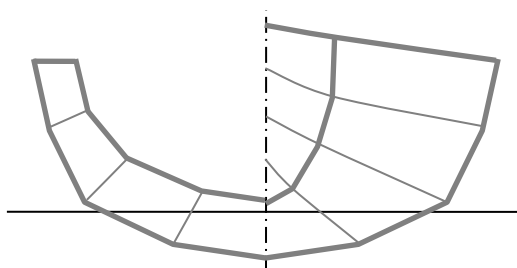


4.1.23. ábra: Kieső bordák

Vitorlások esetén a sarkos bordakialakításra elsősorban a könnyebb egyedi gyárthatóság adhat okot. A fémből vagy rétegelt lemezből készülő vitorlások egy, kettő, vagy akár három törésvonallal is készülnek. Több törésvonalat a kerek forma jobb megközelítése érdekében alkalmaznak. Egy sarokél esetén a kialakításnak – a könnyebb gyárthatóságon kívül – inkább hátrányai vannak, mert az ilyen formájú hajó dőlése során a vízvonalak igen drasztikusan eltorzulnak. Az ilyen hajótestre a nagyobb merülés és a kisebb stabilitás a jellemző.

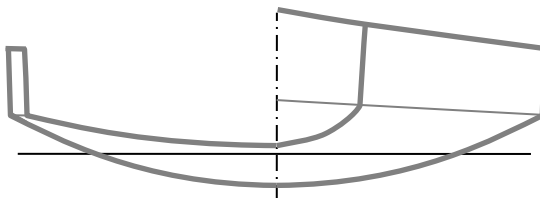


4.1.24. ábra: Sarkos vitorlás sík és ívelt fenékrésszel



4.1.25. ábra: Több éllel rendelkező sarkos vitorlás

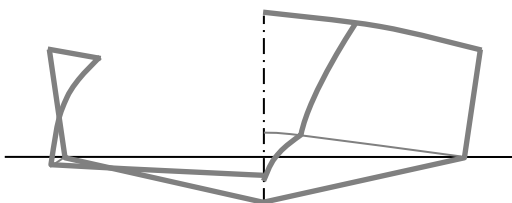
Ha a sarkos jelleget íves fenékkal kombinálják nagyobb stabilitás és kisebb merülés érhető el. Ilyen volt pl. a még ma is népszerű Csillaghajó. Ugyanakkor a mai modern vitorlásoknál is gyakran látni egy, szinte a hajó teljes hosszában vízvonal felett végig futó sarokélt, amely alatt a hajó íves, felette általában sima vonalakkal rendelkezik. Ezek a formák azonban már nagyban különböznek a Csillaghajónál látott formától.



4.1.26. ábra: Kerek bordájú modern vitorlás sarokéllal

Az ilyen kialakítás oka az, hogy adott szélesség mellett így lehet növelni a hátsó, lapos felület szélességét, amely a félszeles vagy raumos siklásnak kedvez. A sarokél elől hozzájárul a vízpermet szétvetéséhez, mellyel az ellenállás tovább csökkenhet. A sarokél magasságát ugyanakkor a jó cirkálóképességre tervezés szempontjai is befolyásolják: ha túl alacsonyan van a sarokél (közel a statikus vízvonalhoz), akkor megdőléskor hamar a vízbe ér, rontva a hajó vízvonalainak szimmetrikusságát. A sarokél alatt a hajók körívet követő metsetekkel rendelkeznek annak érdekében, hogy a vízvonalak megdőlt helyzetben se torzuljanak el nagyon.

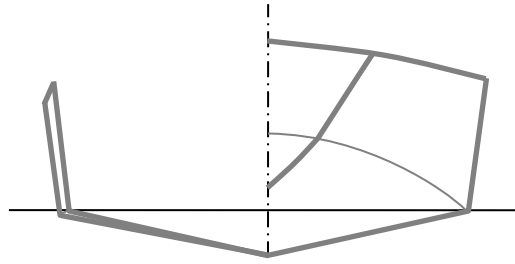
Sikló motorosoknál a sarkos kialakítás kifejezetten előny, sőt követelmény. A sarkos bordametszeteket legfőképpen egy töréssel (egy oldalsó sarokéllal) készítik. A fenékfelhajlási szög függvényében több kategóriát különböztetünk meg: laposfenekű hajók (10° alatt), mérsékelt V forma (20° alatt), mély V forma (20° - 25° között). A szöget a hajó tükrén mérik. A lapos fenekű hajók előnyös tulajdonsága, hogy ennél kell a legkisebb teljesítmény a siklásba hozatalhoz, hátránya viszont, hogy csak sima vízben kényelmes a hajó mozgása nagy sebesség mellett. Hullámos vízben az ilyen hajók „pattognak”. Mivel a vízfelszín még a védettebb helyeken sem mindig sima, ezért a hajók mérsékelt vagy ma már leginkább mély V formával készülnek. Az ilyen hajók nagy sebességnél átvágják magukat a hullámokon, a bukácsoló mozgás egyáltalán nem jellemző rájuk. A mély V formát szinte mindig siklólécekkal készítik. A siklóléceknek több funkciója van: egyrészt a nagy sík felületet merevítik, másrészt vízszintes kialakításuk miatt az ezen keletkező hidrodinamikus felhajtóerő iránya kedvezőbb, harmadrészt elősegítik, hogy nagy sebességnél a felcsapó víz minél előbb elhagyja a testet, így csökken a nedvesített felület és ezáltal az ellenállás.



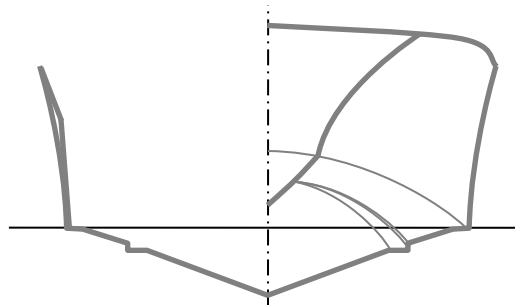
4.1.27. ábra: Lapos fenekű sikló motoros, változó fenékhajlással, homorú orrbordákkal

Az orrbordákat a sarokél alatt enyhén konvexre képezik, mert azt tapasztalták, hogy hullámos vízben és nagy sebességnél ez a forma ad jobb menettulajdonságokat. A sarokél felett elől a bordák általában vagy simák, vagy homorúak, a már említett szárazabb fedél-

zet miatt. A sarokél alatti homorú (konkáv) kialakításnak gyakorlatilag semmilyen előnye nincs. Hátrafelé a bordák vonala többnyire teljesen kiegyenesedik.



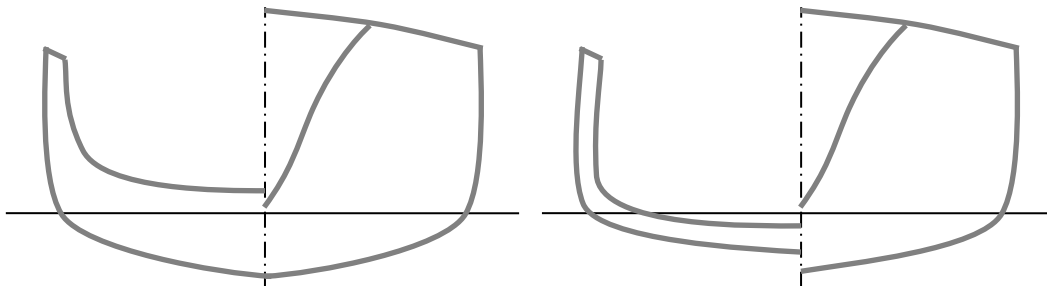
4.1.28. ábra: Mérsékelt V motoros



4.1.29. ábra: Sikló motoros mély V bordákkal, siklólécekkel, konstans fenékfelhajlási szöggel

További fontos jellemző a tükör és az oldalsó sarokél vízbe érésének mértéke valamint a fenék elcsavarodásának nagysága (a fenékfelhajlási szög változása). A tükör vízbe merülését a gerinc felhajlása, a hátul szükséges vízkiszorítás, a megkívánt trimm is befolyásolja. A sarokél vízbe érésével nagyobb a vízvonalszélesség, ami a kezdeti stabilitást növeli. Ezen kívül az itt kialakított siklóléceken már kis sebességnél is keletkezik hidrodinamikai felhajtóerő, amely a könnyebb felsikláshoz járul hozzá. Általánosan igaz, hogy a csavarodás a fenékrészen (változó fenékfelhajlási szög) nagyobb ellenállást eredményez és a hidrodinamikai felhajtóerő szempontjából sem kedvező. Az itt felsorolt paraméterek természetesen egymással is szoros összefüggésben vannak, egyik kialakítása a másik értéket is befolyásolja.

A teljes sikláshoz kedvező sarkos bordaforma mellett a motorosoknál is megtalálható a kerek vagy íves bordaforma is, elsősorban a vízkiszorításos és fél-sikló üzemállapotokra tervezett hajóknál. Ilyen hajók jellegzetes bordametszeteit mutatja a 4.1.30. ábra.



4.1.30. ábra: Vízkiszorításos és fél-sikló motorosok bordái

4.2 Stabilitás

Természetesen a stabilitás számításának alapelvei a kishajóknál is ugyanazok, mint amelyeket végigtárgyaltunk a Hajók elmélete c. tantárgy keretén belül. Az ott elmondottak minden további nélkül érvényesek a kishajókra is. Vannak azonban olyan speciális kishajós jellegzetességek, amelyek miatt a stabilitás témakörét itt is fontosnak tartjuk egy kicsit jobban körüljárni. A vitorlášhajók stabilitásával ebben a fejezetben foglalkozunk kicsit részletesebben, a motorosok különleges stabilitási kérdéseit pedig – mivel azok jellemzően a nagy sebességből származnak – az ellenállással foglalkozó fejezetben tárgyaljuk. A fejezet végén bemutatjuk a (motoros és vitorlás) kishajókra vonatkozó stabilitással kapcsolatos előírások lényegét és a számítás metodikáját.

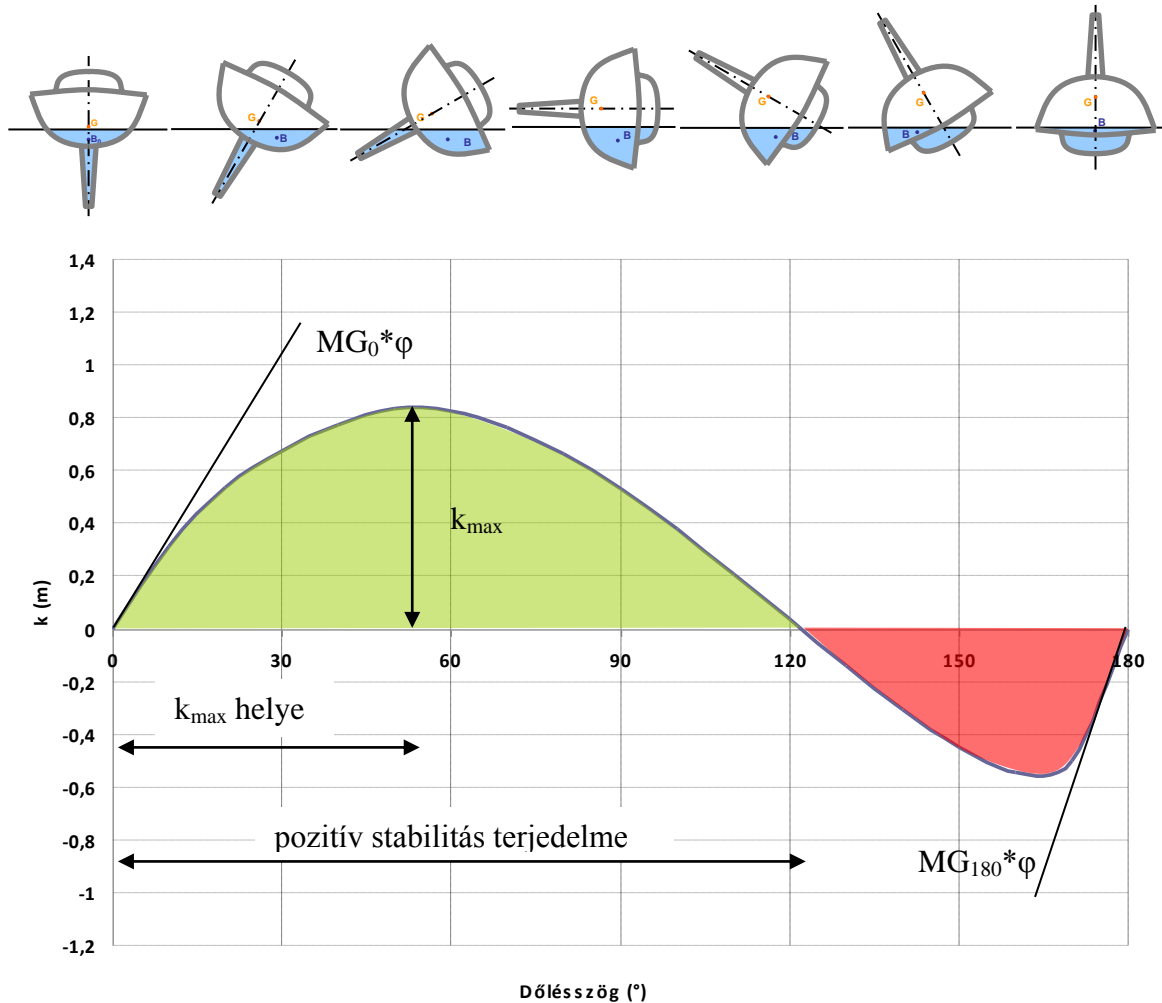
4.2.1 A vitorlások stabilitásáról általában

Korábban, a nagyhajók stabilitásvizsgálatánál különböző terhelési esetekhez vizsgáltuk a mértékadó billentőnyomaték hatására bekövetkező elbillenést, valamint az egyéb kritériumok teljesülését. A hajó adott terhelési esethez (mg és VCG) tartozó stabilitási diagramjának csak a kisebb, maximum $50\text{--}60^\circ$ -ig terjedő szakasza volt igazán érdekes, ennél nagyobb dőlési tartománnyal csak nagyon kevés esetben kell foglalkozni. Egy vitorlášhajó azonban teljesen más „üzemmóddal” rendelkezik. A hajó terhelése nem változik olyan jelentősen, kisebb hajóknál csak a személybefogadó képesség szerint különböztetünk meg 1-2 terhelési esetet, nagyobbaknál a kiegészítők mennyiségének változását is figyelembe kell venni. A vitorlás hajótól azonban nem várjuk el, hogy üzemszerűen dőlés nélkül ússzon, sőt, akár $20\text{--}25^\circ$ -os dölések is kialakulhatnak egy-egy erősszeles menetben. Ugyanakkor természetesen itt is igaz, hogy kisebb dőlés mellett kényelmesebb a „munkavégzés”, tehát, ha lehetséges, igyekezünk a hajót kis üzemi dőlésre tervezni. A legénység tömege sok esetben a hajó tömegével összemérhető, és így a legénység elhelyezkedése jelentősen befolyásol(hat)ja a hajó stabilitását, célszerűen a kedvező irányba. Sőt, ma számos hajó rendelkezik olyan eszközzel, ami a hajó stabilitását ezen túlmenően is növelni képes (pl. vízballaszt, billenthető tőkesúly). Mindezek a stabilitási diagramot aszimmetrikussá teszik, és ezért vizsgálatainknál a kedvezőtlenebb állapotot kell elsősorban figyelembe vennünk, annak ellenére, hogy a hajót természetesen a „kedvezőbb oldalon” szeretnénk használni.

Tengeri és óceáni körülmények között olyan szélviszonyok és időjárási körülmények is kialakulhatnak, amelyek a hajó felborulásához vezetnek. Annak érdekében, hogy egy ilyen eset ne járjon feltétlenül a hajó elvesztésével, a stabilitást nem csak a kisebb – nagyhajóknál szokásos – dőlésszög-tartományban vizsgáljuk, hanem a teljes, 180° -ig terjedő stabilitási diagrammal dolgozunk. Mindez természetesen feltételezi, hogy a hajó ekkora dőlésnél se árasztódjon el. Ez nem mondható el minden kishajóra, éppen ezért a ma alkalmazandó előírások az elárasztási szöveget a nagyhajós gyakorlathoz hasonlóan, mint korlátot veszik figyelembe. Ilyen nagy feltételezett döléseknél egy nagyhajónál természetesen a rakomány elmozdulása biztosan bekövetkezik (többek között ezért sem foglalkozunk már ilyen nagy dölésekkel), kishajóknál viszont általában azzal a közelítéssel élünk, hogy a hajó eredeti (borulás előtti) tömegelrendezése megmarad. Ez nyilvánvalóan nem igaz, hiszen a legénység esetleg ki- vagy éppen beesik a hajóba, mégis az egyszerűség kedvéért ezzel számolunk.

A stabilitási diagramról – melyet a korábbiakban precízen statikus stabilizáló nyomatéki karok diagramjának, vagy Reed-diagramnak neveztünk, és amelyet az angolszász szakirodalmak általában GZ görbének említenek – leolvasható hajóra vonatkozó fontos jellemzők természetesen ugyanazok, mint amelyeket a nagyhajós gyakorlatban használtunk: a

maximális kar értéke, a dőlésszög, amelynél ez jelentkezik, a pozitív stabilitás terjedelme, a görbe alatti pozitív terület valamint a kezdeti metacentrikus magasság (MG_0) értéke (4.2.1 ábra). Mivel azonban a görbét 180° -ig rajzoljuk meg, megjeleníthető a negatív szakasz alatti terület is, és a felborult állapothoz tartozó kezdeti metacentrikus magasság is (MG_{180}). Ezek a paraméterek a felborult, és úgy stabilan úszó hajó visszaállíthatóságáról adnak hasznos információt. Ha ugyanis az MG_{180} nagy, vagyis ha a görbe meredeken fut be a 180° -hoz, az azt jelenti, hogy egy átfordult, de még szerkezetileg ép hajó visszaállításához nagy külső nyomatékokra (hullámváz és szél) van szükség.



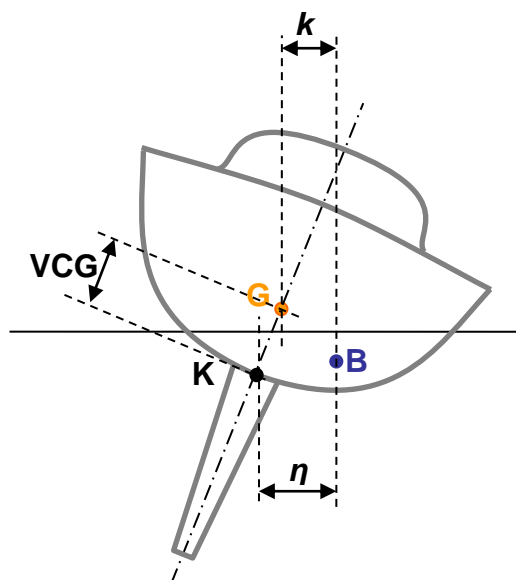
4.2.1. ábra: Vitorláshajó Reed-diagramja

A vitorlások stabilitása kapcsán két sokszor emlegetett fogalom, a súly- és formastabilitás. A korábbi tanulmányokból ismeretes, hogy egy hajó stabilizáló nyomatéka a hajó tömegétől és a stabilizáló nyomaték karjától függ. E kar egy adott dőlésszögnél az aktuális vízkiszorítás súlypontján (B) átmenő függőleges (a felhajtóerő hatásvonala) és a G pont közötti távolság, melynek nagyságát egyrészt befolyásolja a G pont magassága, másrészt a hajótest formájától és vízkiszorításától függő B pont aktuális helyzete. A G pont helyzetét a VCG értékkel számszerűsíthetjük, a felhajtóerő hatásvonalát pedig célszerű egy a G ponttól független, egyébként szabadon kiválasztható viszonyítási ponttól mért távolsággal megadni. E pont a szokásos hajómérnöki gyakorlatban az alappont, vagyis a hajó alapvonalának és szimmetriavonalának metszéspontja (K pont a 4.2.2.

ábrán). Így a B pont helyzetét jellemző érték a pantokaréna. Amennyire lehet különválasztva az egyes, stabilitást befolyásoló tényezőket, a stabilizáló nyomatéokra a:

$$M_{st} = \rho \cdot g \cdot V \cdot k = \rho \cdot g \cdot V \cdot (\eta - \overline{KG} \cdot \sin(\varphi)) = \rho \cdot g \cdot V \cdot (\eta - VCG \cdot \sin(\varphi))$$

korábbról jól ismert képletet írhatjuk fel. A képletben a tömeg és a tömegközéppont helyzete a súly-, a B pont keresztirányú helyzetét mutató pantokaréna pedig a formastabilitást jellemzi. A súly- és formastabilitás számszakilag nem különíthető el részekre, hiszen a pantokaréna és a VCG értéke is változhat a vízkiszorítással. Ha azonban azonos vízkiszorítású hajókat vizsgálunk, akkor az η már csak az alaktól (B_{WL} -től, jellemző bordaformától, stb.), a VCG pedig a tömegek elrendezésétől függ. Az elkülönítés tehát csak a stabilizáló karok szintjén valósítható meg. (Ha úgy tetszik, lehet mondani, hogy az η a formastabilitási kar, a $VCG \cdot \sin(\varphi)$ pedig az ezt pozitív vagy negatív értelemben módosító súlystabilitási kar.)



4.2.2. ábra: A stabilizáló nyomatéki karok

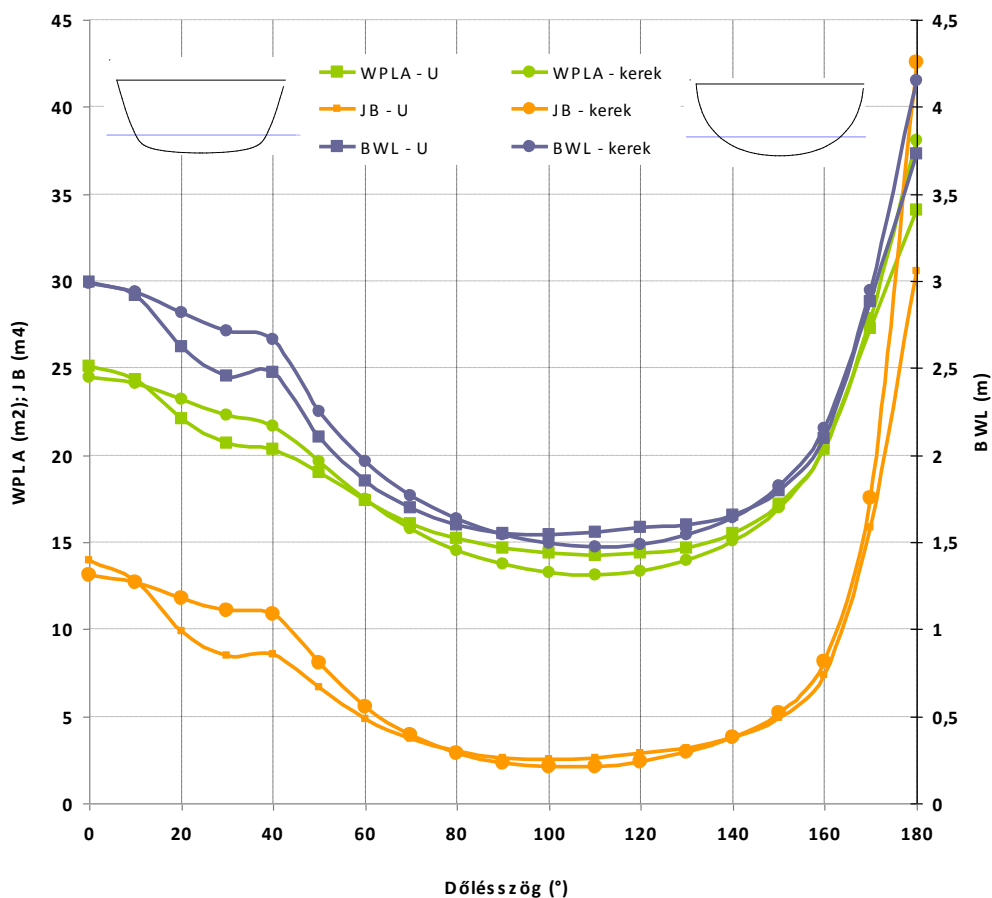
A hajó megdőléseivel a tömeg és annak középpontja (általában) nem változik. A hajó vízbe merült alakja azonban nagyon más lehet a vízszintes úszáshoz tartozó alakhoz képest, ezért a formastabilitást a hajótest víz feletti részeinek kialakítása is befolyásolja. A következőkben ezt, vagyis a hajó alakjának stabilitásra gyakorolt hatását részletesebben is megtárgyaljuk. **Megjegyezzük azonban, hogy a stabilitást meghatározó paramétereket külön vizsgálni csak nagyon óvatosan szabad, mert az egyes paraméterek változtatása a többi paraméter kényszerű megváltozását/megváltoztatását vagy szabad megváltoztathatóságát is eredményezheti.** Ezért egy paraméter stabilitásra kifejtett hatása nem feltétlenül egyértelmű. Például a szélesség növelése általában kezdetben növeli a stabilizáló nyomatékot, ha azonban ez a súlypont emelkedésével jár együtt, már korántsem olyan biztos, hogy javul a hajó stabilitása. A következő általános vizsgálatoknál ezt mindig tartsuk szem előtt.

4.2.2 Formastabilitás

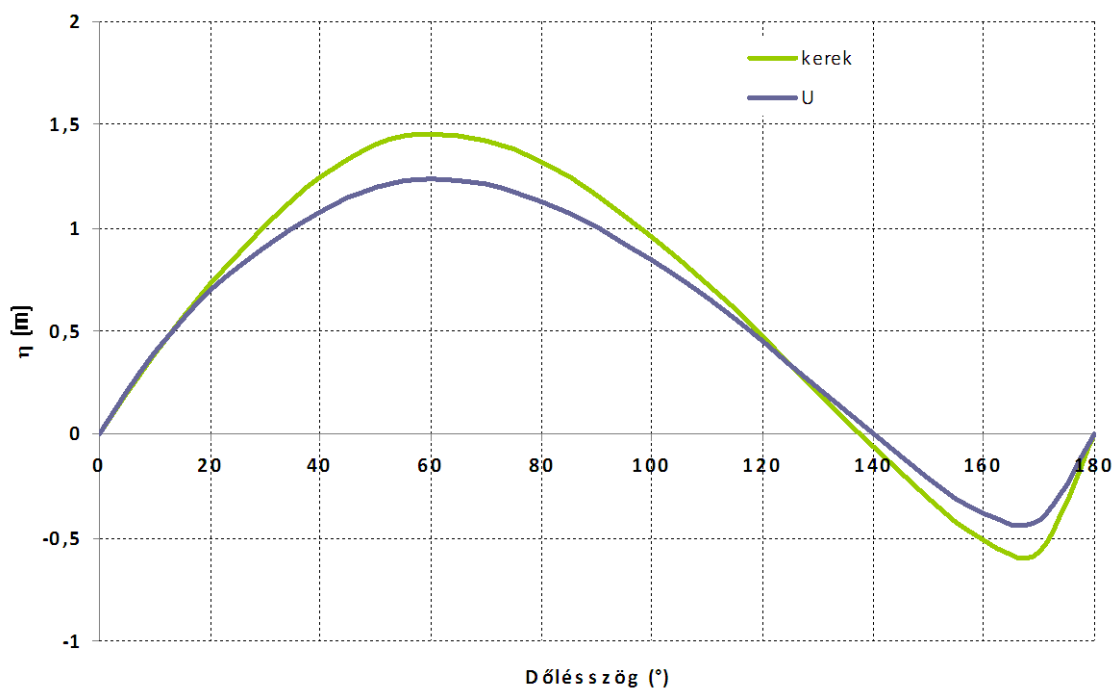
A hajó alakjának stabilitásra gyakorolt hatását az előzőek alapján tehát nem a k hanem az η dőlésszög szerinti változásával szemléltetjük úgy, hogy a vizsgálat során az egymással összehasonlítható változatok tömege (vízkiszorítása) mindig ugyanakkora. Ebben az esetben a pantokarénák klasszikus diagramja egy egymás feletti, és ezért semmit sem mutató pontsereg lenne, éppen ezért nem ezt, hanem egy egyszerű η - φ diagramot rajzolunk fel. (Ez tulajdonképpen egy olyan Reed-diagram, melynél a súlypontot a K pontba vesszük fel, vagyis a $VCG=0$).

4.2.2.1 Bordaforma

A korábban ismertetett számos jellegzetes bordametszet közül most csak egy kerek és egy U bordákkal rendelkező hajót vizsgálunk meg a bordaforma stabilitásra gyakorolt hatásának elemzéseként. A két változat azonos vízvonalszélességgel, szélességgel, oldalmagassággal és vízkiszorítással rendelkezik. A 4.2.3. ábrán láthatók a vízvonalterület, annak keresztirányú másodrendű nyomatéka (J_B), és a vízvonalszélesség megváltozása a teljes dőlési tartományon. Az U bordájú hajó vízvonalszélessége egy adott kis érték után drasztikusabban kezd el csökkenni, mint a kerek bordájú hajó B_{WL} -je. Ennek oka, hogy az U formából adódó „sarkosabb” medersor a dőlés folyamán egyre inkább vízbe kerül. A B_{WL} csökkenése maga után vonja a vízvonalterület és a J_B arányos csökkenését is. Mindennek a pantokaréna értékekre gyakorolt hatását a 4.2.4. ábra szemlélteti.



4.2.3. ábra: U és kerek bordaforma hatása egyes hajógeometriai jellemzőkre

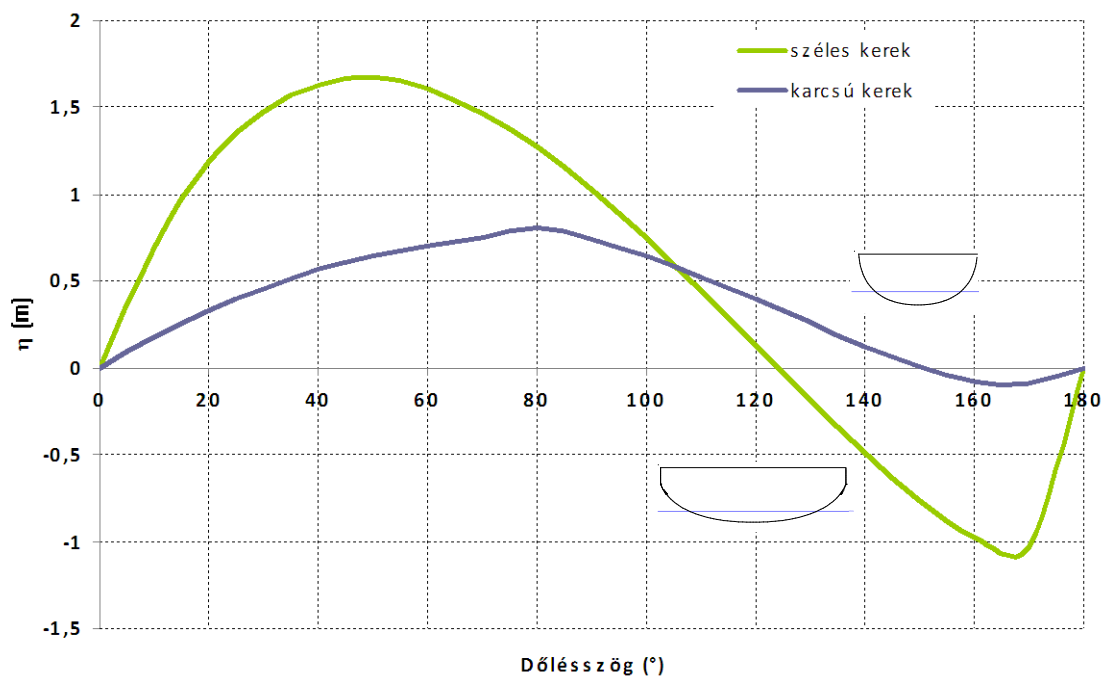


4.2.4. ábra: A pantokaréna különbsége kerek és U formánál

A diagramról látható, hogy a kerek bordájú hajó formastabilitása nagyobb szögig növekszik egyenletesen. Másképp fogalmazva az U bordájú hajó stabilitása előbb kezd el csökkenni a kerekhez képest. A két változat formastabilitásának terjedelme nagyjából azonos, a maximális nyomatéki kar a kerek formájú hajónál azonban kb. 20%-kal nagyobb.

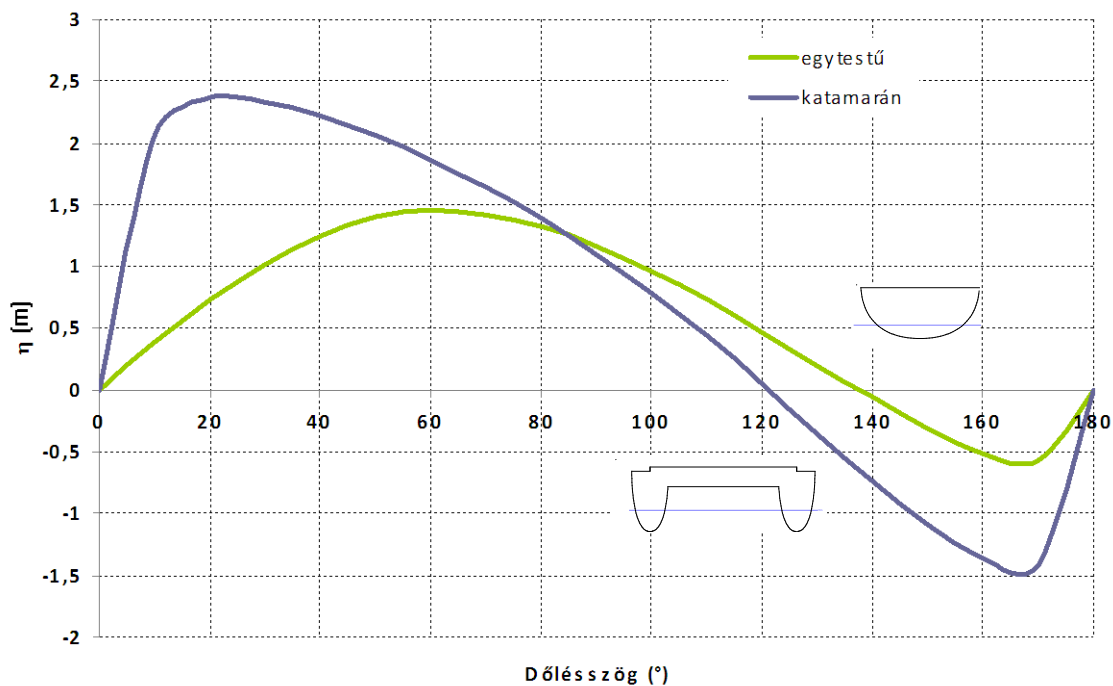
4.2.2.2 Szélesség

A 4.2.5. ábra a pantokaréna értékeket szemlélteti egy karcsú és egy modern, lapos, széles vitorlás esetén. A két hajó bordaformája hasonlóan kör keresztmetszetű, a karcsú hajóé azonban értelemszerűen sokkal kisebb sugarakkal készül, mint a szélesé. A két hajó vízki-szorítása most is azonos, a karcsú változat vízvonalszélessége kisebb, merülése nagyobb, mint a szélesé. A *B* pont keresztirányú elvándorlásából származó, formastabilitásban jelentkező nagy különbség a szélesebb hajó javára jól látható. A széles hajó kezdeti stabilitása, és a maximális kar értéke is jóval nagyobb, mint a másik változaté, ellenben a stabilitás tartománya a karcsú hajónak nagyobb. Sőt, ennek a kialakításnak az az előnye is megvan, hogy egy teljes átfordulás esetén lényegesen kisebb erőhatásra van szükség a hajó visszaállításához.



4.2.5. ábra: A szélesség hatása az η értékére

A következőkben vizsgáljuk meg, milyen formastabilitása van egy egytestű hajónak és egy ugyanolyan vízkiszorítású, de kialakításából következően lényegesen szélesebb kataránának. Az azonos vízkiszorításhoz tartozó pantokaréna értékek a dőlésszög függvényében a 4.2.6. ábra szerint alakulnak.

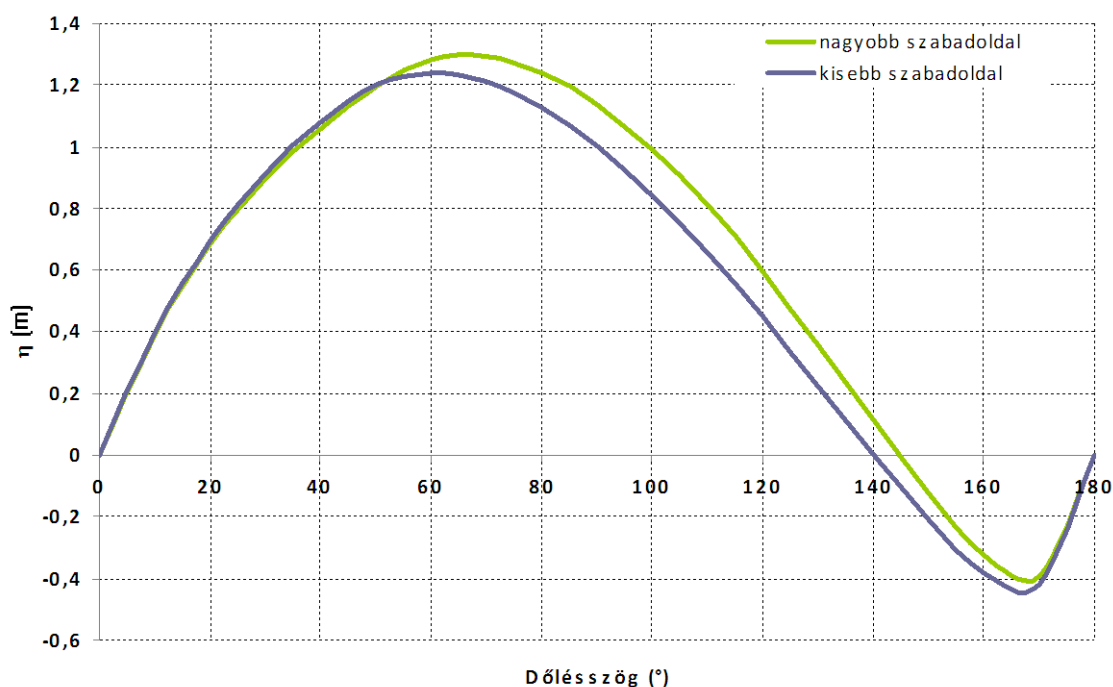


4.2.6. ábra: A hajóalak hatása a stabilitási diagramra

Az egytestű hajó kezdeti MG -je a relatíve kis szélesség miatt alacsony, a katamaráné ehhez képest óriási. Ez meg is mutatkozik a görbéken: a katamaráné nagyon meredeken indul, igen nagy a maximális nyomatéki kar. Az egytestű vitorlás maximális nyomatéki karja nem olyan nagy, de sokkal nagyobb szögénél (kb. 60° -nál) jelentkeznek, a katamarán esetén ez a szög sokkal kisebb. A vizsgált túrakatamaránál ez 20° környékére adódik, azonban kisebb oldalmagasságú versenykatamaránok esetén ez az érték akár 10° alatt is lehet. Innen a katamarán formából származó stabilizáló nyomatéka drasztikusan csökken. Az ábra alapján azonban meg kell jegyezni, hogy a stabilitás terjedelme azonban nem számottevően kisebb a katamarán esetén (120° a kb. 140° -hez képest). Hangsúlyozzuk, hogy mindez azonban csak a formából származó stabilitásra vonatkozik. Egy tökesúlyos vitorlásnál az η értékét a súlypont általában csak csekély mértékben rontja (versenyhajóknál még inkább javítja is). Egy katamarán súlypontja azonban mindig jóval az alappont felett helyezkedik el és ez számottevően befolyásolja a stabilitás terjedelmét – de ez már nem a forma-, hanem a súlystabilitás témaköre (további részleteket ld. ott).

4.2.2.3 Szabadoldal

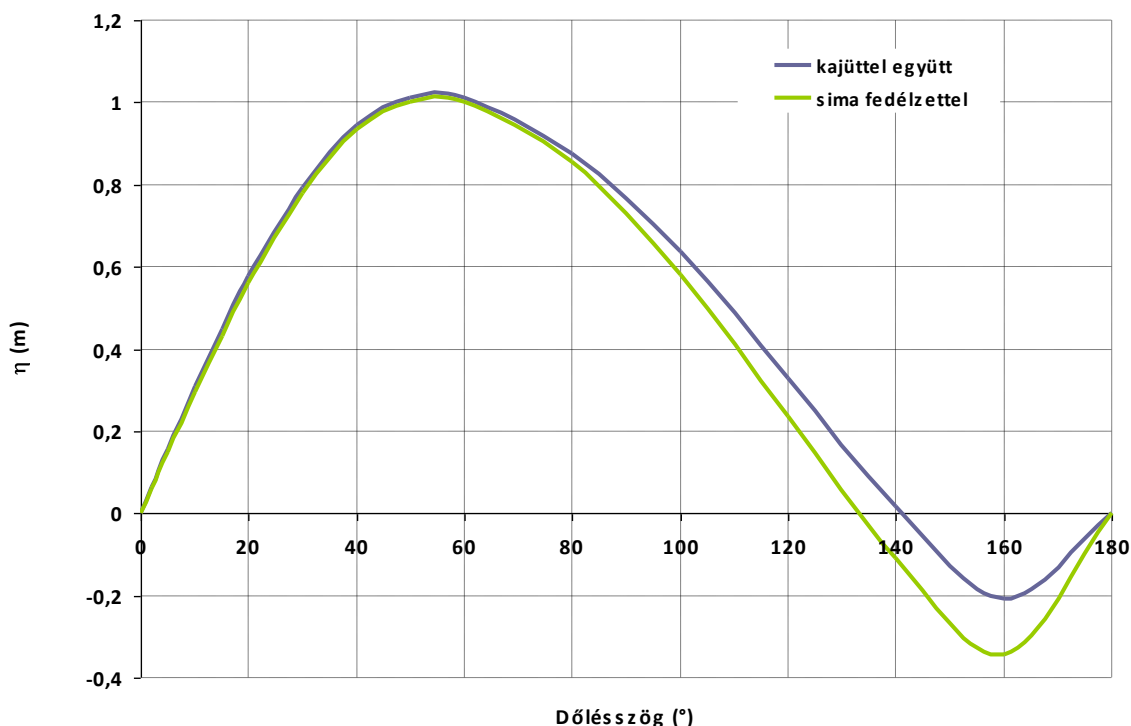
A stabilitási diagram általában egy nagyjából lineáris szakasszal kezdődik. A nagyjából egyenes növekedés után egy adott dőlésszögénél a kar növekedésének üteme határozottan elkezd csökkenni. Azt, hogy ez milyen dőlésszögénél történik, alapvetően a hajó szabadoldal magassága befolyásolja. Ennek oka az, hogy a fedélzet vízbeérése (vagy a hajófenék kiemelkedése) után a vízvonalterület alakja (nagysága és teltsége) hirtelen elkezd csökkenni. Ez a paraméter tehát értelemszerűen csak a diagram középső szakaszára van csak hatással, az elejére és végére nem. A 4.2.7. ábrán látható, hogy a szabadoldal magasságának megnövelése nem csak a maximális kar értékét, de azt a szöget is növeli, ahol ez kialakul. Ez általában a stabilitás terjedelmének növekedését is maga után vonja.



4.2.7. ábra: A szabadoldal hatása a Reed diagramra

4.2.2.4 Kajüttető és kockpit

Mivel a vitorlásoknál nagy dölésekre is lehet számítani, érdemes megvizsgálni a kajüttető és a cockpit stabilitásra gyakorolt hatását is. Nagyobb döléseknél – a hajótest teljes zártságát feltételezve – a kajüttető és cockpit vízbe merülésével azok térfogata is befolyásolja a B pont elhelyezkedését és így a stabilitást is. A 4.2.8. ábrán bemutatott két görbe egy teljesen sima fedélzettel rendelkező egyszerűsített modell és a ténylegesen megépült hajó stabilitási diagramját mutatja. A nyilvánvaló különbségek szinte minden hajóra ugyanilyen előjellel igazak, vagyis elmondható, hogy a kajüttető és cockpit általában igen jó hatással van a hajó stabilitásának terjedelmére és az MG_{180} értékére.



4.2.8. ábra: A kajüttető és cockpit hatása

Éppen emiatt egyes óceáni versenyhajókon – amelyeknél korábban sokszor jelentett problémát, hogy a hajó felborulása után ugyan a hajó nem árasztódott és süllyedt el, de az épen marad tökesúly ellenére sem volt képes visszaállni normál úszáshelyzetbe a nagy MG_{180} miatt – ma már előírják a kajüttető által határolt térfogat minimumát. Ilyen hajó még ezen előírás előtti régebbi, és újabb változatát mutatja a 4.2.9. ábra.

4.2.2.5 A fedélzet szélességének a vízvonal szélességéhez viszonyított aránya

Egyes vitorlásoknál a stabilizáló nyomaték növelése érdekében a legénység tömegének kijebb helyezését úgy oldják meg, hogy a fedélzeten a hajót lényegesen szélesebbre tervezzik, mint vízvonalon. Az ilyen bordaformát „kieső” bordáknak nevezik. A fedélzet szélességének a vízvonal szélességéhez viszonyított aránya önmagában is hatással van a stabilitási diagramra, melyet a 4.2.10. ábrán szemléltetünk. A kis dőlésszögeknél a szélesebb vízvonal feletti hajótest hatása még alig érzékelhető, de nagyobb szögeknél határozottan javul a nyomatéki kar. Ahogy ez lenni szokott, ez kisebb stabilitásterjedelmet és nagyobb MG_{180} -at eredményez, ami viszont tengerállóság szempontjából nem kedvező. Látható tehát, hogy a szélesség növelése – akár a hajótest egészét, akár csak a fedélzetet illetően –

csak kisebb dőlésszög tartományban kedvező, a hajó tengerállóságához nem igazán járul hozzá.

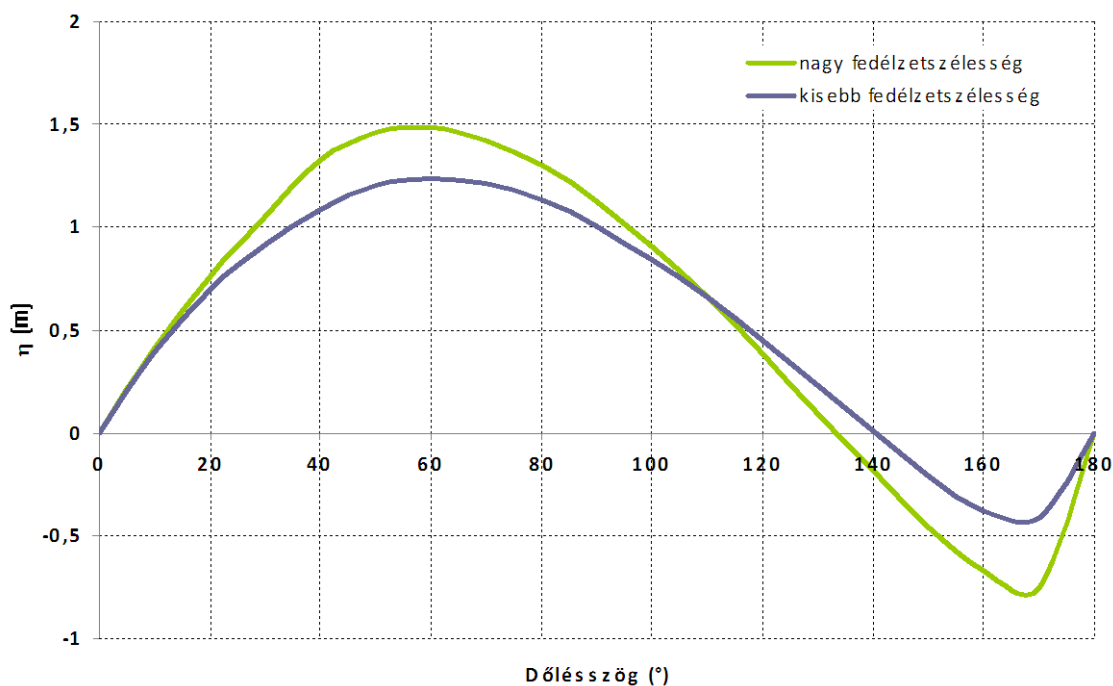


forrás: www.finot.com



forrás: www.xsracing.org

4.2.9. ábra: Régi és mai 60 lábás offshore versenyhajó, kicsi és lényegesen nagyobb kajüttetővel

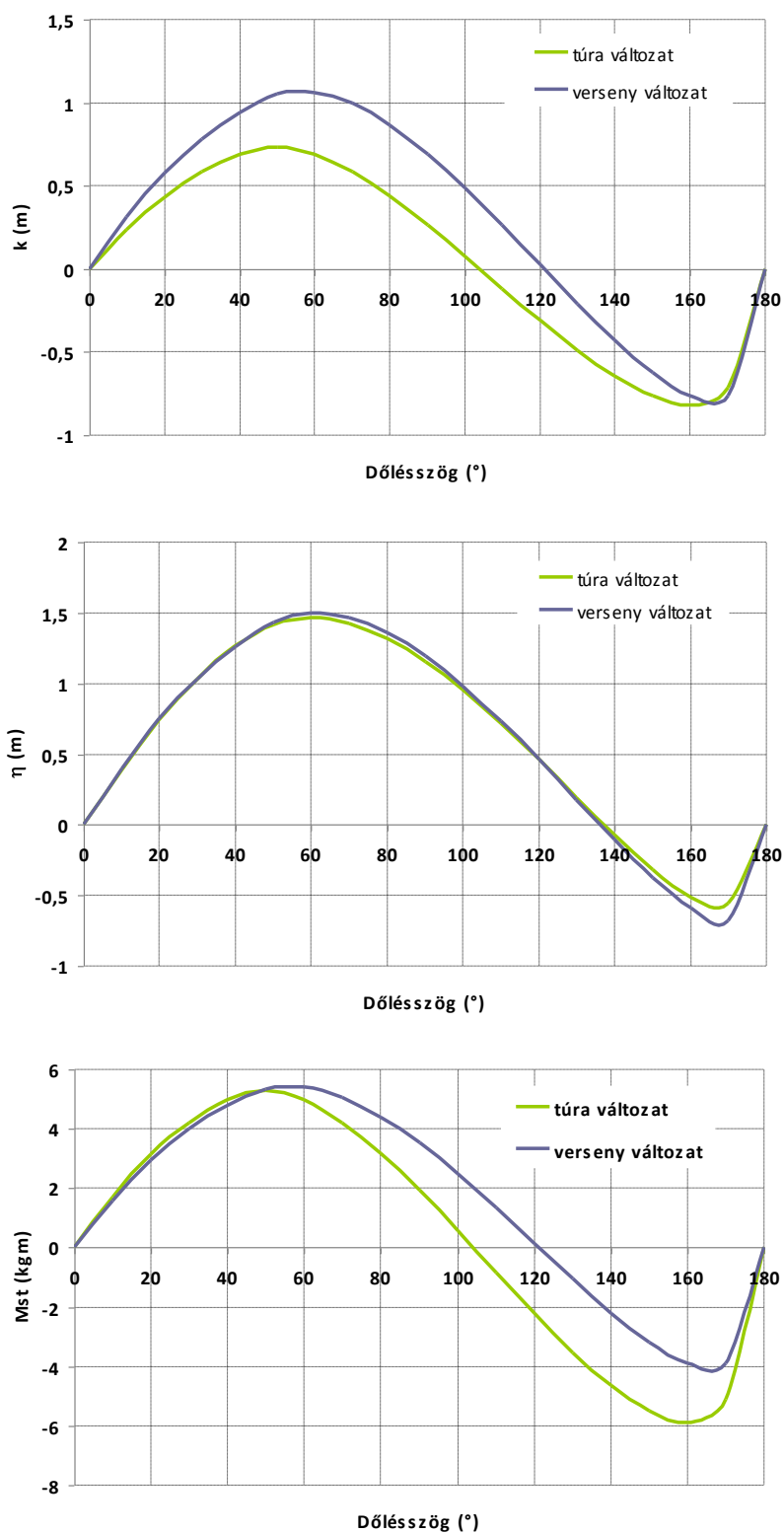


4.2.10. ábra: A fedélzet szélesség/vízvonal szélesség arányának hatása

4.2.3 Súlystabilitás

Láttuk, hogy a súlystabilitás a hajó tömegéből és a súlypont kedvező elhelyezkedéséből származik. Minél nagyobb a hajó tömege, és minél alacsonyabban van a tömegközéppontja, annál nagyobb lesz a súlystabilitása. Nagyobb tömeggel és magasabban levő súlyponttal rendelkező túrahajó stabilizáló nyomatéka lehet (az elfogadható dőlési tartományban) ugyanakkora, mint egy ugyanabból a sablonból készülő, könnyű szerkezetű, de nehéz, alacsony súlyponttal rendelkező tőkesúllyal készített versenyváltozaté. Előbbinél a korábban említett $VCG \cdot \sin(\varphi)$ nagy, így a k relatíve kisebb, de ezt kompenzálja a nagyobb tömeg. A versenyváltozatnál a $VCG \cdot \sin(\varphi)$ akár negatív is lehet, ezért k relatíve nagy, de a tömeg

lényegesen kisebb. Mivel azonos alakú hajókat vizsgálunk, így az η csak a vízkiszorítás miatt különbözik. A túra- és versenyváltozatban az említett paraméterek a 4.2.11. ábra szerint alakulnak.

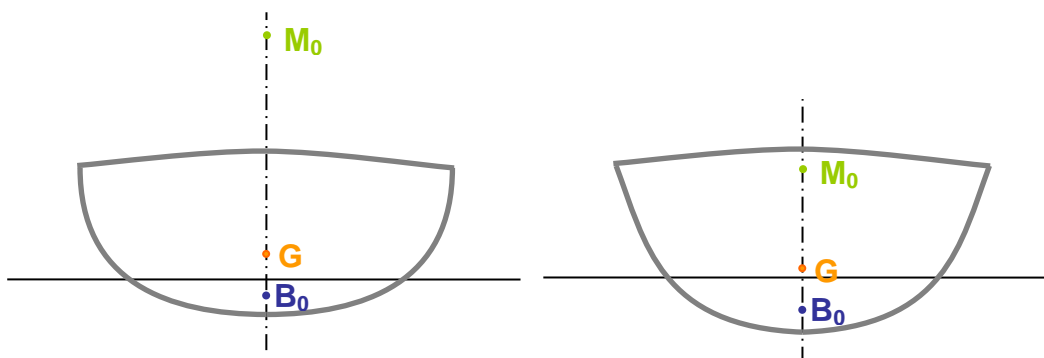


4.2.11. ábra: A verseny- és túraváltozat k , η és M_{st} diagramjai a dőlés függvényében

A túraválozat tömege $G_t = 7,2$ t, súlypontja: $VCG_t = 0,89$ m, a versenyválozat adatai: $G_v = 5,1$ t, súlypontja: $VCG_v = 0,5$ m. A felső diagramon jól látható, hogy a versenyválozat alacsonyabb súlypontja mind a stabilitás terjedelmére, mind a maximális kar-értékre vonatkozóan kedvező, kezdeti stabilitása is nagyobb. A középső, pantokarénára vonatkozó diagram jól szemlélteti, hogy a két válozat vízkiszorításában meglevő különbsége az η értékét és így az alakstabilitást gyakorlatilag nem befolyásolja annak ellenére, hogy a különbség a tömegben nem is olyan kicsi, hiszen a túraválozat kb. 40%-kal nagyobb tömegű. (Megjegyezzük, hogy a szokásos alakú tengeri kereskedelmi hajókra a vízkiszorítás függvényében ábrázolt pantokaréna értékek általában a teljes – a kedvtelési célú hajókéhoz képest lényegesen nagyobb – vízkiszorítás-tartományon is csak keveset változnak.) A legalsó diagram mutatja, hogy a vizsgált értékek mellett a tényleges tömeg milyen hatással van a stabilizáló nyomaték alakulására. Ebből kiderül, hogy normál üzemszerű állapotban a túrahajó nagyobb tömege révén akár ugyanolyan (tehát nem nagyobb) dőléssel is reagálhat adott nagyságú billentőnyomatéokra, mint az – esetleg pusztán csak a karok diagramja alapján felelőtlenül jobbnak ítélt – versenyhajó.

A nagy tömeg miatt azonban adott szélereősség és vitorlafelület mellett a hajó sebességpotenciálját egyszerűen, de biztosan jelző vitorlafelület-vízkiszorítás arány romlik. A túra- és versenyválozat tehát stabilitás szempontjából (legalábbis az elfogadható dőlési tartományban) azonos, így adott szélviszonyok között ugyanakkora dőléssel fog a két hajó haladni, azonban a könnyebb válozat gyorsabb lesz. E miatt a súlystabilitás vízkiszorítás növelésével való növelése manapság a kishajók világában nem szokásos. A sebesség hajhászása miatt az egyre fejlődő építési technológiák adta lehetőségeket kihasználva a tervezők igyekeznek egyre könnyebb hajókat készíteni, a formát az egyre kisebb vízkiszorításra optimalizálni.

Vizsgáljuk meg meg egy kicsit a tömeg hatását. A tömeg csökkentése egyrészt csökkenti a nyomatékot, másrészt viszont – ugyanolyan vízvonaltérületű válozatokat összehasonlítva – növeli a kezdeti stabilitást. Hiszen, ha V csökken és J_B változatlan, akkor mivel $r = J_B/V$, így r nő (4.2.12. ábra), vagyis a hajó kezdeti metacentruma magasabbra kerül, a Reed-diagram kezdeti szakasza meredekebb lesz.



4.2.12. ábra: A tömeg hatása a kezdeti metacentrum helyzetére (balra a kisebb, jobbra a nagyobb tömegű hajó)

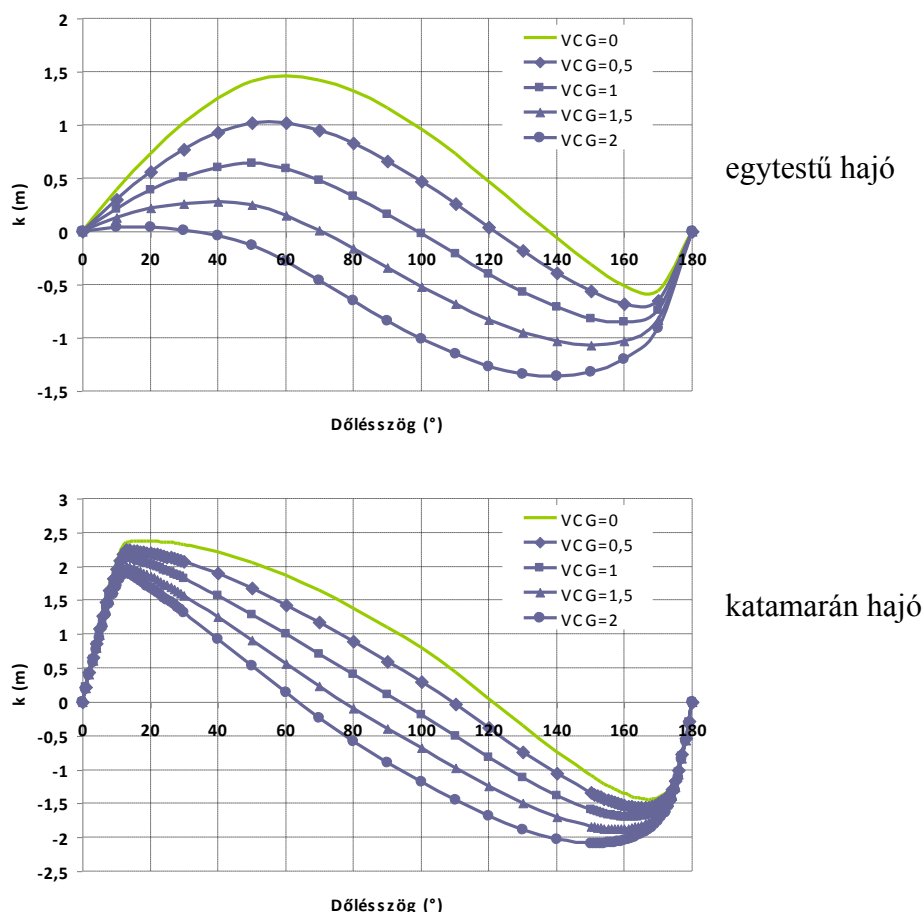
A teljes szögtartományt vizsgálva azonban megállapítható, hogy a pozitív stabilitás terjedelme, és így a görbe alatti terület, vagyis a dinamikai stabilitás a versenyválozat esetén kedvezőbb. E hatások a vizsgált hajóra igazak, és bár bizonyos mértékben más hajókra is

lehet ebből következtetni, azért újra felhívjuk a figyelmet, hogy minden egyes esetet részletesen meg kell vizsgálni, és csak az alapján szabad az egyes változatokat értékelni.

A könnyű hajóknál tehát a nagyobb súlystabilitást a hajó relatíve kis tömegének stabilitás szempontjából kedvezőbb elosztásával érik el. Ez az eredő tömegközéppont helyzetének lefelé és/vagy keresztirányú elmozdításával lehetséges, ami tókesúlyos hajóknál pl. a hajó ballasztarányának növelését vagy csak pusztán a nagy tömegek lefele koncentrációját jelenti. A súlypont keresztirányú módosítására vagy mozgatható ballasztot alkalmaznak vagy a legénységet vezénylik a hajó szélére.

4.2.3.1 A súlypont függőleges változtatása

A súlypont lejjebb vitelének stabilitásra gyakorolt általános hatása ugyan jól ismert, itt ezért csak azt mutatjuk be, hogy milyen különbségek mutatkoznak e téren az egytestű és a katamarán forma között (4.2.13. ábra). A diagramokon a $VCG = 0$ -hoz tartozó (zöld) vonal a 4.2.6. ábrán is bemutatott pantokaréna értékeket ábrázolja. Látható, hogy az egytestű hajónál a súlypont emelkedésével a hajó kezdeti stabilitása (a görbe kezdeti meredeksége), és ezzel együtt a stabilitás terjedelme nagyjából arányosan csökken. Ezzel szemben a katamaránnál azt figyelhetjük meg, hogy a kezdeti meredekség látszólag teljesen azonos, és csak a stabilitás terjedelmében van különbség. Valójában azonban a kezdeti meredekség sem azonos (ez a diagramok vonalaira „zoom”-olva is egyértelmű).

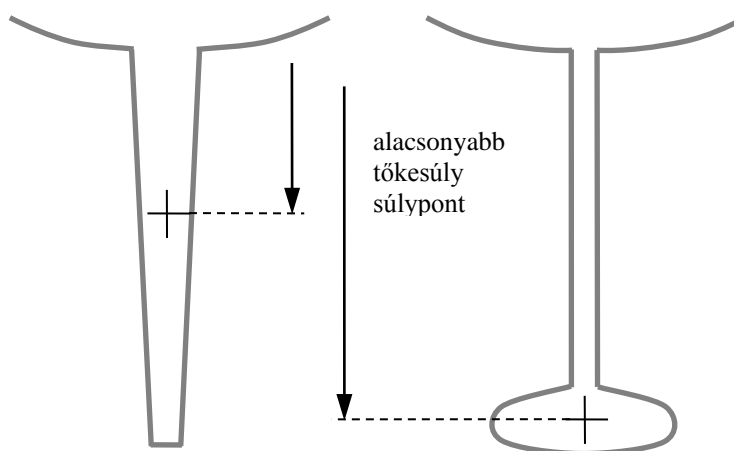


4.2.13. ábra: A súlypont hatása egytestű és katamarán formánál

Mint ismeretes, a görbe kezdeti meredeksége a kezdeti metacentrikus magassággal jellemezhető, mely a metacentrikus sugár (r) és a súlypontok (G és B) közötti távolság (a) különbsége. A katamarán esetében a formából adódóan nagyon nagy metacentrikus sugár van, amelyhez képest a diagramon ábrázolt különböző VCG-khez tartozó a -k változása szinte elhanyagolható (nem úgy, mint a lényegesen kisebb r -rel rendelkező egytestű hajónál). Mivel egy katamaránál általában nem tud olyan magasan lenni a súlypont, hogy az a kezdeti metacentrikus sugárral összemérhető legyen, így ennek változása nem sok befolyással van a görbe kezdeti szakaszára. A stabilitás terjedelme azonban itt is drasztikusan csökken ahhoz képest, amit a forma biztosít (zöld vonal).

A súlypont-magasság csökkentésére számos lehetőség kínálkozik, melyek közül a tervezők mindazokat ki is használják, amelyeket az egyéb szempontok (pl. költségek, megrendelői igények) megengednek. Néhány ilyen az általánosan alkalmazottak közül:

- az egyes főbb elemek (pl. szerkezet, berendezések) tömegének csökkentése a tőkesúly tömegének javára (adott össztömeg esetén);
- a magasan elhelyezett elemek – így pl. az árboc, merevítőkötélzet, fedélzeti felszerelések, futókötelek – tömegének csökkentése. Ezért készítik a modern hajókon – ha a költségvetés ezt megengedi – a teljes rudazatot karbon-epoxi kompozitból, a belső bútorzatot a nehéz rétegelt lemezek helyett szendvics-panelekből, a felszereléseket (pl. csörlők, csigák) rozsdamentes acél (vagy régebben bronz) helyett szintén karbonkompozitból;
- a hajó belső tereinek puritán kialakítása – csak a szerkezetileg vagy használhatóság szempontjából minimálisan szükséges elemekkel;
- a tőkesúly minél nehezebb anyagból készítése – a régebben, ritkábban alkalmazott beton ($1,8\text{--}2,5\text{ t/m}^3$) vagy a gyakrabban előforduló öntöttvas ($7,2\text{ t/m}^3$) helyett ma legjellemzőbben az ólmot ($11,4\text{ t/m}^3$) használják. A nemesfémek és egyéb nehezebb anyagok (arany: $19,3\text{ t/m}^3$, ezüst: $10,5\text{ t/m}^3$, platina: $21,4\text{ t/m}^3$, irídium: $22,5\text{ t/m}^3$, urán: $18,7\text{ t/m}^3$) alkalmazását általában az osztályelőírások tiltják (beszerzésük egyébként is nehezebb és igen költséges lenne);
- a tőkesúly súlypontjának csökkentése megfelelő kialakítás révén – vékony, könnyű penge szárral kombinált bulbás tőkesúly a hagyományos egybeöntött változat helyett (4.2.14. ábra).



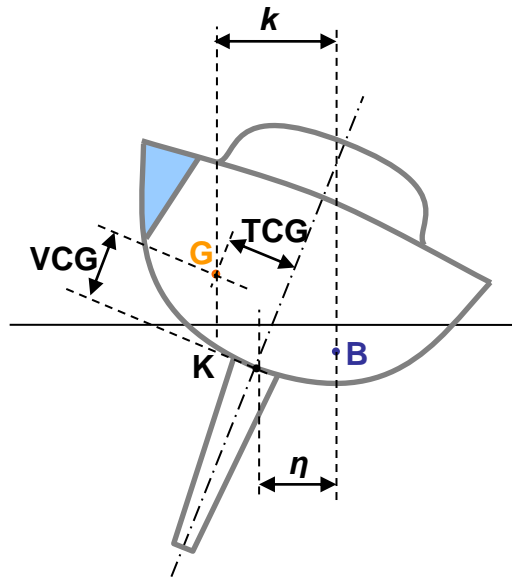
4.2.14. ábra: Különböző tőkesúlyok és súlypontjaik

4.2.3.2 A súlypont keresztirányú változtatása

A súlypont függőleges változtatása mellett a hajó stabilitását a hajó keresztirányú tömegeloszlásának megváltoztatásával is lehet növelni. Korábban, a stabilizáló nyomatékra felírt képletben a KG távolság kifejtésénél nem számoltunk a keresztirányú aszimmetrikussággal. Ha ezt is figyelembe vesszük, akkor a korábbi kifejezés az alábbiak szerint alakul:

$$M_{st} = \rho \cdot g \cdot V \cdot k = \rho \cdot g \cdot V \cdot (\eta - \overline{KG} \cdot \sin(\varphi)) = \rho \cdot g \cdot V \cdot (\eta - [VCG \cdot \sin(\varphi) \pm |TCG| \cdot \cos(\varphi)])$$

A szögletes zárójelben szereplő második – a keresztirányú súlyponteltolódást figyelembe vevő – tagot le kell vonni, ha a súlypont a dőlés irányával ellentétes (tehát a jó) oldalon van.



4.2.15. ábra: A stabilizáló nyomatéki karok aszimmetrikus tömegelrendezésénél

A súlypont keresztirányú aszimmetrikus elrendezésének hatását tárgyalva fontos megjegyezzük, hogy e hatás különbözik az eddig tárgyaltaktól. Eddig csak olyan eseteket vizsgáltunk – akár az alak- akár a súlystabilitás kapcsán –, amelyeknél abban nem volt különbség, hogy stabilizáló nyomaték csak akkor alakul ki, ha a hajó elkezd megdőlni. Hacsak a hajótestet nem ennek figyelembevételével tervezik, akkor a dőlés mindig károsnak tekinthető. A fenti képletből látható, hogy a súlypont oldalirányú aszimmetrikussága miatt már 0° -os dőlés mellett is van stabilizáló nyomatéki kar, hiszen ha a $\varphi = 0$, akkor ugyan $\eta = 0$ és $\sin(\varphi) = 0$, de $\cos(\varphi) = 1$. Amint az a későbbi példákban is jól tükröződik, a súlypont keresztirányú mozgásának elsődleges célja az, hogy a hajót vízszintes, dőlés nélküli úszás mellett is stabilizálni lehet, amellyel nagyobb sebességet lehet nyerni. Ez a mai versenyvitorlázásban alapvetően fontos, így a súlypont oldalirányú elhelyezhetőségének elve a mai versenyhajók tervezésénél – ahol ezt valamilyen szabály nem tiltja – szinte mindig megjelenik.

Az aszimmetrikus tömegelrendezésre a legénység mozgásának lehetősége régen is adott volt. Ezen túlmenően egyes erősen túlvitorlázott vitorlásokon homokzsákokat hordtak a mindenkori szél felőli oldalra (az ilyen hajókat nevezték „sand-bagger”-eknek, 4.2.16. ábra).



forrás: www.nelsonsailingcenter.com és www.nyharborsailing.com

4.2.16. ábra: Sandbagger-ek



forrás: www.zetapress.hu

4.2.17. ábra: A legénység stabilizáló hatása egy magyar Libera-n

Modern korunkban tavi hajókon leggyakrabban a legénység mozgatásának stabilitást növelő hatását használják ki. Egyes típusokon (pl. Liberák) akár úgy is, hogy a legénység

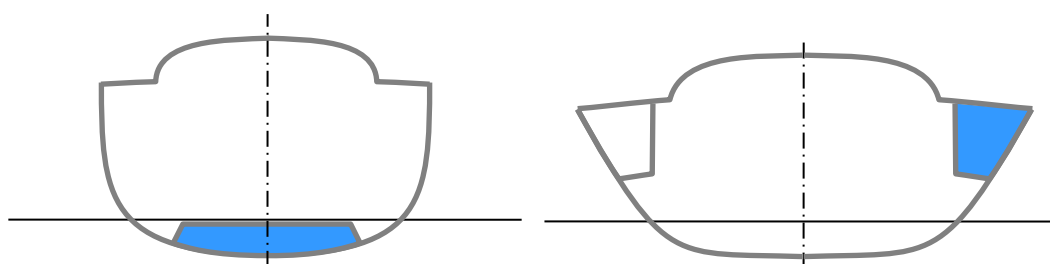
kétharmadának semmi más dolga nincs, mint élő (és irányítható) ballasztként a hajó szél felőli oldalán a mindenkori szélviszonyokhoz alkalmazkodva jelen lenni (4.2.17. ábra).

Tengeri hajókon elsősorban a nagyteljesítményű szivattyú által mozgatott vízballasztot és csigasorok, de leginkább hidraulikus munkahengerek által működtetett billenthető tökesúlyt alkalmaznak. Egyes kisebb hajókon alkalmaznak olyan vízballasztot, ami nem két oldalt, hanem egy, a padlózat alatt elhelyezett tankból áll. Ez csak a súlypont csökkentésére szolgál, keresztirányú aszimmetriát nem ad, a túrahajók jellemző kialakítása. A kétoldali tankkal rendelkező rendszer főleg a versenyhajóknál terjedt el.



forrás: www.velablog.com

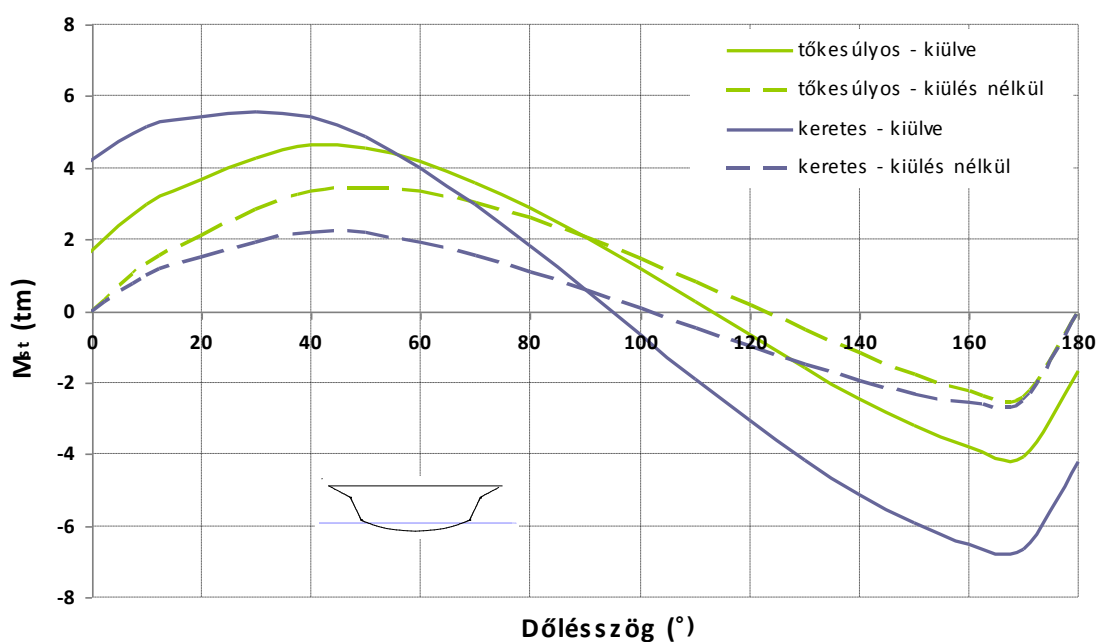
4.2.18. ábra: Billenthető tökesúly



4.2.19. ábra: Vízballaszt kialakítások

A legénység aszimmetrikus elhelyezkedése nem mindig tartható fenn (egy-egy szélőkés hatására a fedélzet szélén ülő, vagy esetleg kiülő kereten trapézoló emberek beeshetnek a hajóba). A billenthető tökesúlyt és vízballaszt rendszer készülhet úgy, hogy a tökesúlyt vagy a vizet minden dőlés mellett megtartsa az aszimmetrikus állásában, de ez sem minden esetre mondható el (pl. a ballaszttankok légzőcsövein keresztül a víz távozhat). Ezek miatt a stabilitás kielégítő voltának hatóságok felé való igazolásakor a legénység stabilitást növelő hatását egyáltalán nem, a mozgatható tökesúlyt és vízballasztot pedig úgy veszik figyelembe, hogy a hajónak azok legkedvezőtlenebb állapotában is megfelelő stabilitással kell rendelkeznie.

Mindazonáltal a hajó menettulajdonságainak vizsgálatához hasznos lehet ezen eszközök vagy akár a kiülő legénység stabilitásra kifejtett pozitív hatásának elemzése is. Mindezt egy adott hajó keretes-trapézos (ld. a Libera képén) és tőkesúlyos, keret nélküli változatának elemzésén keresztül mutatjuk be. A vizsgált hajótest szélessége vízvonalon 2,2m, fedélzeten 4,2m, kerettel 8,5m. A keretes változat csak egy kisebb tömegű tőkesúllyal van szerelve (így $G = 3t$ legénységgel együtt), a másik viszont alacsonyabb súlypontot biztosító nagyobb tőkesúllyal van ellátva ($G = 3,3t$). Mivel a tömegek némileg különböznek, a súlystabilitást a nyomaték (és nem a k kar) ábrázolásával szemléltetjük. A diagramba szaggatott vonallal berajzoltuk a hajók szimmetrikus súlypontelrendezéséhez tartozó stabilitási görbéket is. Mivel kiülő legénységről van szó, akik nagyobb dőlés után már a vízbe vagy a hajóba esnek, ezért inkább csak a görbe eleje mértékadó.



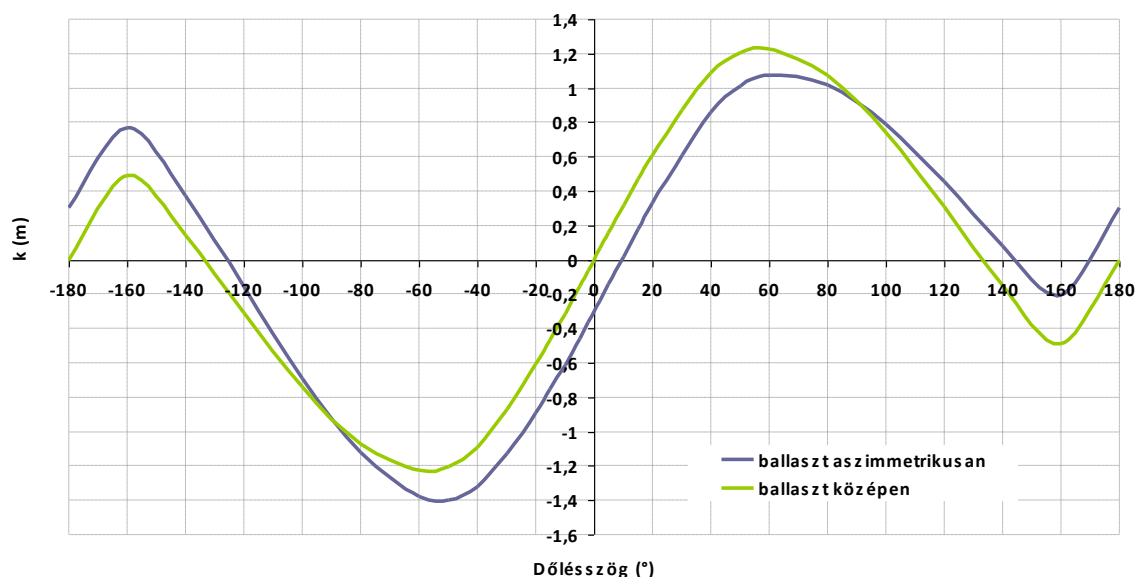
4.2.20. ábra: A legénység aszimmetrikus elhelyezkedésének hatása

A diagram jól szemlélteti a keresztirányú aszimmetrikus súlypontelrendezés gyakorlatban is tapasztalható előnyét. Látható, hogy minél kijebb tud ülni a legénység, annál nagyobb az a billentőnyomaték- (vagyis szélerősség-) tartomány, amelyben a legénység mozgatásának eredményeképp a hajó közel vízszintesen tartható. Ez pedig a vízvonalak szimmetrikusan tartása és a kis ellenállás érdekében szinte minden vitorlánhajónál alapvető fontosságú. Más szavakkal, a nagy kezdeti nyomaték azt jelenti tehát, hogy a keretes változat nagyobb felületű vitorlát húzhat, mint a tőkesúlyos verzió, vagy ugyanakkora vitorlával erősebb szélben is nagyjából vízszintesen tud haladni (amikor a másoknak már esetleg reffelni kell). Ez pedig mindenképpen nagyobb sebességpotenciált jelent.

A vízballaszt hasonló hatását a 4.2.21. ábrán mutatjuk be (az LCG és VCG értékei a ballaszt mozgatásával nem változik, csak a TCG). Itt azonban – mivel a vízballaszt elvileg megtartható a teljes dőlési tartományon – a teljes diagramot megrajzoltuk. Az ábráról látható, hogy a vizsgált hajónál a dőlés adott billentőnyomaték hatására mintegy 10° -kal csökkenthető a szimmetrikus álláshoz képest. Az aszimmetrikus elrendezésben a legnagyobb stabilitási kar is nagyobb (itt kb. 10% -kal), viszont a dőlésszög, amelyhez ez tarto-

zik kisebb. A hajó pozitív stabilitási terjedelme gyakorlatilag nem változik (10° - 144° -ig a 0° - 133° -hoz képest), sőt a hajó az egyik oldalon mindig képes visszaállni a 144° - 170° tartományon kívül. Ezek az értékek ugyan nagyon függenek a kialakítástól, de azt azért szemléltetik, hogy egy aszimmetrikus ballasztelrendezés nem feltétlenül fenyegeti a hajó biztonságát.

A vízballaszttal kapcsolatban meg kell még jegyezni, hogy ez szükség szerint eltávolítható a hajóról a tömeg csökkentése érdekében. Kialakítástól függően azonban a felvett vízballaszt – amellett, hogy aszimmetrikussá teszi az elrendezést – emelheti is a hajó eredő súlypontját, ami bizonyos stabilitáscsökkenést eredményezhet.



4.2.21. ábra: Aszimmetrikus tömegeloszlás hatása a stabilitásra

4.2.4 A kishajók stabilitására vonatkozó előírások

A kishajók stabilitási előírásai megkülönböztetik a 6 m testhosszúság alatti, e feletti vitorlás és motoros hajókat. A három kategóriára különböző jellegű előírások vonatkoznak, melyeket (jelenleg) az MSZ EN ISO 12217-1, -2, és -3 szabványok rögzítenek. E jegyzetben csak a szabvány elvi felépítését és a stabilitási kérdéskör megközelítési módját ismer-tjük.

A kishajókra vonatkozó előírások a fenti csoportosításon kívül mindenféle kishajót 4-féle tervezési kategóriába sorolnak be. Ezek jelentése a következő:

- A - Olyan hosszabb óceáni utakra alkalmas vízijárművek, ahol – a rendkívüli körülményeket nem számítva – a jellemző szélerősség meghaladhatja a Beaufort-skála szerinti 8-as fokozatot, a mértékadó hullámmagasság pedig elérheti, illetve meghaladhatja a 4 métert, és amelyeknek a vízijármű saját erejéből képes ellenállni;
- B - Olyan nyílttengeri utakra alkalmas vízijárművek, ahol a jellemző szélerősség elérheti a 8-as fokozatot, a mértékadó hullámmagasság pedig a 4 métert;
- C - Olyan tengeri partmenti vizeken, nagy öblökben, folyótorkolatokban, tavakon és folyókon tett utakra alkalmas vízijárművek, ahol a jellemző szélerősség elérheti a 6-os fokozatot, a mértékadó hullámmagasság pedig a 2 métert;

- D - Olyan védett partmenti tengeri, öbölbeli, tavi, folyami és mesterséges csatornán vezető víziutakon történő közlekedésre tervezett és épített vízijárművek, ahol a jellemző szélerősség legfeljebb a Beaufort-skála szerinti 4-es fokozatot érheti el, a jellemző hullámmagasság pedig legfeljebb 0,3 méter, de kivételesen legfeljebb 0,5 méter is lehet.

A belföldön üzemben tartott kedvtelési célú vízijárművek közül a 2. hajózási zónában (Balatonon) üzemben tartottakat a C kategóriába, a 3. hajózási zónában (a többi belföldi víziúton) üzemben tartottakat pedig a D kategóriába kell sorolni. A tengeri kedvtelési célú vízijárművek közül a korlátlan hajózási körzetű vízijárműveket az A kategóriába, a parttól 200 tengeri mérföldre eltávolodó vízijárműveket a B kategóriába, a parttól 12 tengeri mérföldre eltávolodó vízijárműveket pedig a C kategóriába kell sorolni.

Mindenek előtt el kell dönteni, hogy az adott hajó vitorlás vagy motoros kishajónak minősül-e. Vitorlás az a kishajó, melynek névleges vitorlafelülete a terhelt vízkiszorítás 2/3–dik hatványának 7%-át meghaladja. A szabványban fontos megkülönböztetés még az, hogy a fedélzet mennyire zárt, eszerint megkülönböztetnek zárt, részlegesen zárt és nyitott kishajókat.

Az előírások különböző vizsgálatokat és azokon belül természetesen különböző követelményeket fogalmaznak meg az egyes tervezési kategóriákba sorolt kishajókra. A 6 m testhosszúság alatti és feletti hajókra vonatkozó előírások nagyon hasonlóak, természetesen az utóbbi kategóriára bővebb vizsgálatokat írnak elő.

A 6m alatti motorosokra vonatkozó előírás a következő paraméterekre ír elő vizsgálatokat:

- elárasztási pont magasság;
- külpontos terhelés;
- vízkiszorítás és stabilitás elárasztott állapotban;
- visszaálló képesség teljes átfordulás után.

A 6m alatti vitorlások esetén ezek kiegészülnek a felborulás utáni visszaálló képesség és a dőlés miatti elárasztódás vizsgálatával. A 6m feletti motorosoknál vizsgálatok a következők:

- elárasztási pontok és nyílások;
- elárasztási pont magasság;
- elárasztási szög;
- külpontos terhelés;
- hullámokkal és széllel szembeni ellenállás;
- szél hatására bekövetkező dőlés;
- elárasztódás.

A 6 m feletti vitorlásokra az alábbi vizsgálatokat definiálták:

- elárasztási pontok és nyílások;
- elárasztási pont magasság;
- elárasztási szög;
- pozitív stabilitás tartománya;

- STIX számítás;
- felborulás utáni visszaálló képesség;
- visszaálló képesség teljes átfordulás után;
- dőlés miatti elárasztódás.

Az elárasztási ponttal kapcsolatos előírások leírják, hogy mi minősül elárasztási pontnak és mind ezek vízfelszín feletti magasságára, mind a szögre természetesen minimumkövetelményeket fogalmazznak meg. A külpontos terhelés vizsgálata gyakorlatilag az utasok egyoldali tömörülésének felel meg, ebben vizsgálni kell a személybefogadó-képességének megfelelő létszámú legénység külpontos elhelyezkedése révén kialakuló úszáshelyzetet és a kiadódó biztonsági távolságot, melyre itt is minimumok vannak rögzítve. A 6 m alatti kishajók még a védettebb vizeken is könnyen elárasztódnak, ezért bizonyos esetekben vizsgálni kell a hajó úszáshelyzetét és stabilitását elárasztott állapotban is. A kielégítő stabilitást ekkor a hajó szélére helyezett adott nagyságú tömegek hatására adott idő alatt bekövetkező dőlés mérésével kell igazolni. Az előírások különbséget tesznek teljes átfordulás (capsize) és felborulás (knock-down) között. Előbbi egyértelmű, a felborulás alatt pedig a vitorlások kb. 90°-ra dőlését értik. A teljes átfordulás utáni visszaálló képesség vizsgálata abból áll, hogy az átfordulás után a hajót a legénység vissza tudja-e fordítani a saját testi erejével és a hajón megfelelően kialakított segédeszközök igénybevételével. Vitorlásoknál ennél a vizsgálatnál a vitorlákat fel kell húzni, svertet le kell engedni (tehát egy tényleges üzemállapotból való átfordulást kell modellezni). Ezzel szemben a felborulás utáni visszaálló képesség igazolása azt jelenti, hogy a hajó képes-e visszaállni eredeti állapotába minden segítség nélkül egy felborulás után. Csak vitorlásoknál a „dőlés miatti elárasztódás” ellenőrzése azt tisztázza, hogy a hajó elárasztási pontjához tartozó dőlést milyen szélsősebesség mellett éri el a hajó. Ehhez a dőlést okozó nyomatók meghatározása után kell a szélsősebességet egy empirikus képlet segítségével számítani. Minél magasabb a kapott érték, annál nagyobb tervezési kategóriát lehet választani. Az előírások lehetőséget adnak a tesztek számításos való kiváltására is, ami néha – de nem minden esetben – könnyebbé teszi a feladatot.

A 6 m feletti A és B kategóriába tartozó motorosoknál egyes esetekben el kell végezni adott szél okozta billentő nyomatókra és hullámvásból származó lengésekre vonatkozó stabilitásvizsgálatot. A C és D kategóriájú hajóknál csak adott szélsősebesség mellett billentőnyomatók okozta statikus dőlésszöget kell vizsgálni (időjárás kritérium). Ezek a vizsgálatok a nagyhajós gyakorlatnak nagyjából megfelelnek.

A 6 m feletti vitorlásokra az eddig említetteken kívül minimumkövetelményeket fogalmaztak meg a pozitív stabilitás tartományára nézve, valamint a legtöbb esetre bevezették az ún. stabilitási index (STIX) kiszámításának szükségességét. Ez a vizsgálat tulajdonképpen a tengerállóságot ellenőrzi. A tengerállóság – mint ismeretes – nagyon összetett kérdés, melyet a hajó geometriája és fizikai jellemzői segítségével csak közelítőleg lehet vizsgálni. Nagyobb pontosságot adó módszerek egyrészt nem végezhetők olyan egyszerűen, másrészt igazán jó megoldás egyelőre nem is áll rendelkezésre. Az ISO (Nemzetközi Szabványügyi Testület) által kidolgozott STIX számítás relatíve könnyű és számos hajón bizonyította megfelelő voltát. A számításhoz a hajó főméreteit és az adott terhelési esethez tartozó stabilitási diagram jellemzőit kell felhasználni. A hajó tengerállósági és biztonsági szempontból értelmezhető jósága különböző tényezőkkel van kifejezve. A STIX-et végül is ezek és a hajó nagyságát reprezentáló hossz, mint a legfontosabb tengerállóságot befolyásoló paraméter súlyozott szorzata adja.

Stability Index (STIX) Calculation				Lightship +1 ps	Loaded 6 ps	Loaded 6 ps+WB
Factor	Item	Symbol	Unit	At m _{woc}	At m _{LDC}	At m _{LDC-WB}
	Mass in appropriate loading condition	m	kg	1132	1537	1787
	Positive Area under GZ curve to ϕ_i or ϕ_b	A_{GZ}	m ² /deg	82,10	55,50	43,70
FDS (6.4.2)	Length of hull acc.to ISO8666	L_H	m	8,00	8,00	8,00
	Factor as calculated = FDS = $A_{GZ}/(15,81*(L_H)^{2,5})$	FDS		1,836	1,241	0,977
	FDS when limited to the range 0,5 to 1,5	FDS		1,500	1,241	0,977
FIR (6.4.3)	Vanishing angle of stability if $m < 40000$, FIR = $\phi_i/(125 - m/1600)$ if $m \geq 40000$, FIR = $\phi_i/100$	ϕ_i	deg	130	128	128
	FIR when limited to the range 0,4 to 1,5	FIR		1,046	1,032	1,033
FKR (6.4.4)	Righting lever at 90° heel	GZ_{90}	m	0,68	0,4	0,35
	Nominal sail area (see ISO 8666)	A_S	m ²	52	52	52
	Height of center of area A_S above the waterline	h_{CE}	m	5,85	5,85	5,85
	Calculate FR = $GZ_{90} * m / (2 * A_S * h_{CE})$	FR		1,265	1,011	1,028
	FKR = 0,5 FKR = 0,875 + 0,0833*FR FKR = 0,5 + 0,333*FR	FKR		0,921	0,837	0,842
	FKR when limited to the range 0,5 to 1,5	FKR		0,921	0,837	0,842
FDL (6.4.5)	Length on waterline	L_{WL}	m	7,95	7,95	7,95
	Length Base Size $L_{BS} = (2L_{WL} + L_H) \sqrt{3}$	L_{BS}	m	7,97	7,97	7,97
	Calculate $F_L = (L_{BS}/11)^{2,2}$	F_L		0,938	0,938	0,938
	Calculate FDL = $(0,6 + 15 * m^2 * F_L / (L_{BS}^{3,5} * (333 - 8L_{BS})))^{0,5}$	FDL		0,847	0,871	0,886
	FDL when limited to the range 0,75 to 1,25	FDL		0,847	0,871	0,886
FDB (6.4.6)	Maximum beam of hull	B_H	m	2,58	2,58	2,58
	Maximum beam of hull on waterline	BWL	m	1,92	1,92	1,92
	Calculate $FB = 3,3 * B_H / (0,03 * m)^{0,333}$	FB		2,629	2,374	2,258
	If $FB > 2,20$ FBD = $(13,31 * B_{WL} / (B_H * FB^{0,3}))^{0,5}$ If $FB < 1,45$ FBD = $(B_{WL} * FB^{0,2} / (1,682 * B_H))^{0,5}$ Otherwise FBD = $1,118 * (B_{WL} / B_H)^{0,5}$	FBD		0,738	0,860	0,928
	FBD when limited to the range 0,75 to 1,25	FBD		0,750	0,860	0,928
FWM (6.4.7)	Downflooding angle = lesser of ϕ_{bc} and ϕ_{bh}	ϕ_b	deg	136	130	126
	If $\phi_b \geq 90^\circ$ (see worksheet 3) than FWM = 1,0 If $\phi_b < 90^\circ$ then:			1	1	1
	Righting lever at downflooding angle	GZ_{ϕ_b}	m	0	0	0
	Lever from center of sail area to underwater profile	$h_{CE} + h_{LP}$	m	0	0	0
	Calculate wind speed at which serious flooding occurs = $(13 * m * GZ_{\phi_b} / (A_S * (h_{CE} + h_{LP}) * (\cos(\phi_b))^{1,2}))^{0,5}$	V_{sw}	m/s	###	###	###
	If $\phi_b < 90^\circ$, FWM = $V_{sw}/17$	FWM		###	###	###
	FWM when limited to the range 0,5 to 1,0	FWM		1,000	1,000	1,000
FDF (6.4.8)	Downflooding angle to non-quick-draining cockpit	ϕ_{cc}	deg			
	Downflooding angle to main access hatch	ϕ_{ah}	deg	136	130	126
	Total area of openings for finding $\phi_{bA1} = (50L_H^2)$		mm ²			
	Downflooding angle until above area is immersed	ϕ_{bA1}	deg			
	Least of the above three angles Then FDF = $\phi_b/90$	ϕ_{cc}	deg	136	130	126
	FDF when limited to the range 0,5 to 1,25	FDF		1,250	1,250	1,250
STIX (6.4.9)	Does boat float according to 7.6 and also when flooded have $GZ_{90} > 0$? YES/NO			NO	NO	NO
	If answer to above is YES then $\delta = 5$, if NO $\delta = 0$	δ		0	0	0
	Length Base Size $L_{BS} = (2L_{WL} + L_H) \sqrt{3}$	LBS	m	7,97	7,97	7,97
	Product of all 7 factors = FDS x FIR x FKR x FBD x FWM x FDF	F		1,15	1,00	0,87
	STIX = $[F^{0,5} * (7 + 2,25 * LBS)] + \delta$	STIX		26,70	24,97	23,30
	Design Category possible on STIX A when STIX > 32, B when STIX > 23, C when STIX > 14, D when STIX > 5			B	B	B

4.2.22. ábra: STIX számítás táblázata egy vízballasztos (WB) hajóra

Az egyes tényezők a következők:

- Hossz-víz kiszorítás tényező (FDL): figyelembe veszi, hogy a méretéhez képest kis víz-kiszorítással rendelkező hajók kevésbé kontrollálhatók, ezt „bünteti”
- Szélesség-víz kiszorítás tényező (FBD): figyelembe veszi, hogy a víz kiszorításhoz képest relatíve nagy szélességű hajók könnyebben felborulnak a hullámok hatására

- A felborult hajó visszaálló képessége (FKR): figyelembe veszi, hogy egy szélleőkés hatására elfekvő hajó vízzel telt vitorláit ellenére mennyire könnyen tud visszaállni
- Az átfordult hajó visszaálló képessége (FIR): figyelembe veszi, hogy egy átfordult hajó külső segítség nélkül mennyire könnyen tud visszaállni
- Dinamikai stabilitási tényező (FDS): azt a munkát veszi figyelembe, amelyet a külső erőknek le kell küzdeni ahhoz, hogy a hajó felboruljon
- Szélnyomatéki tényező (FWM): az elárasztódás bekövetkezésének kockázatát veszi figyelembe azoknál a hajóknál, amelyek elárasztási szöge kisebb, mint 90° .
- Elárasztási tényező (FDF): az elfekvés következtében megjelenő elárasztódás kockázatát veszi figyelembe

A négy tervezési kategóriához bizonyos minimum értékek vannak meghatározva, ha ezt eléri a hajó, akkor stabilitása – az előírások szerint – kielégítő.

Végül, akármilyen hajóról beszélünk is, az egyes vizsgálatok alapján megállapított tervezési kategóriák közül a hajó azt kaphatja meg, amelynek minden szempontból megfelel.

4.3 A kishajók ellenállása

4.3.1 Az ellenállásról általában

A kishajók ellenállása alapvetően ugyanolyan összetevőkből áll, mint a nagyhajóké, melyet a Hajók hajtása c. tantárgy részletesen tárgyal. Eszerint a kishajóknál is jelentkezik a súrlódási és a nyomásból származó ellenállásösszetevő, mely utóbbit a kishajós szóhasználatban is maradékellenállásnak neveznek. E kettő összege a hajó dőlés nélküli ellenállását adja. E már tanult összetevőket csak röviden ismételjük át, a kishajós specialitásokat figyelembe véve. A minden hajónál meglévő komponensek mellett a kishajóknál nagy jelentősége van továbbá a toldalékok ellenállásának és a sodródás valamint a dőlés miatti ellenállásnak, melyeket részletesen is kifejtünk.

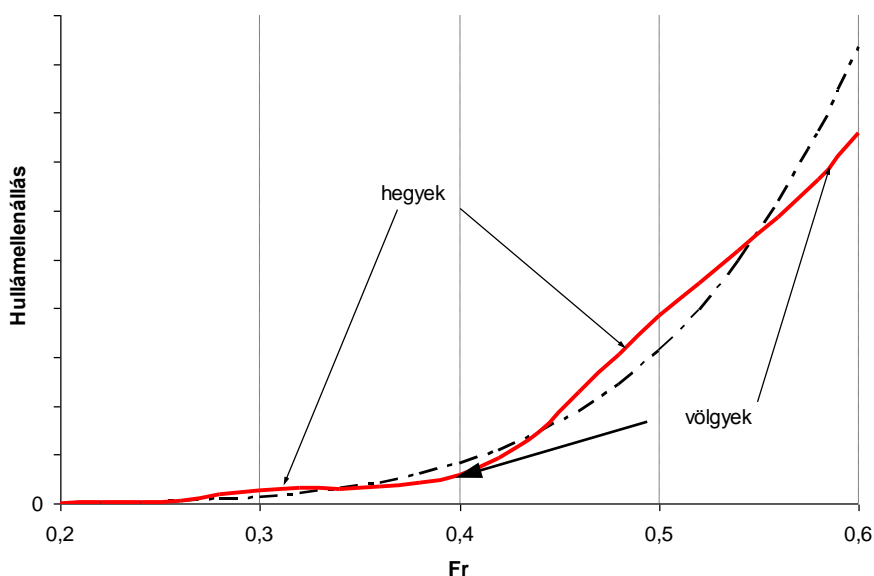
Mint ismeretes, a súrlódási (viszkózus) ellenállás a víz – mint valóságos közeg – csúsztatófeszültségéből származik, könnyen és pontosan számítható a nedvesített felület, a haladási sebesség és a súrlódási tényező ismeretében. A kishajós gyakorlatban is az ITTC-1957 formulával meghatározható egyenértékű síklap súrlódási tényezőt használjuk, mellyel a hidraulikailag sima felület ellenállása számítható. A hajótest súrlódási ellenállásának a hajótest formájától való függését a forma-tényezővel (k) vesszük figyelembe. (A formátényezőt modellkísérletek eredményeiből lehet származtatni arra az alapelvre támaszkodva, hogy a kisebb sebességeknél a hullámképző ellenállás a Froude-szám negyedik hatványával arányos. Ezért a mért teljes ellenállásból az így számított hullámmellenállást levonva a súrlódási és alakellenállás összege is számítható. Ebből a k tényezőt már meg tudják adni.) A k ismeretében a súrlódási és alakellenállás úgy határozható meg, hogy az ITTC 1957 segítségével kapott tényezőt $(I+k)$ -val kell beszorozni.

Az érdesség hatását a korábbiakhoz hasonlóan diagram segítségével a Re-szám függvényében kalkulálhatjuk. Kishajóknál azonban a Re-számhoz nem a hajó vagy a vízvonal teljes hosszát, hanem csak a vízvonalhossz 70%-át szokták használni. Ennek oka a jelentősen változó formájú hajótest, melynél nem minden vízrészecske halad végig a hajó teljes hossza mentén. A hajótesten kívüli tökesúly és kormány súrlódási ellenállásának számításkor a Re-számhoz a profilok átlagos húr hosszát kell figyelembe venni.

Szintén a korábbi tanulmányokra hivatkozunk az alakellenállás kapcsán. Az alakellenállás a hajó haladása során a hajó orra és hátsó része között kialakuló nyomáskülönbségek-

ből származik. Bár az ellenállásért a nyomások különbsége adja, mégis – mivel a nyomáskülönbséget a csúsztatófeszültségek miatt kialakuló határréteg és annak leválása okozza – ezt az ellenállás-összetevőt egyes szakirodalmak a súrlódási ellenállással szokták egy csoportba venni (viszkózus eredetű nyomási ellenállásnak nevezve). Az ellenállás-összetevő neve onnan származik, hogy az orr és a farrész közötti nyomáskülönbség nagysága alapvetően a határréteg leválásától függ, a leválást pedig alapvetően a hajó farának kialakítása befolyásolja. Ha a határréteg leválását sikerül elkerülni, akkor az alakellenállás a súrlódási rész 5-10%-a csak, ha azonban a far tompa, akkor ennél lényegesen nagyobb értékek is előfordulhatnak. Nagy kérdés, hogy a víz milyen irányból áramolja körül a hajótest hátsó részét, hiszen a leválás elkerüléséhez azt kellene biztosítani, hogy a víz áramlási irányának megfelelően ne változzon hirtelen (meredeken) a hajó alakja. A szakirodalmak ehhez inkább a hosszmetsetek, mintsem a vízvonalak vizsgálatát javasolják, és azt ajánlják, hogy a hajó hosszmetseteinek a meredeksége ne haladja meg a $22-25^\circ$ -ot. A vonalterv tanulmányozása mellett igen hasznos két könnyen meghatározható geometriai paraméter, a hengeres teltség és az LCB értékének ellenőrzése is. Minél nagyobb a hajó hengeres teltsége, annál teltebbek a hajó végei, és minél hátrébb van a vízkiszorítás súlypontja, annál teltebb a hajó fara. Éppen emiatt az alakellenállás minimalizálása érdekében a c_p -t 0,5 alatt, az LCB -t pedig a főborda előtt lenne célszerű tartani. Ez olyan formát eredményezne, mint amilyen a vízben élő halak legtöbbjének van. Mivel azonban a hajó nem a vízben, hanem a víz és a levegő határán úszik, és mozgása során hullámmellenállás is keletkezik, ezért ez a kialakítás nem minden esetben optimális. Mindkét ellenállás-összetevő a sebesség függvénye is, így meg kell vizsgálni, hogy a hajó tervezett sebességtartományában (amely a várható szélviszonyokkal és a preferált haladási irányokkal szoros összefüggésben van) melyik összetevőnek nagyobb a jelentősége.

Mint tudjuk, a nyomási ellenállás másik része a hajó által keltett hullámok okozta ellenállás. Ismeretes az is, hogy a hajó mellett kialakuló hullámkép (hullámhegyek és völgyek száma és nagysága) és így a hullámmellenállás a Froude-számtól (vagyis a hajó sebességétől és hosszától) függ. Fontos, hogy nem csak a hajó orrától indul el egy hullámrendszer, hanem a hajó farától is. A két rendszer interferenciájából következik, hogy a hullámmellenállás diagramja nem monoton növekvő, hanem helyi maximumok és minimumok vannak benne.



4.3.1. ábra: A hullámmellenállás a Froude-szám függvényében

Kis sebesség mellett az ellenállás-diagram hegyei és völgyei nem olyan jelentősek, így a hullámmellenállás sem. Fontos azonban az utolsó nagy hullámhegy, amely előtt a görbe már nagyon meredeken emelkedik. Ez elméletileg a hajó ún. testsebességénél, a 0,4-es Froude-számnál jelentkezik, a gyakorlatban azonban a hajótest túlnyúlásai által létrehozott nagyobb tényleges vízvonallal miatt ennél nagyobb értéknél, kb. 0,5-nél találhatjuk a csúcst. A vitorlások nagy többségének ez a Froude-szám az elméleti maximális sebességet adja. Ennél nagyobb sebességgel a nehéz, vízkiszorításos hajók csak extrém körülmények között (jellemzően nyílt tengeren, erős szélben, követő hullámzásban) képesek haladni, amit főleg az hoz létre, hogy a hajó a hullám lejtős oldalán gyakorlatilag lecsúszik. Ez adja ugyanis azt a plusz energiát, ami az ellenállás-diagram hullámhegyének leküzdéséhez kell. Ugyanakkor, egyes nagyon könnyű, lapos fenékel rendelkező hajók (dingik, katamaránok) akár cirkálásban is, könnyű, de még éppen vízkiszorításos módban működő (pl. America's Cup) versenyhajók pedig háromnegyed szélben át tudják lépni ezt a „hegyet”. Mindehhez persze az szükséges, hogy a hajtó energiát biztosító szél és a hajó stabilitása kellően nagy legyen! Motorosoknál – ha a beépített motorteljesítmény elegendő – e „hegy” átlépésének nincs különösebb akadálya, de természetesen a megfelelő forma itt is sokat segít.

Az alak- és hullámmellenállást (maradékellenállást) olyan egyszerűen nem lehet meghatározni, mint a súrlódási ellenállást. A szakirodalmak csak közelítő módszereket kínálnak, melyek általában modellkísérletek eredményeire támaszkodnak (bővebben ld. a jegyzet második részében).

A kishajóknál az eddig említett ellenállás-összetevők mellett van még néhány, ami a nagyhajós gyakorlatból nem ismert, ezeket tárgyaljuk a következőkben.

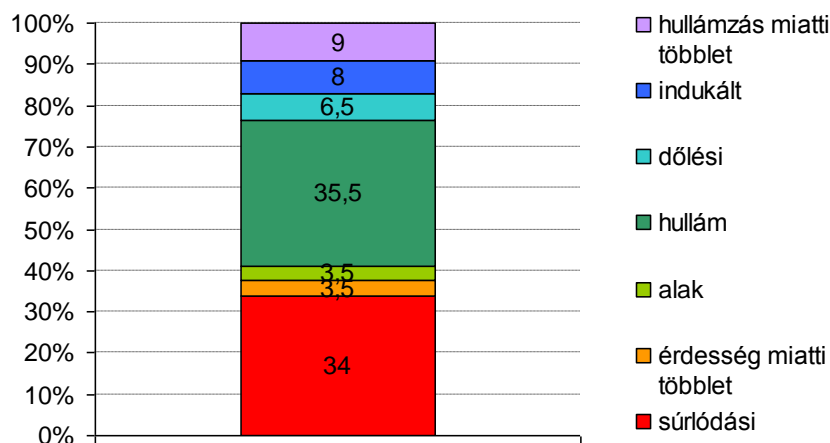
Mint a 2. fejezetben láttuk, a hajó cirkálás közben az egyensúly fenntartása érdekében kénytelen sodródva haladni előre. Minderre azért van szükség, hogy a hajótest víz alatti részén kialakulhasson a hidrodinamikai oldalerő, amely az aerodinamikai ellenpárját kompenzálja. (Látható az is, hogy a hajó minél inkább elfordul a valóságos szél irányától - tehát félszelezik vagy raumol -, annál kisebb az aerodinamikai és így a hidrodinamikai oldalerő is, ami végül is a sodródás csökkenéséhez is vezet.) A hidrodinamikai oldalerőt azonban nem elsősorban a hajótest, hanem a (részben éppen ezért elhelyezett) tőkesúly/uszony és a szintén víz alatt levő kormány biztosítja. Az oldalerő előállításában azonban ellenállás is keletkezik, melyet indukált ellenállásnak hívnak. Ennek az ellenállás-összetevőnek a keletkezésével később a tőkesúly és kormány tervezésénél foglalkozunk.

Ugyanezen erők hatására a hajó rendszerint megdől, amely a sodródás mellett tovább változtatja a hajótest víz alatti részének alakját. A dőlés a hajótest alak- és hullámmellenállásának megváltozását eredményezi, és amennyiben a nedvesített felület is változik, akkor a súrlódási összetevő is eltérhet a dőlés nélküli állapothoz képest. Az ellenállás növekményét vagy empirikusan határozzák meg, vagy az ellenállás-számítást a megdőlt helyzetű hajó adataival végzik el. Ez utóbbi pontosabb, de bonyolultabb számítást jelent.

Az eddig tárgyalt összetevőket összeadva megkapjuk egy hajó nyugodt vízén haladása-kor jelentkező ellenállását. Vitorlászás közben azonban a tenger (vagy tó) állapota nem mindig nyugodt, aminek következtében a hajó haladása is folyamatosan változó paraméterekkel zajlik. A hullámzás a hajót bólogató és merülő lengésekre készíti, a szélökések miatt a hajó dőlésszöge is változik, a hajó oldalirányú lengéseket is végez. Mindezek – azon túl, hogy változtatják a hajó trimmjét, víz alatti részének alakját, a keletkező felhajtóerőt, stb. – újabb hullámrendszereket indukálnak, amelyek természetesen további ellenállást jelentenek.

A hullámzás ellenállásnövelő hatásának számszerűsítésére nincs általánosan elfogadott módszer, néhány szakirodalomban azonban található szintén modellkísérleteken alapuló empirikus képletek. Egyszerűbb esetben a teljes nyugodt vízre számított ellenállás pótlékolásával oldják meg a feladatot.

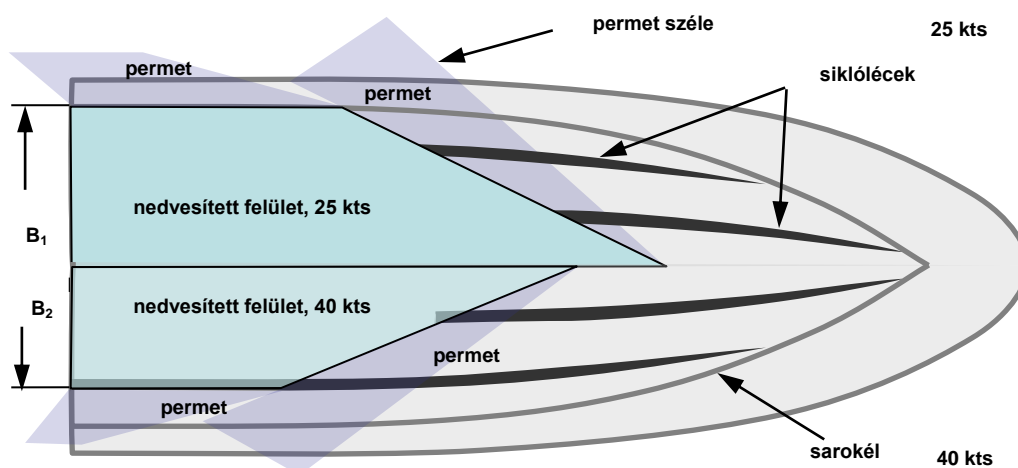
A 4.3.2. ábrán egy 40 lábás vitorlás ellenállásának összetevőit részleteztük.



4.3.2. ábra: Vitorlášhajó ellenállásának összetevői

Vízkişzorításos motoros kishajóknál az itt tárgyalt összetevők közül csak a súrlódási és nyomási összetevők keletkeznek. Ezeket általában csak a hajótestre szokás vonatkoztatni, így a kishajó toldalékainak ellenállását külön kell figyelembe venni. Toldaléknak számítanak a tengely, tengelybak, kormány, lengéscsillapító, hajtómű (pl. Z vagy Arneson) víz alatti része, de bármi egyéb is, ami a hajótestből „kiáll”. A toldalékoknak természetesen van súrlódási és alakellenállásuk, egyes felszín közelében levő elemeknél azonban még hullámellenállás is jelentkezhet. A toldalékok ellenállását empirikus képletekkel vagy becsléssel és pótlékolással veszik figyelembe.

Sikló motorosoknál az ellenállás-számításnál csak a súrlódási és toldalékok ellenállását számítják, a nyomásból származó ellenállást az N erő (ld. 3.3.2. ábra) dőlésszögével veszik figyelembe. Mivel a siklás közbeni egyensúlyi helyzet a statikus úszásvonaltól különbözik, a súrlódási ellenállás számításánál a nedvesített felületet a tényleges úszáshelyzet szerint kell figyelembe venni. (Mivel ez jelentősen eltérhet a statikus úszáshelyzethez tartozó értéktől, célszerű a hajó ellenállását a vízkişzorításos üzemmódra is ellenőrizni.) A tényleges nedvesített felülethez a siklás közben jelentkező permettel (spray) találkozó felületet is hozzá kell számolni. Mindez még siklás mellett is sebességfüggő. A 4.3.3. ábrán egy sikló motoros 25 és 40 csomós sebességnél kialakuló nedvesített felületét mutatja, a számottevő különbség szemmel is jól érzékelhető ($B_1 > B_2$).



forrás: Larsson

4.3.3. ábra: Sikló motoros nedvesített felülete különböző sebességek mellett

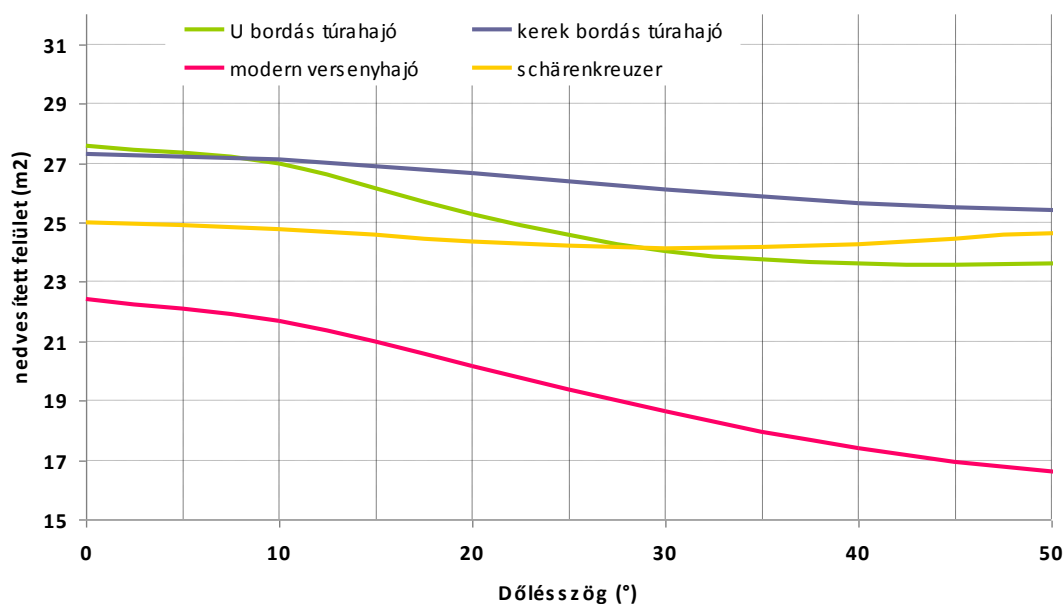
A toldalékok ellenállására egyes szakirodalmak (pl. Larsson) közelítő összefüggéseket közölnek.

4.3.2 A vitorlások ellenállását befolyásoló hajótest-paraméterek

4.3.2.1 Nedvesített felület

Mint korábban látható volt, a súrlódási ellenállás egyik meghatározó tényezője a hajó nedvesített felülete. A nedvesített felület nagysága természetesen a hajó alakjával van összefüggésben. Adott térfogathoz a gömb adja a legkisebb felületet, ez azonban hajónak nem alkalmas. Ez után egy henger – tehát körív keresztmetszetekkel rendelkező test – a legkedvezőbb, ezért kishajóknál – ahol a hordképesség nem elsődleges célparaméter – célszerű körív alakú bordákkal rendelkező hajót rajzolni a nedvesített felület minimalizálása érdekében. Erre tipikus példa lehet a balatoni vizekről is ismert schärenkreuzer, vagy éppen az R yachtok.

Míg nagyhajóknál a nedvesített felület nagysága jellemzően a terheléssel változik leginkább, vitorláshajóknál a dőlésnek van nagyobb befolyása. Az említett nagyon karcsú, kerek bordaformájú hajóknál a nedvesített felület és így a súrlódási ellenállás sem nagyon változik a dőlés függvényében. A nem körív, hanem inkább U bordákkal rendelkező lapos fenekű hajótestek nedvesített felülete azonban a dőléssel határozottabban csökken, ami kedvezőnek mondható az ellenállás szempontjából. Ilyen hajóknál – pl. jolléknál, vagy ahol a legénység tömege összemérhető a hajó tömegével – azért szokták a legénységet gyenge szélben a szél alatti oldalra ültetni, hogy így megdöntve a hajót csökkentsék a súrlódási ellenállást, amely kis sebességnél gyakorlatilag a teljes ellenállást adja. Még drasztikusabb csökkenést lehet elérni a 4.1.26. ábra mutatott lapos, széles de kerek bordaformájú modern versenyhajóknál. A nedvesített felület nagyságának változását a 4.3.4. ábra szemlélteti.



4.3.4. ábra: A nedvesített felület változása a dőlésszög függvényében néhány vitorlášhajó-típusnál

4.3.2.2 A megdőlt hajó vízbemerült részének alakja

A korábban tárgyalt dőlés miatti többletellenállás abból adódik, hogy a dőlés során a hajótest vízbe merülő részének alakja a kezdeti szimmetrikushoz képest akár jelentősen is aszimmetrikussá válhat. Megfelelő forma választásával az alakellenállásnak ez a növekedése jelentősen lecsökkenthető. Elméletben megint a gömb, illetve a henger a legkedvezőbb, hiszen ezeknél a vízbe merült rész alakja nem változik a dőlés során. A karsú schärenkreuzer-ek tehát ilyen szempontból is igen kedvezők. Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy stabilitás szempontjából az ilyen alak igen előnytelen, hiszen sem a gömbnek, sem a hengernek nincsen formastabilitása (ld. korábban). Vagyis ahhoz, hogy az ilyen jellegű hajók nagy vitorlafelületet hordhassanak nagy súlystabilitásra van szükség. Ez esetleg nagy össztömeget is jelenthet, ami a sebesség szempontjából nem kedvező.

A kör-keresztmetszet előnyeit nagy szélességgel és lapos kialakítással (vagyis nagy sugarakkal) kombinálva azonban olyan hajóalakhoz jutunk, mely a dőlés során megtartja szimmetrikusságát, kis vízkiszorítást is lehetővé tesz (a lapos forma miatt) és a nagy szélesség miatt jelentős vízkiszorítás-súlypont elvándorlás is tapasztalható, nagy formastabilitást biztosítva ezáltal. Ha ehhez alacsony rendszersúlypont párosul, akkor egy igen nagy stabilitású, kis tömegű vagyis összességében igen gyors hajót nyerhetünk. Ez a tervezési trend figyelhető meg számos óceáni és tavi versenyhajón is (pl. Open 60, Volvo70, Nautic 370, CODE8), de ma már a túrahajókon is egyre inkább alkalmazzák ezt az elgondolást (pl. ELAN-ok, Jeanneau-k egyes új típusai).



forrás: www.rodgermartindesign.com

4.3.5. ábra: Kerek bordametszetű vitorlás vízvonalai megdőlt helyzetben is szimmetrikusak maradnak

Mivel a szélesség sok hajónál akár a szabályok, akár a praktikum miatt korlátozott, a hajók alsó köríves részét oldalt egyszerűen egy (közel) függőleges oldallal levágják, így ezekenél a vitorlásoknál is kialakul a sarkos forma és a sarokél. Ilyen hajót mutat a 4.3.6. ábra. Ilyen megoldás esetén azonban meghatározható egy maximális dőlésszög, melyen túl a sarokél a vízbe ér, és a víz alatti rész jelentősen eltorzulhat. Máshogy fogalmazva, a sarokél helyzetét (vagyis a magasságát, hiszen helyzetét keresztirányban a hajó maximált szélessége már meghatározza) a várható üzemi dőléshez kell igazítani. A magasságot azonban a körívfenékmetszetek is befolyásolják. Mindebből látható, hogy az optimális kialakítás igen komoly feladat, amelyben azonban a modern számítástechnika sokat tud segíteni.



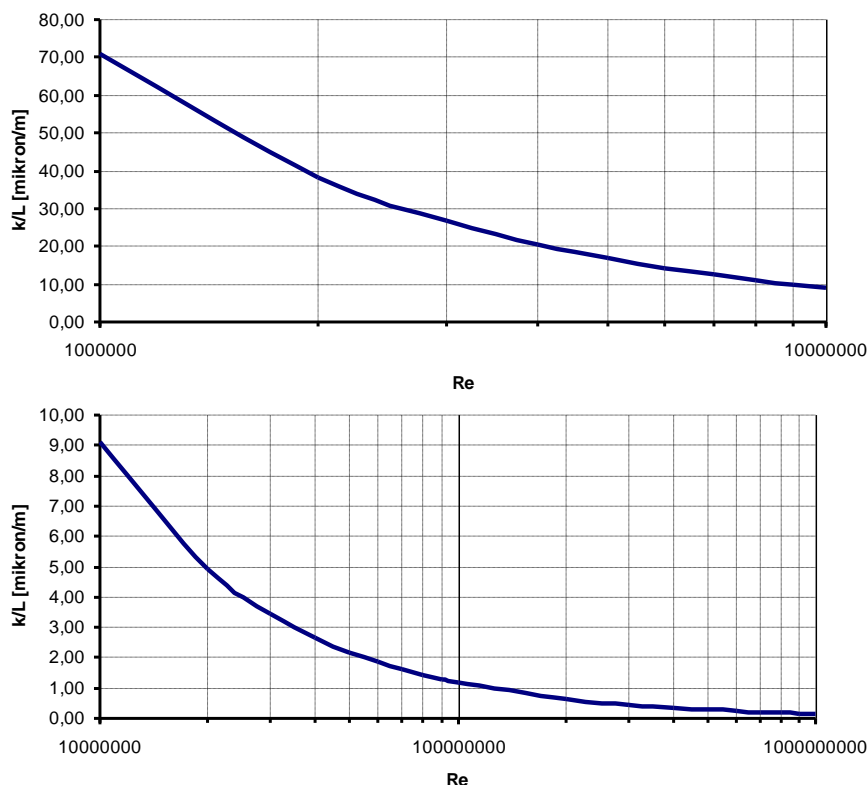
forrás: www.code8.hu

4.3.6. ábra: CODE8-as vitorlás a jellegzetes sarokélel

4.3.2.3 Felületi érdesség

Mint láttuk, a súrlódás a felületi érdesség javításával is csökkenthető, ezért meg szokták adni a hidraulikailag sima felületet (tehát minimális súrlódási ellenállást) biztosító legna-

gyobb megengedett felületi érdességet. A súrlódási tényező diagramjából nyilvánvaló, hogy ez az érték a sebesség függvénye, és hogy minél nagyobb a sebesség, annál kisebb a megengedhető érdesség annak érdekében, hogy a felület még hidraulikailag simának legyen tekinthető (4.3.7. ábra).



4.3.7. ábra: A hidraulikailag sima felülethez megengedhető legnagyobb relatív felületi érdesség

4.3.2.4 Vízkiszorítás

Kishajókon végzett szisztematikus modellkísérletek megmutatták, hogy a maradékellenállást leginkább befolyásoló tényező a vízkiszorítás (azaz a hajó tömege). Az eredmények szerint a maradék ellenállás a 0,12-0,75 Froude-szám tartományban a hajó súlyának általában 0-10%-a. Érdekes eredménye a kísérleteknek, hogy a vízkiszorítás mellett az ellenállást befolyásoló formai paraméterek – a hossz-vízkiszorítás arány (a $L_{WL}/Disp^{1/3}$), a hengeres teltség (c_p), az LCB , a B_{WL}/T_c és L_{WL}/B_{WL} , ezekről a továbbiakban még szólunk – a maradékellenállást mindössze 10-20%-ban változtatták meg, ez alapján tehát kijelenthető, hogy azonos vízkiszorítású hajók maradékellenállása nagyjából azonos. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy ugyanolyan arányokkal (geometriával) rendelkező hajóknál egy kisebb tömegű hajó maradékellenállása a tömegével arányosan kisebb egy másikhoz képest. A formai paramétereknek egy meghatározott Froude-szám alatt gyakorlatilag nincs befolyása a maradékellenállásra, vagyis e sebesség alatt a hajó lehet, hosszú, keskeny, széles, telt, stb.

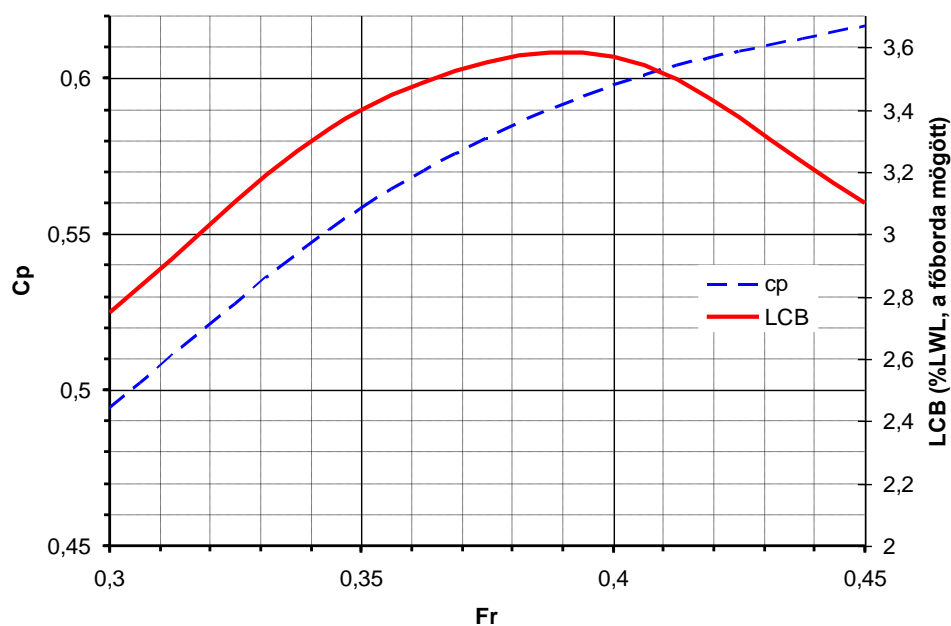
4.3.2.5 A hossz-vízkiszorítás arány

A hossz-vízkiszorítás arány tulajdonképpen azt jelenti, hogy a hajó tömege milyen hosszon oszlik el. Ezt az arányszámot karcsúságnak is szokták nevezni. A maradékellenállás szempontjából a minél nagyobb érték a kedvező, de hatása lényegében abban jelentkezik, hogy egy bizonyos határ felett érhető csak el a nagyobb ($Fr = 0,45$ felet-

ti) sebességtartomány. E határ alatti hajóknál a hajó ellenállásgörbéje a 0,4-es Froude-szám környékén már olyan meredek, hogy további sebességnövekedés nehezen képzelhető el normál körülmények között (ld. korábban). A határt sok egyéb paraméter (mint a stabilitás vagy a bordák alakja) is befolyásolja, de a szakirodalmak vitorlášhajókra általában az 5,7-es értéket jelölik meg. Egy 11m-es L_{WL} -lel rendelkező hajónál ezzel az értékkel a tömeg 7 tonna körülire adódik, ami ma már egyáltalán nem kivitelezhetetlen. Sok modern versenyvitorlás lényegesen nagyobb karcsúsággal rendelkezik. A stabilitással foglalkozó fejezetben említett Libera típus bőven 8 feletti értékkel bír, tehát elég karcsúnak tekinthető ahhoz, hogy a $Fr = 0,45$ -t átléphesse (nyilván megfelelő szélviszonyok esetén). Ilyen vonatkozásban tehát olyan vitorlás lenne célszerű, amely hosszához képest igen kis tömegű, de a $Fr=0,45$ felett könnyen siklásba jön, vagyis kellően széles-lapos fenékkal rendelkezik. E kialakításra való törekvés jól megfigyelhető a modern versenyvitorlásokon.

4.3.2.6 A hengeres teltség

A hengeres teltség valójában azt jelenti, hogy a hajó középső részéhez képest a hajó eleje és vége mennyire telt. Adott vízkiszorítás mellett a c_p növelése – vagyis hogy a középrészről elvett vízkiszorítás a hajó végeibe (előre és hátra) kerül – a maradékellenállás alakellenállás részét növeli, a hullámellenállás összetevőt csökkenti, de ha a térfogat átrendezése túlzott mértékű, az alakellenállási rész meredekebben nő, és így eredőben nő a maradékellenállás is. A szisztematikus modellkísérletek számszaki eredményeiből a különböző sebességekhez (Froude-számokhoz) levezethetők a minimális maradékellenállást biztosító hengeres teltség értékek. Ezek a közepes és nagyobb tömegű hajókra (tehát nem a speciális versenyhajókra) a 4.3.8. ábrán láthatók. Mivel az optimum sebességfüggő, a hajó sebessége pedig nagyban függ a haladás valódi szélhez vett irányától és a szélesebbségtől, a tervezéskor el kell dönteni, hogy melyik irányra (pl. cirkálás vagy raum) és milyen szélre optimalizálunk. A szél sebességét és irányát azonban egy földkerülő versenyen, de még egy hosszabb tavi távversenyen is igen nehéz előre megmondani (annak ellenére, hogy vannak bizonyos ismert tendenciák). Mindebből látható, hogy nem lehet erős szélben, raumban és könnyű szélben cirkálaskor is ugyanolyan jól teljesítő hajót tervezni – a diagram alapján az előbbihez 0,6 vagy akár annál nagyobb, az utóbbi esethez pedig 0,5-nél kisebb optimális hengeres teltség tartozik. A kérdés (és a győzelem) sokkal inkább azon múlik, hogy melyik tervezőnek sikerül jobb kompromisszumot kötni. Nagyobb sebességű, könnyű versenyhajóknál, melyek a félsikló állapotot is elérhetik, a helyzet sokkal komplikáltabb. A sikláshoz ugyanis célszerű a széles lapos hátsó rész, sőt akár a vízbe érő tükör is, ami nagy c_p -t jelentene, de egy ilyen hajó igen rosszul teljesítene gyenge szélben, kis sebesség mellett. Ebben a sebességtartományban azonban főleg csak vízbe merülő tükörrel rendelkező motorosokat vizsgáltak, így a szakirodalmakból a gyors és könnyű vitorlásokra használható információkat nem nagyon lehet találni.



4.3.8. ábra: Optimális c_p és LCB értékek vitorlásoknál

4.3.2.7 LCB

A vízkiszorításos sebességtartományra az optimális LCB értéket szintén a modellkísérletek eredményeiből számíthatjuk ki. Az értékeket a 4.3.8. ábra mutatja, itt is a kisebb sebességtartományra és a közepes súlyú és nehezebb hajókra vonatkozóan. Természetesen itt is egymásnak ellentmondó feltételeknek kellene egyszerre megfelelni. Egy könnyű, modern versenyhajóknál a raumban sikláshoz egy, az ábrán vázoltnál nagyobb LCB érték (pl. 6%) szükséges. Ez szép, karcsú orrkiképzést tesz lehetővé, kis vízvonallal belépési szögekkel, amely nemcsak a maradékellenállást, de a hullámos vízen jelentkező többletellenállást is csökkenti. A másik oldalon viszont ez az érték magával hozza azt, hogy a hajó orr részében relatíve kicsi a tartalék-vízkiszorítás. Háromnegyed- és hátszélben, hullámos vízen így a hajó orra könnyen lefűr, ami nagy mennyiségű víz fedélzetre áradásával és akár a hajó sebességének drasztikus csökkenésével jár együtt. A másik kedvezőtlen hatás az, hogy a dőléssel megnő az ilyen hajók orra billenő hajlama, így a hajó középrészén hátul akár annyira kiemelkedik a vízből, hogy a kormánylapát a víz felszínével találkozik (ellenállása megnő, a kormányhatás romlik). Mindezek miatt sok hajónál célszerűbb az LCB -re kisebb értéket választani.

4.3.2.8 Vízvonal szélesség-testmerülés arány

Vitorlásoknál a B_{WL}/T_c arány megválasztása megint kompromisszumot igényel a gyenge és erős szélre és a cirkálásra vagy raumra optimalizálás között. A döntést befolyásolják egyéb paraméterek, úgymint a hossz-vízkiszorítás aránya, a vitorlafelület nagysága, a meglévő stabilitás, a legénység stabilitást növelő hatásának aránya, a belső elrendezéssel kapcsolatos igények, stb. Nyilvánvaló, hogy ha egy hajó könnyű, akkor a szélesség növelésével lehet a stabilitását növelni. Tehát minél nagyobb a hossz-vízkiszorítás aránya, annál inkább szükséges nagyobb B_{WL}/T_c arányt választani. Ez kis sebességeknél nagyobb maradékellenállást jelent, de minél nagyobb a sebesség ($Fr = 0,45$ felett), annál inkább elmondható, hogy a B_{WL}/T_c arány – a siklási tulajdonságok javulása révén – kifejezetten

csökkenti a maradékellenállást. Kisebb sebességekre tervezett hajóknál azonban más okok miatt is célszerűbb az B_{WL}/T_c arányt kisebbre venni. A nagy szélesség ugyanis nagyban növeli a nedvesített felületet és így a súrlódási összetevőt, és növeli a hullámzásban jelentkező plusz ellenállást is, hiszen a bólogató és merülő lengések során egy szélesebb hajó nagyobb víztömegeket mozgat meg, több energiát veszítve ezáltal.

4.3.2.9 A tökesúly hatása a hajótest középrészére

A nagy odafigyeléssel tervezett hajótest hullámképe (és így hullámellenállása) a tökesúly hatására számottevően megváltozhat, különösen dőlés közben. A hajótesten cirkáláskor nagy hidrodinamikai oldalero keletkezik, amelynek jelentős része a tökesúlyon ébred. A hidrodinamikai oldalero biztosító, a tökesúly két oldala között levő nyomáskülönbség – ha a tökesúly dőlés közben közel kerül a víz felszínéhez – egy hullámot indít el, amely természetesen a hajótest hullámrendszerével interferálva hatással van az ellenállásra. A hullámellenállást tehát nem pusztán a hajótestre, hanem a tökesúllyal együtt kell vizsgálni, és ennek figyelembevételével kell kialakítani a vízkiszorítás eloszlást. A térfogat hossz menti eloszlását tulajdonképpen a bordaterület-eloszlás görbe és a hengeres teltség mutatja. Ha csak a hajótestet vesszük alapul, a bordaterület-eloszlás görbe – egy jól megtervezett hajónál – általában szép folytonos, minden hirtelen változástól mentes. Azonban nyilvánvaló, hogy a tökesúly térfogata – mivel az is a hajó része – ezt megváltoztatja: a tényleges c_p némileg csökken. Úgy kell tehát a bordaterület-eloszlást felvenni, hogy a hajó középső részén a tökesúly térfogatával is számolni kell. Ezt általában úgy érik el a tervezők, hogy a tökesúly környékén a hajótestet „kilapítják”, elvesznek annyi térfogatot, amennyit a tökesúly jelent, és ezt a hajó elülső és hátsó részén „elkenik”. Ezzel a módszerrel részben kompenzálni lehet a tökesúlyról elinduló hullámrendszer negatív hatását. A kilapítással azonban a tökesúly közelebb kerül a vízfelszínhez, amely megint csak kedvezőtlenül befolyásolja a hullámellenállást. Ha innen nézzük, akkor célszerűbb az U-bordák helyett mélyebbre nyúló kerek vagy V-alakú bordákat használni.

Meg kell azonban jegyezni, hogy minél kisebb a tökesúly térfogata a hajótest vízkiszorításához képest, annál kisebb ennek a problémának a hatása. Modern hajók „penge tökesúlyainál” más, mint egy nyílttengeri túrahajónál.

4.3.3 A motorosok ellenállását befolyásoló hajótest-jellemzők

A motoros hajók a tervezési sebesség tekintetében lényegesen szélesebb tartományon mozognak, mint a vitorlások. Itt a $Fr = 0,3$ -tól nem ritkák a jóval $Fr = 1$ feletti relatív sebesség értékek sem. A hajótest ellenállását a különböző sebességtartományokban más paraméterek determinálják. Alacsony sebességeken, vízkiszorításos üzemben a nagyhajós gyakorlatban megismert szokásos tényezők (mint pl. a vízkiszorítás, a c_B , c_P , B/T , hossz-vízkiszorítás arány, stb.) a mértékadóak. Nagyobb Froude-számoknál azonban ezek közül egyesek jelentősége (pl. c_B , B/T) lecsökken, helyükbe más tényezők lépnek. A következőkben mindezeket részletesebben is bemutatjuk.

4.3.3.1 Nedvesített felület, felületi érdesség

A felületi érdesség a vitorlásoknál elmondottakkal azonosan befolyásolja a motorosok ellenállását is.

A nedvesített felület vonatkozásában a vízkiszorításos motorosok esetében igazak az eddig említettek, de értelemszerűen a motorosokra nem jellemző a dőlés, így ennek vonzataival nem kell foglalkozni. Motoros kishajóknál vízkiszorításos üzemben csak a terheléstől függően változik a nedvesített felület, de ennek mértéke általában elhanyagolható. Siklóhajók esetén a növekvő hidrodinamikai felhajtóerő hatására a test egyre jobban kiemel-

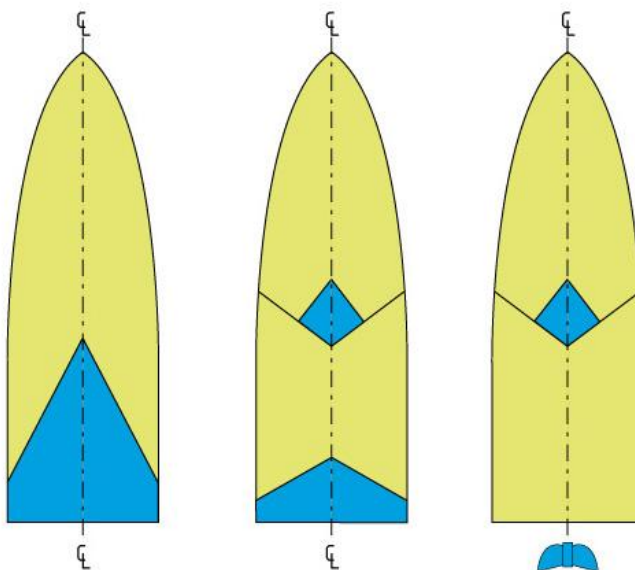
kedik a vízből, és ennek természetes következménye a nedvesített felület, és így a súrlódási ellenállás csökkenése.

Érdeemes még megemlíteni a siklóléceket (spray-rails) és a lépcsős fenékkialakítást. Mindkettőt elsősorban a hidrodinamikai felhajtóerő növelése érdekében alkalmazzák, de emellett mindkét módszer hozzájárul a hajótest nedvesített felületének csökkenéséhez is. A siklólécek a hajótesttől elválasztják a felfelé verődő vizet és vízpermetet. A lépcsős fenék kismértékben megtöri a felületet és helyes kialakítás mellett oldalról levegő jut be a hajótest alá. Így a lépcső után már csak víz-levegő keverék érintkezik a hajótesttel, ami szintén csökkenti a súrlódást.



www.thehulltruth.com

4.3.9. ábra: A siklólécek és a lépcsős fenék...



forrás: www.fastelectrics.net/monohulls.php

4.3.10. ábra: ...és hatása a nedvesített felületre

4.3.3.2 Vízkiszorítás

Ugyanúgy, mint a vitorlásoknál, a motorosoknál is a vízkiszorításnak van a legnagyobb hatása a maradékellenállásra. Az ott elmondottak a motorosokra is igazak. Kiegészítjük azonban ezeket azzal, hogy a hajótest optimalizálása során a vízkiszorítás mellett jelentő-

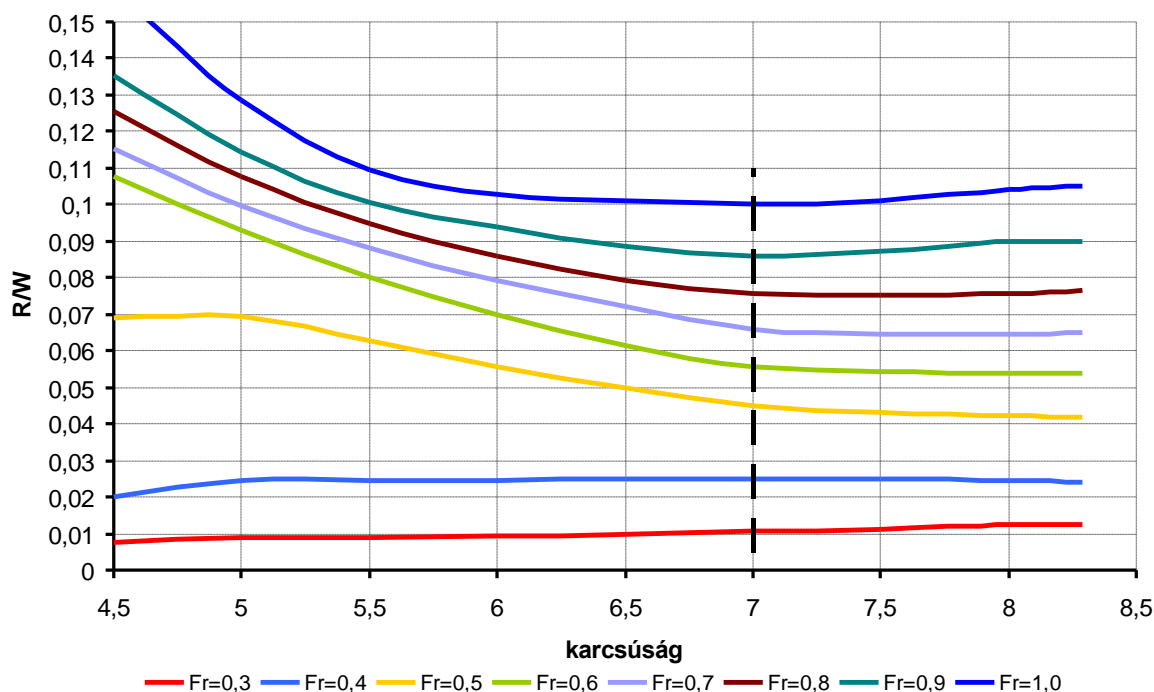
séggel bíró formai paraméterek helyes megválasztása – noha azok a vízkiszorításhoz képest kisebb mértékben befolyásolják az ellenállást – még mindig jelentős üzemanyag-fogyasztás-, és így éves üzemeltetési költség-csökkenést eredményezhetnek.

4.3.3.3 Hossz-vízkiszorítás arány (karcsúság)

A vitorlásokkal ellentétben, a motorosoknál nem igazán az a kérdés, hogy vajon átléphető-e a testsebesség környékén jelentkező nagy relatív hullámhegy a maradékellenállás görbéjében, hanem az, hogy milyen karcsúság mellett adódik minimális ellenállás a különböző sebességtartományokban.

Lekerekített medersorú (round bilge) hajótestek kísérleti eredményei (4.3.11. ábra) alapján látható, hogy a kisebb sebességeknél ($Fr = 0,4$) a teljes fajlagos ellenállás – mely a hajó egy tonnájára vetített teljes ellenállás értéke – gyakorlatilag független a karcsúságtól. (Az ellenállás hajótömegre vetítésével küszöbölhető ki a vízkiszorítás ellenállásra gyakorolt hatása). A fél-sikló és siklási tartományokban azonban 7-es karcsúság alatt az ellenállás drasztikusan megemelkedik a kisebb hossz-vízkiszorítás arányok esetén. Ezen kívül az eredmények egy másik interpretációja, hogy minél kisebb a karcsúság (7 alatt), annál jobban jelentkezik a hirtelen ellenállásnövekedés $Fr = 0,4$ és $0,5$ között (a hullámhegy a testsebesség környékén). Ez 7-es karcsúság felett szinte eltűnik, és a diagramból látható, hogy az ellenállás szinte lineárisan növekedik.

További szisztematikus modellkísérletek eredményeit összefoglaló szakirodalmak megállapítják azt is, hogy $Fr = 0,5$ alatti sebességeknél a diagramon nem látható nagyobb, kb. 10-11-es karcsúság mellett lesz az ellenállás minimális. Ezen túlmenően, kb. 18-as hossz-vízkiszorítás arány után a súrlódási összetevő meredekebben nő, mint ahogy a maradékellenállás csökken, így a teljes ellenállásban növekedés tapasztalható.



4.3.11. ábra: Lekerekített medersorú hajók fajlagos ellenállása a karcsúság függvényében

Itt jegyezzük meg, hogy a karcsúság nem keverendő össze a hajótest hossz-szélesség (L_{WL}/B_{WL}) arányával. Nyilvánvaló azonban, hogy a két arány egymástól nem független,

hiszen általában ugyanolyan vízvonalhosszú, de különböző vízvonalszélességű hajók vízkiszorítása is jellemzően különböző. Ez azonban nem feltétlenül van mindig így.

4.3.3.4 Hajótest alak, bordaforma

Annak érdekében, hogy a különböző hosszal, vízkiszorítással és alakkal rendelkező hajótestek ellenállása összevethető legyen, többféle ellenállásmegjelenítési módszert is kidolgoztak. Ezek között található a Telfer-tényező is, mely a következőképpen írható fel:

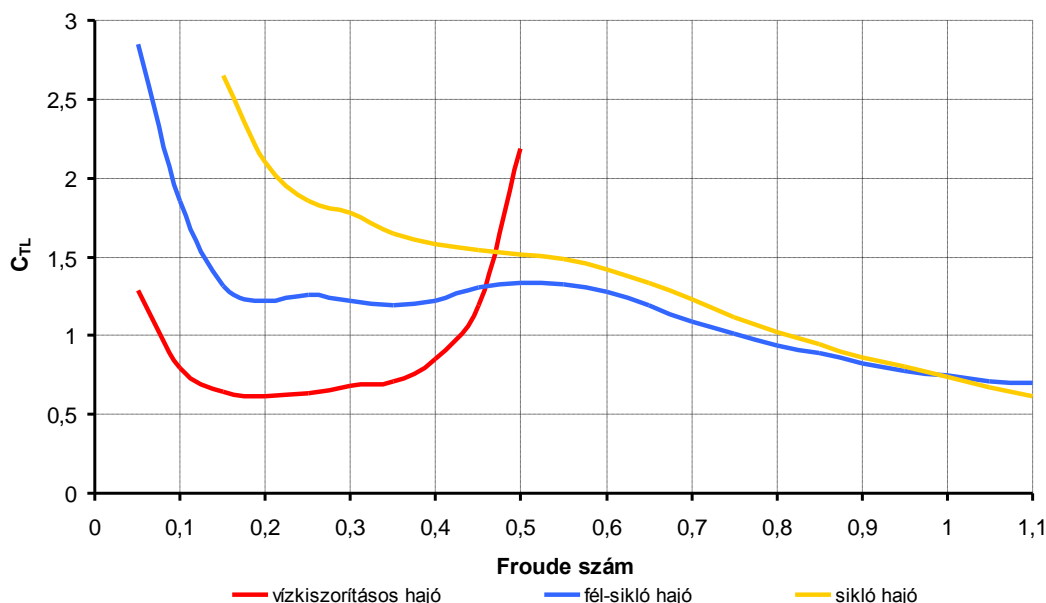
$$C_{IT} = \frac{R_T / Disp}{\left(v / \sqrt{L_{WL}}\right)^2} = \frac{R_T \cdot L_{WL}}{Disp \cdot v^2}$$

ahol R_T a teljes ellenállás, $Disp$ a hajó vízkiszorítás tömege, v a sebesség, L_{WL} a vízvonalhossz.

A 4.3.12. ábrán három különböző testforma teljes ellenállásra gyakorolt hatását láthatjuk. Az ellenállást a Telfer-tényező reprezentálja, a három különböző jellegzetes testforma pedig a következő:

- vízkiszorításos hajó – lekerekített medersorral, bulbaorral, kis bemerülő tükörrel;
- fél-sikló hajó – kisebb lekerekítés, esetleg kétszeresen sarkos forma;
- sikló hajó – sarkos kialakítás, nagy bemerülő tükörrel, konstans fenékfelhajlással.

Az ábrából jól látható, hogy a vízkiszorításos testforma ellenállása 0,4-0,45-ös Froude-szám után meredeken emelkedik, és a fél-sikló testforma ezeknél a sebességeknél már kisebb ellenállást biztosít. Egy újabb átmenet $Fr = 1,0$ -nél következik be, itt a teljesen sarkos hajó produkálja a legkisebb ellenállást. Az nyilvánvaló, hogy a vízkiszorításos üzemre kerék, a teljes siklásra pedig sarkos forma való. Az igazán kérdéses a köztes fél-sikló állapot – amely sok kishajónak a tervezési sebességét jelenti. Bailey és Blount mérései alapján kijelenthető, hogy a nyugodt vizen mérhető ellenállás szempontjából a sarkos forma csak $Fr = 0,75$ felett célszerű. (Más szempontból – pl. nagyobb dinamikus stabilitás és iránytartás – azonban indokolt lehet használata kisebb sebesség mellett is.)



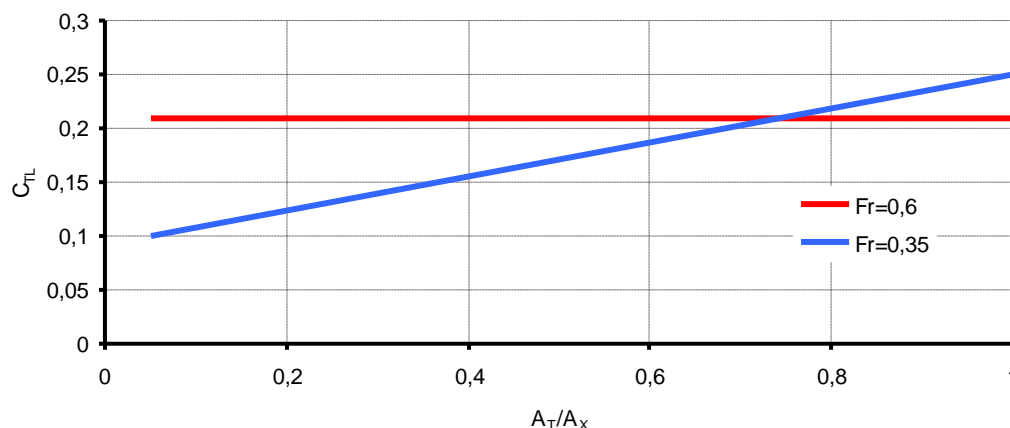
4.3.12. ábra: Telfer-tényező a Froude-szám függvényében, különböző hajóalakoknál

4.3.3.5 A_T/A_X arány

Az A_T/A_X arány a tükör vízbe merült felületének a maximális bordaterülethez viszonyított aránya. A motoros hajókon végzett kísérletek megmutatták, hogy a tükör vízbe merült részének relatív nagysága a sebesség függvényében különböző módon befolyásolja a hajók ellenállását. Kis sebességeknél a vízbe merülő tükör mögött igen nagy leválás (örvények) keletkezik, amely ennél a sebességénél az ellenállás jelentős részét adja. A sebesség növekedésével a hajótest fokozatosan felsiklik, majd egy bizonyos határ felett a tükör „szárazzá” válik (a víz a gerincvonallal és a hosszmetsetekkel párhuzamosan hagyja el a hajót). A gyakorlat azt mutatja, hogy ez a határ a tükör-merüléssel felírt Froude-szám $(v/(T_T \cdot g)^{0,5})$ $Fr_T = 2,5-3$ értékénél jelentkeznek. A hajó hosszának és tükör-merülésének arányából ki lehet számítani, hogy ez milyen Froude-számhoz tartozik. A hosszú kiküszöbölendő a 4.3.13. ábrán az ellenállást újra a Telfer-tényező segítségével jelenítjük meg, a vonalak különböző hajókra vonatkozó mérések által adott pontokra illeszthető trendvonalak. Az ábra jól szemlélteti, hogy míg $Fr = 0,35$ -nél a befolyás igen jelentős, addig nagyobb, a fél-sikló állapothoz tartozó sebességeknél a tükör relatív méretének hatása gyakorlatilag elhanyagolható az ellenállás szempontjából. Az ábrából jól látszik az is, hogy a vízkiszorításos sebességekre tervezett hajóknál a kis ellenállás érdekében minél kisebb bemerülő tükörfelületet célszerű választani.

Mindezek mellett meg kell jegyezni, hogy a nagy, akár 50-80%-os tükörfelület arány (és így az igen lapos, sokszor vízszintes hosszmetset- és gerincvonalak) választását az indokolja, hogy ezáltal biztosítható a hátsó részen nagyobb hidrodinamikus felhajtóerő, ami pedig a kisebb menet közbeni trimmhez járul hozzá (ld. az Egyensúly fejezetet). A nagyjából vízszintes úszáshelyzet – különösen a fél-sikló üzemiállapot kezdetén ($Fr < 0,4$) – jelentősen csökkenti az ellenállást. Látható tehát, hogy a trimm szempontjából viszont a nagyobb bemerülő tükörfelület lenne kedvező.

Az ellentmondás áthidalására olyan eszközöket alkalmaznak, amelyek a hajótest végén helyileg nagyobb nyomást hoznak létre és ezzel járulnak hozzá a kívánatos trimmhelyzethez. Ezek a segédeszközök (pl. trimmlapok, interceptor-ok) sok esetben állíthatók (a 4.3.14. ábrán hidraulikusan), így nem csak egy sebességnél működnek hatékonyan. Az általuk elérhető ellenálláscsökkenés akár 7-10% is lehet a fél-sikló üzemiállapotban.



4.3.13. ábra: A fajlagos ellenállás a bemerülő tükörfelület arányának függvényében



forrás: continuouswave.com/whaler/reference/trimTabs.html

4.3.14. ábra: Trimlap egy motorcsónak tükrén

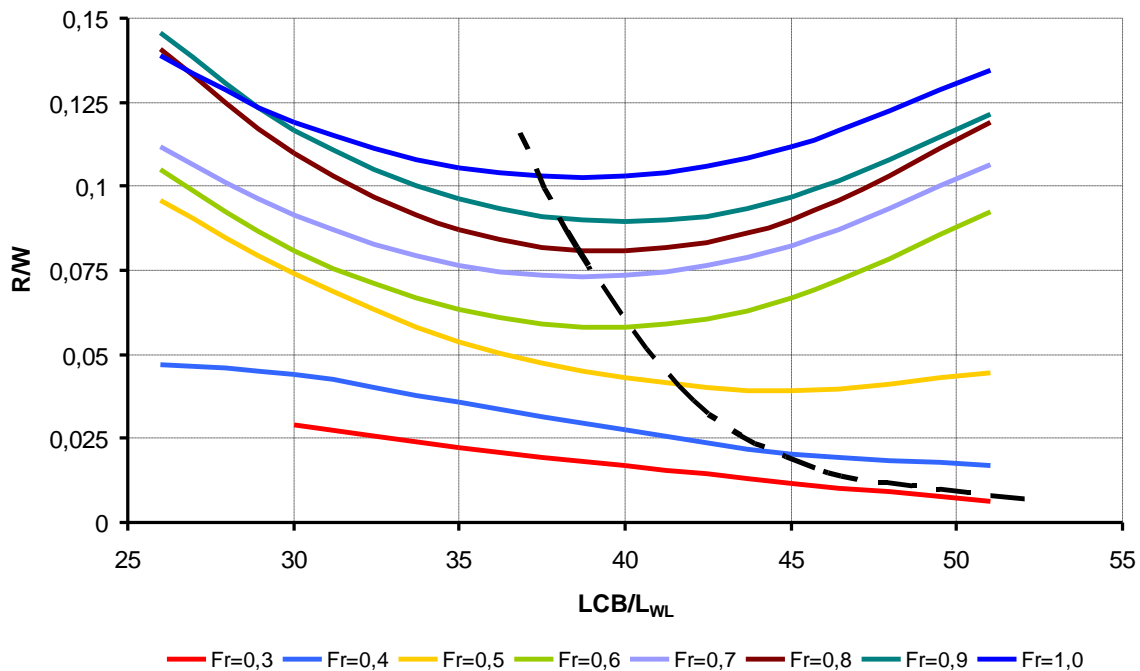
4.3.3.6 LCB/ L_{WL} arány

Mint láttuk, nagyobb sebességnél a hajót egyre inkább a hidrodinamikai felhajtóerő tartja. Annak érdekében, hogy a hajó ellenállása minimális legyen, a hajó menet közbeni trimmjét kell megfelelően beállítani. A menet közbeni trimm a hajóra ható erők egymásrahatása révén alakul ki úgy, hogy az erők és nyomatékaik egyensúlyban legyenek. A tapasztalat és a mérések azt mutatják, hogy növekvő sebességgel annak érdekében, hogy minimális ellenállást adó trimet lehessen létrehozni, a súlypontot célszerű egyre hátrébb vinni. Míg a vízkiszorításos üzemben a tükörtől mért súlypont optimális értéke a vízvonalhoz felére adódik ($LCB/L_{WL}=50\%$), addig a fél-sikló üzemállapotban ez fokozatosan csökken, teljes siklásnál pedig akár a 35%-nál is kisebb lehet (4.3.15. ábra).

A diagramból egyben az is kitűnik, hogy a nem megfelelő súlyponthelyzet milyen nagy arányú ellenállásnövekedést eredményez. Az LCB itt az adott nyugalmi úszásvonalhoz tartozó vízkiszorítás súlypont hosszkoordinátája, mely értelemszerűen azonos a hajó LCG -jével. Az optimalizáláskor érdemes a félterheléshez tartozó tömegeloszlást alapul venni.

4.3.3.7 Bulbás orr

Azoknál a nagyobb méretű kishajóknál, melyek nagyobb távolságokat tesznek meg azonos sebességgel, a bulbás orrkialakítás a nagyhajókhoz hasonlóan kedvező a maradékellenállás csökkentése érdekében. Ma már a CFD technikák lehetővé teszik, hogy az adott kishajóra olyan bulbát tervezhessünk, amely a megnövekedett nedvesített felület ellenére mintegy 15%-kal csökkenti a teljes ellenállást. Egyes kedvtelési célú hajókon végzett mérések szerint a bulba nem is csak a vízkiszorításos üzemben volt hatékony, hanem a magasabb Froude-számok tartományában is, egészen $Fr = 0,55$ -ig. Megjegyezzük azonban, hogy a bulbás orr fejlesztése inkább csak a nagyméretű luxusmotorosokra jellemző (melyek nagyrészt hivatalosan már nem is minősül kishajónak), ahol az üzemeltetési költségek várható csökkenése akkora előnyt jelent, hogy érdemes vállalni az optimalizálás többletköltségeit.



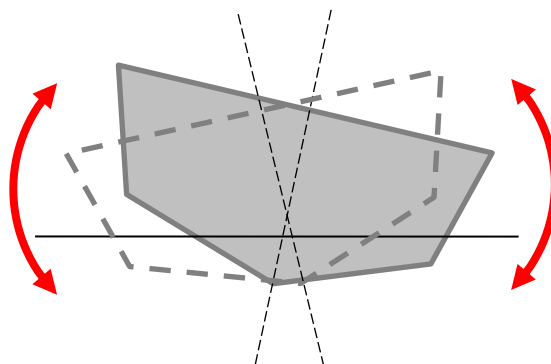
4.3.15. ábra: A súlypont optimális helye a minimális fajlagos ellenálláshoz

4.3.3.8 Motorosok instabilitása nagy sebességnél

Azoknál a hajóknál, ahol a sebesség miatt nagyobb hidrodinamikus felhajtóerőre lehet számítani, bizonyos esetekben előfordulhat, hogy a sebesség által indukált erők aszimmetrikusan keletkeznek. Ez a hajó megdőléséhez és komolyabb stabilitási problémákhoz vezethet.

A sebesség révén kialakuló instabilitásnak alapvetően kétféle formája van. Az egyik kategóriába tartoznak a billenő (chine-walking) lengések és az „Egyensúly” fejezetben már tárgyalt bólogató (porpoising) lengések. A chine-walking, vagyis a „sarokéleken táncolás” általában akkor alakul ki, ha a hajó íves sarokél-vonallal rendelkezik. Az alulról domború (konvex) íven annál nagyobb depresszió keletkezik, minél nagyobb a görbület. Egészen addig, míg a hajó pontosan vízszintesen úszik, a két oldalon keletkező depresszióból származó szívóerők kiegyenlítik egymást. A valóságban azonban a legkisebb oldaldőlés mellett már a nagyobb merülő oldalon nagyobb hatás jelentkezik, a test még jobban elkezd dőlni, egészen addig, míg a vízkiszorításból származó stabilizáló nyomaték ki nem egyenlíti az így keletkező nyomatékokat. Ha a szívóerő a haladás során bármilyen zavarás miatt megszűnik, akkor a hajó nem lesz egyensúlyi helyzetben: a stabilizáló nyomaték hatására elkezd visszabillenni az egyensúlyi helyzetébe, de lendületénél fogva azon túl is. A másik oldalon a folyamat megismétlődik, és így kialakul a periódikus sebesség-indukálta lengés. Szerencsétlen esetben a lengés amplitúdója olyan nagy lehet, hogy a hajó felborul.

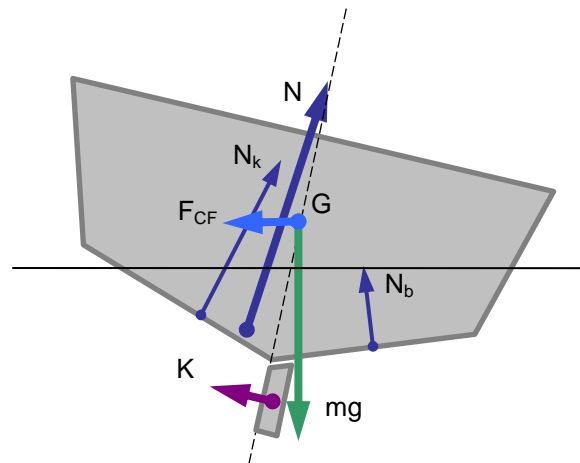
Normál esetben a nagy sebességű hajók oldala relatíve sima, a hosszmetsetek - legalábbis a vízbe merülő részen – szinte egyenesek. A hajó elülső része azonban szinte minden motoroson konvex ívekkel rendelkezik, így ha a hajó súlypontja igen elől van (kicsi a trimm vagy akár orrtrimm van), és ezek a részek is vízbe érnek, könnyen kialakul a „táncolás”. A jelenség bármilyen más orrtrimmet okozó körülmény (pl. trimmlapok alkalmazása, túlterhelés, motor-tolóerő hatásvonalának változtatása) miatt is létrejöhet.



4.3.16. ábra: Chine-walking

A második kategóriába az aszimmetrikus hidrodinamikai erők hatására bekövetkező statikus oldaldőlés okozta olyan mozgások tartoznak, melyek nem tekinthetők periodikusnak. A sebesség hatására a hajótest egyik oldalán relatív depresszió keletkezik, mely a hajót oldaldőlésre készíteti. Ennek következménye, hogy a hajótest vízbe merült részén olyan nyomadék keletkezik, amely igyekszik kitéríteni a hajót haladási irányából. A jelenség mindaddig fennáll, míg a hajó sebességét nem csökkentik. Főleg olyan lekerekített medersorú és jellemzően túlterhelt, orrnehéz hajóknál jelentkezik, melyek sebessége meghaladja a 0,75-ös Froude-számot. Sarkos hajóknál csak nagyobb sebességnél kell számítani erre a jelenségre, itt a határ $Fr = 0,9$ felett van.

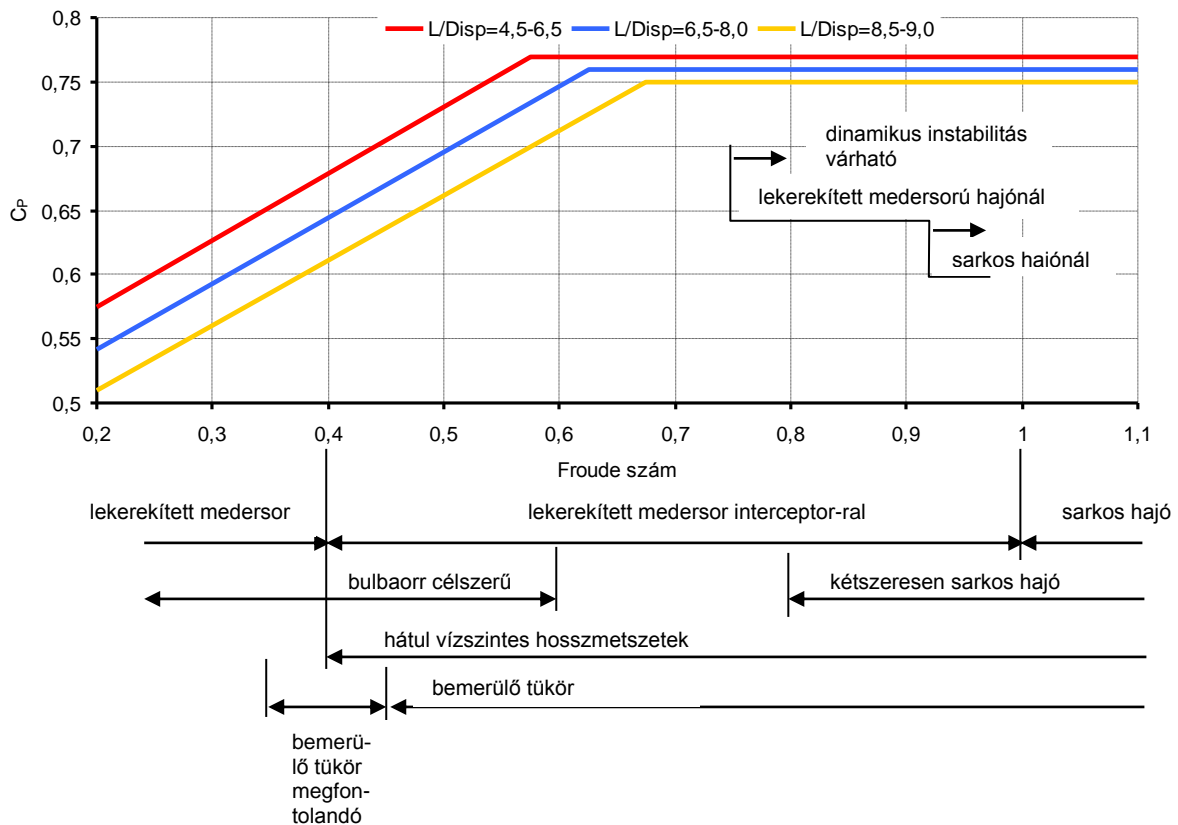
Meg kell még említeni a nagy sebességű hajón fordulás közben keletkező erők egyensúlyát is. Amikor a kormányt elfordítjuk, azon a fordulás irányával ellentétes irányba mutató oldalirányú erő keletkezik. Ennek eredményeképpen a hajó elkezd irányt változtatni, de mivel az oldalirő a hajó hátulján keletkezik, ezért egyben a hajó a rendszersúlypont körül el is fordul. Az elfordulás miatt a hajótest a víz áramlás irányához képest állásszögbe kerül, amely egy az előzővel ellentétes irányú oldalirőt generál, főleg a hajótest elülső részén. Eddigre a mozgás iránya is megváltozik már: a hajó kezd íves pályán haladni, így a rendszersúlypontban kialakul a „kifelé” (az ív görbületi középpontjától elfelé) mutató centrifugális erő (F_{CF}) (4.3.17. ábra). A hajótesten a nyomásból származó erők (N) a külső oldalon nagyobbak, mint a belsón, a különbség vízszintes komponense az állásszögből származó befelé mutató oldalirő. A függőleges összetevő is nagyobb kívül, mint belül, ez egy befelé billentő nyomadékot produkál. Ha az erők nyomadékait a G rendszersúlypontra számítjuk, akkor a centrifugális és a súlyerő nem ad nyomadékot. A kormánylapáton keletkező erő mindig befelé billenti a hajót, a nyomásból származó függőleges összetevő pedig a súlypont magasságától függően vagy befelé vagy kifelé. A legtöbb sikló motorcsónaknak elég alacsonyan van a súlypontja ahhoz, hogy az eredő nyomadék fordulási kör közepe felé billentsen, de egy-két magasabb felépítésű, ún. flybridge-el rendelkező hajónál előfordulhat, hogy a hajó akár veszélyesen is kifelé billen a forduló során. A vízkiszorításos üzemi hajóknál a nyomásból származó erő pusztán a hidrosztatikus felhajtóerő, amely a két oldalon nagyjából megegyezik, így ennek nincs nyomatéka. Az elfordulás miatti állásszögből származó erő gyakorlatilag vízszintes, de mindig vízvonal és ezért a rendszersúlypont alatti. Ennek nyomadékát kompenzálja a kormánylapáton ébredő erő nyomatéka úgy, hogy az eredő általában kifelé billenti a hajót.



forrás: Larsson

4.3.17. ábra: A motoroson keletkező erők kanyarodáskor

A korábbi külön alfejezetekben leírtakat nagyon jól összefoglalja a 4.3.18. ábra, melyben az egyes kialakítási lehetőségek célszerűségi tartományát szemléltetjük, mintegy tervezési segédletként.



forrás: Blount-McGrath

4.3.18. ábra: Tervezési segédlet motorosok kialakításához

5. A TŐKESÚLY

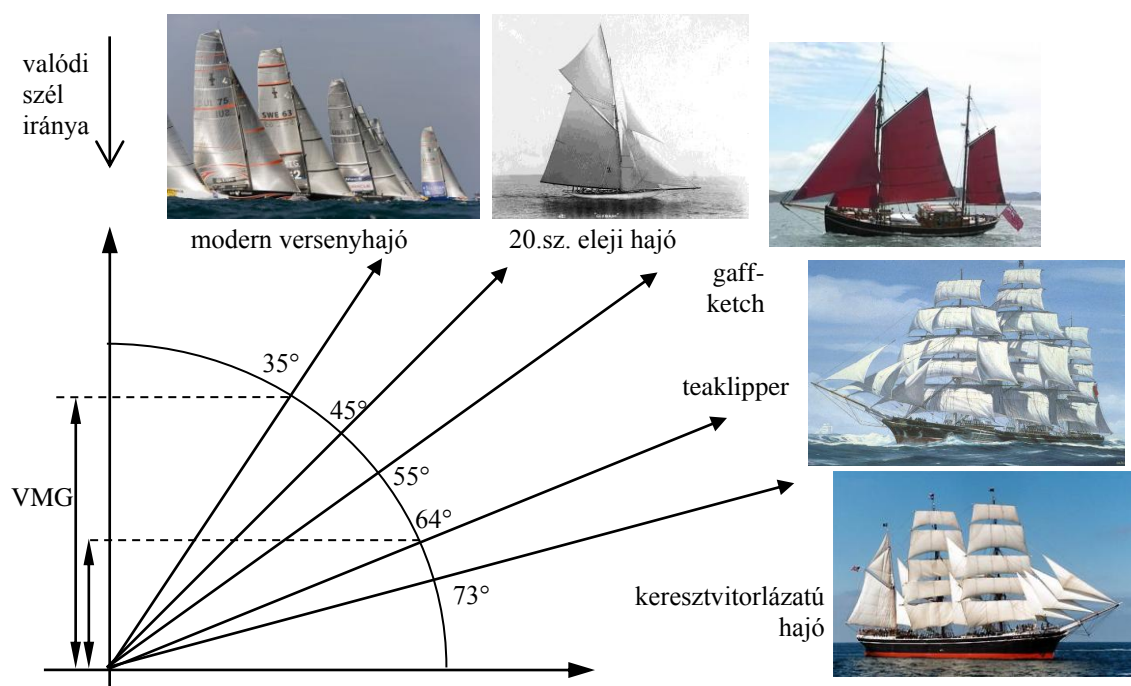
5.1 Bevezetés

A következő fejezetekben a vitorláshajók egy igen fontos elemével, a tőkésúlyal foglalkozunk. A tőkésúly feladata kettős:

- minél hatékonyabban állítsa elő a szükséges oldalerő nagy részét;
- növelje a hajó stabilitását, a tömeg, és annak minél mélyebbre koncentrációja által.

Fontos megjegyezni azonban, hogy mindkét funkciónak csak cirkáláskor és részben felszélben – tehát a szélhez közelebbi irányokon vitorlázva – van jelentősége, hiszen a többi irányokon a vitorlázon keletkező oldalerő nagymértékű csökkenése következtében nem alakul ki számottevő dőlés és oldalcsúszás. Ezekben az esetekben a tőkésúly csak a hajó ellenállását növeli.

A kisebb vitorláshajók hasonló funkciót betöltő eleme a felhúzzható uszony, de ez csak az első feladatot tudja ellátni, mivel a geometriai méretek miatt, még ha acélból készül, sem tud a hajótest és legénység tömegével összemérhető tömegű lenni. Előnyös tulajdonsága azonban, hogy raumban és hátszélben – amikor nincs csúszás – felhúzzható, így a hajó ellenállása csökkenhet. Az uszony felhúzzhatóságának másik oka, hogy a merülést csökkentjük, ezáltal a hajó a homokos partra kifuttatható.

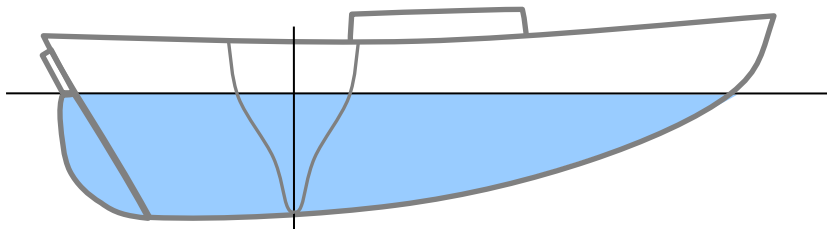


5.1.1. ábra: A vitorláshajók élessége különböző történelmi korokban

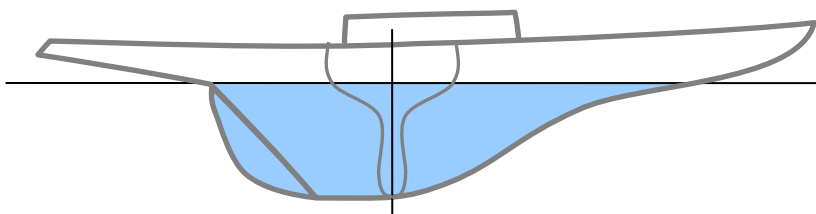
Kezdetben – még a kereskedelmi vitorlások korában – a hajóknak nem volt kifejezetten tőkésúlya, csak egy, a hajó középsíkjában, a hajó teljes hosszán végig futó szerkezeti eleme, melyet gerincnek, tőkének neveztek. Ezeknél a hajóknál a stabilitást a rakomány, a

felszerelés és az ágyúk tömege, illetve ha a hajó üresen haladt, a ballaszt, vagyis a tőkén elhelyezett nehezék (a test aljában felhalmozott homokzsákok, agyag vagy víz) súlya adta meg. Ezzel a módszerrel bizonyos szélerőig megfelelő stabilitást tudtak biztosítani, amikor pedig elkezdett nagyon dőlni a hajó, csökkentették a vitorlafelületet. A hajó oldalcsúszását sajnos csak a test nagy és széles laterálfelülete akadályozta, de ez igen rossz hatékonyságú volt, következésképpen ezek a hajók nagyon tompák voltak (5.1.1. ábra).

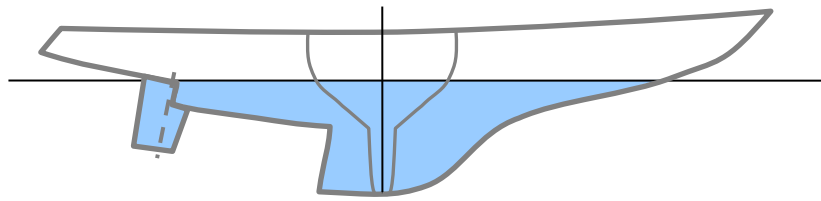
A sport- és kedvtelési célú hajók ilyen, elég tompán vitorlázó hajókból fejlődtek ki, de ahogy csökkenhetett a hajó vízkiszorítása, úgy alakult át a hajótest formája is (5.1.2-3. ábra). A stabilitás érdekében tudták, hogy a ballasztot mélyen célszerű elhelyezni, így a hajótest alsó része elvékonyodott, már csak a nehezéknek szükséges helyet biztosította. Az áramlástan fejlődésével pedig alakja is egyre inkább egy szárnyéra hasonlított, melynek révén a hajók már sokkal élesebb menetre is alkalmasak voltak. Egy következő nagy lépés volt a fejlődésben, amikor a hajótest és a ballasztot hordozó rész elkülönült egymástól: kialakult a mai értelemben vett tőkésúly (5.1.5. ábra). (Ez a külön szó csak a magyar nyelvben jelenik meg, az angolok és a németek nem tesznek különbséget a gerinc és a tőkésúly között, mindkettőre a *keel* illetve *kiel* szavakat használják.) Innentől kezdve a hajótestet és a tőkésúlyt a különböző funkcióiknak megfelelően, de egymással összhangban fejlesztették. Újabb áttörést a speciális anyagok megjelenése hozott, amelyek révén lehetőség volt a tőkésúly két funkciójának elkülönítésére is: a tömeget a tőkésúly legalján elhelyezett áramlástanilag kedvező (legkisebb ellenállást adó) formájú bulbába koncentrálták, az oldaleroőt pedig nagy hatékonyságú – a bulba nagy tömegét és az ebből származó igénybevételeket elviselni képes – szárny-formájú tartóelemmel állítják elő (5.1.6. ábra). (Ennek az elemnek az angol megnevezése „fin”, melyre igazán jó magyar megnevezés nem született. E jegyzetben mi a továbbiakban pengé-nek hívjuk.)



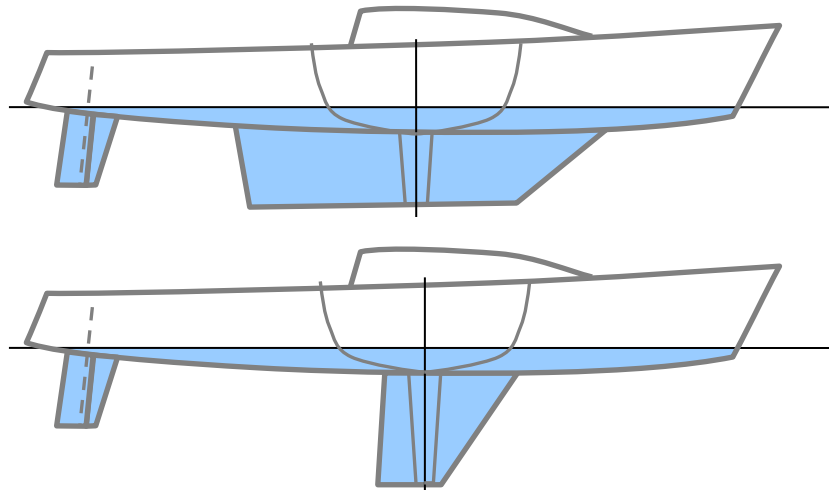
5.1.2. ábra: Klasszikus hosszúgerinces kedvtelési célú vitorlás



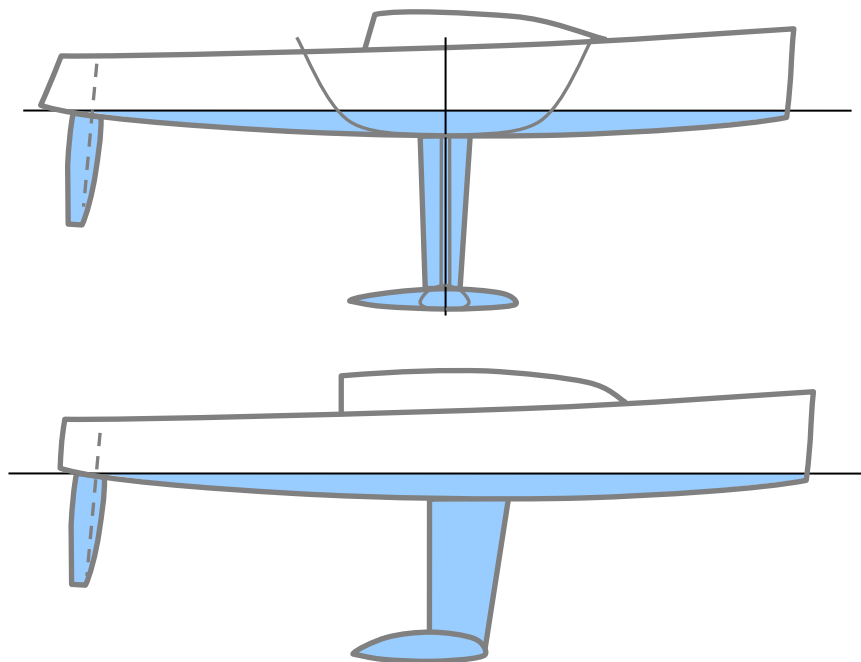
5.1.3. ábra: Rövid tőkével rendelkező klasszikus vitorlás



5.1.4. ábra: Vitorlás külön kormányval, de a testhez szervesen kapcsolódó tőkésúllal



5.1.5. ábra: Vitorlás különálló, kis és nagy karcsúságú tőkésúllal



5.1.6. ábra: Modern T és L tőkésúlyos hajó bulbával

A következőkben bemutatjuk a ma általánosan használt tőkesúly- és uszony-típusokat, megtárgyaljuk, hogy hogyan keletkezik rajtuk az oldalerő és az ellenállás, és melyek azok a paraméterek, amelyek az erőket leginkább befolyásolják. Bár általában a tőkesúlyokkal foglalkozunk, az elmondottak nagyon sok vonatkozásban alkalmazhatók uszonyokra és kormányokra is.

5.2 Jellegzetes tőkesúlyok, uszonyok

A mai vitorlásokon igen sokféle típusú tőkesúlyal találkozhatunk. Ezek kialakítását a 5.2.1.-5.2.12. ábrákon szemléltetjük.

A hagyományos tőkesúlyok általában öntött kialakításúak, vagy öntöttvasból, vagy ötvözött ólomból készülnek. Ha az öntés felületi minősége nem megfelelő, akkor gittelik vagy műanyaggal burkolják. Sokszor bulbával együtt készítik. A bulbás kialakítás másik változata, amikor a penge valamilyen épített szerkezetből (akár acél váz műanyag burkolattal, akár teljesen kompozit) és külön hozzá rendszerint csavarozással rögzített öntött bulbából áll (5.2.2. ábra jobb oldali képe).



forrás: a szerző

5.2.1. ábra: Hagományos tőkesúly

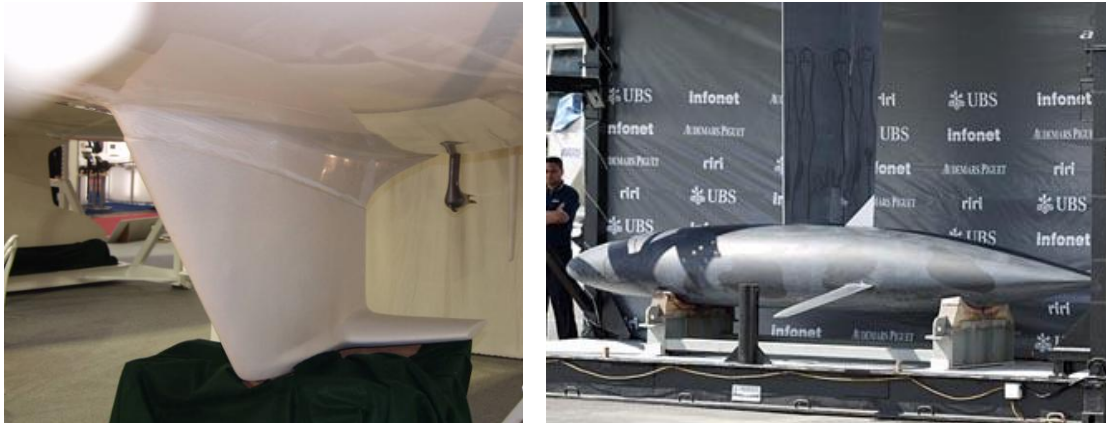


forrás: a szerző

5.2.2. ábra: Kis és nagy karcsúságú bulbás tőkesúly

A szárnyas tőkesúly hidrodinamikai szempontból talán a legösszetettebb kialakítás, áramlástani szerepükről később részletesebben is szó lesz. A szárnyak alapvetően két kon-

cepció szerint készülnek: vannak csak tömeget koncentráló, robosztusabb változatok, és vannak kifejezetten az áramlások módosítását szolgáló és az ellenállást csökkentő ún. „winglet”-ek, szárnyacsokkák (5.2.3. ábra jobb oldala). A nagy szárnyak hátránya, hogy ha belefűrik magukat az iszapba, nehezen lehet a hajót kirángatni. A szárnyas és bulbás kialakítás közös hátránya, hogy hajlamos nagy mennyiségű hínárt összeszedni, amelyet esetleg csak némi bűvármunkával lehet eltávolítani.



fotók: Dobó Pál és www.hmtmarine.com

5.2.3. ábra: Szárnyas tőkesúly

Iker tőkesúlyokat ritkán alkalmaznak, elsősorban azokon a túrahajókon, ahol korlátozott a merülés és a hajót olyan helyeken használják, ahol jelentős az ár-ápany jelenség nehezíti a hajó kikötését. A szükséges oldalerő előállításához ajánlatos felületet ennél a változatnál két egymás mellett elhelyezett tőkesúlyal oldják meg, amelyek alja teljesen lapos, így a hajó apálykor képes „megállni a lábán” (nem borul fel).



fotó: Dobó Pál

5.2.4. ábra: Iker tőkesúlyos hajók

A tandem kialakítás annyiban hasonlít az előzőhöz, hogy a tőkesúly két részből áll, itt azonban a pengék egymás mögött egy vonalban helyezkednek el. Szintén ritkán alkalmazott megoldás, mert nem váltja be a hozzá fűzött reményeket a hatékonyság terén.



5.2.5. ábra: Tandem tőkesúly

A billenthető tőkesúly a mozgatható változatok leginkább elterjedt megoldása. Ennél olyannyira elkülönül a tőkesúly két funkciója, hogy használatukhoz mindig szükség van egy (általában felhúzzható) uszonyra is. A tőkesúly szára itt elsősorban a bulba tartását szolgálja, hiszen elbillentéskor nem rendelkezik már az oldalerő előállításához elegendő felülettel. Ez ti. az oldalerő produkálása az uszony, vagy uszonyok feladata. Ha csak egyet használnak, akkor az értelemszerűen szimmetrikus kell legyen, és a hajó középsíkjában engedik le, kettő alkalmazásával azonban lehetőség van hatékonyabb, aszimmetrikus profi-
lokot alkalmazni és az uszonyt a tervezett dőlésszögnek megfelelően ferdén leengedni. Természetesen mindig csak a lee oldali (szél alatti) uszonyt engedik le. A 5.2.6. ábrán jól látható a szélfelőli felhúzott uszony hajótestből éppen csak kiálló része.



forrás: www.sailnet.com

5.2.6. ábra: Billenthető tőkesúly

A felhúzzható kialakítás oka szintén a korlátozott merülés (sekély vizű tavak vitorlásainál) vagy esetleg kisebb hajóknál a könnyebb szállíthatóság (így közúti utánfutóval vontatható a hajó, és a vízretétel sólyán is megoldható). Ugyanilyen okból készítenek felhajtható változatokat is, azonban ez csak a kisebb tömegű pengénél kivitelezhető egyszerűen.



fotók: Dobó Pál

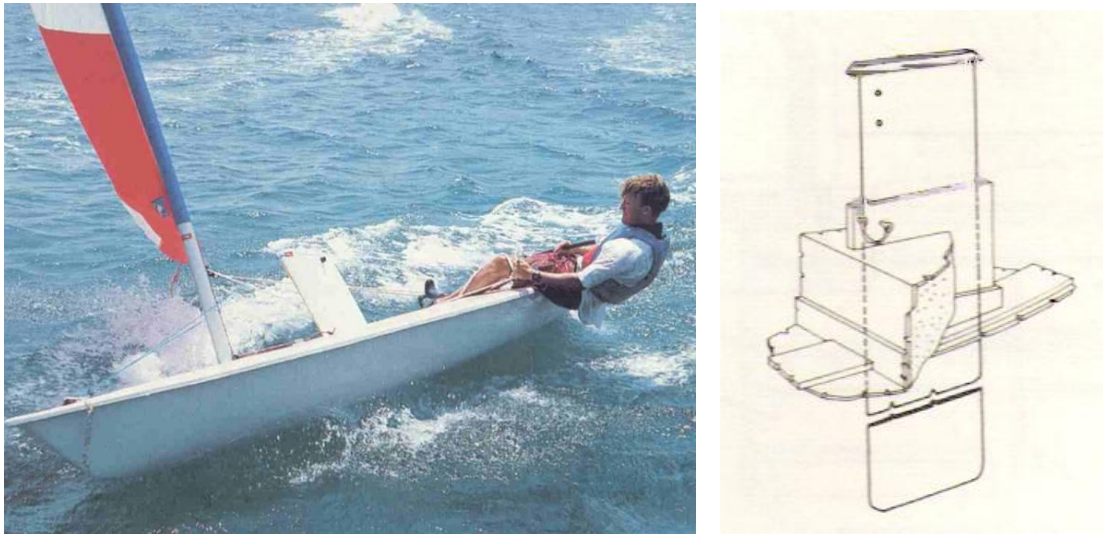
5.2.7. ábra: Felhúzzható, bulbás tőkésúly



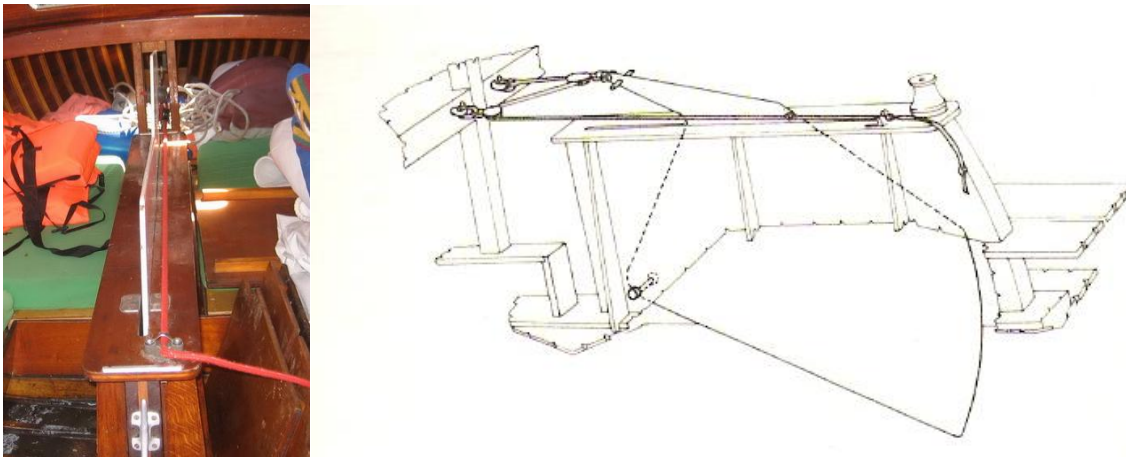
fotók: Dobó Pál

5.2.8. ábra: Felhajtható tőkésúly

A kishajók uszonyát praktikusán acél- vagy alumíniumlemezből, fából vagy valamilyen kompozit szerkezetből készítik, így az uszonyos kishajóknál a stabilitás az uszony révén nem javul annyira, mint a nagyobb hajóknál egy tőkésúly révén. Mint korábban említettük, az uszonyok mindig mozgathatóak: vagy egy csap körül elforgatva lehet leereszteni, vagy egy egyenes mentén lehet fel-le csúsztatni. (Az angolban az elsöre a daggerboard, a másodikra a centerboard kifejezést használják.) A lemezből készült változatoknál az uszony belépő élét le szokták kerekíteni, a hátsó részt pedig (amennyire lehet) élesre képezik ki. Hidrodinamikailag azonban sokkal kedvezőbb a profilos forma, ezért a modernebb kishajók uszonyait már fából vagy még inkább kompozit anyagból készítik. Az uszonyt leggyakrabban a hajó középvonalában, a gerincen felállított uszonyszekrényben helyezik el, de készülnek kishajók dupla uszonnal, a hajó mindkét oldalán. (Az uszonyos kishajókat jollé-nak vagy svert-es hajóknak is szokták nevezni.)



5.2.9. ábra: Szimpla, középen felhúzható uszony



5.2.10. ábra: Klasszikus jolle csap körül elfordítható uszonnal



forrás: www.yxilon.de

5.2.11. ábra: Duplasvertes kishajó (Yxilon jolle)

Meg kell említeni még egy megoldást, melynél a tőkesúlyt egy uszonnal kiegészítve használják. Ilyen ún. uszony-tőkesúlyos hajókat akkor készítenek, ha a merülés egyes helyeken (pl. kikötőben) korlátozott, de másutt általában megvan a kellő vízmélység. Az uszont felhúzott állapotban a tőkesúly foglalja magában, így a hajó merülése kicsi. Az uszont leeresztve a tőkesúly karcsúsága megnő, és így hatékonyabban tud működni.



forrás: www.jordanyachts.com

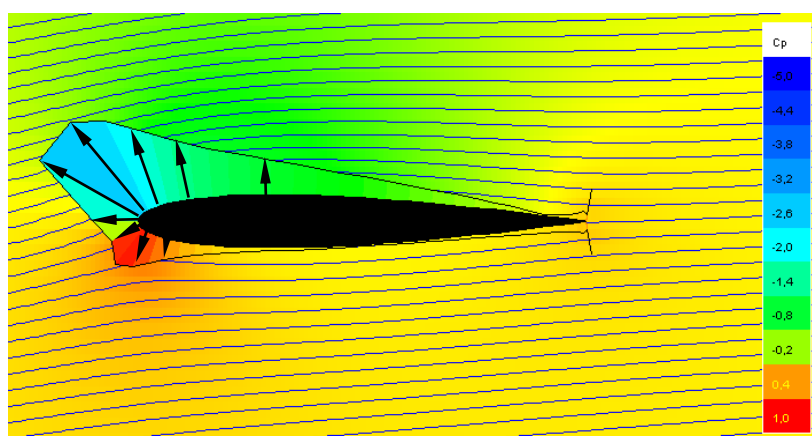
5.2.12. ábra:Uszony-tőkesúly

5.3 A tőkesúlyon keletkező erők

A tőkesúly pontosan ugyanúgy működik, mint egy repülőgép szárnya, azzal a különbséggel, hogy míg a repülőgépeknél mindig egyirányú – felfelé mutató – felhajtóerőt kell produkálni, a vitorlásoknál a jobb és baloldali széllel való haladás miatt a tőkesúlynak mindkét irányban ugyanúgy kell működnie. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a repülőgépek aszimmetrikus szárnyprofiljával ellentétben a vitorlások tőkesúlya szimmetrikus profillal kell rendelkezzen. Természetesen vannak kivételek: iker-tőkesúlyok alkalmazásával a két profil lehet aszimmetrikus (egyébként pedig egymás tükörképei), vagy a billenthető tőkesúlyal rendelkező hajók esetén, ha két oldaluszont alkalmaznak, akkor azok szintén lehetnek aszimmetrikus profilúak.

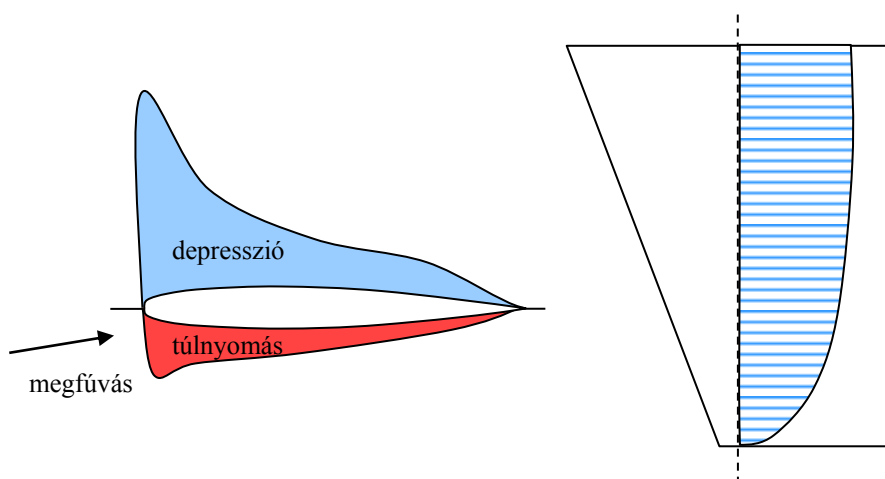
A víz a hajó oldalcsúszása következtében a tőkesúlyra – mint szárnyra – az oldalcsúszás mértékének megfelelő állásszög alatt érkezik. Ennek hatására – ahogy azt az áramlás-tanban ismertettük – a szárny két oldalán különböző nyomáseloszlás (az 5.3.1. ábrán a vektorok végeit összekötő folytonos vonal) alakul ki, melynek a teljes felületre vett eredőjéből származik a szárnyon keletkező eredő erő. A szárny egyes metszetein a nyomáskülönbségből származó erőket a szárny hossza mentén ábrázolva megkapjuk a hossz menti erőeloszlás jellegzetes diagramját (5.3.2. ábra).

Az eredő erőt az áramlás-tanban alkalmazott definíciók szerint felbonthatjuk az áramlás (vagyis a hajó haladási) irányára merőleges felhajtóerőre és az azzal egybeeső ellenállás-erőre. A korábban említett hidrodinamikai oldalero igen jelentős része ez a tőkesúlyon keletkező felhajtóerő, ehhez adódik hozzá a kormányon és magán a hajót testen keletkező oldalirányú erő.



forrás: www.mh-aerotoools.de

5.3.1. ábra: A nyomásmegoszlás egy NACA0012 profilkerülete mentén 6° -os állásszögnél



5.3.2. ábra: Nyomáseloszlás a profil mentén és véges szárnyon a hossz mentén

Már itt megjegyezzük, hogy míg a tőkesúly és hajótest mindig az oldalcsúszás irányának megfelelő irányú (ld. korábban a 3.1.2. ábrán) oldalerozt produkál, a kormányon keletkező oldalero irányja és nagysága annak kitérítésétől és attól a tényről is függ, hogy a kormány a tőkesúly sodorvonalában dolgozik. Az ellenálláserő komponens – a hajótesten és kormányon hasonló okokból keletkező ellenállással együtt – adja a hidrodinamikai teljes ellenállást. A következőkben már csak a tőkesúlyon keletkező erővel foglalkozunk.

A tőkesúly ellenállása – a hajótesthez hasonlóan – több részre bontható. A súrlódási ellenállás kezelhető talán a legegyszerűbben, értéke a korábban leírtak szerint határozható meg, természetesen a tőkesúly felületét alapul véve. Az alakellenállás a tőkesúly profiljának geometriájától (a profil típusától, vastagságától, húr hosszától) és az állásszögtől függ. A különböző profilok alakellenállásának számításához – ellentétben a hajótestnél írtakkal – részletes méréseket végeztek. A mérések során szélcsatornában, a két fal között vizsgáltak különböző profilokkal rendelkező szárnyakat, és mérték a keletkező ellenállást valamint felhajtóerőt az állásszög függvényében. Az összetartozó értékeket – a profil pontos geometriájával együtt – a profilkatalógusokban adták meg. A mért erőkből a profil egyes geo-

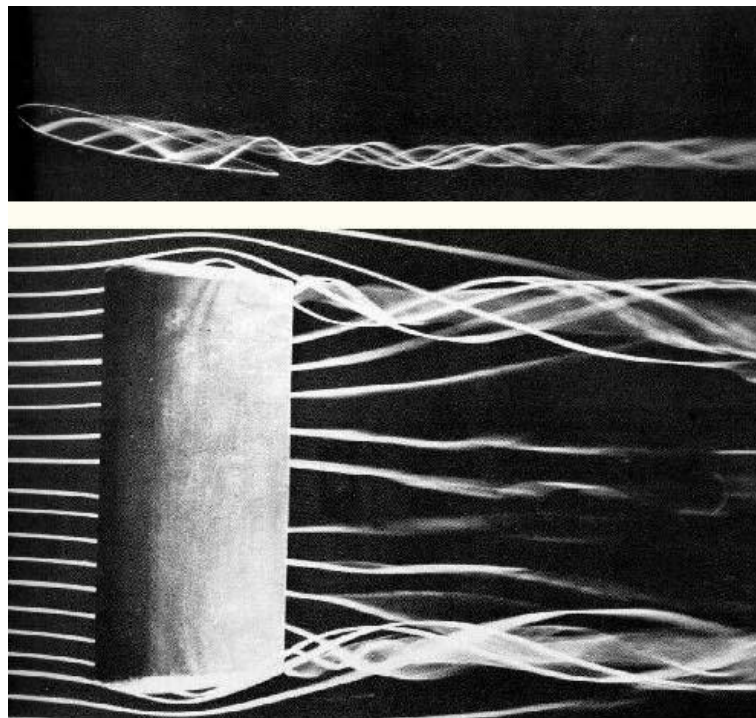
metriai adataival és a sebességgel ún. felhajtóerő-, és ellenállás-erő-tényezőket alkottak a következők szerint:

$$c_l = \frac{L_\infty}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \qquad c_d = \frac{D_\infty}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} ,$$

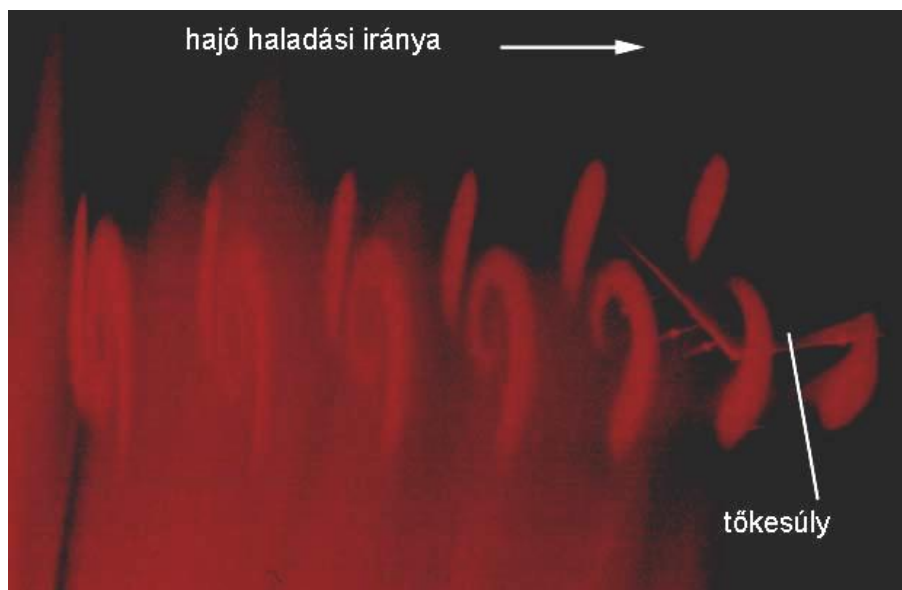
ahol v az áramlás sebessége, A a szárny felülete, ρ a közeg sűrűsége, L_∞ és D_∞ a végtelennek tekinthető szárnyakon a mért felhajtóerő és ellenállás-erő.

A szárnyak végén levő két fal nem engedi a szárnyak végén kiegyenlítődni a két oldal között kialakuló nyomást, ezért a szárnyak gyakorlatilag végtelen hosszúnak tekinthetők. A szárnyak körüli áramlás ebben az esetben kétdimenziósnak vehető, a nyomásmegoszlás minden metszetben ugyanaz, és a szárny hossza mentén (vagyis minden metszetben) azonos. A mért ellenállás tehát a profil súrlódási és alakellenállását, a felhajtóerő pedig a 2D-s áramlás felhajtóerejét jelenti.

A valóságban azonban a szárnyak nem végtelen hosszúak és nincs a végükön két nagy felületű lap sem, hogy két fal közöttinek vehessük őket. A tőkésúly esetében a hajótest a szárny egyik végét lezárja ugyan, de az alsó végénél a nyomás már ki tud egyenlítődni. Ennek eredménye, hogy a nyomásmegoszlás sem lesz egyenletes: a tőnél (a hajótest felőli végénél) levő értékről a másik vég felé valamilyen megoszlás szerint, de folyamatosan csökken 0-ra (ld. az 5.3.2. ábrát). A véges szárnyakra ebből két dolog következik: egy további ellenállás-összetevő jelenik meg, melyet indukált ellenállásnak neveznek és az, hogy a felhajtóerő a végtelen szárnyon keletkezőhöz képest csökken (a nem egyenletes nyomásmegoszlás miatt). Az új ellenállás-komponens a felhajtóerő „mellékterméke”, hiszen a szárny két oldala közötti nyomáskülönbségből származik. Ha nincs felhajtóerő, akkor a véges szárnyakon sincs indukált ellenállás.



5.3.3. ábra: A szárnyon keletkező indukált örvények (két nézetben)



5.3.4. ábra: Az indukált örvények keresztmetszetei (A kép a BME Áramlástan tanszékének szélsatornájában készült, a fotót készítette: a szerző)

A nyomáskiegyenlítődés miatt a tökesúly alsó részén a nagyobb nyomású oldal felől a kisebb nyomású oldal felé egy, a tökesúly alsó élét megkerülő másodlagos (szekunder) áramlás jön létre, amely a nagyobb nyomású oldalon csökkenti, a kisebb nyomású oldalon növeli a nyomást. Ez a másodlagos áramlás a szárnyat elhagyva egy örvénnyé csavarodik fel (5.3.3. ábra), az ellenállást az örvényben távozó energia jelenti. A vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy az indukált ellenállás értéke akkor minimális, ha a szárny hossza mentén a felhajtóerő-eloszlás elliptikus.

Látható, hogy a tökesúly véges volta tehát kétféle teljesítményt csökkentő hatással rendelkezik: növeli az ellenállást és csökkenti az adott állásszöghöz tartozó felhajtóerőt. Végeredményben ez a korábban definiált hidrodinamikai ellenállásszöget (ε_H), és így a hajó élességét rontja.

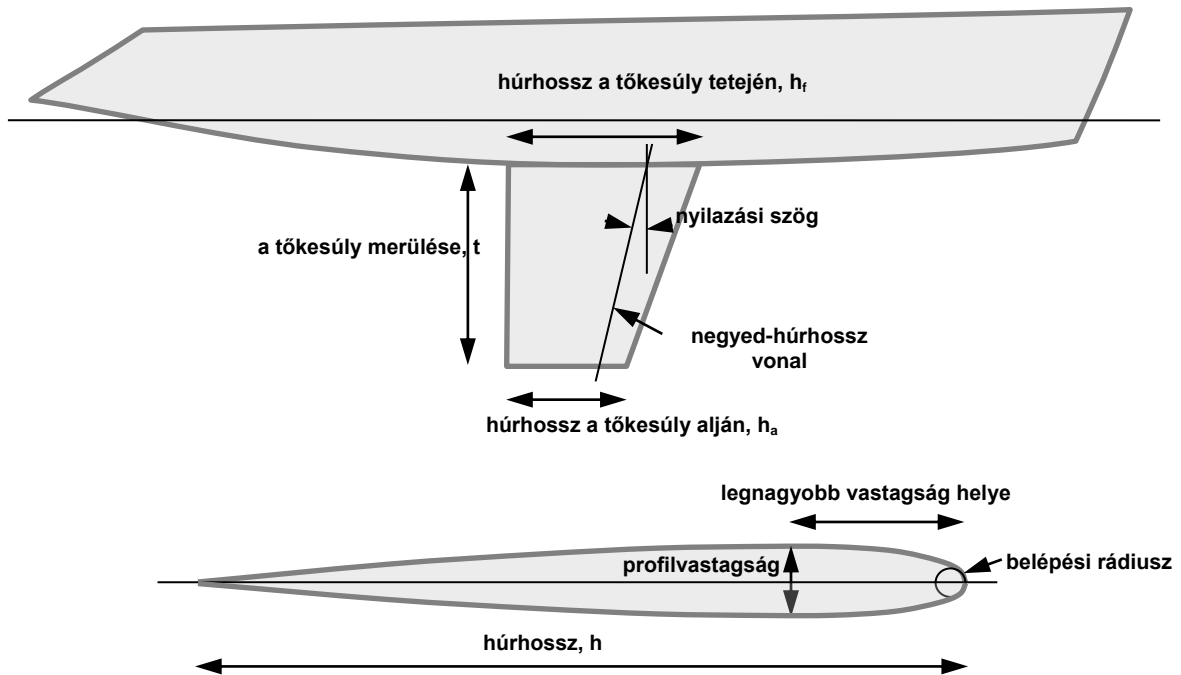
A véges szárnyakra vonatkozó felhajtóerő-, és ellenálláserő-tényező számításához tehát figyelembe kell venni az indukált örvények c_l -t és c_d -t módosító hatását.

$$c_L = \alpha \cdot \frac{c_{l\alpha}}{1 + \frac{2}{AR_e}} \quad c_D = c_d + c_{di} \quad c_{di} = \frac{c_L^2}{\pi \cdot AR_e}$$

ahol α az állásszög (csúszási szög), $c_{l\alpha}$ az egy fokra jutó felhajtóerő-tényező (a c_l görbe lineáris szakaszának meredeksége), AR_e pedig a tökesúly effektív karcúsága (ld. később). Megjegyezzük, hogy az ellenállás-tényezőket befolyásoló, a képletekben is megjelenő paramétereket számos, nehezebben számszerűsíthető, vagy mástól nehezen függetleníthető jelenség befolyásolja, így egy adott geometriájú véges szárnyon keletkező erő meghatározása korántsem olyan egyszerű, mint ahogy azt a fenti képletek esetleg sugallják.

5.4 A tökesúly geometriai jellemzői

A tökesúlyok nagy többsége egy négyszögletes formával jól közelíthető. A legfontosabb jellemzőket az 5.4.1. ábra szemlélteti.



5.4.1. ábra: A tőkésúly jellemző méretei

Az itt használt jelölésekkel a tőkésúly közepes húrhossza:

$$\bar{h} = \frac{h_a + h_f}{2}$$

A tőkésúly geometriai karcsúsága:

$$AR_g = \frac{t^2}{A} = \frac{t^2}{t \cdot \bar{h}} = \frac{t}{\bar{h}}$$

Mint azt korábban említettük, a szárny véges volta a gyakorlatban azt jelenti, hogy van két szabad vége, ahol a két oldal közötti nyomáskülönbség kiegyenlíthető. Az áramlás ezért az 5.3.3. ábrán bemutatott kép szerinti. Egy tőkésúlynál azonban a szárnynak csak az egyik vége szabad, a másikat a hajótest lezárja, így a tőkésúly test felőli végénél nem tud a nyomás kiegyenlítődni, ezért nem alakul ki örvény. Az áramlás itt nagyjából annak megfelelő, mint amelyet az 5.3.3. ábra felülnézetének középső részén, a szimmetriavonal környezetében látunk (a valóságban a tőkésúlynál nagyjából a hajótest vonalával futnak párhuzamosan az áramvonalak). Az egészet úgy is fel lehet fogni, hogy a hajótest helyettesíthető a hajótest alatti áramlás tükörképével. Ebből az következik, hogy a tőkésúly áramlástechnikai szempontból nem egy a geometriai, hanem egy kétszer akkora karcsúságú szárnyak felel meg. Mivel azonban a hajótest nem egy végtelen sík, a tükörkép sem tökéletes, ezért a tényleges vagy effektívnek nevezett karcsúság sem vehető a geometriai kétszeresének. A leírtak mellett – ugyan nem túl nagy, de – kedvezőtlen hatással van a karcsúsági tényező tényleges értékére az is, ha a felhajtóerő-eloszlás eltér az elliptikustól. Mindezeket a befolyásoló tényezőket egy K tényezővel vesszük figyelembe. Ezek alapján írható, hogy:

$$AR_e = K \cdot AR_g$$

ahol K 1 és 2 közötti.

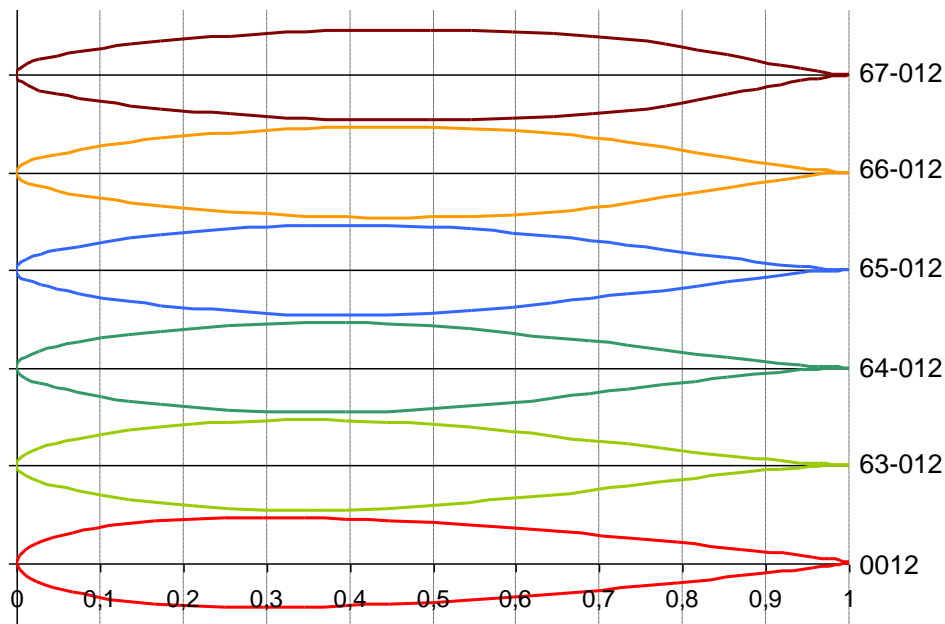
Itt jegyezzük meg, hogy modern lapos fenekű gyors vitorlásoknál a hajó dölésekor a tökesúly-hajótest csatlakozása igen közel kerül a vízfelszínhez, és így a két oldal közötti nyomás bizonyos mértékig ki tud egyenlítődni, ami az effektív értéket közelíti a geometriaihoz. A kormányok sokszor a vízfelszín közelében működnek, ezért itt még hangsúlyosabb ez a helyzet. Sőt, amennyiben a kormány egy része – pl. dőlés miatt – kiemelkedik a vízből, akkor a t értéket le kell csökkenteni és csak a vízfelszíntől a kormány végéig tartó hosszt szabad számítani. Egyes szakirodalmakban a dőlés effektív karcsúságra gyakorolt hatását úgy veszik figyelembe, hogy a geometriai érték kétszeresét megszorozzák a dőlészög koszinus-ával.

A kihegyezés mértéke:

$$TR = \frac{h_a}{h_f}$$

A nyilazási szöget sokféleképpen lehet definiálni, de a legelterjedtebben a negyedhúrhossz-vonal (a profilmetszetek 25%-át összekötő egyenes) függőlegessel bezárt szögét adják meg. A nyilazási szög pozitív, ha hátrafelé, negatív, ha előre felé nyilazott a szárny.

A profil pontos geometriáját a profilkatalógusok tartalmazzák. A leginkább ismert katalógust a NACA (a NASA elődje) *Theory of Wing sections* kötetében adták ki (NACA report No. 824). Ezekben a profilokat különböző kódszámokkal tartják nyilván. A szimmetrikus profiloknak két fő típusa van: a négy-számjegyes és a 6-os sorozat. Ezek egy példáját mutatja az 5.4.2. ábra. A profilok koordinátáit ma már számos Interneten is megtalálható generátor pillanatok alatt képezi, ezért azokat itt már táblázatosan nem közöljük (természetesen a fent említett 824.-es jelentésben is megtalálhatók). A négy-számjegyes profinnál a számok közül az első kettő a profil középvezetékének geometriáját definiálja, ez szimmetrikus profiloknál mindig 0.



5.4.2. ábra: Különböző NACA profilok alakja

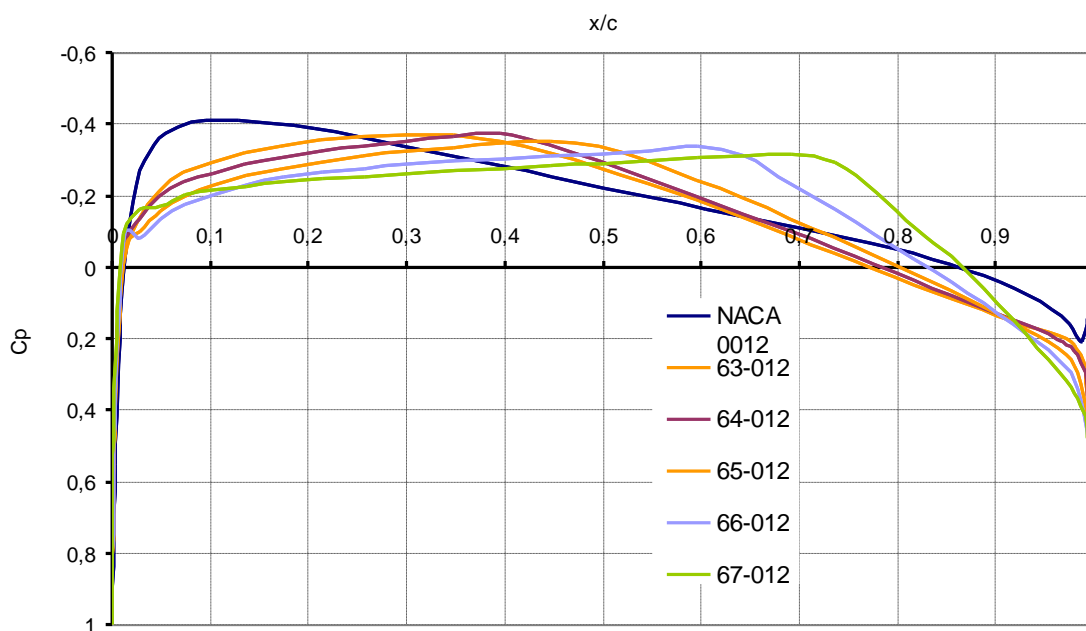
A második kettő a profil vastagságát adja meg a húr hossz százalékában. A legnagyobb vastagság helye ennél a típusnál mindig a húr hossz 30%-nál van. A 6-os sorozatban a 6-os után következő szám utal a legnagyobb vastagság helyére, ez a 63 esetén 35%, 64-nél 40%, a 65-nél 40%, 66-nál 45% és végül a 67-esnél 50%. A legnagyobb vastagság helyének a profil ellenállásában van nagy szerepe (ld. később). A kötőjel utáni számok közül az első a középvonalra az utolsó kettő pedig a profilvastagságra vonatkozik, az előzőekhez hasonlóan. (Egyes profiloknál a profilok keresztirányú lineáris torzításával más vastagságú profilt kapunk: pl. a 0010-ből 0015 adatait az y értékek 1,5-ös szorzásával nyerjük.)

5.5 A tőkésúlyon keletkező erőket befolyásoló tényezők

A korábbiak alapján látható, hogy a tőkésúly c_L és c_D tényezőjét befolyásoló paraméterek közé tartoznak a geometriai jellemzők (a szárnyprofil formája, vastagsága, a legnagyobb vastagság helye, a tőkésúly karcsúsága, a tőkésúly nyilazási szöge, az oldalnézeti alakja, „kihegyezése”, a hajótest-tőkésúly [esetleg tőkésúly-bulba] átmenet kialakítása), valamint az állásszög, és a felület érdessége. A következőkben ezek hatását ismertetjük.

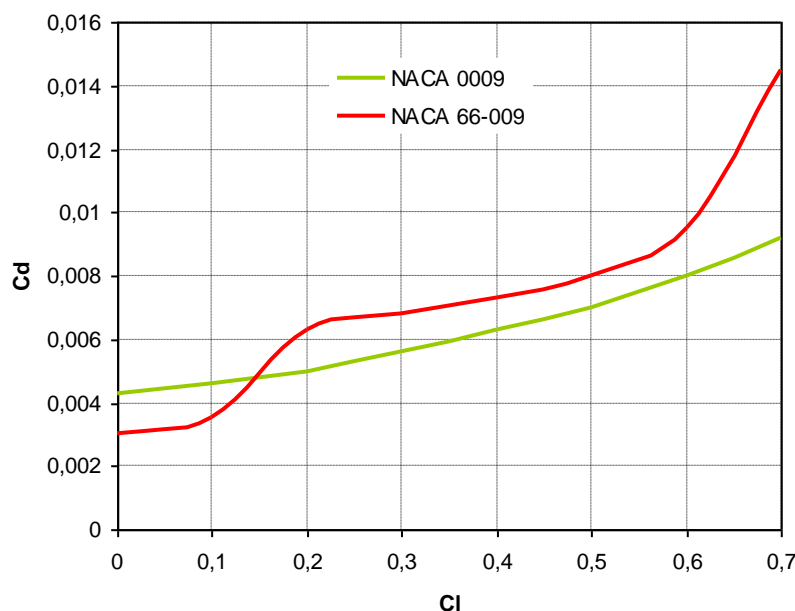
5.5.1 Profilformák, profilvastagság

A korábban említett alakbeli különbségek mellett a szárnyprofilok két típusát különböztetjük meg, a hagyományos és ún. lamináris profilokat. Hagyományos profilok azok, amelyek legnagyobb vastagsága a húr hossz 30-35%-ában van, ezzel szemben a lamináris profilok legnagyobb vastagsága hátrább, a hossz 40-50%-ában található. Az áramlástanból ismeretes, hogy a valóságos közegek fal melletti áramlásakor kialakuló határréteg leválásának feltétele, hogy az áramlás irányába növekedjen a közegben a nyomás. A leválás késleltetése az állásszög alatt működő profiloknál is igen fontos, mert így csökkenthető a profil ellenállása. Ha megvizsgáljuk a 5.5.1. ábrán látható profil menti nyomáseloszlást mutató diagramokat, láthatjuk, hogy a hagyományos profiloknál a legalacsonyabb nyomás a belépőélhez igen közel, míg a laminárisoknál attól lényegesen távolabb található.



5.5.1. ábra: A profil menti nyomáseloszlás változása a különböző profiloknál

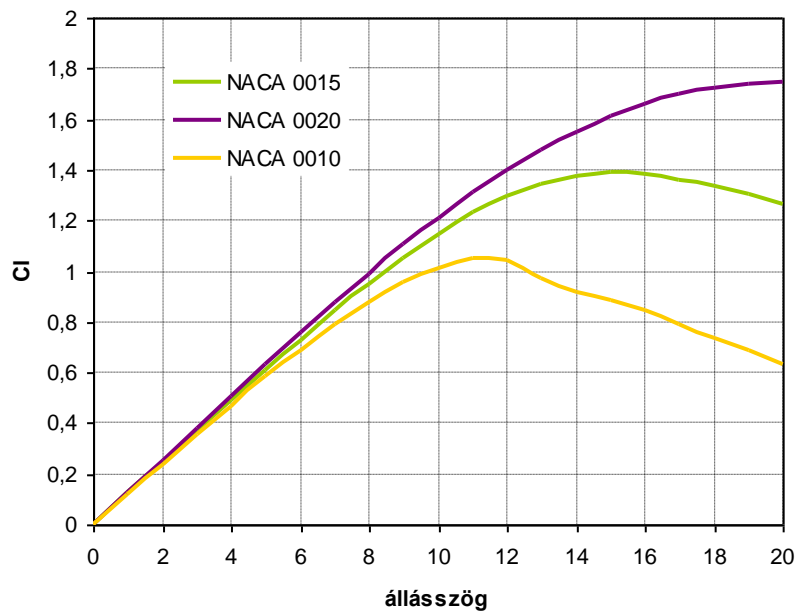
Ez azt jelenti, hogy a hagyományos profilnál az áramlás csak nagyon rövid szakaszon lamináris, hamar átvált turbulensbe, majd a legnagyobb vastagság helyét elérve gyakorlatilag a profil mentén végig nő a nyomás. A lamináris változatnál az áramlás majdnem a húrhossz feléig gyorsul (nyomása csökken), és csak innen kezdődik meg a nyomás növekedése. Ezeknél a profiloknál értelemeszerűen a lamináris szakasz is sokkal hosszabb (innen kapták a nevüket). Emiatt a hagyományos profiloknál lényegesen korábban leválik az áramlás, mint a laminárisnál. Ez tükröződik vissza a két profiltípushoz tartozó ellenállástényező-állásszög diagramokon is (5.5.2. ábra). Figyeljük meg, hogy a lamináris profiloknál egy bizonyos állásszögig igen kicsi – a hagyományoshoz képest akár 20%-kal kisebb – ellenállás adódik. Minél nagyobb a profil vastagsága, annál szélesebb ez a kis ellenállást biztosító rész. A vastagság növelésével természetesen nő a minimális c_d értéke is, mind a hagyományos mind a lamináris profilok esetében. A lamináris profilú tökesúlylyal tehát raum és hátszél irányokban – amikor kis felhajtóerő-tényezőre van szükség – sokkal kisebb az ellenállás a hagyományoshoz képest. Ugyanakkor az is látható, hogy nagyobb sodródási szögeknél a hagyományos profilok rendelkeznek kisebb ellenállással.



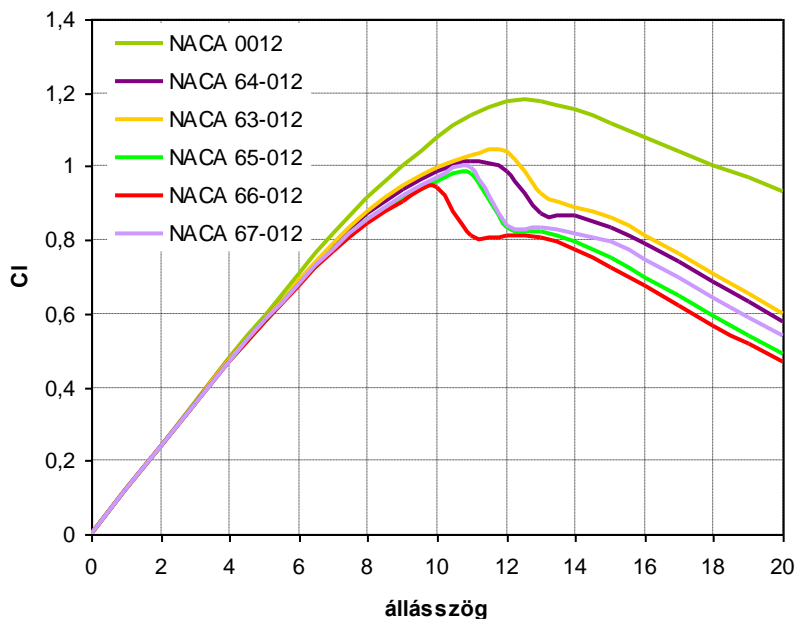
5.5.2. ábra: A profilellenállás a felhajtóerő-tényező függvényében, különböző profilok esetén

A szárnyelmélet alapján levezethető, hogy gyakorlatilag minden profilmajta adott állásszögnél azonos értékű felhajtóerő-tényezőt produkál (2D áramlás!). A felhajtóerő-tényező függvényének meredeksége ($c_{l\alpha}$) 0,1-0,11 közé esik. Az egyes profilok közötti különbség főleg abban áll, hogy hol kezdődik meg az „átésés”, vagyis az áramlás leválásának olyan mértékű növekedése mely a felhajtóerőt drasztikusan csökkenti. Általában elmondható, hogy minél vékonyabb egy profil, és minél kevésbé telt az eleje (minél „laminárisabb”), annál előbb következik be az átésés. Meg kell azonban jegyezni, hogy a 3D-s áramlásban ennek a határnak nagy jelentősége a gyakorlatban használt tökesúlyok esetén nincs, mert jóval a működési tartományhoz tartozó szögértékek felett következik be.

Az eddig leírtakat mérlegelve, hidrodinamikai szempontból célszerű az általában nagyobb állásszögekkel működő kormánylapátnak vastagabb hagyományos profilt, míg a kisebb (pl. hátszél esetén zérus) állásszögekkel működő tökesúlynak vékonyabb lamináris profilt választani.



5.5.3. ábra: A profilvastagság hatása az átesési szögre



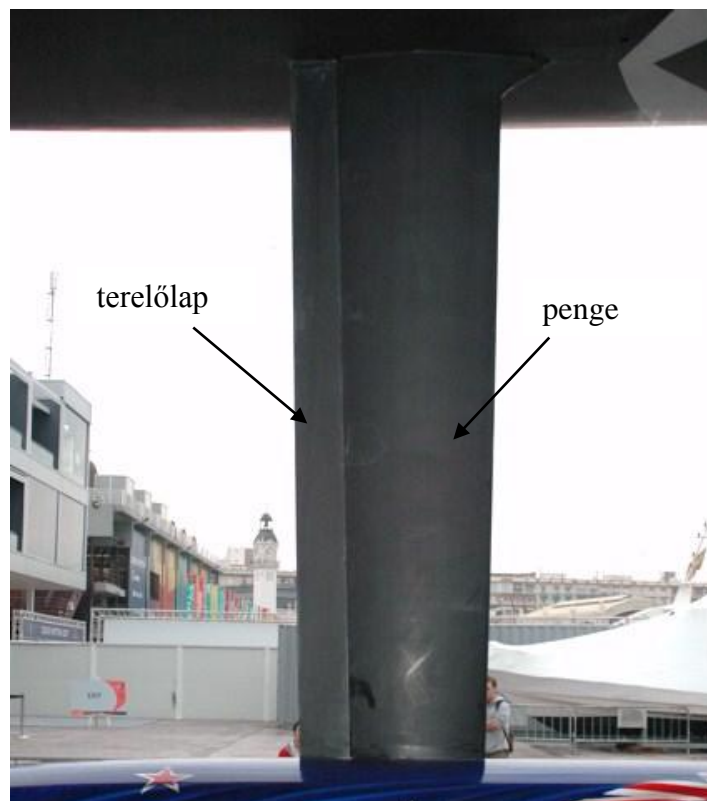
5.5.4. ábra: Profiltípus hatása az átesésre

A profil kiválasztásakor azonban nemcsak azt kell mérlegelnie a tervezőnek, hogy melyik profil ad elegendő oldalerőt, lehetőleg kis csúszásszög és ellenállás mellett, hanem azt is, hogy az így kialakított tőkésúly megfelelő súlystabilitást is biztosítson. Azoknál a hajóknál ugyanis, amelyeknél főleg éles menetre (cirkálásra) kell számítani, a minél nagyobb stabilitás, és így a ballaszt nagysága elsőrendű fontossággal bír. Régebbi hajóknál ennek a tömegnek – mely egyes extrém versenyhajóknál a vízkiszorítás 60-70%-át is elérte – a tőkésúlyban kellett helyet találni, lehetőség szerint úgy, hogy a súlypont minél alacsonyabbra kerüljön. Ez nagy tőkésúly térfogatot (tehát nagy profilvastagságot, teltséget és

húrhosszt) és így nagy ellenállást is jelentett. Ma ezt már bulbás kialakítással oldják meg, amely a tőkesúly felhajtóerőt termelő részének, a pengének az alakját nem köti meg annyira. A penge vastagsága és tömege kisebb lehet, a felület és az ellenállás is csökken. (Természetesen az így átalakított tőkesúly pengének fel kell tudni vennie a tőkesúlyon a megdőlés során keletkező hajlító-csavaró igénybevételeket. Ez adott anyag típus esetén határt szab a profilvastagság csökkentésének.)

Az előzőek összefoglalásaképpen tehát elmondható, hogy a profil jellegének elsősorban az ellenállásra, az átesési tulajdonságokra és a tőkesúly tömegére van hatása.

Eddig csak szimmetrikus profilokkal foglalkoztunk, hiszen alapfeltevésünk volt, hogy a hajónak ugyanúgy kell teljesíteni, akár bal-, akár jobboldali széllel vitorlázik. Közismert azonban, hogy az aszimmetrikus szárnyprofilok nulla állásszög mellett is produkálnak felhajtóerőt, és mindezt relatíve kis ellenállással, vagyis a profil hatékonysága sokkal nagyobb. Éppen ezért már régen felmerült a gondolat, hogy vitorláshajók tőkesúlyánál hogyan lehet ugyanilyen hatást elérni úgy, hogy az aszimmetria mindkét oldali vitorlázásnál biztosított legyen. Merev, fix alakkal rendelkező profilokkal sodródás nélkül csak úgy tudunk felhajtóerőt produkálni, ha az egész tőkesúlyt a hajó hossz tengelyéhez képest elforgatjuk. Bár épültek hajók ilyen megoldással, a módszer azonban nem igazán vált be, mert a forgatás igen nehézkes a tőkesúly nagy tömege miatt.

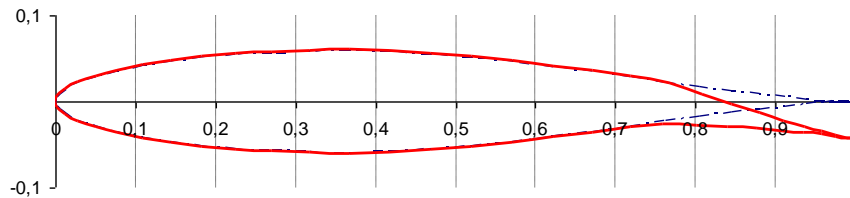


forrás: www.cupinfo.com

5.5.5. ábra: Terelőlap egy America's Cup yacht tőkesúlyán

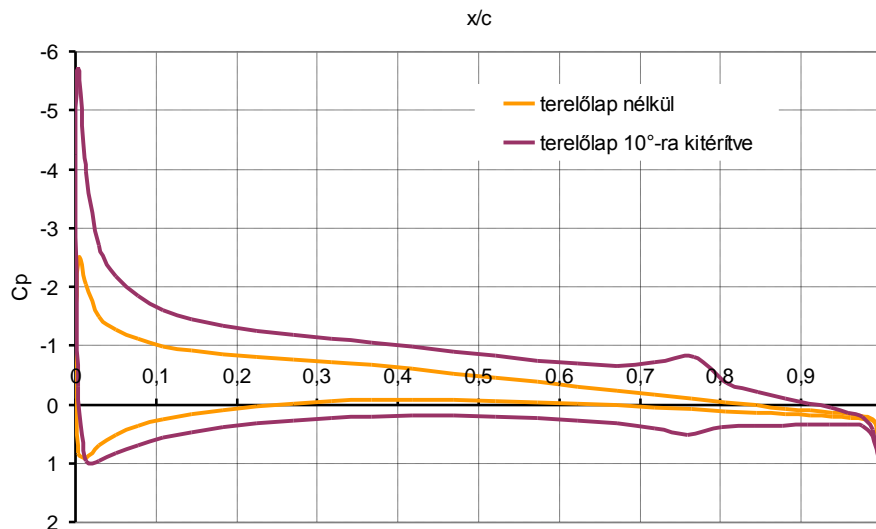
Sokkal kedveltebb és különösen a versenyhajókon elterjedt megoldás a repülőgépeken alkalmazott terelő- és csűrőlapok mintájára készített trim-tab, vagyis terelőlap. A terelőlap hagyományos kialakítás esetén tulajdonképpen a szimmetrikus profilból készített tőkesúly felületének hátsó 10-20%-a, mely egy függőleges tengely körül elforgatható. Ez által az

eredetileg szimmetrikus profil aszimmetrikussá tehető mindkét irányban. Ilyen kialakításnál természetesen csak a tengely előtti részben van ballaszt (ha van ott egyáltalán), a terelőlap maga egy könnyű üreges rész.



5.5.6. ábra: Terelőlapos tőkésűly profilja

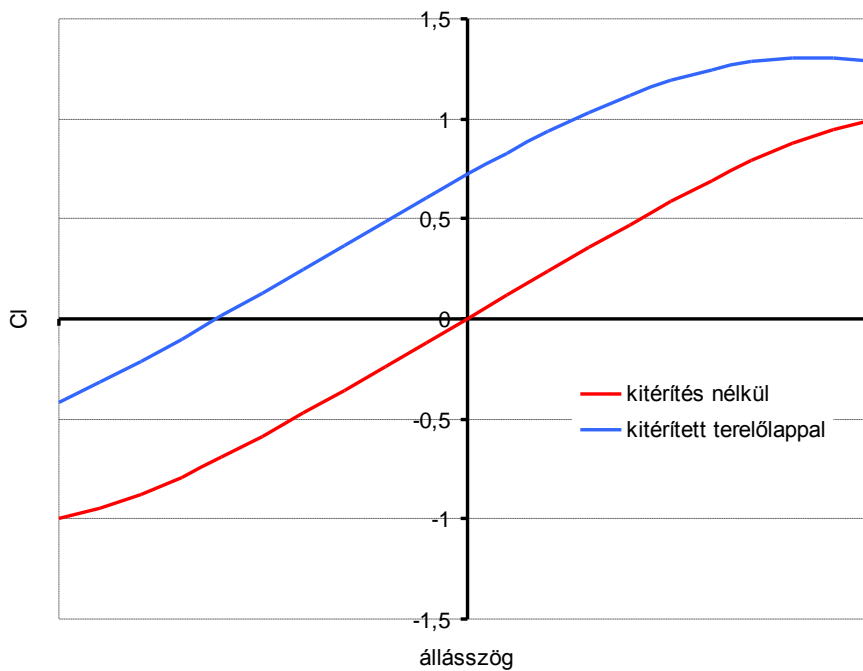
A kitérített terelőlap hatására megváltozik a profil körüli nyomáskép és ezáltal a felhajtóerő- és ellenálláserő-tényező értéke is. Az 5.5.7. ábrán szemléltetjük a nyomáseloszlást kitérített és kitérítetlen állapotra is.



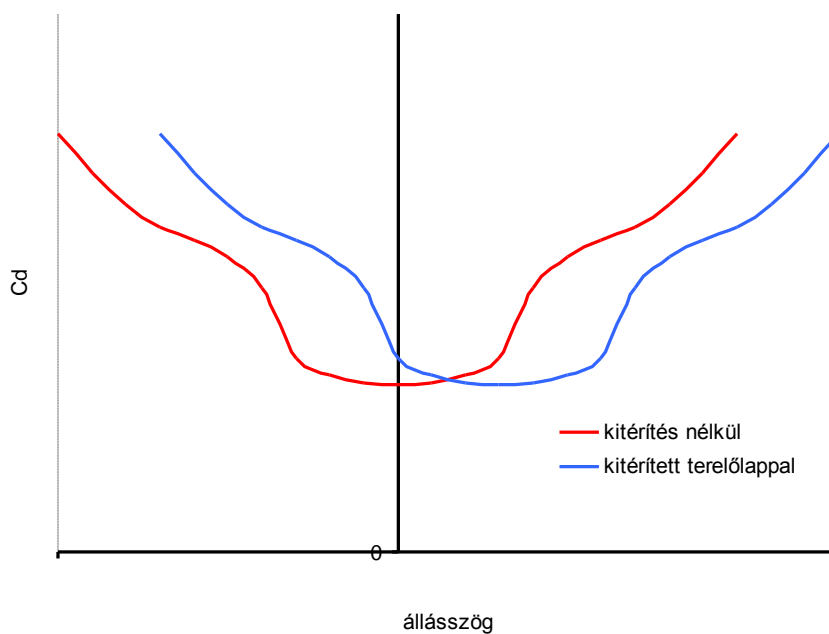
5.5.7. ábra: A nyomáseloszlás alakulása a húr hossz mentén a terelőlap kitérített és kitérítetlen állapotában (63-012-es profil 5°-os állásszögben)

A felhajtóerő-tényező görbéjén (5.5.8. ábra) látható, hogy az a szimmetrikus kialakítás görbéjéhez képest balra és felfelé tolódik el. Ezáltal nulla sodródási szög mellett is keletkezik már felhajtóerő, egyes esetekben ez akár elegendő is lehet a vitorlákon keletkező oldal-erő kompenzálására. Ha nem elégséges, akkor is elmondható, hogy a szükséges oldal-erőt kisebb sodródási szög mellett produkálja a hajó, miáltal a hajótest csúszás miatti ellenállás-növekedése is kisebb lehet. A diagramból ugyanakkor látható, hogy az áteséshez tartozó pont is balra tolódik, vagyis kisebb sodródás mellett már bekövetkezhet az átesés. Az ellenálláserő-tényező diagramját (5.5.9. ábra) vizsgálva ugyanez mondható el: a görbe szintén egy vízszintes eltolást szenved. Ez a gyakorlatban két dolgot is jelent. Egyrészt, hogy a kis ellenállást adó rész a nagyobb pozitív sodródási szögeknél is jelentkezik, másrészt, hogy a profil ellenállása a terelőlap kitérítésével nem változik! Ezek alapján már összefoglalhatjuk a terelőlapos tőkésűlyök legfontosabb előnyét: mivel a felhajtóerő-tényező nő, az

ellenálláserő-tényező pedig nem változik, teljesen egyértelmű, hogy nő a profil hatékonysága. Mindez pedig a hajó élességének javulását eredményezi.



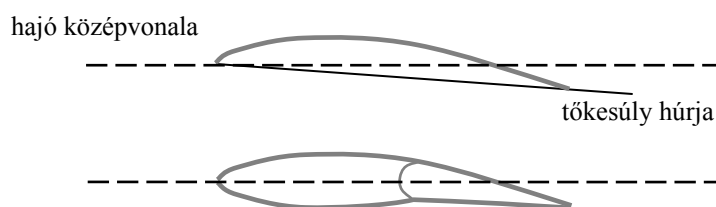
5.5.8. ábra: A felhajtóerő-tényező alakulása terelőlappal profiloknál



5.5.9. ábra: Az ellenálláserő-tényező változása terelőlappal profiloknál (Larsson)

A profilt mutató ábráról látható, hogy kitértett állapotban a profil kontúrvonala nem sima: a tengelynél törés van mindkét oldalon. Ez a törés látható a húr hossz menti nyomáseloszlás mindkét görbéjén is, és ez némileg rontja a profil karakterisztikáját. Ugyanakkor

ez a profil kitérítetlen állapotban tökéletesen sima vonalvezetéssel rendelkezik. Tudjuk, hogy a felhajtóerő előállítás szempontjából a szívott oldalnak van nagyobb jelentősége, ezért elvileg célszerű lenne olyan profilt készíteni, amelynél a szívott oldal a terelőlap kitérített állapotában törésmentes. Erre kínált egy megoldást Gabriel Heyman svéd hajótervező, az általa javasolt profilt az 5.5.10. ábrán mutatjuk be. Ennél a megoldásnál a nyomáseloszlás görbéje legalábbis a szívott oldalon törésmentes. A másik oldal azonban nagyobb törést szenved, sőt nyilvánvaló, hogy egy ilyen profil csak olyan kitérítés esetén ad egyik oldalán sima felületet, amelyre tervezték. Ennél kisebb szög esetén, és a semleges állapotban mindig törés van a profil vonalában, ami azokon az irányokon, ahol nem kell felhajtóerőt termelni, hátrány lehet. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek és Hajók Tanszékén Korenchy Tamás által végzett elemzés kimutatta továbbá, hogy a profil felhajtóerő-ellenálláserő aránya az állásszög függvényében úgy változik, hogy egy bizonyos szög felett a hagyományos profilkialakítás kedvezőbb. A vizsgálatokból arra lehet következtetni, hogy a túrahajók esetén a hagyományos, a jellemzően kisebb sodródási szöggel üzemelő versenyhajóknál pedig a terelőlapos változat lehet előnyösebb, azonban bebizonyosodott az is, hogy a határértéket a tőkésúly karcsúsága is befolyásolja. Ami a terelőlapos megoldások különböző változatait illeti, a vizsgálatok a Heyman és a hagyományos kialakítás között kis eltérést mutattak csak.



5.5.10. ábra: Heyman-féle terelőlapos profil

A terelőlapos tőkésúlynak azonban hátrányai is vannak. Ennek érdekében, hogy a tőkésúly két oldala közötti nyomás ne egyenlítődhessen ki a terelőlap tengelyénél, azt a részt igen körültekintően tömíteni kell. Ha a terelőlapot mozgató mechanika meghibásodik és a lap befeszül, akkor az az egyik vitorlázási oldalon igen jelentősen rontja a hajó teljesítményét. Ilyen befeszülést okozhat esetleg a nagy hajlító nyomaték, ami egy bulbás tőkésúly penge részét terheli. Ezek a hátrányok azt eredményezik, hogy terelőlapos profilokat ma még kifejezetten csak egyes versenyvitorlásokon használnak.

5.5.2 Felület

Mint ahogy a felhajtóerőre felírt képletből is látszik, az erő nagysága egyenes arányban áll a tőkésúly felületével. Ha a tőkésúly túl kicsi, csak nagy sodródás mellett fogja tudni produkálni a szükséges oldalerőt, így nagy ellenállást generál és mindez lassabb hajót eredményez. A másik véglet a túlzottan nagy tőkésúly, amely (esetleg feleslegesen) nagy nedvesített felülete révén ad nagy ellenállást. Mivel azonban az erők más paraméterektől is függenek, az optimális értékeket ezek figyelembevételével célszerű meghatározni. Pl. egy átlagosan nagyobb sebességű hajónak (modern skiffek) kisebb felület is elegendő lehet, vagy egy hosszúgerinces, kis karcsúságú – és ezért kevésbé hatékony – tőkésúllyal rendelkező hajót veszünk, akkor ott nagyobb felület szükséges.

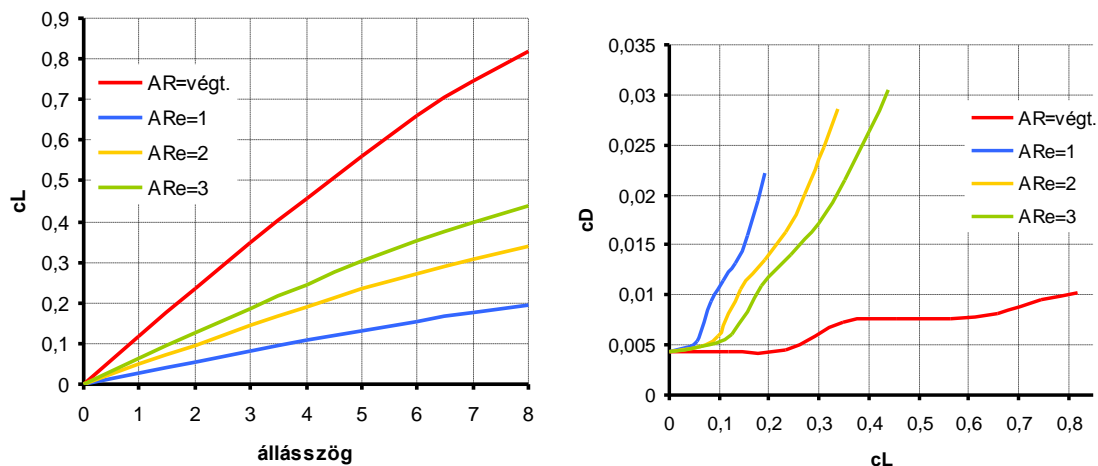
A tőkésúly felületét is meghatározó másik fontos szempont lehet a szükséges ballaszt mennyisége, melynek kérdéskörét az előző pontban végigtárgyaltuk. Az ott leírtakat értelemszerűen lehet a felületre is vonatkoztatni.

A szükséges tökesúly-felület nagyságát vagy a vízvonalhossz vagy a vitorlafelület nagyságának függvényében szokták megadni. Ez utóbbi szerint az átlagos érték 3,5% 0,75%-os szórással. A 2,75% alatti értékek már inkább csak versenyhajókra jellemzőek. Fontos azonban megjegyezni, hogy ezek az átlagértékek azonban nem veszik figyelembe a tökesúly alakját, és így a hatékonyságot kiiktatják. Komolyabb tervezés esetén célszerűbb olyan elemzést végezni, amelyben a hasonló méretű jól teljesítő hajók tökesúly felületét korrigáljuk a tökesúly merülésének a hajó merüléséhez viszonyított arányával.

5.5.3 Oldalnézeti alak (karcsúság, „kihegyezés” és nyilazási szög)

A tökesúly oldalnézeti képét a karcsúsággal, „kihegyezés”-sel és a nyilazási szöggel lehet jellemezni. A három paraméter egymással is összefüggésben van, így a teljesítményre gyakorolt hatásuk ennek megfelelően elég összetett.

A tökesúly karcsúsági tényezőjének növelésével csökken annak a tökesúly-felületnek az aránya az összes felülethez képest, ahol a véges szárny miatt kialakuló megkerülő áramlás, az indukált örvény kedvezőtlenül befolyásolja a profil áramlási jellemzőit. Ezáltal minél karcsúbb a profil, annál nagyobb az oldalerő adott állásszög mellett. A gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy cirkálás közben $c_L = 0,35-0,5$ szükséges ahhoz, hogy a szokásos vitorlafelület-lateralfelület arányok mellett a vitorlákon keletkező oldalirányú erőt a tökesúly kompenzálni tudja. Ha megvizsgáljuk a véges karcsúság hatását a c_L -re (5.5.11. ábra), látható, hogy minél kisebb a karcsúság, a szükséges felhajtóerőt annál nagyobb állásszög mellett lehet csak elérni, a felhajtóerő-tényező görbe meredeksége ($c_{L\alpha}$) csökken. Ehhez párosul, hogy véges szárnyaknál megjelenik az indukált ellenállás, mely szintén annál nagyobb, minél kisebb az AR . Mindezeket egybevetve megállapíthatjuk, hogy kisebb karcsúságú tökesúllyal a szükséges felhajtóerőt nagyobb állásszög és nagyobb ellenállás mellett lehet csak biztosítani. Ez a gyakorlatban az ε_H drasztikus növekedését és az élesség csökkenését eredményezi.



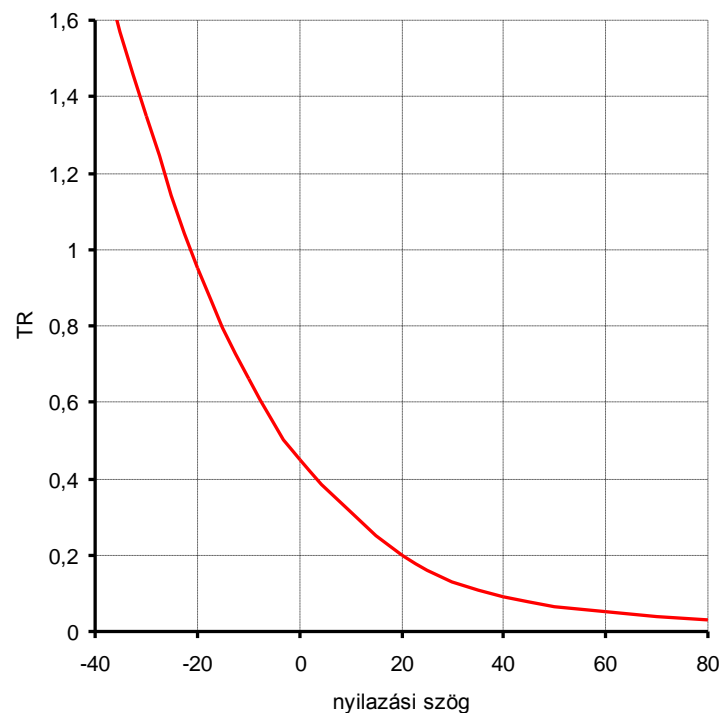
5.5.11. ábra: A c_L és c_D alakulása a karcsúság függvényében

A tényezők javulása kb. $AR_e = 5-6$ értéke felett már csak minimális, tehát a tökesúly további nyújtásával, azaz a hajó merülésének további növelésével nem érünk el további kedvező hatást. Az elemzéshez mindenütt az effektív karcsúságot használtuk.

Más oldalról közelítve a dolgot, karcsúbb tökesúllyal ugyanakkora oldalerőt kisebb felülettel és így kisebb ellenálláserővel lehet előállítani. A karcsúság növelésével lejjebb vi-

hető és így csökkenthető a hajó dőlését csökkentő tömeg. Ennek ellene dolgozik az a tény, hogy a karcsúság növekedésével a tőkésúlyon és a vitorlán keletkező oldalról származó nyomaterék – és így a hajó dőlése is –, növekszik. A gyakorlati használhatóságot vizsgálva elmondható, hogy a karcsúság ilyen szempontból sem növelhető minden határon túl, hiszen pl. a vízmélység (különösen a balatoni hajók esetében), a könnyebb „trélerezhetőség”, szállíthatóság esetleg megszabja hajónk maximális merülését.

Mint azt már említettük, matematikailag és szélcsatorna vizsgálatokkal is bizonyítható, hogy az indukált ellenállás értéke akkor minimális, ha a tőkésúly kialakuló felhajtóerő eloszlás elliptikus. Ez például akkor jön létre, ha a tőkésúly oldalnézetben elliptikus, vagy ezt az alakot közelíti. Azonban az ilyen forma tőkésúly készítésére nem igazán praktikus, gyártási szempontból sokkal kedvezőbbek a négyszögletes oldalnézeti formák. Az ilyen tőkésúlyokra adott nyilazási szöghöz megadható olyan h_a/h_f kihegyezési arány (és viszont), amellyel ezen a nyilazott szárnyon is az elliptikushoz közeli lesz a felhajtóerő eloszlása, így az indukált ellenállás továbbra is közel minimális lehet. Az összetartozó értékeket az 5.5.12. ábrán mutatjuk be.

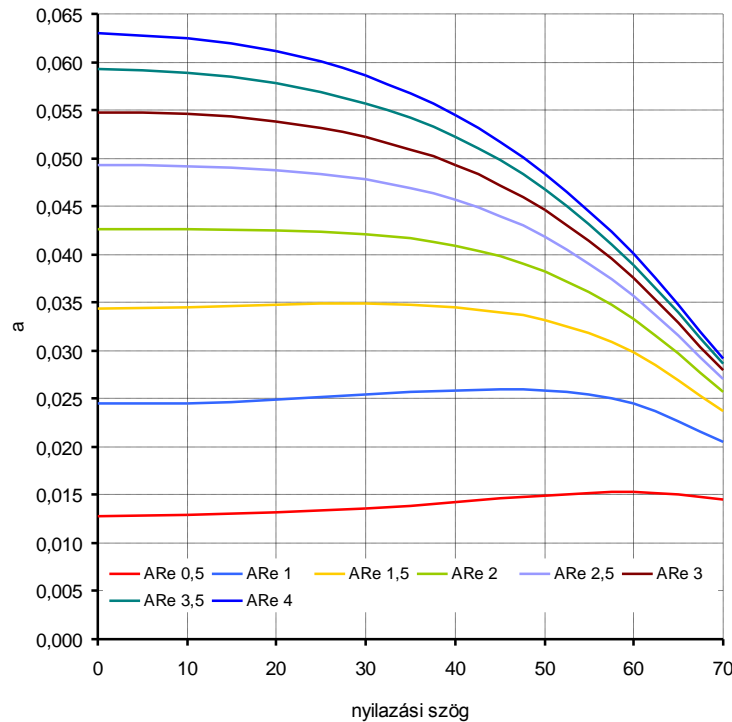


5.5.12. ábra: A nyilazási szöghöz tartozó h_a/h_f (TR) értékek

Az ábráról látható, hogy pl. 20°-os hátranyilazáshoz kb. 0,2-es h_a/h_f kihegyezési arányra van szükség. Ez azt jelenti, hogy a tőkésúly alsó vége igen rövid, és ha feltételezzük, hogy a tőkésúly mindenütt azonos profiltípussal bír (pl. 63-012), akkor az alsó részen a profilok már igen keskenyek is. Így a tőkésúly hossza mentén a tömeg nagyon magasra koncentrálódna, ami stabilitási szempontból nem megfelelő. Ráadásul a szárny fesztávmenti nyomáeloszlás elliptikus volta miatt ebben az esetben a tőkésúly végi rövid metszetenek nagyok a helyi felhajtóerő-tényező értékek, ami azt jelenti, hogy a tőkésúly ezen részén hamarabb következik be az átesés. A gyakorlatban általában a tervezők felvállalják a nem összetartozó nyilazási szög-kihegyezés miatti néhány százalékos indukált ellenállás növekedést, és a kielégítő stabilitás érdekében 0,5-0,7-es kihegyezési aránnyal dolgoznak.

Szeretnénk hangsúlyozni, hogy a kihegyezés és nyilazási szög fenti összefüggése csak az adott karcsúság (és felület) mellett biztosítja a minimális indukált ellenállást az elliptikus felhajtóerő-eloszlás révén. Egy másik, pl. nagyobb karcsúságú tőkesúly a hatékonyság (ε_H) tekintetében ezért sokkal jobb is lehet. Érdekes tehát megvizsgálni az említett paraméterek és a felhajtóerő-tényező görbe meredekségének ($c_{L\alpha}$) összefüggését is.

A szárnyelméletből levezethető, hogy a nyilazási szög cosinus-os összefüggés szerint csökkenti a $c_{l\alpha}$. Ennek figyelembevételével a $c_{L\alpha}$ (a diagramon a -val jelölve) és a karcsúság közötti összefüggésre az 5.5.13. diagram adódik.



5.5.13. ábra: A $c_{L\alpha}$ a nyilazási szög és a karcsúság függvényében

Ebből látszik, hogy minél nagyobb egy szárny karcsúsága, a maximális $c_{L\alpha}$ értékhez annál inkább a zérus nyilazási szög szükséges. Kis karcsúság esetén azonban a görbe elég lapos, így szinte mindegy, milyen nyilazást alkalmazunk, bár az optimum inkább nagyobb értékekre adódik.

Az ellenállást is megvizsgálva a különböző karcsúságú tőkesúlyokkal rendelkező, megdőlt hajókon végzett modellkísérletek azt mutatták, hogy kis karcsúságnál a hajónak nagyobb hátranyilazási szög mellett volt kisebb ellenállása. Hátranyilazás nélküli tőkesúlyoknál ugyanis dőlés közben a tőkesúly igen terhelt felső része közel van a vízfelszínhez, és a tőkesúly szél felőli oldalán levő depresszió egy hullámot indít el, mely növeli a hajó hullámellenállását. A hátranyilazás révén az erőeloszlás a tőkesúly vége felé tolódik el (a felhajtóerő támadáspontja lejjebb kerül), így a tőkesúly tövének terhelése és az általa indukált hullámellenállás csökken. Azonban, ahogy korábban írtuk, adott hátranyilazáshoz relatíve kis értékű kihegyezési arány tartozik az indukált ellenállás minimalizálása érdekében, így egy ilyen megoldásra a relatív kisebb stabilitás jellemző.

Ezt a tőkesúly által generált hullámellenállást azonban nem csak a nyilazási szög növelésével lehet csökkenteni. Az America's Cup versenysorozat 1983-as versenyének ausztrál kihívója, az *Australia II* 12R yacht tervezése és optimalizálása során azt tapasztalták, hogy

0 nyílzási szöveget rögzítve de a tőkésúly alját sokkal hosszabb profilura készítve, mint a tövét (vagyis kb. 1,5-ös kihegyezési arányt alkalmazva) a hajó jóval kisebb hullámmellenállást produkált megfelelő oldalero mellett, mint hátranyilazással. Annak ellenére volt ez az eredmény, hogy eltértek a 0 szöghöz tartozó optimális kihegyezési értéktől, ami a minimálisnál nagyobb indukált ellenállást eredményezett. (Ezen a híres winglet-ek segítségével tudtak javítani, ld. később.) Ez a kedvező hatás azonban csak azoknál a hajóknál jelentős, ahol a hajótest is igen mély, és maga is egy (ugyan igen kis karcúságú) szárnyként kezelhető. Emiatt a testen is számottevő felhajtóerő keletkezik, melynek megoszlása hasonló a tőkésúlyéhoz: a hajótest alja felé 0-ra csökkenne, ha nem lenne ott a tőkésúly. Ezen a helyen viszont egy normál kihegyezésű ($TR < 1$) tőkésúlynál igen nagy terhelés van, így a test és a tőkésúly közötti terhelésátmenet nagyon hirtelen, ez generálja a tőkésúly hullámmellenállását. A fordított kihegyezésű tőkésúllyal pont azt érték el, hogy ez az átmenet sokkal folyamatosabb lett. Modern, kis testmerüléssel rendelkező, lapos fenekű hajóknál a test gyakorlatilag csak véglapként funkcionál, nem termel felhajtóerőt. A tőkésúly rendszerint nagy karcúságú, így a tő terhelése kisebb, ezért nem jelentkezik olyan nagy tőkésúly által indukált hullámmellenállás.



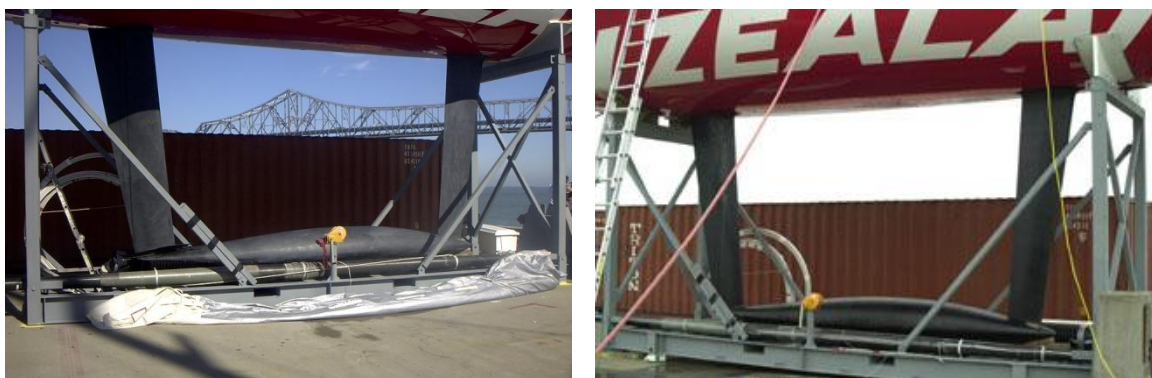
forrás: wikipedia

5.5.14. ábra: Az Australia II tőkésúlya

A karcúsággal kapcsolatban még beszélni kell az ún. tandem kialakításról.

A tandem kialakítás (ld. korábban az 5.2.5. ábrát) azt jelenti, hogy a tőkésúly két, egymás mögött, egy síkban elhelyezett szárnyprofilból áll, amelyek alul általában bulbával vannak összekötve. A két profil között bizonyos méretű rés van. Egyes – a kikötőkben és hajókereskedőktől is hallható – tévhitek szerint a tandem tőkésúly előnye, hogy osztott szárnyfelületein, mivel azok karcúsága külön-külön nagyobb, mint ha együtt lennének, azonos oldalero mellett kisebb indukált ellenállás keletkezik, mint a nem osztott változatén. Sőt, egyes megállapítások szerint, az ily módon csökkentett merülésű tőkésúllyal ugyanolyan élesen lehet vitorlázni, mint egy nagyobb merülésű, karcúbb változattal. Más szavakkal: a kis merülésű tandem-tőkésúly ugyanolyan hatékony lehet, mint a nagy merülésű hagyományos. Mindez azonban nem igaz.

Az 1992-es America's Cup viadalon több hajó is megjelent a tandem kialakítás változataival. Ezek a változatok azonban igen karcsú, és egymástól igen távol elhelyezett szárnyfelületekből álltak (5.5.15. ábra).



forrás: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/6/63/New_Zealand_IACC_keel.jpg és www.latitude38.com/LectronicLat

5.5.15. ábra: Tandem tőkesúly egy versenyhajón

A verseny során bebizonyosodott, hogy ezek akkor tudnának feltehetőleg nagyobb hatékonyságot produkálni, ha mindkét szárnyfelület függőleges tengely körül állítható lenne. Mindazonáltal a versenysorozatban azóta sem jöttek elő ezek a tőkesúly-módozatok, ami – indirekt módon ugyan, de – azt jelenti, hogy az összes szempontot egybevetve, adott maximális merülés mellett a hagyományosnak nevezhető (egy felületből álló) konfiguráció biztosan jobb. (A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén Hargitai L. Csaba és a szerző által végzett kísérletek tanúsága szerint a nem forgatható felületekből álló tandem kialakítás csak nagyobb állásszögek és nagyobb résméret (profilok közötti távolság) esetén biztosít kismértékben nagyobb felhajtóerő/ellenálláserő viszonyt (hatékonyságot), mint az ugyanakkora fesztávval és nedvesített felülettel – tehát a felületre vonatkoztatva kisebb fesztávval – rendelkező hagyományos kialakítás. A kedvezőbb eredményeket adó állásszög tartomány viszont kívül esik a tőkesúlyok működési tartományán.)

A túrahajókon „szokásos” (mert azért nagyon ritka kialakításról van szó) tandem-tőkesúly két része, mivel relatíve közel van egymáshoz, igen szoros kölcsönhatásban, bizonyos módon egymásra is hatva működik. A profilok egyvonalban, egymás mögött helyezkednek el, és a hagyományos változatoknál egyikük sem forgatható, sőt az egyes felületek karcsúsága sem olyan nagy.

Egyes szakirodalmak szerint a tandem megoldás előnye nem a kis merülés melletti nagy hatékonyság, hanem az, hogy a két belépőel miatt az áramlás összességében nagyobb felületen marad lamináris. E mellett, elméletileg a szárny „átesése” előtt nagyobb oldalerő érhető el rajta (vagyis az átesési szög nagyobb), emiatt kisebb laterálfelület elegendő lenne, ami a súrlódási ellenállás csökkenését eredményezné. Mint azt korábban a profilok tárgyalásánál láttuk, az átesés azonban csak nagy terhelésű (tehát relatíve kis felületű) tőkesúlyoknál jelentkezik problémaként, a többi esetben a csúszási szög kellően kicsi ahhoz, hogy ne kelljen az áteséstől tartani. Így ez az elméleti előny sem aknázható ki igazán. Ha ehhez hozzávesszük a nehezebb gyárthatóságot, akkor már egyértelműnek tűnik, miért nem terjedt el ez a kialakítás a vitroláshajókon.

Az oldalnézeti alakra vonatkozó leírásunkból kitűnhet, hogy egy-egy paraméter teljesítményre gyakorolt hatását önmagában vizsgálni elég veszélyes. Éppen ezért az optimali-

zálás legbiztosabb módszerei a teljes rendszert (hajótest-tökesúly-kormány-vízfelszín) vizsgáló modellkísérletek vagy számítógépes szimulációk (CFD).

E hosszasan tűnő hidrodinamikai elemzés végén szeretnénk hangsúlyozni, hogy a tökesúly alakja (minden ezt befolyásoló paraméterével együtt) nem csak a keletkező erők nagyságát, de annak támadáspontját is meghatározza. A kiegyensúlyozottság érdekében (ld. a korábbi erről szóló fejezetet) a tökesúlynak így a vitorlázat elhelyezkedéséhez is igazodnia kell. Mindemellett a tökesúly pozicionálása azt is meghatározza, hogy hova kerül a tökesúly tömegközéppontja hosszirányban. Mivel a tökesúly tömege sok esetben a hajó össztömegének 40-60%-át is eléri, ezért ahhoz, hogy a hajó ne legyen orr- vagy farnehéz, a tökesúly jó elhelyezése igen fontos. Mindezek összehangolása szép kihívás a hajó tervezője számára.

5.5.4 A hajótest-tökesúly kölcsönhatása

Könnyen belátható, hogy a hajótest jelenléte megzavarja a tökesúly körüli áramlást, és ehhez hasonlóan a tökesúly is befolyással van a hajótest mellett létrejövő áramképre. Ennek kétféle hatása is van: az egyik az, hogy a két elem nem ugyanakkora felhajtóerőt állít ellő, mint ha a másik nem lenne ott, másrésztől a két különböző áramlás találkozásánál turbulencia keletkezik, amelyet interferencia-ellenállásnak neveznek. Mindkét jelenséget csak röviden tárgyaljuk.

Modellkísérletek bebizonyították, hogy a két elem az oldalerő előállítását illetően pozitív hatást gyakorol a másikra, vagyis mindkét elemen nagyobb oldalerő keletkezik ahhoz az esethez képest, ha a másik nem lenne ott. E hatás mértéke változó, de alapvetően attól függ, hogy a hajótest és a tökesúly keresztmetszete hogyan viszonyul egymáshoz. Általánosan és a kérdést leegyszerűsítve azt lehet mondani, hogy a modern kis merülésű hajótesttel és nagy (>1) karcsúsággal rendelkező tökesúlyok esetén a test hatása a tökesúly által produkált oldalerőre olyan, mintha a tökesúly felérne egészen a vízvonlig. Az ilyen konfigurációban a hajótest relatíve kis oldalerőt termel, és annak a tökesúly miatti megváltozása sem jelentős. Az egymásra-hatás figyelembevétele jóval összetettebb a mélyebb testtel és kisebb karcsúságú tökesúlyal bíró hajókra, de ez a variáció ma már nem jellemző, így itt nem foglalkozunk vele.

A hajótest-tökesúly kölcsönhatásának másik velejárója az interferencia-ellenállás. Amikor áramló közegben egy test egy másikkal metszésben van (vagy kellően közel vannak egymáshoz) a két test körül kialakuló nyomáseloszlás és határreteg egymással kapcsolatba kerül. Ez azt eredményezi, hogy a két test együttes ellenállása nagyobb, mint külön-külön vett ellenállásuk összege. Ezt a különbséget nevezik interferencia-ellenállásnak, mely vitorláhajók esetén nem csak a hajótest és a tökesúly, de a tökesúly és a bulba között is jelentkezik. Sajnálatos módon az interferencia-ellenállás csökkentésének lehetőségeiről még keveset tudunk, az azonban bizonyos, hogy a két test csatlakozási vonalának kialakítása alapvetően fontos. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a két elem között célszerű egy lekerekített átmenetet kiképezni. A lekerekítés a tökesúly mindkét oldalán a belépőéltől indul, és hátrafelé egyre növekvő rádiusszal bír, a kilépő élnél a sugár legyen a határreteg vastagságával egyenlő. Bulba és tökesúly-szár csatlakozásánál a rövid profilhossz miatt a határreteg vékonyabb, így itt kisebb rádiuszt kell alkalmazni.

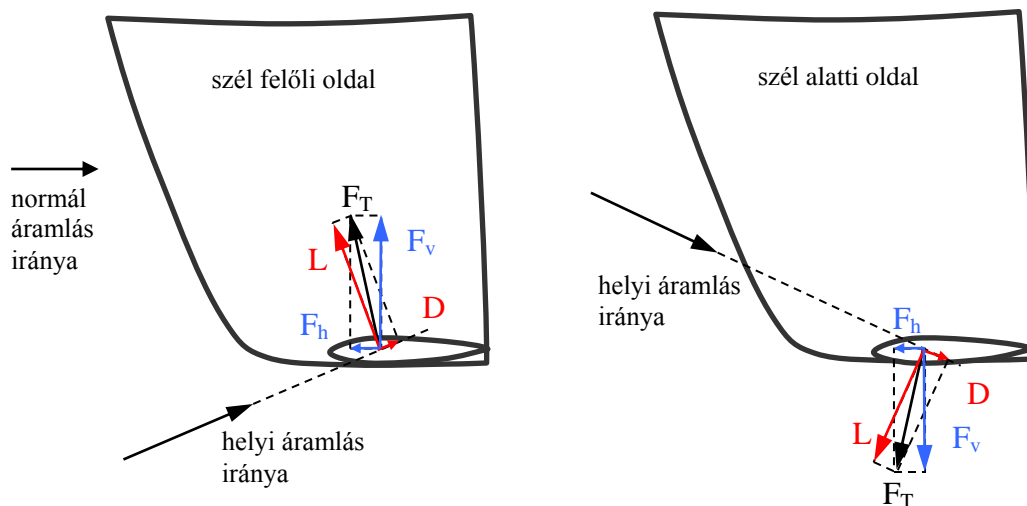
5.5.5 Szárnyak (winglet-ek)

A winglet a tökesúly alján elhelyezett, a tökesúly felületével egy határozott szöget bezáró szárnyfelület. Mivel a hajó hol jobboldali, hol baloldali széllel vitorlázik, ezért a

winglet-et mindkét oldalon el kell helyezni. Első közelítésben bulba nélküli tőkesúlyról beszélünk. A winglet-ek a tőkesúly hossza menti felhajtóerő-eloszlást változtatják meg, mégpedig úgy, hogy azt a szárny vége felé tolják el. Ennek következtében megváltozik az áramkép a szárny végén – és helyes tervezés mellett – csökken az indukált ellenállás. Megfelelő kialakítás mellett a tőkesúly alján létrejövő megkerülő áramlásból származóan olyan hidrodinamikai erőkomponens is keletkezhet rajtuk, mely a hajót – kismértékben ugyan –, de előretolja. A szárnyak felülete ugyanakkor hozzáadódik a nedvesített felülethez, és mivel további, igaz gyengébb örvényeket is generálnak, ezzel a kedvező hatás mellett nyilvánvalóan növelik a hajó ellenállását. A jól működő szárny kialakításához több, egymásnak ellentmondó feltételnek kell megfelelni, a legjobb kompromisszum megtalálásához elengedhetetlenül fontos a tőkesúly körül kialakuló igen összetett, háromdimenziós áramlás pontos ismerete. Ha pontos számítások, esetleg kísérletek nélkül, „csak úgy” találomra helyezünk el szárnyat egy hajó tőkesúlyán, szinte biztos, hogy végeredményben kisebb hasznot hoz, mint amennyi többletellenállást jelent.

Hogy a feladat mennyire összetett, csak röviden felsoroljuk azokat a tényezőket, amelyek a winglet-ek működését, jóságát befolyásolják:

- a winglet húr hossza;
- a kihegyezése;
- nyílazása;
- elcsavarása;
- a tőkesúlyhoz viszonyított szöge oldalnézetben és keresztmetszetben;
- a szárnyak és a tőkesúly csatlakozása az interferencia-ellenállás szempontjából;
- a szárnyak profilja;
- és a szárnyak hosszirányú helyzete a tőkesúlyon.



5.5.16. ábra: A megkerülő áramlásból származó szárnyakon keletkező erők

A szárnyak kapcsán azonban meg kell jegyezni, hogy a különböző kialakítású tőkesúlyokkal végzett kísérletek eredményei szerint a tőkesúly hatékonyságának növelésére a legjobb módszer a tőkesúly hosszának (merülésének) növelése. Ezért a szárnyak alkalmazása csak akkor célszerű, ha a merülés valami miatt korlátozott, már nem növelhető tovább. Ilyen okok lehetnek például a sekély víz, az osztályelőírások, a szilárdsági vagy szál-

líthatósági szempontok. Bármi is legyen a korlátozó tényező, mindig elmondható, hogy egy jól megtervezett szárny hozzáadásával az adott merülésű tökesúly hatékonysága tovább növelhető. A szárnyas tökesúlyok tervezésének kezdetén voltak törekvések arra, hogy a szárnyak profiljának és méreteinek növelésével nagyobb tömeget koncentrálnak a tökesúly aljára, növelve ezzel a hajó stabilitását. Mára azonban minden kétséget kizáróan bizonyosodott, hogy a szárnyak vastagítása nem célszerű, sokkal nagyobb hangsúly van inkább azon, hogy a szárnyak kellően nagy karcsúsággal, és kis térfogattal (azaz nedvesített felülettel és alakellenállással) rendelkezzenek. Ugyanazt a tömeget, amit a szárnyakban helyeznénk el, sokkal kisebb ellenállás mellett lehet elhelyezni egy bulbában. Az optimális megoldás tehát, hogy a maximálisan megengedhető merülés mellett a stabilizáló tömeget egy mélyen elhelyezett, minimális nedvesített felülettel és alakellenállással rendelkező bulbában helyezzük el, és a tökesúlyt a hatékonyság további fokozása érdekében minimális vastagságú, de szintén nagy karcsúságú szárnyakkal látunk el. A szárnyakat ilyenkor természetesen a bulbán helyezik el, a pozíciót a tökesúly-bulba egysége körül kialakuló megkerülő áramlás határozza meg.

Vastag, nagy tömegű szárnyak ma már csak túrahajókon fordulnak elő, de ekkor szerepük már nem a hatékonyság növelése, hanem a tömegközéppont hosszirányú pozicionálása. Előfordulhat ugyanis, hogy a hajó kiegyensúlyozottsága érdekében a laterálfelület súlypontjának szempontjából megfelelő tökesúly-elhelyezés nem kielégítő tömegelosztást eredményez. Nagyobb tömegű, például hátul elhelyezett szárnyak hozzáadásával a tökesúly tömegközéppontját szükség szerint módosítani lehet. A tökesúly más részeiből a szárnyakba átcsoportosított tömeg szinte minden esetben alacsonyabbra kerül, ezáltal a hajó stabilitása növekedhet. De ne feledjük, ez a tömeg áramlástanai szempontból kedvezőbb helyen lenne egy bulbában.

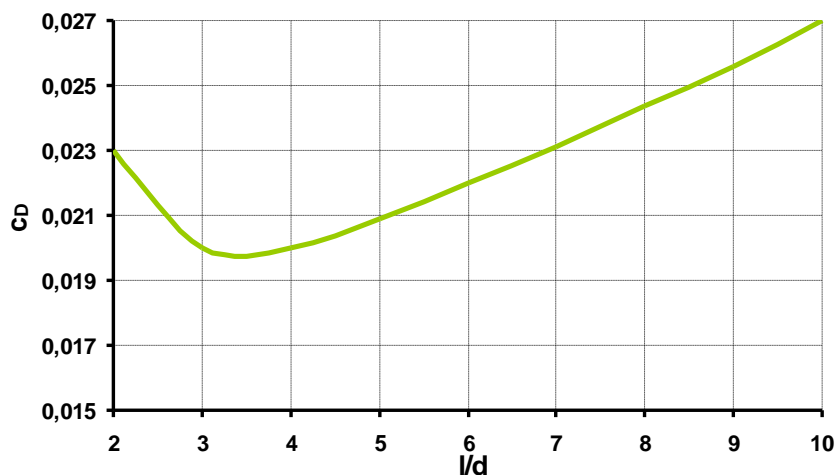
5.6 Bulbák

Említettük korábban, hogy a súlypont csökkentése és a tökesúlyon keletkező felhajtóerő szempontjából is kedvező, ha a stabilitást adó nagy tömeget „kivesszük” a tökesúly szárny-részből, és még koncentráltabban, egy bulbában helyezzük el. A bulba feladata tehát pusztán a tömeg „tárolása”, ezért alakját elsősorban az határozza meg, hogy hogyan lehet minél nagyobb tömeget kis ellenállás mellett elhelyezni. (Meggjegyezzük azonban, hogy a hajótesthez hasonlóan a bulbán is keletkezik oldalerő, azonban alakját nem erre optimalizálják.)

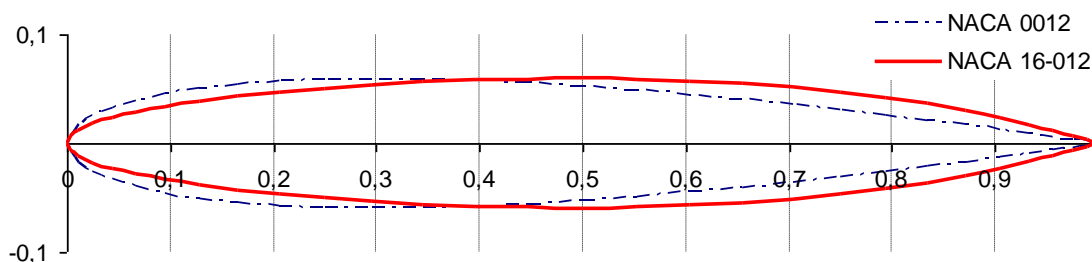
Mivel általában távol vannak a vízfelszíntől, a bulbák ellenállását a súrlódási és alak ellenállás összetevők adják. Tudjuk, hogy adott térfogathoz a gömb adja a legkisebb nedvesített felületet, így súrlódás szempontjából ez lenne az ideális forma. Az alakellenállást azonban hosszú, kis keresztmetszetű, áramvonalas torpedó-formával lehet minimalizálni. Ezért a bulbák hosszmeteszében szokásosan valamilyen szárnyprofil alakját követik, a kis súrlódási ellenállás érdekében a tervezők kifejezetten a lamináris profilokat preferálják. E formát alapul véve a súrlódási és alakellenállás összege az 5.6.1. ábra szerint alakul. Nagy hossz/szélesség(átmérő) arány esetén az ellenállás nagyobb hányada származik a súrlódásból, kisebb aránynál (tömzsibb alak) az alakellenállás a domináns. A diagramban a hossz/szélesség változtatása csak az arányt változtatja, a test térfogatát nem, így az ellenállás értékek azonos térfogathoz tartoznak.

Az alkalmazott profilok tekintetében a korábban említettek mellett feltűnik a 16-es sorozat (5.6.2. ábra), mely jellemzője lamináris volta mellett a nagy teltség, így nagy tömeg befogadására képes. A bulbák keresztmetszete szokásosan kör vagy ellipszis, ez utóbbi

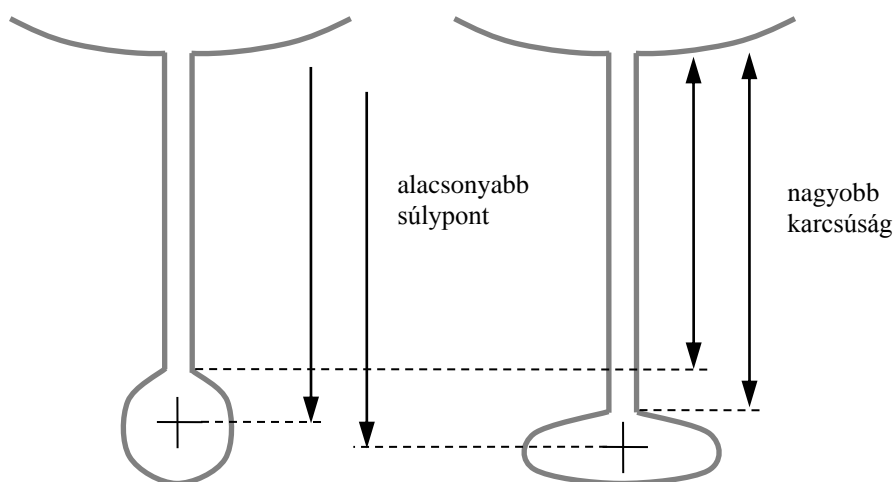
kicsit nagyobb nedvesített felülettel rendelkeznek (adott térfogat mellett), de alacsonyabban lehet a bulba súlypontja és kisebb a magassága, miáltal kötött merülés mellett a felhajtóerőt termelő szár hosszabb lehet. Tapasztalatok szerint kisebb lehet az ellenállás, ha a forgástest végét nem egy pontban futtatják ki, hanem a halak farkához hasonlóan ellaposítják (ld. az 5.6.4. ábra középső képét).



5.6.1. ábra: A hossz/szélesség arányának hatása a bulba összellenállására



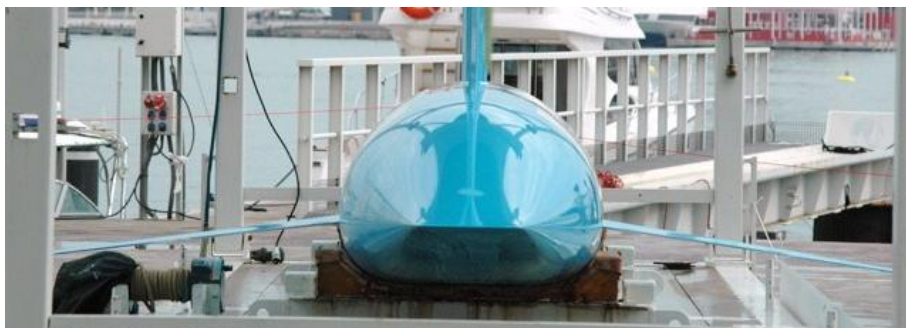
5.6.2. ábra: 16-es sorozatú profil a 0012-höz hasonlítva



5.6.3. ábra: Kör- és ellipszis keresztmetszetű bulbák

A bulba elhelyezése a tőkésűly penge végén nem szünteti meg a megkerülő áramlást, ezért láthatunk a komoly versenyhajókon winglet-eket a bulbán elhelyezve.

A bulba szilárdságilag optimális hosszirányú helyzete olyan, hogy a bulba tömege nem ad csavaró igénybevételt a szárra, vagyis a tömegközéppont a szár tengelye alatt van (T elrendezés). Ettől függetlenül vannak olyan esetek, amikor a bulba nem középre kerül, mert az oldalerő támadáspontja, és a bulba tömegközéppontja között nagyobb távolságot kell tartani (L elrendezés).



forrás: www.cupinfo.com

5.6.4. ábra: Egy America's Cup hajó bulbája a szárnyakkal

Az ellenálláson túlmenően azért meg kell említsük azt is, hogy a tervezők saját elképzelései, az osztályelőírások vagy a felmérési rendszerek, és a divat is befolyással van a bulba formájára. Egyes felmérési szabályok mellett nem szélszerű a torpedó alakú bulba, mert a felmérésnél hátrányt jelent. Az IMS (International Measurement System) pl. az ellipszis helyett lekerekített háromszög keresztmetszetű bulbák rajzolására inspirálja a tervezőket (5.6.5. ábra). Van, hogy semmilyen különösebb műszaki megfontolást nem végeznek a tervezők, sőt sokszor a házilagosan kialakított bulbák „nem is látnak” tervezőt. Determinálhatja továbbá az alakot a könnyebb gyárthatóság. Az 5.6.6. ábra egy kiteríthető felületekből készített bulbás tőkesúlyt mutat, amelynél a bulba ólmát a külső felületet is adó házba öntötték bele. Ebben az esetben nem kellett drága öntőmintát készíteni, ami egyedi hajók gyártásánál előny.



5.6.5. ábra: IMS jellegű bulbás tőkesúly



forrás: www.concordia.matav.hu/hajo

5.6.6. ábra: Egyedi, könnyen gyártható bulba kiteríthető felületekkel

Úgy tűnhet, hogy a bulba alkalmazása mindig jó megoldás, de ez nem igaz. Kis merülésű tőkesúlyoknál kicsi a karcsúság értéke, és így a tőkesúly hatékonysága egyébként sem olyan jó. Ebből a karcsúságból a bulba még tovább elvesz, és ha meggondoljuk, hogy adott stabilizáló nyomaték mellett kis merülésnél nagyobb tömege és így nagyobb, esetleg ma-

gasabb bulbára van szükség, akkor ez a hatás igen számottevő is lehet. Ilyenkor célszerűbb lehet a kisebb karcúság miatt amúgy is nagyobb profilhosszokat kihasználva vastagabb profilokat alkalmazni, akár a tőkésúly alján is, amivel a tömeg lefelé koncentrálható, de a felhajtóerő-termelés nem szűnik meg ezeken a profilokon sem (5.6.7. ábra).



fotó: a szerző

5.6.7. ábra: Az alsó profilok szélesítésével a tömeg lefelé koncentrálható

6. BEVEZETŐ A KISHAJÓK ÉPÍTÉSE RÉSZHEZ

A kedvtelési célú kishajózás a 16. és 17. század fordulója körül kezdődött azzal, hogy a holland hajósok rájöttek, vitorlázni nemcsak munkavégzés céljából lehet, hanem annak pusztán szépségéért is érdemes. És mindezzel egy időben megjelent a sporthajózás is, mint a kedvtelés egyik formája. Ebben az időben a hajók építési anyaga jobbra csak a fa volt, így a kedvtelési célú kishajók építési technológiája is a fahajók már a középkorban kifejlődött jól bevált módszereit követte: gerincre elhelyezett bordázatra palánkokat raktak, és ezzel készítették a héjazatot. A későbbiek során – hogy egyre nagyobb méretű kishajókat kezdtek építeni –, a bordákat acélból készítették, és akár több, egymáshoz képest szög alatt elhelyezett palánkozással látták el. Sőt, egyes speciális hajókat akár teljes egészében acélból készítették. Az 1950-es évekre a műanyagok kishajó-iparban való alkalmazása is lehetővé vált, így újabb gyártástechnológiák léptek a korábbiak mellé. Ezeket aztán – számos előnyük miatt – rohamosan és több irányban tovább is fejlesztettek az egyre változatosabb kedvtelési igények és a nyereséges versenyzés által diktált követelmények kielégítésére. Mindezek eredménye, hogy mára a kishajóépítésben számos alapanyagot és igen sok különböző gyártási technológiát használnak a hajóépítők.

A gyártási módszert minden időben a rendelkezésre álló szerkezeti anyagok és azok kötési, megmunkálási lehetőségei szabták meg. Kezdetben az alapanyag a fa volt, a gyártástechnológia is értelemszerűen ehhez igazodott. Mind a mai napig építenek kishajókat fából, annak kedvező esztétikai és fajlagos szilárdsági jellemzői miatt, de a kötéstechnika (csavarozás, szegezés helyett/mellett ragasztás) fejlődése egészen új, modern eljárások bevezetését is lehetővé tette, mellyel sok esetben egyes egyszerűbb kompozit szerkezetből készülő hajónál is jobbat lehet ma már fából készíteni. A fém, mint szerkezeti anyag a kishajóépítésben – nagy fajsúlya miatt – kisebb jelentőséggel bír, a gyártástechnológia nagyjából hasonló a korábban leírt nagyhajós módszerekhez. Mind a fához, mind a fémhez tartozó építési technológiák olyanok, amelyek nem igazán felelnek meg a sorozatgyártási célok-nak, ezért elmondható, hogy ezek az alapanyagok és technológiáik a kishajóépítésben belül főleg az egyedi hajók gyártását szolgálják. A szálerősített műanyagok – akár tömör laminátos, akár szendvics-szerkezetű kialakításban – és később részletezett gyártási módszereik ugyanakkor tökéletesen alkalmasak kishajók sorozatban gyártására is. Általánosságban elmondható tehát, hogy egyedi tervek alapján ma mindenféle anyagból és módszerrel épül kishajó, sorozatban viszont jellemzően csak kompozitból. (A sorozatgyártás alatt itt azt értjük, hogy a hajók azonos alapvető tulajdonságokkal és testformával rendelkeznek, de belső kialakításuk nem feltétlenül egyezik meg teljesen. A sorozatszám tekintetében országonként és cégenként is nagy a szórás, a típusonként évi 3-5 db kis sorozatnak, a 250 db pedig nagy sorozatnak tekinthető.)

Az egyedi gyártás jellemzői:

- a hajó egyedi tervek alapján épül, így a megrendelő egyedi igényeit is ki lehet elégíteni;
- nagyobb munkaigénye van;
- mivel a hajó formája egyedi, nincsenek sablonok;
- olyan alapanyagot és technológiát célszerű választani, ami nem igényel sablonokat (könnyen használható az adott forma kialakításához);

- a bútorzat kialakítása a hajón belül történik alkatrészenként;
- a héjszerkezet elkészülte után a hajótest nem mozog, minden további alkatrész, elem oda szállítandó és ott kerül beépítésre, ahol a hajó van (a hajó áll).

Meg kell jegyezzük, hogy a számítógépes hajótervezés sok tekintetben megkönnyítheti az egyedi gyártást is, hiszen ennek révén számos alkatrész vagy elem gyártását lehet gépesíteni.

A sorozatgyártás jellemzői:

- a gyártás kötött, a megrendelő speciális igényei nem elégíthetők ki;
- a nagyobb elkészítendő darabszám gazdaságosabb gyártása érdekében a nagyobb alkatrészekhez mindenképpen, a kisebbekhez esetleg készítenek speciális, a gyártást megkönnyítő szerszámokat, mintákat, sablonokat;
- számos gyártási tevékenységet gépesítenek, automatizálnak (pl. rétegelt lemezek kivágása, felületkezelés);
- a hajók belső bútorzati részeit nagyobb elemekben előre, a hajón kívül készítik, majd egységenként rögzítik;
- a hajó egy gyártási láncon megy végig, melynek minden egyes állomásán valamilyen más feladatot végeznek el (a hajó mozog);
- kisebb átfutási idő;
- nagy termelékenység;
- egy azonos minőségi szint könnyebben biztosítható minden terméknel;
- a hajók lehetnek teljesen egyformák (ez lehet előny, pl. one-design osztályoknál, de lehet hátrány is);

A következő fejezetekben áttekintjük az egyedi és sorozatgyártás módszereit. A bemutatás célja azonban nem az, hogy általa az olvasó hajóépítő mesterré váljék. Csak annyira igyekszünk belemenni a részletekbe, hogy a hajótervezéssel foglalkozó szakemberek elméletben és általánosan megismerkedhessenek az egyes technológiákkal, és így olyan hajókat tervezhessenek, amelyeket adott esetben le is lehet gyártani. Éppen ezért nem foglalkozunk részletesen a szerszámok kezelésével, felhasználásuk módjával és olyan dolgokkal sem, mint a kishajók karbantartása, javítása, stb. Ehelyett a választható alapanyagok, azok jellemzőinek ismertetése, és a belőlük készíthető hajók gyártási folyamatainak tematikus leírása volt a szándékunk. Nem írunk továbbá a fémből készülő kishajók építéséről, hiszen ez a technológia gyakorlatilag azonos a jegyzet előző részében tárgyalt nagyhajók építésénél alkalmazott módszerekkel.

7. A KISHAJÓK ALAPANYAGAI

A kishajókat manapság a velük szemben támasztott követelmények – esztétika, sebességpotenciál, tartósság, ár, stb. – miatt és a technikai fejlődés adta lehetőségek révén többféle anyagból építik. Az adott hajó számára megfelelő anyag kiválasztása ezért nem is olyan egyszerű feladat. Az anyaggal szemben támasztott követelményeket a következőképpen lehet összefoglalni:

- biztosítson megfelelő szilárdságot – statikus, dinamikus (periódikus) és „egyszer az életben” jellegű terhelésre is;
- adjon kellő merevséget – hajlítás és kihajlás esetére is;
- könnyen lehessen vele dolgozni – legyen könnyen megmunkálható, formázható, jó kötéseket lehessen készíteni;
- legyen időtálló – a mechanikai tulajdonságok ne változzanak számottevően az idővel, kevés hulladék legyen;
- legyen elfogadható az ára – az alapanyagának és a megmunkálásnak is (tőke- és rezsiköltségek, szerszámgépjár, stb.);
- legyen sérüléstűrő – úszó tárgyakkal ütközés, zátonyra futás, hullámütések esetére.

Nyilvánvaló, hogy minden követelményt egyetlen anyag sem tud teljesíteni, ezért olyan, hogy ideális anyag, nem létezik. Sok esetben nincs is nagyon lehetőség a választásra, mert vagy a megrendelő, vagy pl. egy osztályelőírás megkötöti a tervező kezét. Ha viszont a tervező szabadon választhat, akkor az adott feladat ismeretében, az anyagokra jellemző előnyök és hátrányok racionális értékelésével kell a kiválasztást elvégezni. Az alábbiakban az egyes anyagok jellemzőit vesszük végig, majd a fejezet végén következik a szerkezeti anyagok összehasonlítása, mely a kiválasztást is segítheti.

7.1 Szerkezeti műanyagok

A műanyag hajógyártás különböző lehetőségeinek bemutatásához mindenképp szükség van a következő, a korábban említett anyagfeleségek tárgyalásához képest sokkal részletesebb kompozitokról szóló leírásra. E részletes ismertető nagyban támaszkodik a Gurit cég „Guide to Composites” segédletére.

A kishajógyártásban a hajótest szerkezeti elemeinek építéséhez használt műanyagok ma általában kompozit anyagok. A kompozit olyan anyag, amely legalább két összetevőből áll. Az összetevők együttműködnek annak érdekében, hogy olyan anyagtulajdonságokat hozzanak létre, amelyek különböznek az egyes összetevők saját tulajdonságaitól. A legtöbb kompozit tartalmaz egy ún. beágyazó anyagot (mátrix), és egy valamilyen erősítő anyagot, ami arra szolgál, hogy a mátrix szilárdságát és merevségét növelje. Ez a megerősítés általában szál formájú. Napjainkban a legelterjedtebb ember által előállított kompozitfajták a következők:

- Polimer mátrixú kompozitok – a kishajók építésében általánosan használt típus, melyet általánosan szálerősített műanyagoknak hívnak (fibre reinforced plastics). Az angol megnevezés betűszava FRP, ezt a rövidítést használjuk majd mi is. Ezeknél az anyagoknál mátrixként egy gyantát, megerősítésként pedig többféle szál (pl. üveg, szén) használnak.

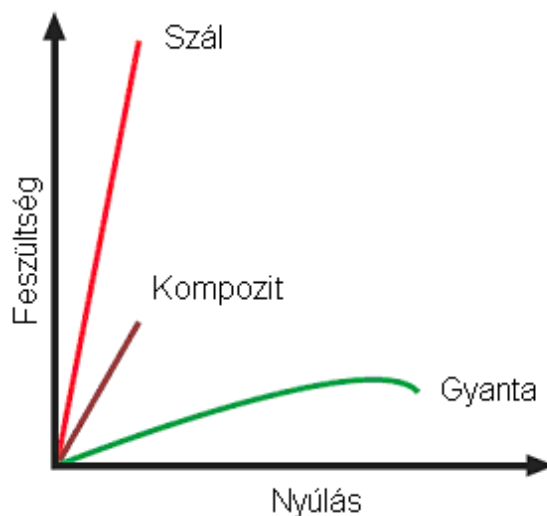
- Fém mátrixú kompozitok – gépjárművek gyártásában használatosak. Ezeknél az anyagoknál fémet, pl. alumíniumot használnak mátrixként, és ezt szilikon karbiddal, vagy egyéb rosttal erősítik meg.
- Kerámia mátrixú kompozitok – ezeket nagyon magas hőmérsékletű környezetben, elsősorban az űrtechnikában használják.

Kompozitnak tekinthető ugyanakkor az építőiparban használt vasbeton is (ahol a szál acélból van, a mátrix pedig a beton). A továbbiakban a polimer mátrixú kompozitokkal foglalkozunk részletesebben.

7.1.1 A kompozitokkal kapcsolatos általános tudnivalók

Szerkezetek előállításához az epoxi és polieszter gyantarendszereknek önmagukban korlátozott a felhasználhatósága, mivel mechanikai jellemzőik – összehasonlítva a legtöbb fémmel – nem elég jók. Vannak azonban különösen a kishajóépítés szempontjából igen előnyös tulajdonságaik is, mint pl. a könnyű formázhatóság. Az olyan anyagoknak, mint az üveg, az aramid vagy a szén nagyon nagy a szakító- és nyomószilárdságuk, de ezek a tulajdonságaik „tömör” állapotban nem nyilvánulnak meg. Ez annak a ténynek köszönhető, hogy amikor terhelés éri őket, az esetleges felületi hibák miatt összetörnek, jóval az „elméleti töréspontjuk” alatt. Ezt a problémát elkerülendő, az anyagot szál-formában állítják elő. A szálakban is megtalálhatók ugyanúgy a felületi hibák, de ezek csak bizonyos szálakra korlátozódnak, és a többi biztosítja az anyag elméleti szilárdságát. Így egy szálköteg sokkal pontosabban mutatja meg az anyag tényleges teljesítményét, minőségét. A szálak azonban csak szálirányukban tudják biztosítani a megfelelő szilárdságot. Mindezekből látható, hogy önmagukban ezek az anyagok nem használhatók kishajók építésére. A gyanták és az üveg-, szén- vagy az aramidszálak kivételes tulajdonságait csak akkor tudjuk elérni, ha a szálakat beágyazzuk a gyantába és így kompozit szerkezetté építjük őket össze. A gyanta mátrix szétesztja a kompozitot érő terhet az egyes szálak között, valamint védi a szálakat a kopás és ütés káros hatásaitól. A kompozit szerkezet tehát gyantába ágyazott szálanyag, sok esetben nem is csak egy, hanem több rétegben, akár különböző alapanyagból készült, különböző irányultsággal elhelyezett szálakkal. Az ilyen módon előállított új „anyag”-ra (szokásos nevén: laminátra) a kis sűrűséggel párosuló nagy szilárdság és merevség, a komplex formák könnyű elkészítése, a környezeti hatásokkal szembeni nagy ellenállás jellemző. Egy szerkezet elkészítésére a kompozit anyag éppen ezért sok alkalmazásban a fémeknél is jobb választás lehet.

Mint minden szerkezetnek, így a kompozitoknak is alapvetően négy fő terhelése van, ezek: húzás, nyomás, nyírás és hajlítás. Egy kompozitban a húzó igénybevétel a szálak veszik fel, így a kompozit reakciója a húzásra főleg a szálak húzószilárdsági jellemzőitől függ. Nyomás esetén a gyantarendszer tapadó és merevségi jellemzői a létfontosságúak, mivel a gyanta feladata a szálakat egyenes oszlopokban megtartani, és megelőzni azok elhajlását. Nyíró igénybevétel esetén a terhelés megpróbálja egymáson elcsúsztatni a kompozit egyes rétegeit. Ilyen esetben a gyanta játssza a fő szerepet, elosztva a terhelést a kompozit teljes egészére. Ahhoz, hogy a kompozit jól működjön ilyen irányú terhelésnél, a gyanta alkotórésznek nemcsak kiváló mechanikai tulajdonságokkal kell rendelkeznie, hanem nagymértékben kell tapadnia az erősítő szálakhoz. Ennek a tulajdonságnak a jellemzésére használják laminátoknál az ún. rétegek közötti (vagyis interlamináris) nyírószilárdságot, mint mechanikai jellemzőt. A hajlító terhelés tulajdonképpen ötvözete a húzásnak, nyomásnak és nyírásnak. Ilyenkor az egyik felület nyomásnak, a másik húzó igénybevételnek, a középső rész pedig nyírásnak van kitéve.



7.1.1. ábra: A kompozitok szilárdságának összetevői

A kompozitok tulajdonságait a következő tényezők határozzák meg:

- a szál tulajdonságai;
- a gyanta tulajdonságai;
- a szál és a gyanta aránya a kompozitban (szál-térfogatrész, FVF);
- a szálak geometriája és orientációja a kompozitban.

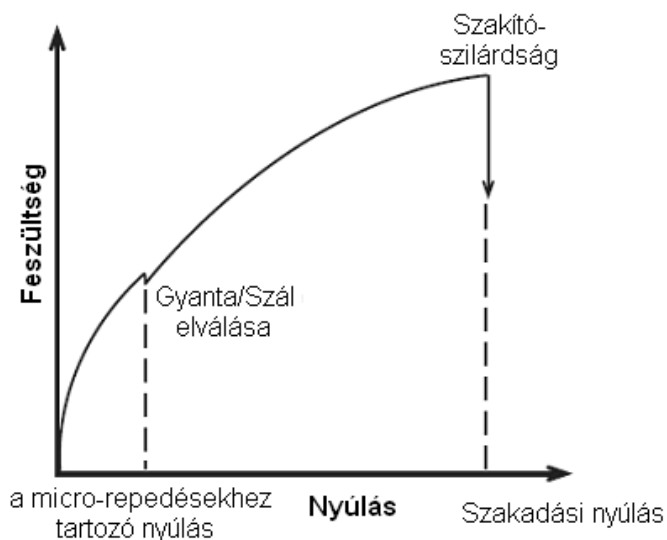
Az első két tényezőt a következő alfejezetekben részletesebben is tárgyaljuk. A szálak aránya nagymértékben függ az előállítási folyamatától, ezekről szintén később lesz szó. Általában azonban elmondható, hogy az arányt befolyásolja még az alkalmazott gyantarendszer típusa és a forma, amiben a szálakat összedolgozzák. Mivel a szál mechanikai tulajdonságai sokkal jobbak a gyanta tulajdonságainál, minél nagyobb arányban szerepel a szál a kompozitban, annál jobbak annak tulajdonságai. A gyakorlatban megvannak ennek a korlátai, mivel a szál csak úgy hatékony, ha teljesen bevonja a gyanta. Így az általában hengeres keresztmetszetű szálak összerakásának van egy optimuma. Ráadásul a szálakat a gyantával kombináló előállítási folyamat (a szerkezet gyártása) különféle hibákhoz és légzárványokhoz vezethet. Általában egy közönséges kézi felrakó eljárás esetében, ami széles körben elterjedt a hajóépítésben, a szálanyag maximális aránya kb. 30-40%. A jobb minőségű, összetettebb és precízebb eljárások esetében az arány azonban elérheti akár a 70%-ot is.

A szálak elhelyezkedése a kompozitban szintén fontos, mivel a szálak tulajdonságai szálirányban és nem annyira szélességükben érvényesülnek. Ez eredményezi a kompozitok nagymértékben anizotróp tulajdonságait, vagyis a fémektől eltérően, a kompozit mechanikai tulajdonságai a különböző irányokban eltérőek lesznek. Ezért a kompozitok alkalmazásakor nagyon fontos tehát már a tervezési szakaszban figyelembe venni a terhek nagyságát és irányát. Ha tudjuk, hol mekkora és milyen irányú terhelés éri a szerkezetet, akkor a kompozit anizotróp tulajdonsága kifejezetten előnyös lehet, hiszen csak oda kell tenni az anyagot, ahol terhelés lesz, így elkerülhető sok felesleges anyag beépítése.

A fémek esetében az anyag tulajdonságait az anyag gyártója határozza meg. Az a személy, aki az anyagokból előállítja a végső szerkezetet, már képtelen megváltoztatni ezeket

a „beépített” tulajdonságokat. A kompozit anyag a szerkezet előállításával egy időben alakul, így az azt előállító személy egyidejűleg alakítja az eredményként létrejövő kompozit tulajdonságait is; így az alkalmazott előállítási folyamatoknak különösen fontos szerepük van a keletkező szerkezet tulajdonságainak meghatározásában. Ez olyan alapvető különbség a fémek és a kompozitok között, amelyet a kompozitok tervezésénél és előállításánál mindig figyelembe kell venni!

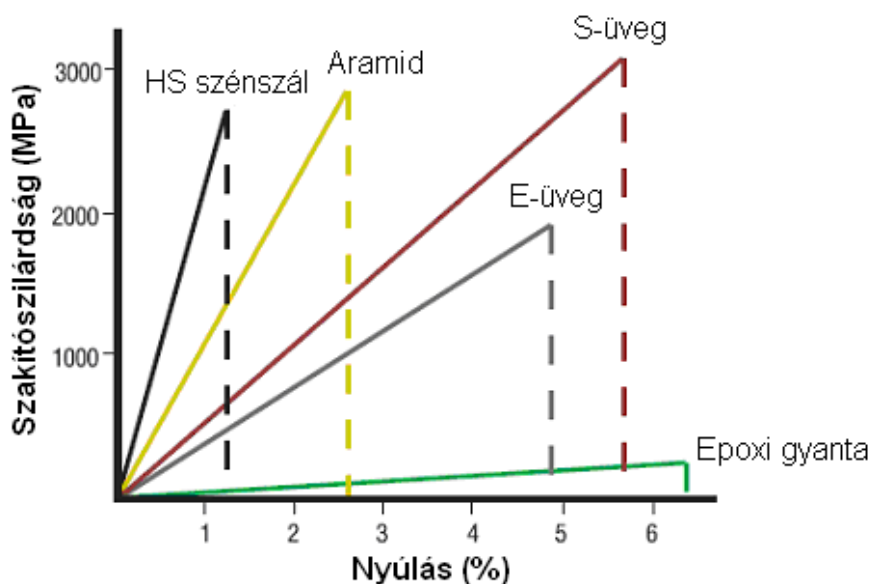
Egy laminát erősségén általában azt értjük, hogy mekkora terhelést bír el az anyag, mielőtt végleg megrongálódik. A szakító vagy törő szilárdság egy laminát esetében tehát az a pont, amikor a gyanta teljesen tönkremegy, és a szálak elszakadnak. E határérték előtt azonban a laminát elér egy olyan feszültségi szintet, ahol a gyanta elkezd elválni azoktól a merevítő szálaktól, amelyek nem a terhelés irányában vannak elhelyezve, és ezek a repedések végigvonulnak a gyanta egész szerkezetén. (7.1.2. ábra). Ezt a jelenséget transzverzális mikro-törésnek nevezik és, bár ezen a ponton a laminát még nem ment tönkre teljesen, a meghibásodási folyamat megkezdődött. Következésképp, a tartós szerkezet kialakítása érdekében a mérnököknek biztosítaniuk kell, hogy a laminát ne érje el ezt a pontot az üzemi terhelés alatt.



7.1.2. ábra: Tipikus laminát szakítódiaagram

A laminát által a szerkezeti törés előtt elviselhető nyúlás nagyban függ a gyantarendszer szívósságától és tapadási képességétől. Rideg gyantarendszerek (mint a legtöbb poliészter) esetében, ez jóval a laminát meghibásodása előtt következik be, és így nagyban korlátozza a laminát terhelhetőségét. Vizsgálatok kimutatták, hogy pl. egy üvegszálás poliészter laminátban, a hajszálrepedés jellegzetesen 0.2%-os nyúlásnál következik be, bár a végleges meghibásodás csak 2.0%-os nyúlásnál következik be. Ez a törőszilárdság csupán 10%-os kihasználásának felel meg. Mivel a húzásra igénybe vett laminát szakítószilárdságát a szálak szilárdsága adja meg, a gyanta mikro-repedései nem redukálják azonnal a laminát végső szilárdságát. Azonban olyan környezetben, mint a víz vagy nyirkos levegő, a szerkezetileg sérült laminát az ép anyagnál jelentősen több vizet szív magába. Ez később súlynövekedéshez vezet, a gyantát és a szálak bevonatát a víz megtámadja, az anyag elveszti merevségét, és egy idő múltán a mechanikai tulajdonságok is romlanak. Mindez késleltethető a gyanta és a szálak közötti jobb tapadás révén. A tapadás jósága általában a

gyanta megfelelő kémiai összetételéből és a gyantának a szálak gyártása közben alkalmazott felületi bevonatokkal (írezőanyagokkal) való jó összeférhetőségéből származik. A gyanta szívósságát nehéz mérni, de ezt nagyjából jellemzi az anyag szakadásig bekövetkező nyúlása. A poliésztergyantákra kb. 3%, a vinilészterekre 4,5%, az epoxira pedig 7% jellemző. Húzásra igénybevett laminátban, annak érdekében, hogy a szálak által biztosított magas szilárdságot ki tudjuk használni, a gyantának legalább olyan nyúlást el kell tudni viselni, mint amekkorát a szálak a terhelés alatt produkálnak. A különböző nyers szálanyagok (melyekről később részletesen is szólunk) terhelés hatására bekövetkező nyúlását a 7.1.3. ábra mutatja. Ebből látható, hogy pl. egy 5,3%-os szakadási nyúlással rendelkező S-üveget poliészter gyantába ágyazva, mivel a gyanta rosszabb tulajdonságokkal (3%-os szakadási nyúlás) rendelkezik, mint a szál, a laminát jellemzőit sajnálatosan nem a szál, hanem a gyanta fogja limitálni. Ha ugyanezt az S-üveget epoxigyantával kombináljuk, akkor lehetőségünk van a szál adta jó szilárdsági mutatókat kihasználni. Az ábrából az is látható, hogy az epoxigyanta gyakorlatilag minden, kishajóépítésben használt szálanyagnál jobb szakadási nyúlással bír, így az ilyen gyantával készített laminátok nagyobb szerkezeti nyúlásokat tudnak elérni mikro-repedések nélkül.



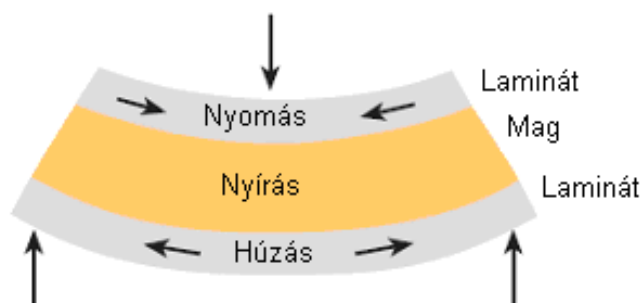
7.1.3. ábra: Szálanyagok szakadási nyúlása

Általában a kompozitok a legtöbb fémmel összehasonlítva kiváló kifáradással szembeni ellenálló képességet mutatnak. Azonban, mivel az anyagfáradási hibák a kismértékű károsodások fokozatos felhalmozódásának következményei, bármely kompozit anyagfáradási viselkedését a gyanta szívóssága, hajszálrepedésre való hajlama, valamint a gyártás során keletkező légzárványok és egyéb hibák mennyisége befolyásolja. Ennek eredményeként az epoxigyantával készülő laminátok – összehasonlítva mind a poliészterrel, mind a vinilészterrel – rendkívül jó fáradással szembeni ellenállást mutatnak, és ez az egyik fő oka a repülőgép szerkezetekben való felhasználásuknak.

A különböző szálakból készített kompozit panelek – mint amilyen egy hajótest héjszerkezete is – már igen kevés réteggel is lehetnek kellően szilárdak, ami azt jelenti, hogy a terhelés alatt az anyag nem törik el. Ugyanakkor, a kevés réteg miatt a héj nem kellően merev, hiszen ismeretes, hogy bármely panel hajlítási merevsége egyenesen arányos a vas-

tagságának köbével. Így tehát különösen a vékony laminátok a terhelésre igen nagy deformációval válaszolnak, ami sok szempontból nem megengedhető. Egy adott merevítő rendszert feltételezve, a merevség klasszikusan a héjfelületek vastagságának növelésével vagy a „mögöttük” elhelyezett merevítő rendszer sűrítésével növelhető. Egy kompozit szerkezetben a vastagságot a rétegek számának növelésével lehetne növelni, de ez – mint ahogy a merevítő rendszer sűrítése is – többlet anyagfelhasználást és nagyobb anyag- és munkadíjat jelentene. Ennél sokkal célszerűbb megoldás a szendvics-szerkezetek készítése. Egy szendvics-szerkezetben két vékonyabb laminát fogja közre az ún. maganyagot. A maganyagok kis sűrűségükkel és megfelelő vastagságukkal hatékonyan növelik a merevséget, de mindez nem jár számottevő szerkezeti súlynöveléssel. A szendvics-szerkezet hasonlítható az I-tartóhoz, a szerkezet külső és belső laminátja megfelel az I tartó övlemezeinek, a maganyag pedig a gerinclemezeknek.

A 7.1.4. ábra azt mutatja, hogy egy maggal ellátott laminát hogyan viselkedik hajlító igénybevételnél. A rajzolt irányú terhelésnél látható, hogy a felső réteg nyomott, az alsót húzás, a magot pedig nyíróerő terheli. A fentiekből értelemszerűen következik, hogy a jó maganyag legfontosabb jellemzői a kis sűrűség és a nagy nyírószilárdság.



7.1.4. ábra: Szendvics-szerkezet hajlító terhelés alatt

7.1.2 Gyanták

A kompozitokhoz használt gyantáknak van egy közös tulajdonsága: hosszú láncmolekulából állnak, melyben sok egyszerű, ismétlődő rész található. A mesterséges gyantákat „szintetikus gyantáknak”, vagy egyszerűen gyantáknak nevezik. A polimereket két csoportba sorolhatjuk a hővel szembeni viselkedésüknek megfelelően: hőre lágyulók és hőre keményedők.

A hőre lágyuló anyagok, mint a fémek, melegítés során megpuhulnak, végül megolvadnak, hűtés hatására megkeményednek. A folyamat – melynek során átlépjük az olvadáspontot – akárhányszor megismételhető anélkül, hogy ez bármely szakaszban hatással lenne az anyag tulajdonságaira. Tipikus termoplasztikus műanyag pl. a nejlon, a polipropilén és az ABS (akrilonitril-butadién-sztirén).

A hőre keményedő anyagokat kémiai reakciók során hozzák létre, ahol a gyantát edzővel vagy katalizátorral összekeverve, egy nem visszafordítható kémiai reakció során jön létre egy kemény, olvaszthatatlan termék. Egyes hőre keményedő anyagnál (pl. fenol gyanták), a kötés (szilárdulás) kondenzációs folyamat révén megy végbe és ennek során illóanyagok keletkeznek melléktermékként. A poliészter és epoxi viszont olyan hőre keményedő anyagok, amelyeknél addíciós reakciók zajlanak le és így nem keletkeznek illóanyagok melléktermékként, ezért ezeket sokkal könnyebb előállítani.

Bár a kompozit iparban számos különböző gyantát használnak, a szerkezeti elemek legnagyobb hányadát három fő típusból, a poliészterből, a vinilészterből és az epoxiból készítik.

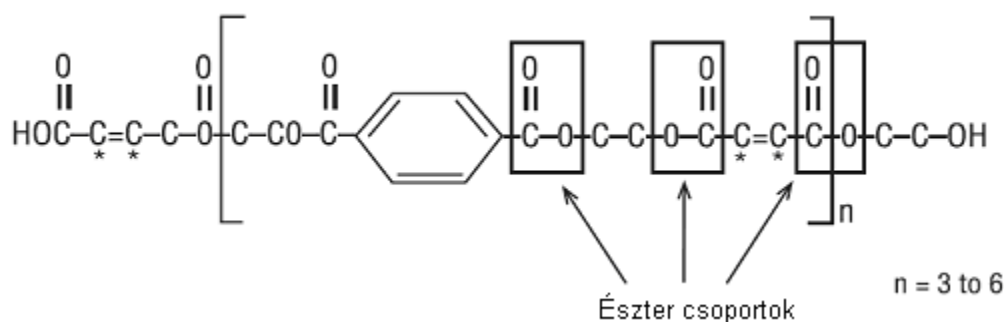
7.1.2.1 Poliészter gyanták

A poliészter gyanták a legszélesebb körben alkalmazottak, különösen a hajóiparban.

A poliészter gyanták a telítetlen típusú gyanták közé tartoznak. A telítetlen gyanták hőre keményedők, megfelelő feltételek mellett képesek folyékony vagy szilárd halmazállapotról is kikeményedni. A telített poliészterek ilyen módon nem keményíthetők meg. E különbség ellenére gyakori, hogy a telítetlen poliészter gyantákat egyszerűen csak „poliészter gyantákként” vagy „poliészterként” említik. E jegyzetben poliészter gyanta alatt mi is mindig telítetlen gyantát értünk.

A poliészter gyantáknak két alaptípusa van, amiket a kompozit iparban általánosan alkalmaznak. Az ortoftál poliészter gyanta kevésbé jó tulajdonságokkal rendelkezik, de gazdaságos, ezért sokak által használt változat. Az izoftál poliészter gyanta az előzőhöz képest sokkal jobb vízzáró képességgel bír, ezért egyre kedveltebb alapanyag a kishajó-iparban, hiszen itt ennek igen nagy jelentősége van.

A 7.1.5. ábra egy tipikus poliészter ideális kémiai szerkezetét szemlélteti. Figyeljük meg az észter csoportok (CO – O – C) és a reakcióképes (csillaggal jelölt) oldalak elhelyezkedését a molekula láncon belül.



7.1.5. ábra: Az izoftál poliésztergyanta kémiai felépítése

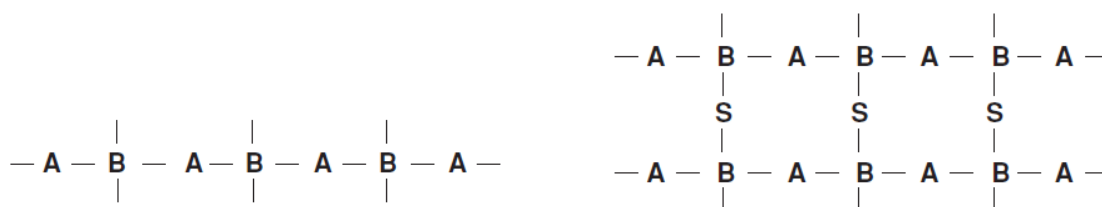
A legtöbb poliészter gyanta nyúlós, viszkózus, halvány színű folyadék, amely gyakorlatilag monomerek (általában sztirol) és poliészterek oldata. A sztirol részarányának 50%-ig történő növelése csökkenti a gyanta viszkozitását, és így a gyanta könnyebben kezelhető. A sztirolnak ugyanakkor a gyanta kikötésében (polimerizációjában) van elsődleges szerepe: a poliészter molekuláris láncainak átkötése révén a gyanta folyékony halmazállapotról szilárd halmazállapotúra képes keményedni úgy, hogy közben melléktermék nem keletkezik. A poliészter gyantáknak korlátozott élettartama van, mivel egy idő után maguktól megkeményednek. Ezért gyakran kis mennyiségben inhibitor (késleltető szert) adagolnak a gyártás során, hogy lassítsák ezt a spontán folyamatot.

Laminátok készítése során azonban szükség van néhány további segédanyagra is. Ezek a katalizátor, gyorsító, valamint további adalékanyagok (tixotrópizálók, színező anyagok, töltőanyagok, vegyszer- és tűzállóságot biztosító anyagok).

A gyártó a gyantát alapállapotában vagy a fent említett adalékanyagokat bizonyos arányban tartalmazva forgalmazza. Ettől függetlenül a gyanták a katalizátor hozzáadása előtt a gyártás helyszínén az igényeknek megfelelően tovább adalékolhatók.

Ahogy már említettük, a telítetlen poliészter gyanták maguktól megkötnek, ha elég időt hagyunk. A polimerizáció azonban a gyakorlati célokhoz túlságosan lassú. Azért, hogy a polimerizáció folyamata egy praktikus időtartamon belül játszódjon le, a gyantához katalizátorokat és gyorsító adalékokat adnak. Mivel a gyorsítónak nincs különösebb hatása a katalizálatlan gyantára, ezért a gyorsító előre bekeverhető a gyantába. A katalizátor hozzáadása után azonban a gyanta gélesedése egy rövid időn belül megindul, ami annak a jele, hogy a polimerizáció (kötés) visszafordíthatatlanul elkezdődött. A katalizátor ugyanakkor nem vesz részt a kémiai folyamatban, csupán aktiválja, megindítja a polimerizációs reakciót.

A poliészter molekula láncait sematikusán a 7.1.6. ábra mutatja. B-vel jelöltük a molekula azon részeit, kötés jöhet létre (reagens oldalak). A katalizátor jelenlétében a sztirol minden reagens oldalnál keresztbeköti a polimer láncait, és így létrehozza az ábrán jobb oldalon látható komplex, térbeli hálót. Ez a nem megfordítható (irreverzibilis) kémiai folyamat a polimerizáció, mely jelentős hőfejlődéssel jár (exoterm folyamat). Az így kialakult anyag megkötött, kémiai ellenálló (és általában) szilárd anyag. A molekuláris láncnak a keresztkötésekkel létrejövő oldalt kapcsolódási tulajdonsága eredményezi, hogy a poliészter laminátok a hirtelen terheléskor igen törekenyek.



7.1.6. ábra: Poliészter gyanta alap- (balra) és kikötött állapotban (jobbra)

Fontos, hogy a gyorsító adalék és a katalizátor megfelelő mennyisége, mert túl sok katalizátor hozzáadása túlságosan lerövidíti a gélesedésig rendelkezésre álló időt, míg túl kevés katalizátor esetén nem keményedik ki teljesen a gyanta.

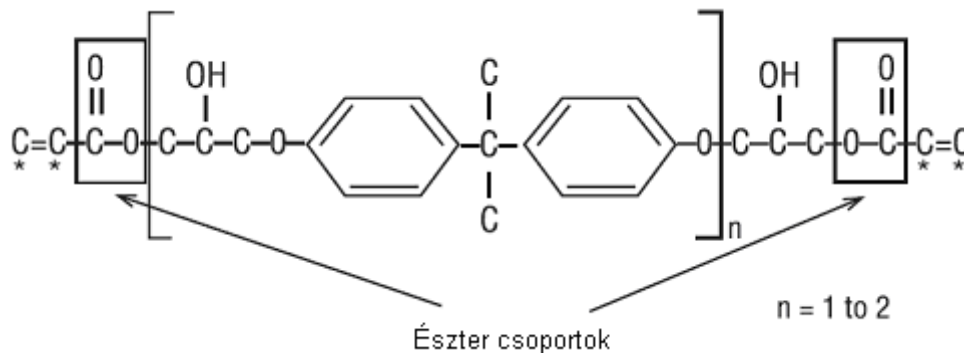
A gyanták színezése színezőanyag hozzáadásával kivitelezhető. Töltőanyagokat több okból is használnak: költségcsökkentés, a feldolgozás megkönnyítése, sajátos tulajdonságok elérése. Itt említünk meg két speciálisan adalékolt gyantát, az ún. gélt és a top-coat-ot. A gél a poliészterből készített szálerősítésű termékek legkülső kemény, szívós bevonata, amelyet az esetek nagy többségében esztétikai okok miatt színezőanyaggal is ellátnak. A gél másik funkciója a szerkezet vízzárásának javítása, amelyet a megfelelő adalékszerekkel biztosítanak. A gélt szórással vagy ecseteléssel hordják fel a sablon felületére, és aztán erredolgozzák rá a szerkezet egyes rétegeit. Maga a gél nincs szákkal erősítve.

A top-coat a poliészter laminátok legbelső oldalán egy paraffin tartalmú záró réteg, amely szintén a víz laminátba jutását akadályozza meg, csak éppen a belső oldalról (a hajókba általában belül is van víz, páralecsapódásból, esőből, esetleges tömítetlenségekből).

7.1.2.2 Vinilészter gyanták

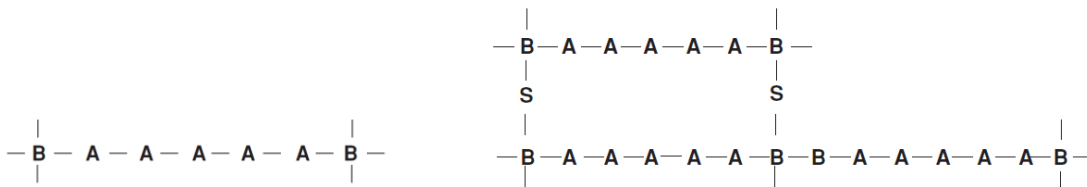
A vinilészter gyanták molekuláris szerkezetükben nagyon hasonlítanak a poliészterekhez, a különbség az, hogy a reagens oldalaik csak a molekula láncok végén helyezkedhetnek el. A vinilészter gyantákat pontosan ez teszi a poliészter gyantáknál szívósabbá és rugalmasabbá, hiszen a hirtelen terhelést a molekula lánc teljes hosszában képesek elnyelni. További különbség, hogy a vinilészter molekula kevesebb észter csoportot tartalmaz. Az

észter csoportok hidrolízissel könnyen felbonthatók, vagyis víz hatására a szabad kötések felbomlanak, és oda molekulák kapcsolódhatnak. A víz ebben a folyamatban az oldószer szerepét játssza. Egy vizes közegben használt laminát esetén ez azt jelenti, hogy ha a gyan-tában kevesebb az észter csoport, akkor az anyag jobban ellenáll a vízzel szemben. A 7.1.7. ábrán látható a vinilészter molekula felépítése, és az, hogy a poliészternél jóval kevesebb észter csoportot tartalmaz, ezáltal a vinilészter gyanta kevésbé hajlamos károsodásra hidro-lízis révén. Az anyagot ezért gyakran használják víz alatt lévő poliészter rétegek védő vagy borító rétegeként (mint például hajótestek esetében), vagy csővezetékek és vegyszer tartá-lyok készítésére. A vinilésztert megszilárdult molekulaszervezete szívósabbá teszi a poli-észternél, de hogy ezeket a tulajdonságokat elérjük, a gyan-tának általában szüksége van egy emelt hőmérsékletű utókeményítésére.



7.1.7. ábra: A vinilészter gyanta kémiai felépítése

Alább szemléltetve összehasonlíthatjuk a vinilészter molekula láncait a korábban be-mutatott poliészter molekula láncával. A fő különbség a reagens oldalak (B) elhelyezkedé-sében van.

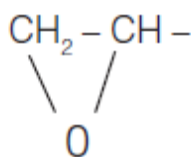


7.1.8. ábra: Vinilészter gyanta alap- (balra) és kikötött állapotban (jobbra)

7.1.2.3 Epoxi gyanták

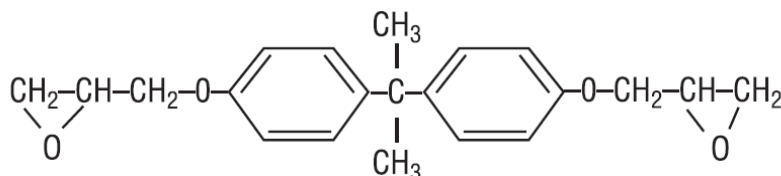
Az epoxi gyanták hatalmas családja adja a jelenleg létező legjobb minőségű gyantákat. Az epoxik általában túlteljesítik az egyéb gyantatípusok legtöbbjét a mechanikai tulajdon-ságok és a környezeti hatásokkal szembeni ellenálló képességük tekintetében, amely szinte kizárólagos használatukhoz vezetett a repülőgép alkatrészek gyártásában. Mint laminálás-hoz használt gyanta, nagy tapadó képességük és vízzel szembeni ellenálló képességük ideálissá teszik használatukat a hajóépítés területén is.

Az epoxi kifejezés egy kémiai csoportra utal, amely egy oxigén atomból áll, amely megköt két, valamilyen módon már kötött szénatomot. A legegyszerűbb epoxi egy három elemből álló, gyűrűs szerkezetű molekula, amely alfa-epoxi, illetve 1,2 epoxi néven ismert. Ennek kémiai szerkezetét a 7.1.9. ábra szemlélteti, ez a legegyszerűbben felismerhető része minden más, komplex epoxi molekulának.



7.1.9. ábra: Epoxi molekula szerkezete

A 7.1.10. ábra egy komplexebb felépítésű epoxi ideális kémiai szerkezetét szemlélteti.



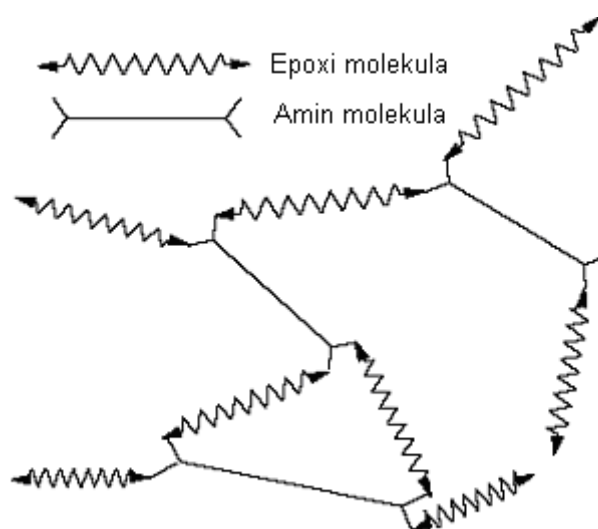
7.1.10. ábra: Komplex epoxi molekula ideális kémiai szerkezete

Az epoxigyanták általában jellegzetes borostyán vagy barna színnel és számos hasznos tulajdonsággal rendelkeznek. Az észtergyantákkal ellentétben nem katalizátort használnak a kötés megindításához, hanem az ún. edzőt. A folyékony halmazállapotú gyanta és az edző is alacsony viszkozitású, könnyen előállítható rendszer. Az epoxigyanták könnyen és gyorsan megszilárdulnak, 5°C-150°C között bármilyen hőmérsékleten, az edző típusától függően. Az epoxik egyik legelőnyösebb tulajdonsága az alacsony mértékű keményedés közbeni zsugorodás, amely minimalizálja szövet átnyomódását és az anyag belső feszültségét. Nagyon jó tapadóképeségük és mechanikai jellemzőik mellett az epoxik még kiváló elektromos szigetelőképeséggel és vegyi anyagokkal szembeni ellenállóképességgel rendelkeznek. Az epoxikat a laminátkészítés mellett az ipar számos területén használják ragasztóként, tömítő anyagként, öntőkeverékként, lakk- és festékanyagként.

Az epoxigyanták szerkezete szintén hosszú láncmolekulákból áll, és a vinilészterhez hasonlóan csak a végeken található reagens oldalak. Azonban az epoxi gyanták esetében a reagens oldalakat észter csoportok helyett epoxi csoportok alkotják. A 7.1.10. ábrán látható az észter csoportok hiánya is, ez különösen jó vízálló képességet eredményez. Az ábrázolt epoxi molekulája közepén tartalmaz két gyűrűs csoportot is, amelyek a lineáris szerkezetnél jobban képesek elnyelni mind a mechanikai, mind a hőhatásokat, így ez a felépítés nagyon jó merevséget, szívósságot és hőálló képességet nyújt az epoxigyanták számára.

Mint említettük, az epoxik abban is különböznek a poliészter gyantáktól, hogy edzőszerrel és nem katalizátorral keményítik ki őket. A gyanta és az edző (gyakran egyfajta amin) elegye egy addíciós reakció révén keményedik ki. A folyamatban – melynek kémiája lényegében az, hogy általában két epoxi oldal köt meg egy amin oldalt – mindkét anyag részt vesz. A kötés után a 7.1.11. ábrán látható komplex, térbeli molekula szerkezet jön létre.

Mivel az amin molekula meghatározott arányban reagál az epoxi molekulával, fontos a gyanta és az edző közötti megfelelő keverési arány. Ha az amint és az epoxit nem megfelelő arányban vegyítik, akkor kötetlen gyanta vagy edző marad vissza a mátrixból, a keményedés után befolyásolva a végső tulajdonságokat. A gyanta és keményítő pontos vegyítése érdekében a gyártók általában úgy alakítják a komponenseket, hogy egyszerű keverési arányokat tudjanak megadni, amelyek könnyen megvalósíthatók az anyagok súly vagy mennyiség alapján történő kimérésével.



7.1.11. ábra: Kikötött epoxigyanta felépítése

7.1.2.4 Gélesedés, keményedés, utólagos keményítés

Katalizátor vagy edző hozzáadásának hatására a gyanta egyre nyúlósabb lesz egészen addig, amíg eléri azt az állapotot, amikor már nem folyadék és elveszti a folyóképességét. Ez a gélesedési pont. A gyanta tovább keményedik, míg egy kis idő múlva elnyeri végső keménységét és tulajdonságait. A reakciót exoterm hő kíséri, ami visszahatva a folyamatra, gyorsítja azt. Az egész folyamatot a gyanta kikeményítésének nevezik. Ennek sebessége a poliészter és vinilészter gyantáknál a gyorsító adalék mennyiségével befolyásolható, epoxi gyanta esetében pedig az edző fajtájának, nem pedig mennyiségének változtatásával. Általában elmondható, hogy hasonló időtartam alatt, a poliészter gyanták erőteljesebb exoterm folyamatot és az elsődleges mechanikai tulajdonságok gyorsabb kifejlődését produkálják, mint az epoxik.

Mindkét gyanta típusnál lehetséges gyorsítani a keményedési folyamatot hő alkalmazásával, így minél nagyobb a hőmérséklet, annál előbb következik be a végső kikeményedés. Ez leginkább akkor hasznos, ha másképp a keményedés szobahőmérsékleten több órát vagy esetleg napot venne igénybe. A magas hőmérsékleten történő keményítésnek további előnyös tulajdonsága, hogy javítja az anyag végső mechanikai tulajdonságait, sok gyanta rendszer pedig nem rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal, amíg ezt az ún. utókeményítést végre nem hajtják. Az utókeményítés tulajdonképpen a szobahőmérsékleten történt keményedés után növeli a molekulák keresztkötéseinek lehetséges számát.

7.1.2.5 A gyanták tulajdonságainak összehasonlítása

A gyanta rendszer kiválasztása számos jellemzőtől függ, amelyek közül a legfontosabbak a legtöbb kompozit szerkezet esetében a következők:

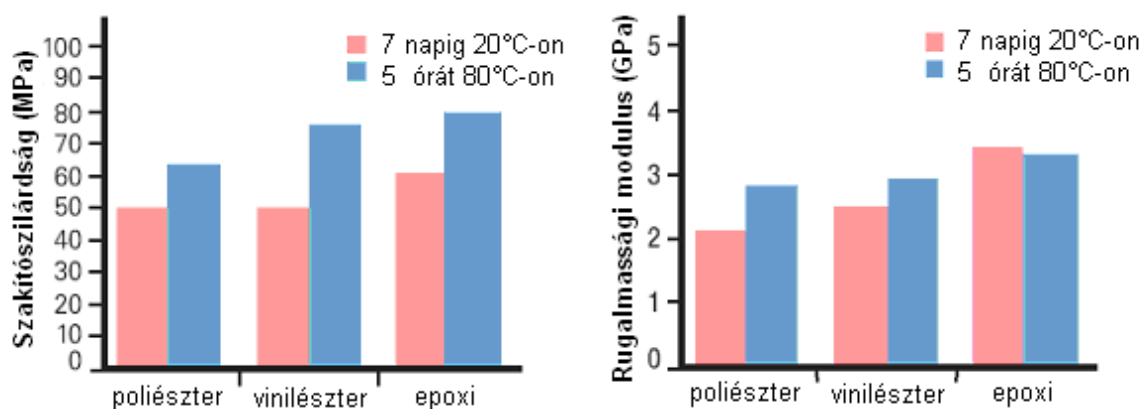
- tapadási tulajdonságok
- mechanikai tulajdonságok
- vízfelvétel általi károsodás

Már említettük, milyen nagy szerepe van a gyantarendszer tapadási tulajdonságainak a kompozitok végső mechanikai tulajdonságainak elérésében. Szendvics szerkezet esetén

nagyon fontos a gyanta tapadása a merevítő szálakhoz és a maganyaghoz. Az itt leírt három rendszer közül általában a poliészter gyantáknak vannak a leggyengébb tapadási jellemzői. A vinilészter gyanták jobb tapadóképességgel rendelkeznek, de az epoxi rendszerek nyújtják a legjobb teljesítményt mind közül. Mivel az epoxik kis zsugorodással szilárdulnak, a szilárdulás nem befolyásolja a különböző felületi érintkezéseket a folyékony gyanta és a hozzá kapcsolódó elemek között. Az epoxi tapadási tulajdonságai különösen hasznosak a méhsejt szerkezetű szendvicsmagok szerkezetében, ahol a kis kötési felület miatt az egyik legfontosabb követelmény a maximális tapadás.

Meg kell ugyanakkor jegyezzük, hogy a gyanta és az erősítő szálak közötti kötés erőssége nem kizárólag a gyantarendszer tapadási tulajdonságaitól függ, azt befolyásolja a szálak felületi borítása is. Ezzel később, a szálanyagok fejezetében foglalkozunk.

Minden gyantarendszer két fontos mechanikai tulajdonsága a merevség és a szakítószilárdság. E két jellemzőt mutatja a 7.1.12. ábra a kereskedelmi forgalomban kapható poliészter, vinilészter és epoxi gyantarendszereken elvégzett tesztek alapján, melyek során a gyantákat 20°C-on és 80°C-on keményítették ki.



7.1.12. ábra: A gyanták mechanikai jellemzőinek összehasonlítása

Látható, hogy hétnapos, szobahőmérsékleten való keményedés után egy jellegzetes epoxi jobb tulajdonságokkal fog rendelkezni egy poliészternél vagy vinilészternél, mind a szakítószilárdság, mind a merevség területén. A 80°C-on, öt óra alatt történő keményítés jótékony hatása szintén látható.

A tervezők és gyártók számára szintén fontos a zsugorodás mértéke, amely a keményedés alatt és után következik be. A zsugorodás annak köszönhető, hogy a gyanta molekulái cseppfolyós és félkemény állapotban újrendezik önmagukat, és új irányt vesznek fel. A poliészter és vinilészter anyagok kikeményedéséhez jelentős molekuláris újrendeződésnek kell végbemenni, és így zsugorodásuk akár 8%-os is lehet. Az epoxi reakció eltérő természete rendkívül kismértékű újrendeződéshez vezet, és nem keletkezik illóanyag sem melléktermékként, így az epoxik jellemző zsugorodása 2% alatt van. A zsugorodás hiánya – részben – felelős az epoxinak a poliészterrel szembeni jobb mechanikai tulajdonságaiért, hiszen a zsugorodás belső feszültséget okoz, amely gyengíti az anyagot. Ezen kívül a zsugorodás egy laminátban a szilárdító szálak mintájának átütéséhez vezet, ami egy nehezen és drágán kiküszöbölhető szépséghiba.

Minden gyanta további fontos tulajdonsága, különösen tengeri környezetben, hogy képes legyen ellenállni a vízfelvétel okozta károknak. Minden gyanta megköt valamennyi nedvességet, növelve a laminát súlyát, de sokkal lényegesebb, hogy a megkötött víz ho-

gyan befolyásolja a gyantát és a gyanta/szál kötéseket a laminátban. Mind a poliészter, mind a vinilészter hajlamosak a víz általi károsodásra a hidrolizálható észter csoportok molekulaszervezetükben való jelenléte miatt. Tesztek szerint, emiatt egy vékony poliészter laminát egy évi vízben tartása után a rétegek közti nyíróerejének csak 65%-át képes megtartani, míg egy epoxi laminát azonos időtartam után a nyírási szilárdság 90%-át őrzi meg.

Az itt említett poliészter, vinilészter és epoxigyanták hajóépítés során jelentkező előnyeit és hátrányait a 7.1. táblázatban összegezzük.

Gyanta típusa	Előnyök	Hátrányok
Poliészter	<ul style="list-style-type: none"> – könnyű használat – a legolcsóbb az elérhető gyanták közül 	<ul style="list-style-type: none"> – csak mérsékelt mechanikai tulajdonságok – nyitott eljárások esetén magas sztirol kibocsátás – nagy keményedési zsugorodás – korlátozott működési időtartam
Vinilészter	<ul style="list-style-type: none"> – nagyon magas kémiai/ környezeti ellenálló képesség – a poliészternél jobb mechanikai tulajdonságok 	<ul style="list-style-type: none"> – jó tulajdonságok érdekében utókeményítés általában szükséges – nyitott eljárások esetén magas sztirol kibocsátás – nagy keményedési zsugorodás – drágább, mint a poliészter
Epoxi	<ul style="list-style-type: none"> – jó mechanikai és hőállósági tulajdonságok – jó vízállóképesség – hosszú működési idő – kis keményedési zsugorodás 	<ul style="list-style-type: none"> – sokkal drágább a vinilészternél – érzékeny a keverési arányra – maró hatású

7.1. táblázat: A gyanták összehasonlítása

7.1.3 Szálalapanyagok

A legtöbb erősítő szál mechanikai jellemzői lényegesen jobbak, mint az erősítés nélküli gyanta-rendszereké. A szál/gyanta egyesítéséből készülő kompozitok mechanikai tulajdonságait a szálak laminát szilárdságához való hozzájárulása határozza meg. Ezt 4 fő tényező befolyásolja:

- a szál alapvető mechanikai jellemzői.
- a szál és a gyanta kapcsolata
- a szál mennyisége a kompozitban (FVF)
- a szálak iránya a kompozitban.

A szál és a gyanta felületi kapcsolatát a két anyag közötti kötés mértéke adja meg. Mint korábban említettük, ezt az alkalmazott gyanta és a szál felületének kezelőanyaga erősen befolyásolja. A különböző felületi kezeléseket is itt tárgyaljuk.

A kompozitban lévő szálak mennyiségét nagymértékben befolyásolja az alkalmazott gyártási eljárás. A szorosan egymás mellett elhelyezett erősítő szálak magasabb szálanyag/gyanta arányt eredményeznek, mint a durvább szálakból készült szövetek, vagy amelyeknél nagy a távolság a szálkötegek között. A szálátmérő is fontos tényező, a drágább, kisebb átmérőjű szálak nagyobb szálfelületet eredményeznek, elosztatva a szál/mátrix felületi terheléseket. Általános szabály, hogy a laminált anyag merevsége és erőssége a benne lévő szálmennyiséggel arányosan növekszik. Azonban, 60-70% száltartalom felett (attól függően, hogy a szálak hogyan vannak összerakva), bár a hajlítómerevség nőhet, a laminát szilárdsága már eléri maximumát és utána már csak csökken. Ennek oka, hogy nincs meg a megfelelő gyanta mennyiség a szálak összetartásához.

Végül, mivel az erősítő szálak arra vannak tervezve, hogy hosszukban és ne oldalirányban legyenek terhelve, orientációjuk „irányfüggő” tulajdonságokat eredményez a kompozitban. A kompozitok anizotróp tulajdonsága jól kihasználható tervezéskor úgy, hogy a szálak többségét a fő terhelési vonal mentén helyezzük el. Ez minimalizálja a felesleges anyag-felhasználást az olyan helyeken, ahol egyáltalán nem, vagy csak kevésbé lesz terhelve a szerkezet.

Egy kompozit anyagban a szálerősítések szerepe leginkább a tiszta gyanta-rendszer mechanikai tulajdonságainak növelése, javítása. A kompozitokban használt összes szál különböző tulajdonságokkal rendelkezik, és így többféle módon befolyásolja a kompozit tulajdonságait. A legáltalánosabb szálak tulajdonságait alább írjuk le.

7.1.3.1 Üveg

Törmelékanyagok vegyítésekor (homok, kaolin, mészkő, colemanit) 1600°C-on, folyékony üveg keletkezik. A folyadékot átnyomják egy mikro-fínomságú fúvókán, ezzel egyidejűleg hűtik, hogy létrehozzák a végtelenített üvegszálakat, amik 5-24µm átmérőjűek. Ezeket a szálakat aztán összehúzzák egy többszálú szorosan vagy lazán kötött fonattá, majd bevonják a tapadásközvetítő anyaggal, amely jobb kohéziót biztosít az üveg és a gyanta között, és egyben védi a kopástól is a szálakat.

A „recept” változtatásával különböző típusú üvegszálakat lehet előállítani. A szerkezeti anyagként alkalmazott üvegtípusok a következők:

- E-üveg (elektromos): alacsonyabb alkáli tartalmú, és erősebb, mint az A-üveg (alkáli). Jó a szakító- és nyomószilárdsága és merevsége, jók az elektromos tulajdonságai és viszonylag olcsó, viszont az ütőszilárdsága viszonylag alacsony.
- C-üveg (kémiai): a leginkább ellenálló a vegyi hatásokkal szemben. Főleg felületi bevonó réteggént alkalmazzák a vegyi anyagokat és vizet tartalmazó csövek és tartályok laminátjainál.
- R, S vagy T-üveg: az elnevezések ugyanazt a magas minőségű üveget takarják, aminek nagyobb a szakító- és nyomószilárdsága mint az E-üvegnek. A kisebb elemi szálátmérő nagyobb rétegek közötti nyírószilárdságot eredményez. Az S-üveget az USA-ban az OCF gyártja, az R-üveget Európában a Vetrotex, a T-üveget pedig a Nittobo Japánban. Űrtechnológiai és védelmi célokra fejlesztették ki, és ballisztikus nehézfegyverek gyártásánál alkalmazzák. Az ára emiatt, és a kis gyártási mennyiség miatt viszonylag magas.

A kishajóépítésben használt kompozitokhoz a leggyakrabban az E-üveget használják. Az E-üvegszál 3 formában elérhető:

- fonál – elemi szálak szorosan összefogott kötege. Ritkán található meg kereskedelmi

forgalomban, általában ezt fonattá sodorják.

- fonat – fonalak vagy elemi szálak kötegek összesodort kötege. Mindegyik szál azonos átmérőjű, általában 4-13 μ m. Jellemző adat továbbá a fonat súlya, melynek mértékegysége a 'tex'. 1 tex = 1 g/1000m, vagyis 1000 folyóméter fonat grammban megadott súlya. A fonatok súlya általában 5 és 400 tex között van.
- roving – szálak vagy fonalak lazán összedolgozott, de nem sodort kötege. A szálak átmérője ugyanakkora, általában 13-24 μ m között van. Ezeknek a súlya is változó, általában 300 és 4800 tex közé esik.

Úgy is lehetséges a hosszú üvegszál előállítás, hogy összefonunk több rövidebb szálát. Ezeknek a fonott szálaknak nagyobb a felülete és jobban abszorbeálják a gyantát, de a mechanikai tulajdonságaik nem olyan jók, mint az ugyanolyan vastagságú, de fokozatosan nyújtott szálaknak.

7.1.3.2 Aramid

Az aramid-szál egy mesterségesen előállított organikus polimer (aromás poliamid), amit úgy állítanak elő, hogy egy folyékony kémiai elegyből szilárd szálakat fonnak. A fényes aranysárga szálak változatos tulajdonságúak, de mindegyik nagy szilárdságú és kis sűrűségű, ami magas fajlagos szakítószilárdságot kölcsönöz az anyagnak. Mindegyik nagyon ellenálló az ütéssel szemben, és a kisebb rugalmassági modulusszal rendelkező változatokat hatékonyan használják ballisztikai alkalmazásoknál. A nyomószilárdsága azonban csak az E-üvegével azonos.

Habár a legismertebb típusa a Dupont cég 'Kevlar' elnevezésű terméke, manapság már sokan gyártják ezt a száltípust, pl. az Akzo Nobel, 'Twaron' néven. Minden gyártó többféle aramidot kínál, többféle modulusszal, és különböző alkalmazásokhoz megfelelő felületi kezeléssel. A nagy szilárdsága mellett ez a szál nagyon ellenálló a kopással, kémiai és hőhatásokkal szemben. UV-sugárzásnak kitett szálak esetén a szilárdsági jellemzőkben azonban lassú gyengülés léphet fel.

Az aramid-szálak általában roving formájában kaphatók, 20 és 800 tex közötti súllyal.

7.1.3.3 Karbon (szén)

A kompozit technológiában használatos karbonszálakat eleve szál formájú, magas karbontartalmú szerves elővegyületekből (prekurzor) állítják elő elszenesítés során. A leggyakoribb ilyen prekursor a PAN (poliakril-nitril), mivel ez adja a legjobb karbonszál tulajdonságokat, de a karbonszálak előállíthatók szurokból vagy cellulózból is. Az elszenesítési folyamattól függően vagy nagy szilárdságú szálakat (kb. 2,600°C-on), vagy nagy rugalmassági modulusú szálakat kapunk (kb. 3000°C-on). A köztes hőmérsékleten köztes mechanikai jellemzőkkel rendelkező szálak nyerhetők. Az előállítás után a karbonszálakat tapadásjavítóval és kémiai bevonattal látják el a gyantamátrix kötésének elősegítésére és a sérülések elleni védelem érdekében.

Amikor a karbonszálakat először állították elő a hatvanas évek végén, az ára kb. 200£/kg volt. 1996-ra az éves kapacitás világszerte kb. 7000 tonnára, 2004-re 19000 t-ra, mostanra pedig 90000 t-ra emelkedett, és így az ára lement 5-20 £/kg-ra. (Itt kell megjegyeznünk, hogy a karbonszál-gyártásban Magyarország igen előkelő helyet foglal el. A nyergesújfalui – ma már amerikai tulajdonban levő – Zoltek cég a világ karbonszál-gyártásából igen jelentős hányadot képvisel.)

A karbonszálakat általában az alapján csoportosítják, hogy a tulajdonságaik melyik rugalmassági modulusz-sávba esnek. Ezek a sávok a következők: nagy szilárdságú (HS) ala-

csony modulusz, közepes modulusz (IM), magas modulusz (HM) és ultra magas modulusz (UHM). A legtöbb típusnál a szálátmérő kb. 5-7 μ m. A karbonszálnak van a legmagasabb fajlagos merevsége az összes kereskedelemben elérhető száltípus közül, nagyon magas a nyomó- és húzószilárdsága, nagy a korrózióval és a kifáradással szembeni ellenállása. Az ütőszilárdságuk azonban alacsonyabb, mint akár az üvegé, akár az aramidé, különösen ridegek a HM és az UHM karbonszálak.

Az említetteken kívül sokféle, kompozitokban használható egyéb száltípus létezik, de ezek használata nem annyira elterjedt. A 7.2. táblázat tartalmazza a leggyakrabban használt szálak alapvető mechanikai tulajdonságait. A táblázatban az összehasonlíthatóság kedvéért feltüntettük más szerkezeti anyagok jellemzőit is.

Anyagtípus	Szakítószilárdság (MPa)	Rugalmassági modulus (GPa)	Jellemző sűrűség (t/m ³)	Fajlagos rugalmassági modulus
Szén HS	3500	160-270	1.8	90-150
Szén IM	5300	270-325	1.8	150-180
Szén HM	3500	325-440	1.8	180-240
Szén UHM	2000	440+	2.0	200+
Aramid LM	3600	60	1.45	40
Aramid HM	3100	120	1.45	80
Aramid UHM	3400	180	1.47	120
Üveg- E üveg	2400	69	2.5	27
Üveg – S üveg	3450	86	2.5	34
Üveg – Kvarc	3700	69	2.2	31
Alumínium-ötv. (7020)	400	1069	2.7	26
Titánium	950	110	4.5	24
Lágyacél (55-ös)	450	205	7.8	26
Rozsdamentes acél (A5-80)	800	196	7.8	25
HS acél (17/4 H900)	1241	197	7.8	25

7.2. táblázat: A szálak és egyéb szerkezeti anyagok fő jellemzői

7.1.3.4 Száltípusok összehasonlítása

Ha a száltípusok jellemző tulajdonságait összehasonlítjuk, látható, hogy mindnek megvannak a maga előnyei és hátrányai. Mindez azt jelenti, hogy egy száltípus bizonyos alkalmazásokban jobban megfelel, mint a többi. A következő 7.3. táblázat egy összehasonlítást mutat az általános száltípusok fő tulajdonságait illetően. Az 'A' jelzés jó teljesítményt, a 'C' pedig a legkevésbé jót jelent.

7.1.3.5 Szálak felületi kezelése

A szálak gyártása során szinte mindig alkalmaznak felületi kezelést a szálakon annak érdekében, hogy a felhasználás során keletkező károkat minimalizálják, és hogy a szál és a gyanta közötti tapadást javítsák. A felületkezelés a gyártáskor történik, és ez a réteg a szálon marad a szövetté alakítás folyamata közben is. Az üvegszálnál a felületkezelés tekintetében több választási lehetőség is van.

Azokat az üvegszál-rovingokat, amelyeket az olyan direkt eljárásokban használnak, mint pl. a szálcsévézés, „pultrúzió”, előimpregnált anyagok, általában kettős funkciójú felü-

leti kezeléssel látják el. A szövésre készített üvegszál-fonatokat azonban két lépésben kezelik. Az első felületi kezelés a gyártás során történik, és csak annyi a célja, hogy védje a szálakat a kezelés és a szövés alatti esetleges károsodástól. Ezt a védőréteget, ami általában keményítő alapú, a szövési folyamat után eltávolítják a szálról, vagy hő, vagy valamilyen kémiai anyag segítségével. Ezt a letisztított szövetet aztán külön lekezelik egy másik mátrix-kompatibilis anyaggal, ami optimalizálja a szál – gyanta felület közötti tulajdonságokat, mint pl. a kötés erősség, vízzel szembeni ellenállás és optikai tisztaság.

Tulajdonság	Üveg	Aramid	Karbon
Magas szakítószilárdság	B	B	A
Magas húzó rugalmassági modulus	C	B	A
Magas nyomószilárdság	B	C	A
Magas nyomó rugalmassági modulus	C	B	A
Magas hajlítószilárdság	B	C	A
Magas hajlítási rugalmassági modulus	C	B	A
Magas ütőszilárdság	B	A	C
Magas rétegek közötti nyírószilárdság	A	B	A
Magas síkon belüli nyírószilárdság	A	B	A
Alacsony sűrűség	C	A	B
Magas kifáradással szembeni ellenállás	C	B	A
Magas tűzállóság	A	A	C
Magas hőszigetelő képesség	B	A	C
Magas elektromos szigetelés	A	B	C
Alacsony hőtágulás	A	A	A
Alacsony ár	A	C	C

7.3. táblázat: A különböző szálak mechanikai jellemzőinek összehasonlítása

A szerkezeti kompozitokban használatos szénszálak esetében az írező anyagok általában epoxi alapúak, mennyiségük a felhasználási céltól függ. A szövéshez az írezőanyag mennyisége kb. 1-2 tömeg%, míg a „tape” típusú előre impregnált vagy a szálcsevélésben használt anyagok esetében ez 0.5-1%. Az anyag összetétele és mértéke nemcsak a védelem és a gyanta-kompatibilitás szempontjából fontos, hanem azért is, mert ezek befolyásolják a szál nyújthatóságának mértékét is. A szálakat írezés nélkül is felhasználhatják, de ez esetben ki lesznek téve a használat során keletkező törésnek. A legtöbb gyártó 3-4 fajta írezést kínál a különböző szálakhoz.

Az aramid-szálak felületét általában csak a mátrix-kompatibilitás miatt kezelik. Erre azért van lehetőség, mert az aramid-szálak sokkal kevésbé igénylik a használat során keletkező károkkal szembeni védelmet. A szálak felületi kezelése különböző, attól függően, hogy a szálak kompozitban, gumikban (abroncs, ékszíj) vagy ballisztikus könnyűfegyverekben lesznek felhasználva. A karbonszálakhoz hasonlóan itt is különböző írezőanyag-mennyiségeket használnak attól függően, hogy a szálat milyen módon fogják feldolgozni.

7.1.4 Száaltermékek, szövedékek

A szálak vagy szálkötegek önmagukban csak kevés eljárásban alkalmazhatók (pl. a szálcsevélés). A legtöbb egyéb alkalmazáshoz a kezelhetőség érdekében a szálakat valamilyen vékony lemezszerű módon kell elrendezni. A karbon-, aramid- vagy üvegszálakból ill. ezek kombinációjából előállított szerkezet a szövedék, amely a szálak 1 vagy több rétegét

eredményezi. A szálak szövedékké való összeállításának különböző módjai és a rostok orientációjának lehetséges változatai sok különböző szövettípust eredményeznek, melyeknek megvannak a saját jellemzőik. A szövedékeket gyakorlatilag ez alapján csoportosíthatjuk. A 4 fő szál-orientációs kategória a következő: egyirányú, $0/90^\circ$, több tengelyirányú azaz multiaxiális, és egyéb/véletlenszerű.

7.1.4.1 Egy szálirányú szövedék (unidirekcionális szövet)

Az egy szálirányú (UD) szövedékben a szálak nagy többsége egy irányba fut. A szálak kisebbik része, vagy valamilyen egyéb anyag futhat más irányba, azzal a céllal, hogy az elsődleges szálakat összetartsák. Míg egyes gyártók szerint az unidirekcionális szövet az, amely súlyának 75%-át egy irányba futó szálak teszik ki, más cégeknél csak azok a szövetek minősülnek egy szálirányúnak, amelyeknél a súly legalább 90%-át egy irányba futó szálak adják.

Az egy szálirányú szöveteknél az elsődleges szálak általában 0° -os irányba futnak (a feltekercselés irányának mentén), de lehetnek 90° -ban is.

A ténylegesen egy szálirányú szövedékek lehetővé teszik, hogy a szálakat a megfelelő helyre és az optimális mennyiségben helyezzük el (se többet, se kevesebbet a szükségesnél). Ezen kívül az UD szálak erősek és nincsenek bennük hullámok, mint más szöveteknél (ld. később). Ez a kialakítás eredményezi a kompozitba kerülő szövedék legjobb száltulajdonságait. A kompozit szerkezetek mechanikai jellemzőinek további javítása már csak az előimpregnált anyagokkal lehetséges, amelyekben még az a kevés szál sincs meg, ami az UD szöveteknél a szálakat egybetartja. Ezekben a termékekben csak a gyanta rögzíti a szálakat a helyükön. Az UD szövetekben az elsődleges szálak megtartását általában szövással, varrással (összeöltéssel) és ragasztással oldják meg.

7.1.4.2 $0/90^\circ$ -os szövedékek (szövetek)

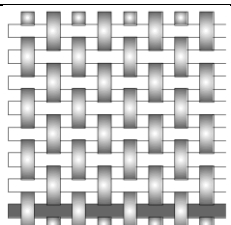
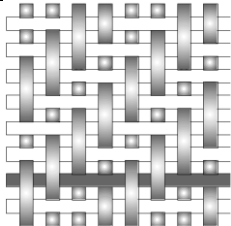
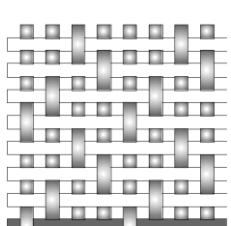
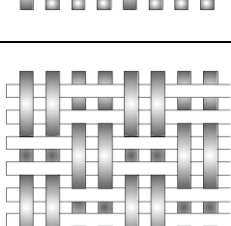
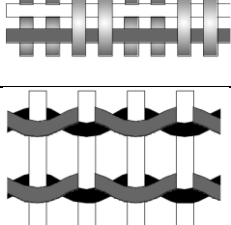
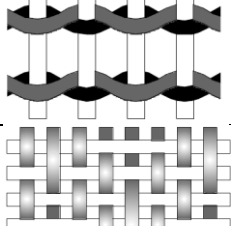
Olyan alkalmazásoknál, ahol több mint egy szálirány szükséges, a szálakat jellemzően 0° és a 90° -os irányban (derékszögben) helyezik el. Ezeknek a szövedékeknek a többsége szőtt termék, de előállíthatók összeöltéssel is (ld. később). A szövással előállított termékek 0° és 90° -os irányú szálak összefűzésével készülnek, valamely ismétlődő minta, vagy szövési stílus alapján. A szövedék integritását a szálak mechanikai összekapcsolódása eredményezi. A szövedék komplex felület létrehozására való képességét, a felületi simaságát és stabilitását elsősorban a szövési stílus határozza meg. A súlyt, a porozitást és a víztaszító képességet a megfelelő szálméret (tex) kombinációja, és a szálak centiméterenkénti száma befolyásolja.

Általában elmondható, hogy a fonat alapú szövedékek azonos tömeg mellett erősebbek, mint a rovingok, és mivel általában finomabbak, ezért könnyebbek is. A rovingból készütek azonban olcsóbban előállíthatóak, és könnyebben átitathatóak. Mivel azonban nehezebbek, olyan esetekben használhatók jól, ahol vastag, nehezebb rétegeket kell előállítani.

Mint korábban említettük, $0/90^\circ$ -os szövedékek öltéssel is előállíthatók. Ezzel a módszerrel gyakorlatilag 2 unidirekcionális szövetet kombinálunk egy szövedékké, ezért ezeket az anyagokat szokás biaxiális szövetnek is hívni. Ez az eljárás a szövással szemben az anyag mechanikai tulajdonságait akár 20%-kal is javíthatja, a következő tényezők miatt:

- a párhuzamos, nem-deformálódó szálak azonnal a terheléskor ellenállnak a feszítésnek;
- a szőtt szövedékeknel a 0 és a 90° -os irányú szálak találkozásánál található feszültséggyűjtő helyek itt kiküszöbölődnek;

- nagyobb szálsűrűség hozható létre a laminátban, mint a szötteknél.

Szövés típusa	Textúra	Leírás
Sima		<i>Minden 0°-os irányú láncfonal elmegy közvetlenül minden 90°-os irányú vetülékfonal alatt és felett. A szövédék így szimmetrikus, jó a stabilitása és a porozitása. Azonban ebből a legnehezebb komplex felületet létrehozni, és a mechanikai tulajdonságai ennek a fajtának a leggyengébbek, összehasonlítva a többi szövési stílussal.</i>
Sávolykötés (twill)		<i>Egy vagy több 0°-os irányú láncfonalat váltakozva vezetünk át 2 vagy több 90°-os irányú vetülékfonal alatt és felett, rendszeresen ismételve ezt a mintát. Ezzel a módszerrel a felület derékszögűen „bordázottá” válik, jobb a szövédék víztaszító képessége, és komplexebb, simább felület alakítható ki jobb mechanikai tulajdonságokkal, a stabilitása viszont kis mértékben csökken.</i>
Szaténszövet		<i>Ez nem más, mint a sávolykötés kissé módosítva: úgy, hogy kevesebb legyen a 0 és a 90°-os irányú fonalak kapcsolódási pontja. A szatén szövetek nagyon simák, jó a víztaszító képességük és nagymértékben összefüggő felületet alkotnak, jók a mechanikai tulajdonságaik. Ez a fajta szövés lehetővé teszi a szálak lehető legszorosabb összekapcsolását, azonban alacsony stabilitása és aszimmetriája miatt meggondolandó a használata. Az aszimmetria abban jelentkezik, hogy a szövet egyik oldalán a 0°-os irányú láncfonalak dominálnak túlnyomórészt, a másik oldalon pedig a 90°-os irányúak.</i>
Kosár		<i>A kosár-minta szinte ugyanaz, mint a sima szövés, azzal a különbséggel, hogy itt 2 vagy több 0°-os irányú láncfonal váltakozva kapcsolódik össze ugyanannyi 90°-os irányú vetülékfonallal. Ha 2-2 fonal kapcsolódik össze, akkor azt 2x2-es kosárnak hívjuk. Ez a szimmetrikus elrendezés nem célszerű, ezért alkalmaznak pl. 8x2, 5x4-es konfigurációt. Ez a szövés simább és erősebb, mint a sima szövés, mert kevesebb a hullám benne, de kevésbé stabil. Ezt nagy súlyú szövédéknél kell használni, vastag (nagy tex) szálakból, hogy elkerüljük a nagyfokú hullámosodást.</i>
Gézsövet		<i>Ez a szövésmód „nyitott” szövédéket eredményez, ahol kevés a szálak száma. Tulajdonképpen nem más, mint a sima szövés egy fajtája, ahol a szomszédos láncfonalak spirális párt alkotva körbecsavarják az egymás után következő vetülékfonalakat, és így hatékonyan rögzítik őket. Ezt a szövésmódot általában egy másikkal kombinálva alkalmazzák, mivel önmagában a nyitottsága miatt nem tudna hatékony kompozit összetevőként működni.</i>
Hamis gézsövet		<i>A sima szövésnek olyan változata, melyben a láncfonalak rendszeres intervallumokban, de általában több szálanként eltérnek a váltakozó alul-felül összekapcsolódástól, és e helyett minden 2. vagy többedik szállal kapcsolódnak össze. Ez hasonló gyakorisággal történik a vetülékfonalakkal is, és az összehatás egy olyan szövédék, mely vastagabb, durvább felületű és jobb porozitású.</i>

7.4. táblázat: Szövési stílusok összehasonlítása

További előny, hogy így nehéz szövedékeket könnyedén elő lehet állítani valamint a szálak megnövelt mennyisége miatt jobb lehet a szálanyag-gyanta arány.

A $0/90^\circ$ -os szövedékek speciális típusai a hibrid szövetek. A hibrid kifejezés arra utal, hogy többféle szerkezeti szál van a felépítésében. Egy többrétegű laminátban több száltípus kedvező tulajdonságait a több réteg miatt kihasználhatjuk úgy, hogy az egyik réteg az egyik, a másik réteg a másik fajta szükséges anyagot tartalmazza. Azonban, ha kis súlyú vagy nagyon vékony laminátról van szó, a hibrid szövedék lehetővé teszi a két szál jelenlétét két réteg helyett egyben. Egy szőtt hibridben megoldható lenne, hogy az egyik szál 0 , a másik pedig 90° -os irányban fusson, de gyakoribb, hogy mindkét szál mindkét irányba váltakozva fut. Habár a hibrideket leginkább $0/90^\circ$ -os szövött anyagoknál alkalmazzák, az elv megtalálható még a $0/90^\circ$ öltött szöveteknél, az egy szálirányúaknál és a többtengelyűeknél is. A legáltalánosabb hibrid kombinációk a következők: karbon/aramid aramid/üveg karbon/üveg. Az elsőben az aramid szálak nagy ütő- és szakítószilárdsága ötvöződik a karbon nagy nyomó- és szakítószilárdságával. Mindkét száltípus kis sűrűségű, de aránylag drága. A másodikban az aramid szálak kis sűrűségét, nagy ütő- és szakítószilárdságát kombinálják az üveg jó nyomó- és szakítószilárdságával, és alacsony árával. A harmadik változatban a karbonszál biztosítja a nagy nyomó- és szakítószilárdságot valamint a merevséget és a kisebb sűrűséget, az üveg pedig csökkenti a költségeket.

7.1.4.3 Többtengelyű (multiaxiális) szövedékek

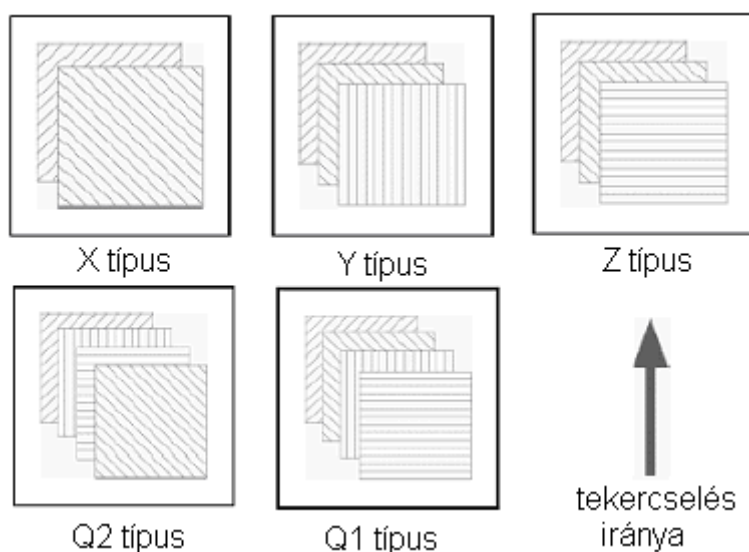
Az elmúlt években a kompozit szerkezetek előállításában egyre jobban teret hódítottak a többtengelyű szövedékek. Ezek egy vagy több UD rétegből tevődnek össze, amiket másodlagos, nem teherviselő öltések tartanak össze. A főszálak bármilyenek lehetnek. Az összeöltés általában poliészter szállal történik, ennek jó összetartó ereje és alacsony ára miatt. A varrási folyamat lehetővé teszi a szálak többféle – nemcsak az egyszerű $0/90^\circ$ -os – orientációjának egy szövedékbe kombinálását. A többtengelyű szövedékek előnyei a szőtt típusokkal szemben:

- jobb mechanikai tulajdonságok, főleg amiatt, hogy a szálak mindig egyenesek és nem hullámosak, valamint a szálak többféle iránya érhető el a rétegek megnövelt száma miatt;
- nagyobb bedolgozási sebesség érhető el amiatt, hogy a szövedéket több száliránnyal vastagabbra lehet készíteni, így egy laminált anyagnak kevesebb réteget kell tartalmaznia.

Hátrányok:

- a poliészter szál egyes gyantákkal nem kompatibilis, így az összeöltési pontok bizonyos hibák kiindulópontjai lehetnek;
- a szövedék előállításának folyamata lassú, az ára viszont magas. A jó felületi minőség érdekében a könnyebb multiaxiális szövetekhez kis tex értékkel rendelkező – vagyis sokkal drágább – fonatokat kell használni;
- a nagy súlyú szövedékeket, bár lehetővé teszik viszonylag nagy mennyiségű szál beépítését a komponensbe, nehéz a gyantával átítatni, ez csak megfelelő gépesített eljárásokkal lehetséges, amely a technológiát szintén megrágítja.

A multiaxiális szövetek legáltalánosabb formáit a 7.1.13. ábra mutatja.



7.1.13. ábra: Multiaxiális szövetek típusai

7.1.4.4 Egyéb szövedéktípusok

Ide tartoznak a paplan valamint a fátyolszövetek.

A paplan nem szőtt, hanem rendszertelenül elhelyezett, rövidre darabolt üvegszálakat tartalmaz, amiket pl. a hajós alkalmazásoknál egy PVA emulzió, vagy egy por alakú kötőanyag tart össze. A paplan, felépítéséből következően nem mutat anizotróp tulajdonságot, viszont a hosszú szálak és egy kitüntetett irány hiányában szilárdsága igen alacsony, a belőle készült laminát pedig igen alacsony szálanyag-gyanta tartalommal rendelkezik.

A fátyolszövetet folyamatos, végtelen szálakból állítják elő, melyeket egy sík felületen egyenletesen, de véletlenszerűen szórnak szét. Ezeket aztán vegyi úton összeillesztik valamilyen szerves alapú ragasztóanyag segítségével (pl. PVA, polieszter). Mivel viszonylag kis teherbírásúak, így nem szilárdságnövelő réteggként használatosak, inkább a sima felületet biztosító felületi rétegekként alkalmazzák. A fátyolszövetek súlya általában 5-50g/m².

7.1.5 Maganyagok

A szendvics-szerkezetekhez maganyagok számos különböző anyagból készülhetnek, leggyakrabban műanyag habokat használnak, de fából sőt fémből is lehet maganyagot gyártani. Ezeket tárgyaljuk a következőkben.

7.1.5.1 Hab magok

A hab az egyik leggyakoribb formája a maganyagoknak. Sokféle szintetikus polimerből előállíthatók, pl. polivinil-kloridból (PVC), polisztirolból (PS), poliuretánból (PU), polimetil-metakrilátból (PMMA, vagy hétköznapi nevén: plexi), polieterimidből (PEI), és sztírol-akrilonitrilből (SAN). Sűrűségük jellemzően 30 kg/m³ és 300 kg/m³ között van, habár a kompozitoknál leggyakrabban használt sűrűség 40 és 200 kg/m³ között mozog. Vastagságukat tekintve is változatosak, tipikusan 5mm és 50mm között vannak.

A habok között a nagy teherbírású szendvics-szerkezetekhez leggyakrabban zártcellájú PVC habokat használnak. A PVC habok kedvező statikai és dinamikai tulajdonságokkal rendelkeznek, vízfelvételre nem hajlamosak. Széles hőmérséklettartományban használhatók: -240°C-tól a +80°C-ig, és sok vegyi anyaggal szemben ellenállóak. Habár a PVC-

habok általában gyúlékonyak, vannak égésgátló változataik, amiket nyugodtan lehet tűzveszélyes környezetben is alkalmazni. A sztirollal szemben is ellenálló, így használható poliészter gyantákkal is, ezért sok iparágban igen népszerű. Általában tábla formájában kapható, sima vagy irdalt felülettel, hogy könnyedén formálható legyen.

A PVC-habnak két fő típusa van: a térhálós és a térháló nélküli, melyekre néha 'lineáris'-ként is utalnak. A térháló nélküli PVC-habok (mint pl. az Airex R63.80) keményebbek és rugalmasabbak, és könnyebb hő hatására domború felületekre alakítani. Az azonos sűrűségű térhálós PVC-habokkal összehasonlítva gyengébbek a mechanikai tulajdonságaik, alacsonyabb az ellenállásuk a magas hőmérséklettel és a sztirollal szemben. A térhálós PVC-habok keményebbek és ridegebbek, merevebb panelt hoznak létre, magas hőmérsékleten kevésbé hajlamosak a lágyulásra és az alakváltoztatásra. Tipikus térhálós PVC-termék a Herex C-sorozatú habok, a Divinycell H és HT, valamint a Polimex Klegecell és Termanto termékek. A keményített PVC-habok új generációja manapság szintén elérhető, ezek ötvözik a térhálós PVC alapvető jó mechanikai tulajdonságait a lineárisok pozitív tulajdonságával. Ilyen pl. a Divinycell HD.



7.1.14. ábra: Irdalt és merev lemez PVC habok

A polisztirol habokat legelterjedtebben a vitorlás- és szörfgyártásban használják, ahol a könnyű súlyuk (40 kg/m^3), alacsony árak és könnyű csiszolhatóságuk elsődleges fontosságú. Ritkán használatosak viszont nagy terhelésnek kitett komponensek gyártásában gyenge mechanikai tulajdonságaik miatt. Nem használhatók poliészter gyantarendszerekkel együtt, mivel a sztirol feloldja.

A poliuretán habok csak mérsékelt mechanikai tulajdonságokkal bírnak, és idővel a gyanta/mag találkozási felületén rongálódásra hajlamosak, ami aztán a külső rétegek leválásához, az ún. delaminálódáshoz vezethet. Ezért szerkezetekben az alkalmazásuk a merevítő bordák formájának megadására korlátozódik. Jól használhatók azonban ezek a habok kiterhelésű hőszigetelő szendvics panelekben, és ahol hangszigetelésre van szükség.

Azonos sűrűséget alapul véve, a polimetil-metakrilát habokból (mint pl. a Rohacell) készített szendvics-szerkezetek a legerősebbek. Jó mérettartásuk miatt egyedülállóak a hagyományos előreimpregnált anyagokból készült szendvics-szerkezetekhez, amelyeket magas hőmérsékleten kell kikeményíteni. Mindehhez természetesen drágák, és emiatt használatuk az űrhajózásban/légiközlekedésben előforduló kompozit összetevőkre korlátozódik (pl. helikopterek rotorlapátja vagy a repülőgépek kormánylapjai).

A SAN-habok a térhálós PVC-habokhoz hasonlóan viselkednek, hasonló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, de még a PVC-knél is jobb a nyúlási alakváltozásuk és a szívósságuk. Ezért képesek elviselni olyan ütőerőt, ami minden más habanyagot eltör. A

SAN-habok számos alkalmazási területen kezdik kiszorítani a lineáris PVC-habokat, mivel jobban viselik a hőt, de rendelkeznek a PVC-k szívósságával és kedvező nyúlásával. Hő segítségével formázhatóak, ami előnyös görbült felületek kialakításánál. A hő-stabilizált verzióik szintén sokkal egyszerűbben használhatók az alacsony hőmérsékleten szilárduló előre impregnált anyagokkal. Tipikus SAN-termék pl. a Gurit cég Core-Cell A-sorozatú habjai.

7.1.5.2 Méhsejt szerkezetű anyagok

A magok egyik speciális formája a méhsejt szerkezet, melyek különböző alapanyagokból készülhetnek. Ezeket az anyagokat mind síkbeli, mind görbe, domború kompozit szerkezetekhez használhatjuk, különösebb mechanikai behatás vagy melegítés nélkül.

A termoplasztikus műanyagokból készülő méhsejt anyagokat extrudálással gyártják, majd megfelelő vastagságúra szeletelik.

A többi típusú méhsejtes anyagokat többlépcsős folyamat segítségével állítják elő. Ezekben az esetekben az alapanyagból először nagyméretű (1,2x2,4m) nagyon vékony lemeztáblákat (papírnál lapokat) készítenek, majd ezeket váltakozóan párhuzamos ragasztócsíkokkal látják el. A táblákat ezek után hő hatása alatt présgépben összeragasztják. Az így elkészült lapköteget az alumíniumból készült méhsejt szerkezeteknél vastagságukban szeletelik. A szeleteket ezután finoman széthúzzák a lapokra merőleges irányban, hogy létrehozzák belőlük a folyamatos hatszögletű cellákból álló formát. A papír alapú méhsejteknel az összeragasztott papírlapok kötegét először finoman széthúzzák, hogy egy kb. 1m vastagságú, nagy méhsejt tömböt hozzanak létre belőle. Ebben a formájában tartva ezt a törekeny papír méhsejt-blokkot gyantába mártják, majd lecsöpögtetik, és egy kemencében kikeményítik. Amikor a gyanta megkötött, a tömb már elég erős ahhoz, hogy kellő vastagságúra felszeleteljék.

A kishajóépítésben a méhsejtes maganyagot tartalmazó szendvics-szerkezetek borító rétegei általában FRP-k, de ezek gyakorlatilag bármilyen, megfelelő tulajdonságokkal bíró lemezből is lehetnek. A méhsejtes szerkezetek celláit is kitölthetjük valamilyen merev habbal, ez a külső és belső laminát számára nagyobb tapadási felületet biztosít, és növeli a mag mechanikai tulajdonságait azáltal, hogy stabilizálja a cellák falát. Ezen kívül javítja a hő- és hangszigetelési tulajdonságokat, de kis mértékben növeli a súlyt is.

A méhsejtes szerkezetek tulajdonságai a cellák méretétől (és ezért gyakoriságától) függenek, valamint a hálószerkezet vastagságától és szilárdságától. A panelek vastagsága változó, 3-50 mm-ig terjedhet, a méretük pedig általában 1200x2400 mm. A méhsejtes magokból szívós és nagyon könnyű szendvics-szerkezet állítható elő, de maganyag és a laminát közötti nagyon kicsi tapadási felület miatt a gyakorlatban kizárólag a nagyon jó tapadó képességgel rendelkező epoxigyantával használják.

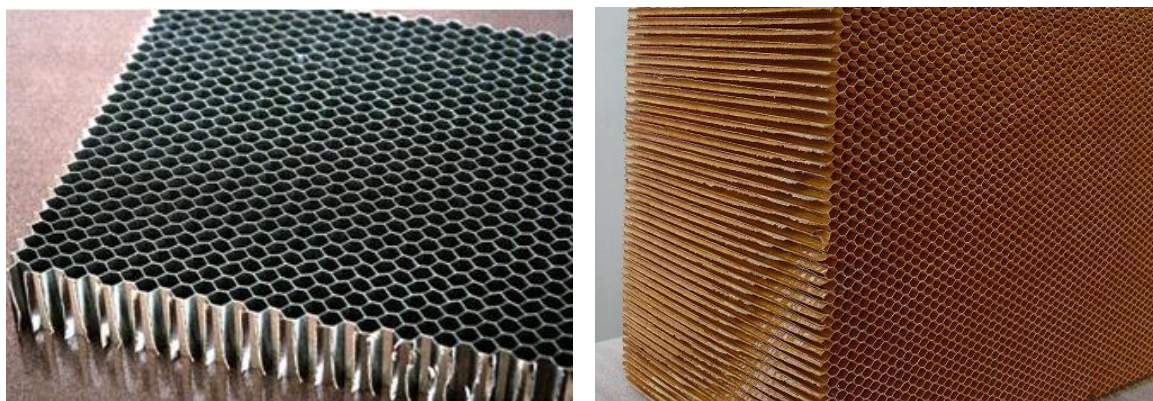
Mint említettük, a méhsejtek előállítására számos anyag felhasználható, ezek közül azonban elterjedtebbek az alumíniumból, hőre lágyuló műanyagokból, vagy az ún. Nomex-ből készült méhsejtes maganyagok.

Az alumínium méhsejt biztosítja az egyik legjobb szilárdság/tömeg arányt. Eltekintve jó mechanikai tulajdonságaitól és viszonylag alacsony áráról, hajóépítési célra csak igen nagy körülmények mellett javasolható, a sósvízi környezetből adódó korrózióveszély miatt. Figyelni kell arra is, hogy a méhsejtes szerkezet ne kerüljön közvetlen kapcsolatba a karbon szerkezettel, mivel az anyag vezetőképessége súlyosbíthatja az elektrokémiai korróziót. Az alumínium méhsejteknek megvan az a hátránya is, hogy nincsen 'mechanikai memóriája', vagyis egy alumínium méhsejt maggal ellátott laminát nyomóirányú terhelésekor a méhsejt visszafordíthatatlanul eldeformálódik, míg a külső szálerősített laminát visszanyeri eredeti formáját. Ez olyan, a

külső rétegekhez már nem kötő területet hoz létre, melynek lényegesen kisebb a szilárdsága. (Az anyag ott megszűnik szendvics-szerkezetként működni.)

A Nomex szerkezeteket ún. Nomex-papírból gyártják – olyan papírból, amelynek az alapja nem cellulóz, hanem aramidszál. A papír méhsejtet a gyártás során egy fenol tartalmú műgyantába mártják, így nagy szilárdságú és fokozottan tűzálló méhsejtet kapnak. Az így gyártott maganyag széles körben használható kis súlyú panelek, héjszerkezetek készítéséhez. A Nomex-et egyre inkább használják nagy teljesítményű versenyhajók építésénél is, a jó mechanikai tulajdonságai, alacsony sűrűsége és hosszú távú stabilitása miatt. Ára azonban a más anyagokból készített méhsejteknek többszöröse.

A termoplasztikus anyagokból készült maganyagok kis súlyúak, van néhány hasznos tulajdonságuk, és még az újrahasznosításuk is könnyebb. A fő hátrányuk a viszonylag kis merevség valamint az, hogy nehéz jó tapadást elérni a méhsejt és a bevonata között. Ezeket ritkán használják nagy terhelésnek kitett helyeken, főleg kisebb igénybevételű lemezszerű elemeket (pl. belső bútorzat részei) készítenek belőle a súlycsökkentés érdekében. A leggyakrabban használt polimerek az ABS, a polikarbonát, a polipropilén és a polietilén.



7.1.15. ábra: Alumínium (balra) és Nomex méhsejt (jobbra), még tömbben

7.1.5.3 Fa

A fát jellemzően kétféleképpen használják maganyagként. Egyikben a fát méhsejt szerkezetként építjük be. A fa tulajdonképpen a 'természet méhsejtje', mivel egy szálirányra merőleges metszetben a szerkezete mikroszkopikusan olyan, mint a hatszögletű cellákkal rendelkező szintetikus méhsejtes szerkezet. A fából készülő méhsejtet úgy állítják elő, hogy az anyagot tömbösítik úgy, hogy a fa rostjai mindig párhuzamosan fussanak. Ezután a tömböt a szálirányra merőlegesen különböző vastagságú lemezekké szeletelik, így kialakul a fa szálszerkezetének megfelelő méretű természetes méhsejt-szerkezet. Ez – amennyiben alapanyagként kellően kis sűrűségű anyagot használnak – olyan tulajdonságokkal rendelkezik, mint az ember által gyártott szintetikus méhsejt-szerkezetek. Azonban annak ellenére, hogy többféle vegyi kezelés létezik, minden fa-mag ki van téve a nedvesség támadásának, és elrohad, ha a záró laminátok vagy gyanta nem megfelelően veszi körül.

A leggyakrabban használt fa-mag a balzafa. Először az 1940-es években alkalmazták a hidroplánok úszótestjeinél, alumínium fedőréteggel kombinálva annak érdekében, hogy az úszótestek ellenálljanak a vízen történő landoláskor keletkező ütéseknek. Az itt szerzett pozitív tapasztalatok alapján kezdték később használni a balzafát a kishajóépítésben is, szál erősített laminát fedőrétegekkel. Nagy nyomószilárdsága mellett előnye, hogy jó hő- és hangszigetelő. Az anyag nem deformálódik melegítés hatására, és tűz esetén szigetelő ré-

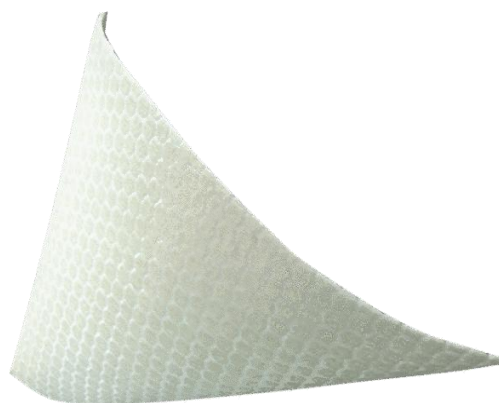
tegként működik, miközben a mag lassan elszenesedik, lehetővé téve, hogy a tűznek ki nem tett másik oldali fedőréteg ép maradjon. Úszóképességet biztosít, és könnyen megmunkálható egyszerű szerszámokkal és eszközökkel is. A balzafa egyik hátránya, hogy nagy a minimális sűrűsége, tipikusan 100 kg/m^3 , tehát a szintetikus maganyagokhoz képest nehezebb. Ezt a problémát súlyosbítja az is, hogy a balzafa a laminálás során nagy mennyiségű gyantát tud magába szívni, bár ezt az előzetes impregnálás csökkentheti. Ezek miatt használata olyan területekre korlátozódik, ahol nem szükséges az optimális súlymegtakarítás, vagy nagy helyi igénybevétel lép fel.

A balzafa mag elérhető szálirányra merőlegesen vágott, 3 – 50mm vastagságú, alapszöveten elhelyezett irdalt lapok, vagy merev táblák formájában. Ez utóbbiak akár 100mm vastagok is lehetnek, és már gyanta-bevonattal, vákuum-, vagy prepreg technológiákhoz előkészítve kerülnek kereskedelmi forgalomba (ld. később).

A fát lehet száliránnyal párhuzamosan (lécekre) is vágni, ez a másik módja annak, hogy a fát maganyagként használhassuk. Az ún. „strip-plank” módszerrel épített hajóknál a két kompozit (FRP) fedőréteg között maganyagként cédrusfa léceket használnak úgy, hogy a fa rostjai párhuzamosan futnak a laminát oldalakkal. A cédrus rostok a hajó teljes hosszában végigfutva nagy hossz-szilárdságot adnak, az FRP fedőrétegek pedig $\pm 45^\circ$ -ban vannak elhelyezve, hogy a torziós merevséget és a fa védelmét biztosítsák.



7.1.16. ábra: Balza maganyag



7.1.17. ábra: Coremat anyag

7.1.5.4 Egyéb maganyagok

Bár nem tekinthetők hagyományos értelemben vett magoknak, mégis van néhány vékony, kis sűrűségű szövetekhez hasonló anyag, amiket használhatunk a tömör laminát sűrűségének csökkentésére. A Coremat és a Sphertex nevű anyagok egy nem-szőtt, nemez- vagy filcszerű részt tartalmaznak, ami tele van sűrűségcsökkentő üreges résszel. Ugyanúgy alkalmazzák, mint a szöveteket, gyakorlatilag egy plusz réteg erősítést jelentenek, de célszerűen a laminát középrészén, a semleges szál környékén helyezik el, mert kis szilárdsággal rendelkeznek. Bár az anyag nemezszzerű része a felhasználás során átítatandó gyantával, az üreges részek kiszorítják a gyantát, és az így létrejövő középső réteg, bár sokkal nehezebb, mint a hab- vagy a méhsejtes mag, mégis alacsonyabb sűrűségű, mint az ugyanolyan vastagságú tömör laminát. A vastagság növelésével a panel merevsége is növekszik, így mindezeket együttvéve tulajdonképpen maganyagként is lehet ezeket az anyagokat tekinteni (ezért szokták ezeket „pseudo” maganyagoknak nevezni). Általában 1-6 mm vastagok, és felépítésükből következően relatíve jól lehet domború felületekhez alakítani. Használatuk gyors és könnyű, áruk a hab-magokhoz képest jóval alacsonyabb, így előszeretettel használják a kishajóépítésben is.

8. MŰANYAGHAJÓK ÉPÍTÉSE

Mint említettük, kompozit anyagból lehet, sőt igen könnyű sorozatban hajót készíteni, de nem kivitelezhetetlen egyedi gyártmányok készítése sem. A kompozit építési technikákat eszerint csoportosítva tárgyaljuk.

8.1 Hajóépítés sorozatban

8.1.1 Ősminta és sablon készítése

A sorozatban gyártott hajók alkatrészeit és héjszerkezetét is sablonokban gyártják. Egy új termék gyártásához tehát rendelkezésre kell, hogy álljon a sablon, amely az alkatrésznek pontos negatívja. Ennek elkészítéséhez használják az ősmintát, amely a gyártandó termékkel azonos formájú (pozitív minta), de nem feltétlenül kell azonos anyagból lennie, és értelemszerűen a forma pontos visszaadásán kívül semmilyen más funkcióval nem kell, hogy rendelkezzen. Az ősmintával szemben mindössze két követelményt támasztanak, egyrészt hogy anyaga és szerkezete biztosítsa, hogy a sablon elkészültéig (levételéig) ne deformálódjon, másrészt a termék számára előírt felületi minőséget ki lehessen rajta alakítani, hiszen amilyen az ősminta felülete, olyan (vagy annál csak rosszabb) a sablon, és majd az abból készülő termék felülete is.

Az ősminta elkészítésére több technológia is ismert. Kishajók esetében egy korábban jól bevált egyedi hajó is szolgálhat (természetesen megfelelő előkészítés után) pozitív formaként.

Az ősminta készíthető fából épített szerkezetből, amelynél a szükséges formát bordavázon elhelyezett lemezek és/vagy lécezések adják. Az ősminta ekkor a hagyományos fahajók építéséhez használt technológiához hasonlóan épül, természetesen bizonyos vonatkozásokban lényegesen alacsonyabb igényszinttel. A felületi minőséget a szerkezet műanyaggal való beborításával, és annak igény szerinti megmunkálásával (gittelés-csiszolás-gittelés) lehet biztosítani. A fa használata az ősmintákhoz azonban nem célszerű, vagy legalábbis korlátozott, mert a fa a légnedvesség hatására méretét változtatja, ami egy ősminta esetén nem előnyös. A deformáció ellen lehet védekezni impregnálással ill. a célnak jobban megfelelő alapanyagok választásával. Egy kishajó-fedélzet ősmintájának gyártási lépéseit mutatják a 8.1.1.-8.1.3. ábrák.



8.1.1. ábra: Az építőállványzat és rajta a bórdaváz (balra), a belécezett és pozdorjalemezzel borított szerkezet (jobbra)



8.1.2. ábra: Az ősminta szerkezete üvegszál-as poliszter laminát bevonattal (balra) és sok gittelés-csiszolás fázis után (jobbra)



8.1.3. ábra: A végleges felületképzés után elkészült ősminta

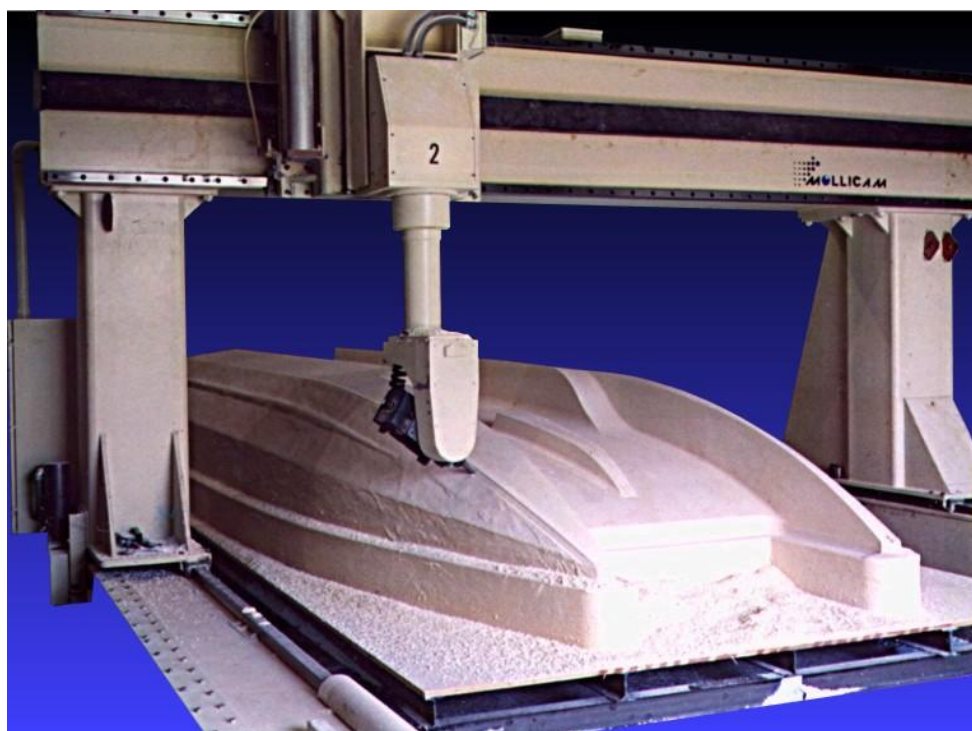
Ezen általánosan elterjedt módszer mellett ma már – a számítógépes hajótervezés nagyarányú elterjedésével – lehetőség van ennél sokkal nagyobb pontosságot adó, gyorsabb eljárásra is. A hajótest, fedélzet vagy bármilyen más alkatrész digitális háromdimenziós modellje ma már sokszor rendelkezésre áll és léteznek olyan nagyméretű 5-tengelyes marógépek, amelyek akár 25 m hosszú 6-8 m széles és több méter magas alkatrészeket is ki tudnak munkálni. Az 5-tengelyes kialakítás a gép marófejének x, y, és z irányban való elmozdulását és két tengely körüli elforgathatóságát jelenti, amellyel a marófej tengelye mindig a felületre merőlegesen állhat. Ez biztosítja, hogy a kimart felület nem lesz lépcsős, hanem hűen követi a számítógépes modell által megadott formát. A fej pozíciójának beállítása eléri a tizedmilliméteres pontosságot, a marási sebesség pedig 20-25 m/perc. A formához felhasznált anyagok lehetnek zártcellás szintetikus habok, vagy tömbösített MDF. Ezeknél az anyagoknál a formát először durván kinagyolják, majd ennek felületén egy megfelelő vastagságú bevonatot képeznek, amelyen a végleges jó minőség érdekében a marófej újra átmegy. Ezt a módszert a 8.1.4. és 8.1.5. képek mutatják be.

A sablon az ősminta elkészülte után már az esetek túlnyomó többségében szálerősített műanyagból, kézi felrakóeljárással készül (ld. a következő fejezetet). A szerkezetét illetően olyan megerősítéseket kap, hogy a több darab kimunkálása és kivétele során jelentkező igénybevételeknek (pl. felületi nyomás) is ellenálljon. Az erősítés sok esetben acélszerkezet, vagy rétegeltlemez bordázat. A nagy darabszámban kikerülő termékek a sablon felületét is igénybe veszik, így a sablonokat speciális, kemény, szívós külső bevonattal, ún. szerszámgéllel készítik. A nagyméretű sablonok általában osztott kivitelűek, kerekeken

elmozdíthatók és egy vízszintes tengely körül elforgathatók a könnyebb munkavégzés érdekében.



8.1.4. ábra: 5-tengelyes CNC maróval készített ősminták



8.1.5. ábra: Kishajó alsóhéj készítése 5-tengelyes CNC maróval

A kishajók formája (alámetszések, visszahajlások) sokszor megköveteli a sablonok megosztását, csak így biztosítható ugyanis, hogy a termék a sablonból kivehető legyen. Ezért is, és egyes gyártástechnológiák miatt is a sablonok megfelelő nagyságú peremmel készülnek.

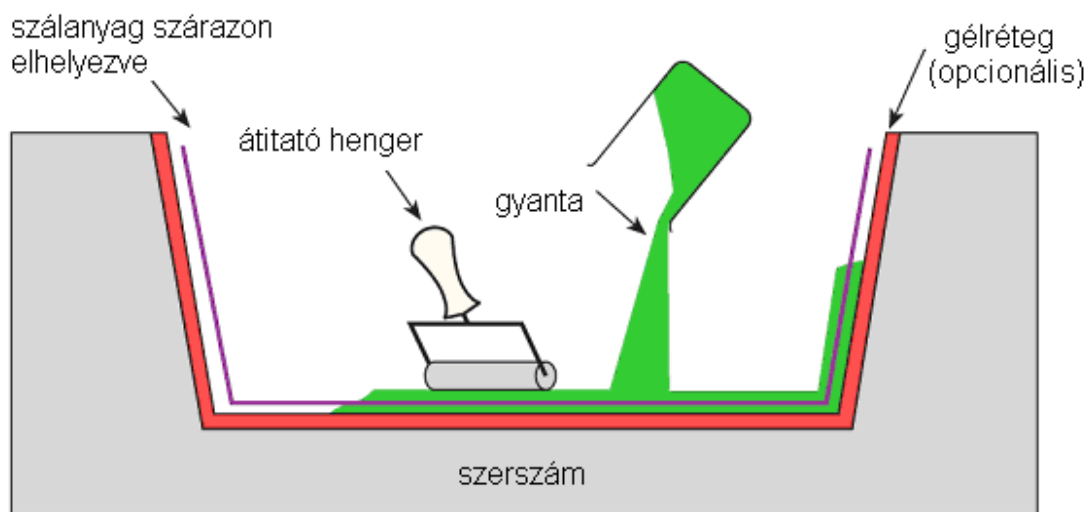
A következő fejezetekben a sablonban épített kompozit kishajók héjszerkezetének készítésére bevált és elterjedt gyártási technológiákat mutatjuk be.



8.1.6. ábra: Kishajó elfordítható sablonja, acélszerkezet merevítéssel

8.1.2 Kézi felrakóeljárás

A kézi felrakóeljárás vázlatát a 8.1.7. ábrán látható.



8.1.7. ábra: A kézi felrakóeljárás vázlatát

Az eljárás lényege, hogy a sablonba a laminát szálerősítése rétegenként szárazon kerül be, és ott helyben történik a gyantával átítatása. A hajó a tervező által megadott rétegterv szerint épül kívülről befelé, az egyszerre feldolgozható rétegek számát poliészter gyanta alkalmazása esetén a túl gyors kötés és az ebből származó nagy exoterm hő ill. intenzív zsugorodás határozza meg. Jellemzően 2-3 réteget laminálnak be egyszerre, utána technológiai szünet következik, míg a felhordott rétegek teljesen ki nem kötnek. Epoxigyantával készülő szerkezetek esetén lehetőség van a teljes szerkezetet egyben kidolgozni. A laminát végül normál légköri nyomáson köt ki. A módszer szendvics szerkezetek készítésére is alkalmas, a maganyag külön technológiai lépésben kerül beépítésre. A mag anyagától füg-

gőn a gyantarendszerrel kompatibilis ragasztóval vagy egy gyantában dús rétegre közvetlenül ráragasztható. Mindkét esetben biztosítani kell a megfelelő felületi nyomást, amelyre egyenletesen elhelyezett nehezekeket vagy a vákuumfóliás technológiát szokták alkalmazni. A módszer technológiai lépései vázlatosan a következők:

- sablon előkészítése (tisztítás és felpolírozás);
- választóréteg felvitele megfelelő vastagságban (mindig szükség van rá, hogy a termék a sablontól elválasztható, kivehető legyen – általában viasz alapú pasztákat vagy polivinil-alkoholt használnak);
- gélréteg felvitele (opcionálisan);
- nyitóréteg bedolgozása (a vékony gélréteg megtámasztására egy vékony, könnyű szálanyagot dolgoznak);
- laminátrétegek felhordása rétegterv szerint (maganyag beépítése opcionálisan);
- top-coat felvitele.



8.1.8. ábra: Alsóhéj kézi laminálása

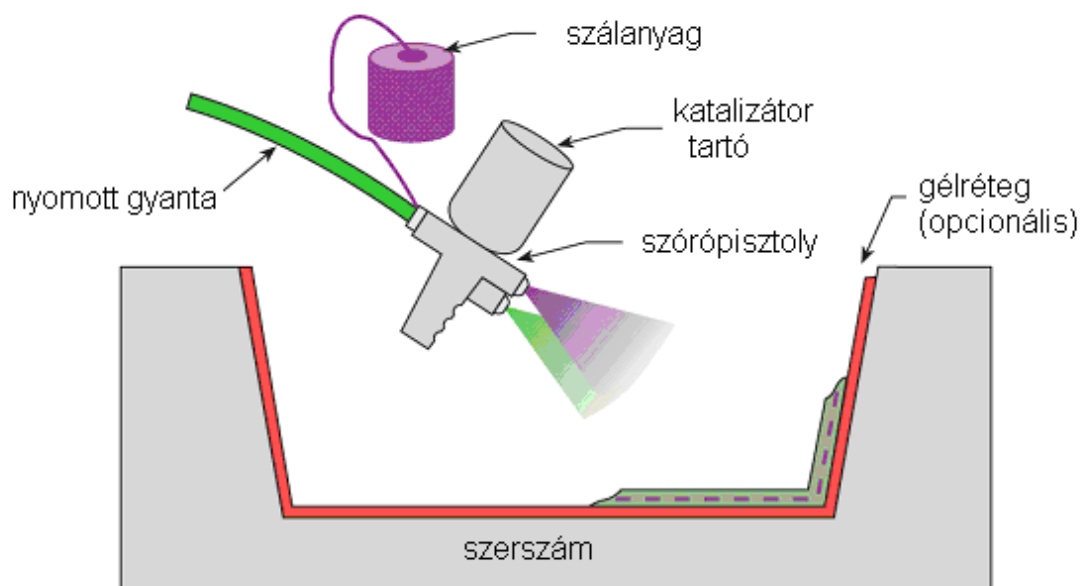
A szálanyag gyantával átítatása ecsettel vagy teddy-hengerek segítségével történik, ez után pedig speciális fém vagy kemény műanyag görgőkkel átgörgözik a teljes felületet. Ez biztosítja, hogy a gyanta minden elemi szálát ténylegesen beágyazzon, és a valóságban is egy jó kompozit szerkezet jöhessen létre. A görgőzés során továbbá eltávolítják a rétegelés során a laminátban keletkezett légzárványokat is. A laminát tömörségét és így minőségét mindez nagyban befolyásolja. A kézi felrakóeljárással általában 35%-os szálanyagtartalmat lehet biztosítani, de körültekintő munkavégzés mellett akár 50% is elérhető. Tetszőleges típusú szálanyagok használhatók, bár meg kell jegyezni, hogy a sűrűbb szövésű, vagy több rétegű, nehezebb fajták ezzel a módszerrel nehezebben itathatók át. A módszer előnyei:

- évek óta elterjedt és jól bevált módszer;
- egyszerű megtanítani, könnyű megtanulni;
- nem igényel drága szerszámokat és sablont, feltéve, hogy szobahőmérsékleten kötő gyantákat használunk;
- alapanyagok széles választéka elérhető;

- nagyobb a száltartalma, és hosszabbak a szálak, mint a szóróeljárásnál.
Fő hátrányok:
- a gyanta kikeverése, a laminát gyanta-tartalma és minősége nagyban függ a laminátorok képzettségétől, a magas száanyagtartalmú laminátokat általában nem lehet légzárványmentesen elkészíteni;
- a gyantákkal kapcsolatban egészségügyi és biztonsági megfontolások szükségesek, ugyanis a kézzel felvihető gyanták általában kisebb molekulasúlyúak és így egészségre ártalmasabbak, mint a nagyobb molekulasúlyú termékek; az alacsony viszkozitású gyanták a ruházatba is könnyebben beleivódnak, rongálva azt;
- a módszer egy nyitott eljárás így a poliészterekből és a vinilészterekből a sztirol a levegőbe párolog el. A levegőben kialakuló sztirol koncentráció engedélyezett szintre való csökkentése nagyon nehéz, csak bizonyos drága kivonatoló berendezésekkel oldható meg;
- a gyantáknak alacsony viszkozitásúnak kell lenniük, hogy kézzel bedolgozhatóak legyenek, a nagy hígító-tartalom rontja a gyanta mechanikai tulajdonságait.

8.1.3 Szórás

A szóró eljárás lényegét a 8.1.9. ábra mutatja.



8.1.9. ábra: A szóró eljárás lényege

Ennél a módszernél nem szöveteket alkalmaznak szálerősítésként, hanem egy speciális szóró-aprító pisztoly segítségével juttatják el mind a gyantát, mind a kb. 4-5cm hosszúra vágott rovingot a sablonba. Az így elkészített laminát normál nyomáson köt meg. A technológia jellegzetességeiből fakadóan csak poliészter gyantát és üveg rovingot használnak, más anyagok „túl jók” ehhez az eljáráshoz. Szendvicsszerkezetet hasonló okokból nem készítenek ilyen módon. Az eljárás igen termelékeny, ezért sorozatgyártásra igen alkalmas, de nagyon gyantadús, ezért adott szilárdságra relatíve nehéz termékek készíthetők csak. A

szilárdság növelhető külön fázisban az előzőekben ismertetett módszerrel felvitt szövet rétegekkel, de ekkor már csökken a termelékenység.

A szórópisztoly többféle kialakítású lehet. Egyes változatokban a katalizátor a gyantához külső, más típusokban belső keveréssel adódik. A külső keverés előnye, hogy a pisztolyban nincs bekatalizált, és ezért bekötni képes gyanta, viszont a keveredés nem olyan jó, mint a belső keverésű változatnál. A gyantát vagy sűrített levegő vagy szivattyú segítségével juttatják a pisztolyhoz. Az eljárás előnyei között megemlíthető, hogy ez is régóta alkalmazott módszer, a gyanta és a szál átítása igen egyszerű, a szóró berendezésen kívül nem igényel más drága eszközt, és igen termelékeny. Hátrányai közt említettük már, hogy relatíve nehéz laminát készíthető ily módon, a szálak igen rövidek a laminátban, így a termék szilárdsága is kicsi, és az előzőhöz hasonlóan ez is nyitott eljárás, de itt még több sztról kipárolgása jellemző, mert a szóráshoz még kisebb viszkozitású anyagra van szükség. Mindezek miatt elsősorban kisebb igénybevételű hajók gyártására használt eljárás.



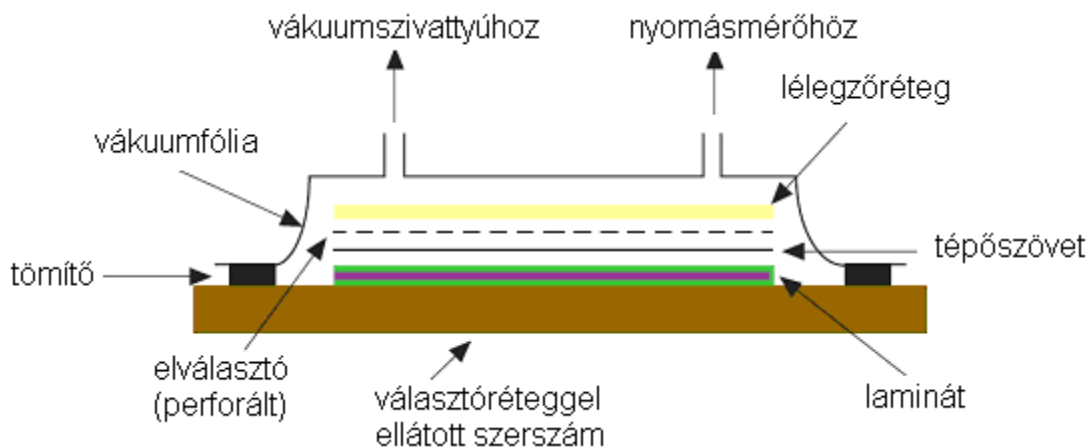
8.1.10. ábra: Belső (balra) és külső keverésű szórópisztoly(jobbra)



8.1.11. ábra: Szálszórás

8.1.4 Vákuumeljárás

A vákuumfóliás eljárás a kézi felrakóeljárás továbbfejlesztett változata annak érdekében, hogy a laminát minősége jobb lehessen, kevésbé függjön a laminátot készítő egyén tudásától és hozzáállásától. A módszer elve a 8.1.12. ábrán látható.



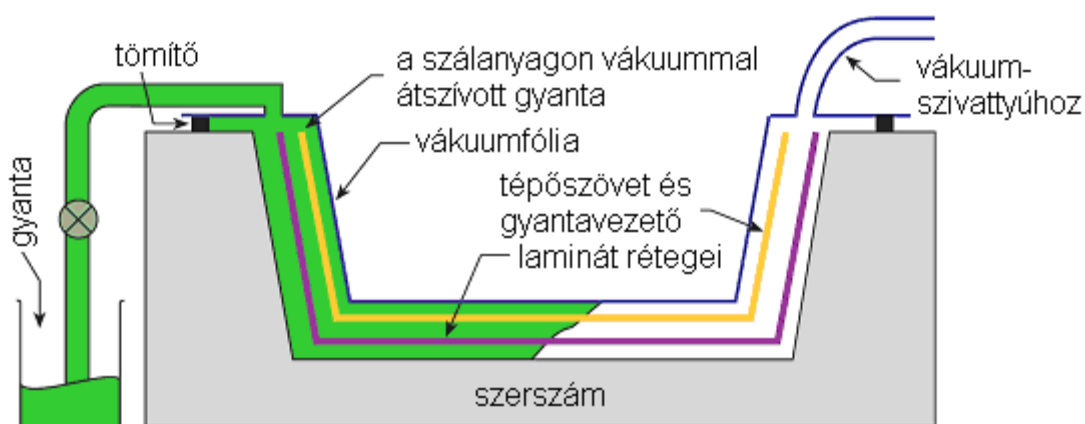
8.1.12. ábra: A vákuumtechnika speciális rétegei

Ennél a módszernél a rétegek a kézi felrakóeljáráshoz hasonlóan kerülnek a sablonba, de a kimunkálás és a laminát tömörítése nem görgőkkel, hanem vákuum révén valósul meg. Az átítatott laminátot egy fóliával zárják le, melyet körben szigetelnek. A levegőt a fólia alól a megfelelő helyeken és sűrűséggel elhelyezett elszívó csomkokon keresztül egy vákuumszivattyúval eltávolítják. Így a külső légnyomás a vákuum mértékétől függően kb. 0,7-0,8 bar-ral nyomja össze a laminátot, a vákuumszivattyú pedig tökéletesen légzárványmentes laminátot eredményez. Ahhoz azonban, hogy a fólia ne tapadjon oda menet közben a lamináthoz és az elszívás meg tudjon valósulni, segédanyagokra van szükség. Az elkészített laminátra egy ún. tépőszövet réteg kerül. Ez a gyanta megkötése után is eltávolítható, letéphető, ez tehát az elválasztó réteg. A tépőszövet után következik egy perforált elválasztó réteg, mely csak a felesleges gyantát engedi át magán, és biztosítja, hogy a következő rétegek könnyebben eltávolíthatóak legyenek (ezt nem mindig alkalmazzák). Ezt követi az ún. lélegző réteg, amely egy filc vagy nemezszerű, légáteresztő anyagból készül, és feladata, hogy a fóliát az előző rétegektől elartsa a szabad levegőáramlás érdekében. Mindezt lezárja egy kellően nagy szakadás előtti nyúlással (akár 800%) rendelkező anyagból készített fólia, amely a sablon peremén egy hőálló ragasztó-tömítőszalag segítségével zárja az egész rendszert. A fóliát a szükséges helyeken megszakítva lehet az elszívó csöveket beépíteni, de ezeken a helyeken is biztosítani kell a megfelelő tömítést. A gyakorlatban a kereskedelmi forgalomban kapható e követelménynek megfelelően kialakított, általában bajonettzáras, szabványos gyorscsatlakozóval ellátott átvezető elemeket használják.

Az eljárásnál általában epoxigyantákat alkalmaznak, ugyanis a poliészter és vinilészter gyantákból a vákuumszivattyú képes nagy mennyiségű sztirolt kivonni, amely a kötést rontaná. Gyakorlatilag mindenféle szálanyag átítható ezzel a módszerrel, még a vastagabb, nehezebb varrt multiaxiális szövetek is. Nagy szálanyagtartalmat lehet elérni úgy, hogy a szálak biztosan átítatódjanak, ezért a laminát igen jó minőségű lesz. Mivel az eljárás zárt, a káros anyagok kibocsátása kisebb lehet, hiszen a szűrés könnyebben megvalósítható. Ezért ezt a módszert az igen jó minőségű, nagy igénybevételeknek kitett hajók gyártásánál alkalmazzák elsősorban. Van ugyanakkor néhány hátránya is az eljárásnak: nagyobb szaktudást, több előkészítő munkát igényel, több, a végén kidobandó segédanyagra van szükség, amely a költségeket növeli. A jobb minőségnek mindig ára van.

8.1.5 Infúziós eljárás

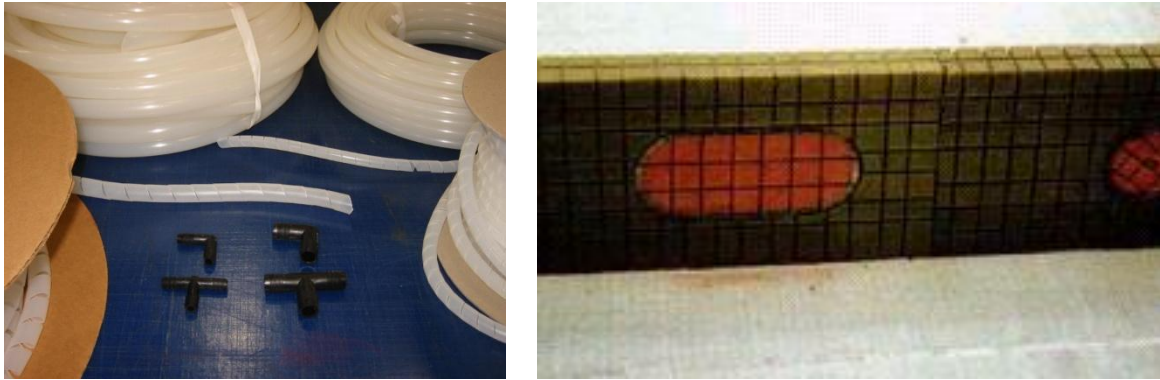
Kompozit szerkezetek készítéséhez többfajta infúziós eljárás is létezik, de mindegyik lényege az, hogy a szálerősítés szárazon kerül a sablonba (esetleg két sablon közé), a gyantát pedig túlnyomás és/vagy vákuum segítségével átszívják a rendszeren. Az átáramlás során a gyanta átítatja a szálanyagokat. A kishajók építéséhez leginkább a SCRIMP módszert szokták alkalmazni. A Seeman Composites cég által szabadalmaztatott és licenstdíjas technológia vázlatát a 8.1.13. képen látható.



8.1.13. ábra: A SCRIMP eljárás vázlatát

Ez a módszer szintén a kézi felrakó- és vákuumeljárások fejlesztett változatának tekinthető. Az alapvető eltérés az, hogy a rétegek szárazon kerülnek beépítésre. A száraz szálerősítést gyanta-kompatibilis ragasztóval rögzítik a felületen, majd következik a szokásos tépő-szövet. Ez után jön egy speciális gyanta terítő, elosztó réteg, amelyet általában gyantavezető csatornákkal kombinálnak. Ezen a rétegen a gyanta könnyen átáramlik, és ebben szétterülve felülről itatja át a száraz szálerősítést. Többféle gyantavezető réteget – szaknyelven: médiumot – használnak, a különböző felépítésű csövektől a szűnyogháló-szerű felületi médiumig, de mindegyiknek azonos a funkciója. E réteg után a vákuumfólia zárja a rendszert. Az előkészítés befejeztével a gyantavezető csatornák egyik végén lévő csatlakozásnál elindítják a vákuumszivattyút, a csövek másik végét pedig elhelyezik a már edzővel összekevert epoxigyantát tartalmazó edénybe. Induláskor a csövek zárva vannak, a vákuumszivattyú eltávolítja az összes levegőt a fólia alól, majd megnyitják az első gyantavezető csövet – a gyanta elkezd beáramlani. Miután az egész felület átítatódott, a gyantacsatornák elzárhatóak, az elszívás leállítható. Szükség szerint a darabot kemencében ki lehet sütni a jobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében.

Nagyon fontos a gyantavezető csatornák megfelelő elhelyezése, mert csak így biztosítható, hogy ne maradjanak át nem itatott részek a darabon. Az infúziós eljárás jóságát befolyásolja továbbá az alkalmazott gyanta viszkozitása (alacsony viszkozitású, kifejezetten infúziós célokra fejlesztett, előmelegített gyantákat szokták alkalmazni), a szálerősítők egyenletes vagy egyenetlen porozitása, áteresztő-képessége, és az alkalmazott vákuum nagysága.



8.1.14. ábra: A gyantavezetés elemei



8.1.15. ábra: Szendvics-panel készítése infúzióval

Az eljárás egyik hátránya éppen az alacsony viszkozitású gyantákban van, ezek mechanikai tulajdonságai elmaradnak a hagyományos lamináló gyantáktól. További hátrány az eljárásért fizetendő licenz-díj, mely a módszert költségesebbé teszi, valamint az, igen speciális szaktudás vagy nagy tapasztalat kell ahhoz, hogy nagy méretű darabokat át lehessen hiba (gyantahiányos hely) nélkül itatni. Előnyként fogalmazhatjuk meg, hogy a vákuumtechnikához használt sablon itt is használható, nem kell speciális fejlesztésekbe fogni, nagy szápanyagtartalmat lehet produkálni, és a szendvics-szerkezetek egy lépésben gyárthatók.

A szápanyagok vonatkozásában elmondható, hogy mindenféle anyagot lehet használni, de a könnyebb változatok könnyebben átíthatók. Szendvics-szerkezetek készítésénél a maganyagba szoktak gyantavezető csatornákat vágni. Méhsejt szerkezetű magok azonban nem alkalmazhatók.

A következő képsorozaton egy nagyméretű motoros hajó héjszerkezetének infúzióját mutatjuk be. (A képek az Airtech cég bemutatójából származnak.)



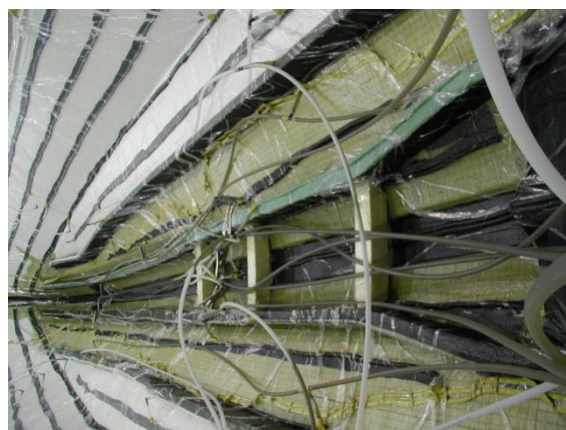
8.1.16. ábra: A sablonba bekerültek a gyantavezetők a tépő-szövet és a száraz laminát fölé



8.1.17. ábra: A vákuumfóliát elhelyezik a sablonon



8.1.18. ábra: Bekötik a gyantabevezető csatornákat, majd elindítják az infúziót



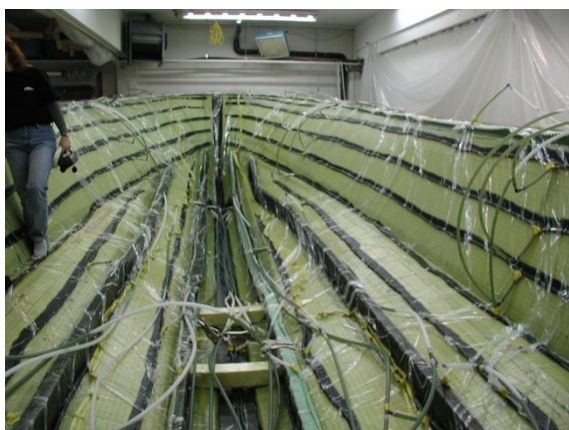
8.1.19. ábra: A gyanta terjed egyik csatornától a másikig



8.1.20. ábra: Amint a gyanta elér egy újabb csatornát, az előzőt lezárják, azt meg kinyitják



8.1.21. ábra: A gyantát a sablon peremén elhelyezett csöveken keresztül szívják el



8.1.22. ábra: A teljes felület átítatódott

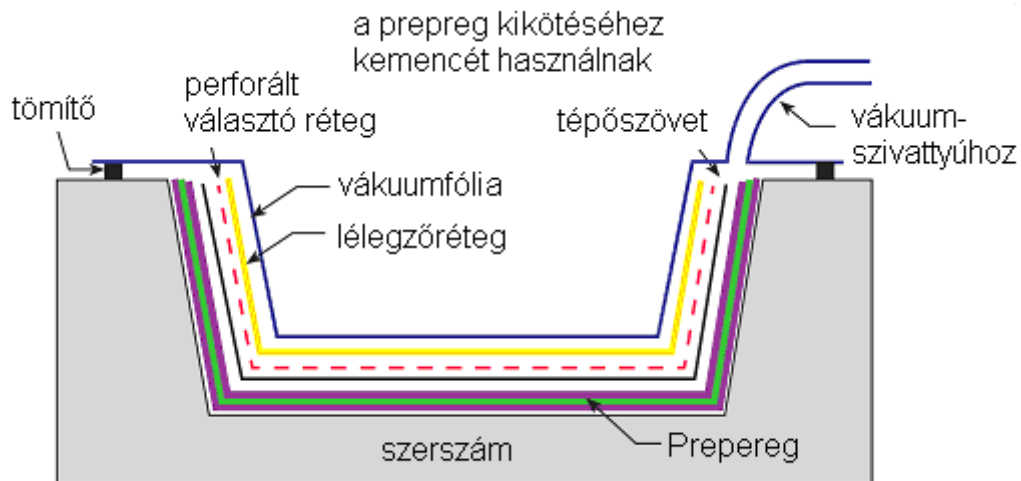
8.1.23. ábra: A kész hajótest (kikeményedés után)

8.1.6 Előimpregnált anyagok (prepreg) használata

Az előimpregnált anyagok – ahogy nevük is mutatja – olyan speciális szálanyagok, amelyekhez az alapanyag gyártója gyárilag hozzáadja a bekatalizált gyantát, mégpedig a megkívánt száltartalomnak megfelelő pontos mennyiségben. A gyantában a katalizátor vagy edző szobahőmérsékleten nem képes elindítani a térhálósodást, ahhoz emelt hőmérsékletre van szükség. Az előimpregnált anyagok között ma már megtalálhatók az alacsony (60-80°C) és magasabb hőmérsékletet (80-120°C) igénylő anyagok is. Az anyagok élettartama szobahőmérsékleten általában a néhány naptól a néhány hónapig terjed, de ez kitolható hűtéssel, ezért jellemzően mélyhűtött állapotban tárolják. Bár szinte minden gyanta felhasználható előimpregnálásra, mégis általában az epoxigyantákat preferálják a gyártók. A szálak tekintetében semmilyen megkötés nincs, a maganyagokat illetően azonban csak a magas hőmérsékletnek ellenálló anyagokat lehet alkalmazni.

Az előimpregnált anyagokat a vákuumtechnológiával szokták feldolgozni úgy, hogy a szükséges összes réteget elhelyezik a sablonba, majd innen alkalmazzák a vákuumtechnikánál leírt segédanyagokat. Itt azonban a perforált válaszfóliát nagyon gondosan kell megválasztani annak érdekében, hogy a pontosan beállított gyantamennyiségből a vákuumszivattyú ne szívasson ki túl sokat a laminátból. A levegő elszívása után a gyanta típusának megfelelő hőmérsékletű kemencébe kell tenni az egész darabot (természetesen a sablonnal együtt). A magas hőmérséklet hatására a gyanta először „felolvad”, folyékony állapotba kerül, majd egy idő után megköt. A megfelelő szilárdsági mutatók érdekében általában több órás kisütést alkalmaznak. Látható, hogy a teljes szerkezet bekerül a kemencébe így a technológia segédanyagaival szemben is az a követelmény, hogy bírják azt a hőmérsékletet, amit a gyanta igényel.

A „prepreg”-ek előnye, hogy pontos és nagy szálanyagtartalommal bírnak, valamint, hogy a gyári átítatásnál olyan nagy viszkozitású gyantákat is tudnak alkalmazni, amelyek a többi eljárásnál e miatt nem használhatók, és amelyek mechanikai tulajdonságai jobbak, mint a hagyományos gyantáké, így erősebb-könnyebb szerkezetek készíthetők. Természetesen ezek az anyagok jóval drágábbak a szokásosaknál.



8.1.24. ábra: Előimpregnált anyagok alkalmazása héjszerkezet készítéséhez

Egyes előimpregnált anyagoknál kevés a vákuumszivattyú által előállítható nyomáskülönbség, ekkor az egész darabot egy autoklávban kell elhelyezni, amelyben akár 5-6 bar túlnyomás is létrehozható. A megfelelő méretű autokláv azonban sokszor nem áll rendelkezésre, így ez a megoldás a hajóépítésben csak korlátozottan elérhető.

8.2 Egyedi műanyaghajók építésének technikái

Ahogy a korábbi fejezetben említettük, annak számos előnye miatt sok esetben a megrendelők teljesen egyedi hajók gyártását kérik. Ez a helyzet akkor is, amikor pl. szabad osztályokban versenyző hajókat kell építeni. Ma különösen e téren csak a kompozit alapanyagok jöhetnek már szóba, így természetesen a műanyaghajók egyedi gyártására is kidolgoztak módszereket. Akármilyen módszerről beszélünk is azonban, mindegyikre az jellemző, hogy a hajó formáját megadó minta – a sorozatgyártás sablonjával ellentétben – nem adja meg a végleges és elfogadható felületi minőséget, ezt a héjszerkezet elkészítése után minden darabon egyedileg kell kivitelezni. A minta mérete annyival kisebb a hajónál, amennyi a gyártástechnika során alkalmazott hajóhéj rétegvastagsága (ld. később). Egyedi műanyaghajók héjszerkezetének gyártása manapság jellemzően szendvicsszerkezet készítését jelenti, de lehetőség van maganyag nélkül, tömör laminátból is héjat gyártani. A következőkben ezeket a módszereket mutatjuk be.

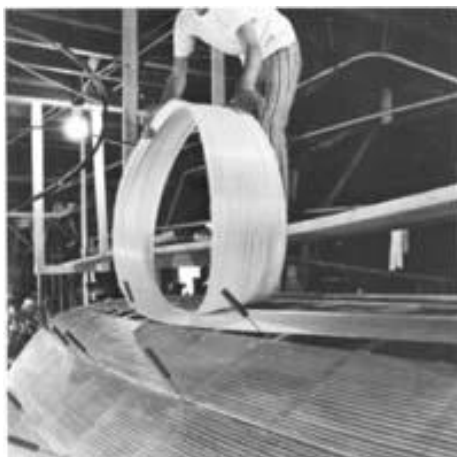
8.2.1 Héjazat készítése tömör laminátból

Ez a gyártási mód az ősminta készítéséhez hasonlóan kezdődik, azzal a különbséggel, hogy az építőbordák méretét úgy kell meghatározni, hogy abban figyelembe vegyük a készítendő héjszerkezet, valamint a minta felületét megadó réteg vastagságát. Az egyedi technikáknál a héjszerkezet általában belülről kifelé készül el, ellentétben a sablonban készülő szerkezeteknél, ahol pont fordított a sorrend (kívülről befelé). A bordázat elkészülte után a vázat beborítják alkalmas anyaggal, kerek bordázatú hajóknál lécezéssel, sarkos hajóknál általában valamilyen lemezeléssel. Ez lehet rétegelt lemez, de jó megoldás lehet valamilyen vékony műanyag burkolattal rendelkező dekor-lemez is. A bordák osztását és a lemezelés vagy lécezés vastagágát egymással összhangban kell meghatározni. Az így elkészített felület minősége általában elégséges, ezzel szemben nem támasztunk különösebb követelményeket, hiszen ez a felület a hajó legbelső rétegével találkozik. Erről a szintről

lehet elkezdni a rétegterv szerinti héjazat készítését, de csak azután, hogy valamilyen választóréteget helyezünk el a felületen. Ez az esetek legnagyobb többségében valamilyen vékony, de kellően erős anyagú fólia rögzítését jelenti, melynek elhelyezésénél az sem számít, ha kisebb redők keletkeznek rajta, a lényeg, hogy nagyobb felületi egyenetlenség ne legyen, mert az a felület külső oldalán is megjelenik és a későbbiek során hosszú és költséges módon lehet csak eltüntetni.

A rétegek felhordása kézi felrakó eljárással történik. A kész rétegelés után következik a felületképzés hosszú és fáradságos munkája. Minél pontosabb volt a bordaváz és felületének kialakítása, itt annál kevesebb munkája lesz a hajóépítőnek. A sima felületet gitteléssel, csiszolással alakítják ki, akár több lépcsőben. Ez után a hajótest festhető. Megfordítás után a héjazat merevítése, a bútorzat és egyébek belülről elkészíthetők. Jellemző, hogy a festés előtti utolsó simításokat csak a belső munkálatok elvégzése után csinálják meg, a gyártás közbeni sérülések kiküszöbölése érdekében.

Látható, hogy ennél a megoldásnál szükség van a bordázat belevezetésére vagy beleemelzésére a tömör laminát elkészítése előtt. Ezt kiküszöbölendő a már említett Seemann Composites cég kifejlesztette a C-Flex anyagot, mellyel a bordák közötti távolság áthidalható.



8.2.1. ábra: A C-Flex anyag

A C-Flex „palánkok”, melyek 30,5 cm széles, 30 és 75m hosszú tekercsben kerülnek forgalomba, vékony, üvegszálerősített anyagból készült rudakkal merevített üveg rovingból állnak (8.2.1. ábra). A két oldalon vékony üvegfátyol réteg található, a közbenső rétegek összetartása érdekében. A két vastagsági méretben (2,03 és 3,18 mm) kapható anyag jellemzője, hogy a műanyag rudak a hajó teljes hosszában felfekszenek a bordákra és kiadják a hajó íveit. Így az átítatás előtt a „palánkok” mindkét irányban képesek deformálódni, ezáltal teljesen képesek felvenni a kerek bordázatú hajók domború felületének alakját is. Az építés menete a szokásos módon, építőállványzat és az építőbordák elkészítésével kezdődik. A kellően kimerevített bordázatra ez után fel lehet vinni az első C-Flexet, a hajó alakjától függően a gerinctől vagy a fedélzet szélétől elkezdve. A gondosan egymáshoz illesztett „palánkok” elhelyezése után az egész felületet híg, nem zsugorodó lassú kötésű gyantával (lehet akár poliészter vagy epoxi is) át kell itatni. Erre azért van szükség, hogy a bordák közötti rész a zsugorodásból következően ne egyenesedjen ki, mert ez később sok gittelést jelentene. Körültekintő munkával azonban relatíve kis ráfordítással olyan felületi minőséget lehet produkálni, mint a sablonban épített hajóknál. A teljes kikeményedés után a felület óvatosan átcsiszolandó, majd portalanítás után el lehet kezdeni a további

rétegek felhordását. A C-Flex alkalmazásával időt és anyagot is meg lehet takarítani, hiszen nem kell a bordázaton semmilyen felületet képezni, és az alapanyagban levő roving, mint unidirekcionális szövet vesz részt a héjszerkezetben és annak merevítésében is. Magyarországon ez az anyag, és így a módszer sem terjedt el – talán mert az egyedi hajóépítés nem nagyon jellemző hazánkban – de külföldön számos kisebb és néhány nagyobb (70-80 láb hosszú) hajót is építettek már ezzel az eljárással. A héjszerkezet készítését a forgalmazó honlapján (www.sintesfiberglass.com) található néhány kép segítségével illusztráljuk.



8.2.2. ábra: A legyártott építőbordák és az állványzat



8.2.3. ábra: Az elkészült vázszerkezet és az első réteg C-Flex felvitele



8.2.4. ábra: A teljes felület elkészült, el lehet kezdeni az átítást

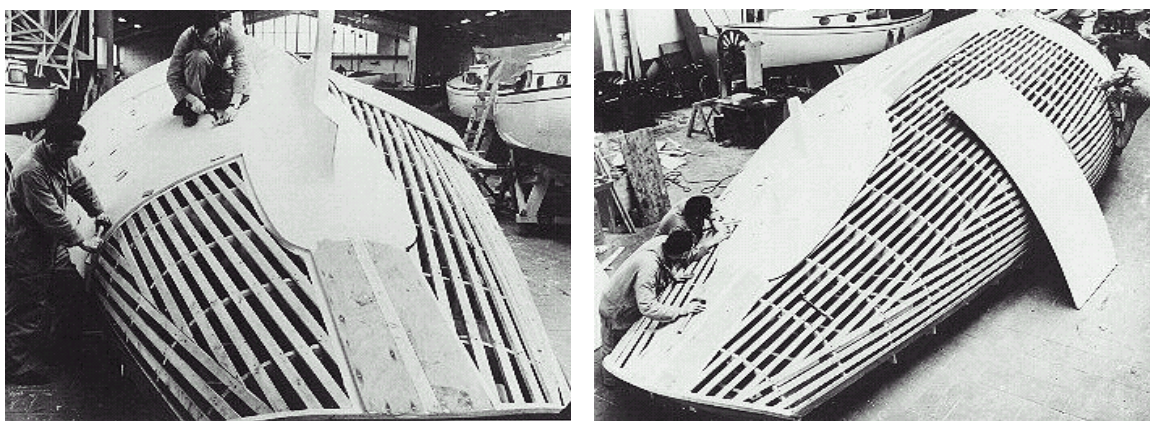


8.2.5. ábra: A kikötött C-Flex lelaminálható, majd következhet a gittelés-csiszolás

8.2.2 Héjazat készítése szendvics-szerkezettel

Szendvics-szerkezetből relatíve könnyen készíthetők egyedi hajók, mert a maganyag kiválóan használható a hajó formájának megadására. Jellemzően kétféle maganyagot használnak, a zártcellás műanyag habokat vagy a balzafát. A habot lehet táblában felhasználni, vagy az Easy-Plank vagy Strong-Plank módszernek megfelelően palánkok formájában.

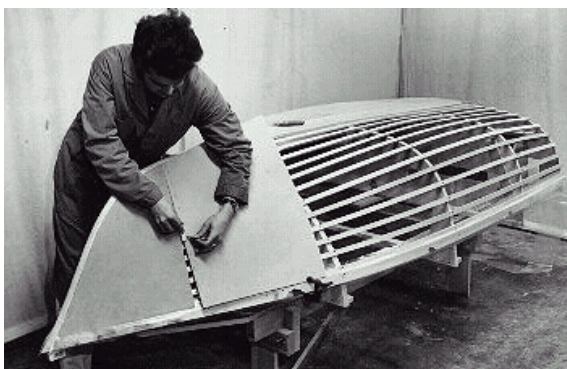
A táblás módszer menete hasonló az előzőekhez, de van néhány különbség, melyet a www.glenn-l.com oldalról származó képekkel mutatunk be. A bordákat itt nem teljes felületen kell belécezni, a lécek csak a tábláknak biztosítanak kellő alátámasztást. A lécköz a mag típusától és vastagságától függ. A bordákból tehát a maganyag és a külső laminát valamint a lécezés vastagságának megfelelő értéket kell visszamérni. A lécezés elkészítése után azokra a helyekre, ahová nem kell, hogy szendvicsmag kerüljön (pl. gerinc, koszorú, tönkcső-kivezetés, stb.) ugyanolyan vastagságú tömörfa betétet helyeznek el. Ez után következik a panelek beszabása, formázása. Az íves felületeken lehet hővel lágyítható és formázható habot használni, ami jobb minőséget ad, de lehet az irdalt habokkal vagy az irdalt balzafával is dolgozni. A sík részeken természetesen a sima táblákat használják, akár habból, akár balzából. Ha a mag megvan, a következő feladat az elemek rögzítése, melyre szintén több lehetőség is van.



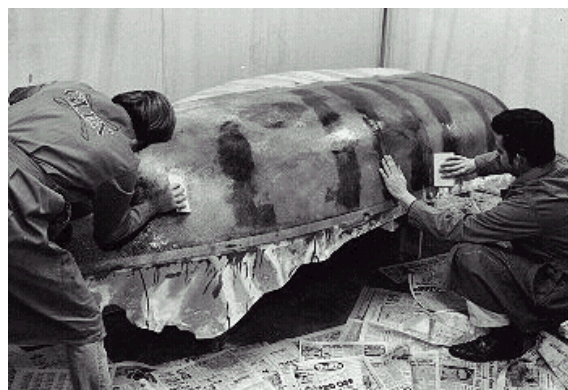
8.2.6. ábra: Szendvicsszerkezetű hajó építése hab táblákkal (a gerincnél látható a tömör fa betét)

Mindegyikre igaz, hogy oldhatónak kell lenni, hiszen a habot és a rálaminált külső réteget le kell tudni venni az építőállványról. Emiatt a habtáblákat vagy „odavarrják” a lécekhez, vagy belülről megcsavarozzák. A következő lépésben a fa betéteket, amelyek nem

maradnak a hajóban (nem a szerkezet részei) választóréteggel (általában fóliával) látják el. Ha irdalt habot használunk, akkor az ívelés miatt kialakuló réseket ki kell tölteni gittel. Ez után megkezdődhet a laminálás, kézi felrakóeljárással. Itt is, mint minden hasonló építési technikánál, a pozitív formák laminálásánál nagyon kell vigyázni arra, hogy a laminát felülete a lehető legsimább legyen, a görgözésnél ne kerüljenek bele gyűrődések, ráncok, mert a későbbi felületképzési munkát ez nagyon megnehezíti. Éppen ezért sokszor egy műanyag lappal le is szokták húzni a felületet.



8.2.7. ábra: A hab táblák rögzítése és az üvegszövet méretre szabása



8.2.8. ábra: A külső rétegek laminálása



8.2.9. ábra: Bölcső készítése és az élek rézselése belül

Ha elkészült és megkötött a külső laminát, akkor a hajót óvatosan meg lehet fordítani. Nagyon ügyelni kell azonban, hiszen a héj csak az egyik oldalán van meglaminálva, és emiatt még nagy deformációkra képes (nem kész a szendvics-szerkezet). Ezért a megfordítás után egy olyan bölcsőbe kell tenni a félkész héjat, ami biztosítja a megfelelő alaktartást. Mielőtt a belső laminátot elkészítik, ellenőrizni és szükség esetén korrigálni kell a hajó állásán annak érdekében, hogy a testben ne legyen elcsavarodás.

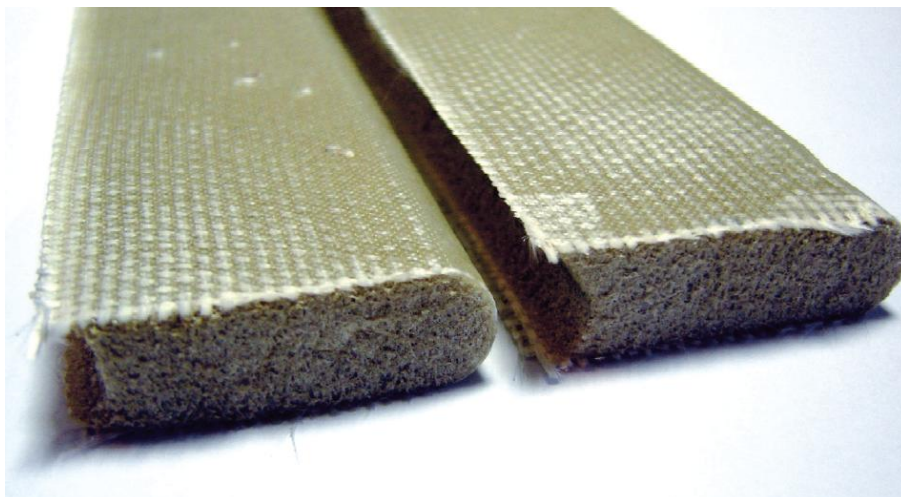
Ha az alak rendben van, akkor ki kell szedni a fa betéteket, a hab-mag éleit le kell ferdére reszelni (rézselni), majd le lehet laminálni a belső oldalt is. Hasonló módszerrel elkészíthető a hajó fedélzete is, majd a belső munkák a szokásos technikákkal.



8.2.10. ábra: A belső laminát elkészítése kézi laminálással

Az Easy-Plank® és a Strong-Plank® módszerek lényegében azonosak, az alapanyagban van egy kis különbség. A magyar fejlesztésű Easy-Plank® különböző méretű PVC hab palánkokból áll, melyet egy réteg vékony üvegszövet borít annak 3 oldalán. A negyedik oldal íves felülete segít a másik palánkhoz jobban illeszkedni, ahogy ezt a Strip Plank módszernél is említettük már. Ezzel szemben a Strong-Plank® téglalap keresztmetszetű palánkjai minden oldalról gyárilag több réteg tömör lamináttal vannak körbevéve, amelyek így sokkal merevebb léceket alkotnak. Mindkét kialakítás célja, hogy az íves felületre a táblák és lécezések helyett könnyebben lehessen felhordani a hab-magot. A hab magában viszont nem lenne elég szilárd ahhoz, hogy egy szokásos távolságra elhelyezett bordavázon kiadja a hajó szép íveit, ezért van szükség valamilyen merevítésre, amit a laminát biztosít. Ezzel az alapanyaggal hőformázás nélkül lehet kellően szép felületet létrehozni egy íves bordavonalú hajó esetén is, mégpedig a hagyományos palánkos technikához hasonló módon. A bordaváz a korábban elmondottak szerint készül, belécezni nem kell, csak a borda-ívekhez igazodó szélességű Easy-Plank® vagy Strong-Plank® palánkokat kell felvinni. Akármelyikkel dolgozunk, a felrakás után jöhet a külső laminátrétegek felvitele, a gittelés-csiszolás fázisai, a héj megfordítása és a belső laminát kialakítása. Általánosságban elmondható, szendvics-szerkezetű hajó építésénél a palánkos módszerek az íves formákhoz (jellemzően vitorlások), a táblás alapanyag a sarkos formájú hajókhoz (sikló motorosok) passzol jobban.

Egy további módszer az egyedi gyártású szendvics-szerkezetekre a lécezett külhéj készítésének továbbvitt változata azzal, hogy a héj két oldalát vékonyabb vagy vastagabb lamináttal látják el. Ezt a módszert sokszor alkalmazzák ősminta készítésére is, akkor olcsóbb fenyőfa magot használnak. Ha azonban az ősmintából hajó is lesz, akkor célszerű nemesebb vörös cédrust használni.



8.2.11. ábra: Easy-Plank® és a belőle készített csónak

9. ÁBRAJEGYZÉK

2.1.1. ábra: Vízkiszorításos motoros és vitorlás kishajó	9
2.1.2. ábra: Sikló vitorlás és motoros	9
2.1.3. ábra: Tipikus motor-vitorlások.....	10
2.1.4. ábra: Vitorlás trimarán verseny- és túraváltozatban.....	10
2.1.5. ábra: Katamarán túramotoros flybridge-el és offshore versenykatamarán	10
2.1.6. ábra: RIB-ek	11
2.2.1. ábra: Tőkesúlyos vitorlás felépítése	12
2.2.2. ábra: Klasszikus fa túrajolle kívülről és belülről.....	12
2.2.3. ábra: Lobster és runabout típusú hajók	13
2.2.4. ábra: Motoros flybridge-el	13
2.3.1. ábra: A hidrodinamikus felhajtóerő részaránya a Froude-szám függvényében	14
2.3.2. ábra: Kishajók üzemállapotai	15
3.1.1. ábra: A haladási irányok megnevezése és a sebességvektorok	16
3.1.2. ábra: A vitorlášajón keletkező erők I.	17
3.1.3. ábra: A vitorlášajón keletkező erők II.	18
3.2.1. ábra: A dőlés hatása a kiegyensúlyozottságra	19
3.2.2. ábra: A „lead” meghatározása	21
3.3.1. ábra: Erők motoroson kis sebességnél	22
3.3.2. ábra: Sikló hajón keletkező erők	23
4.1.1. ábra: Túravitorlás gerincvonala.....	25
4.1.2. ábra: Versenyvitorlás gerincvonala.....	25
4.1.3. ábra: Vízkiszorításos túramotoros gerincvonala	26
4.1.4. ábra: Sikló motoros gerincvonala.....	26
4.1.5. ábra: Nagysebességű hajó lépcsős gerince	26
4.1.6. ábra: Tükör nélküli (kenu-) far.....	26
4.1.7. ábra: A fartúlnyúlás és a tükör viszonya	27
4.1.8. ábra: Vitorlások jellegzetes farkialakításai	27
4.1.9. ábra: Motorosok farkialakításai.....	28
4.1.10. ábra: Klipper orr	28
4.1.11. ábra: Kanál-orr változatai (rövid, hosszú, alul, közepen és felül görbülő változatok)	28
4.1.12. ábra: Katamaránok orrkialakítása.....	29

4.1.13. ábra: Vitorlások függőleges orrtőkével	29
4.1.14. ábra: Motorosok orrkialakításai.....	29
4.1.15. ábra: Sarkos orrtőkék.....	30
4.1.16. ábra: Íves fedélzetű vitorlások (klasszikus és modernebb)	30
4.1.17. ábra: Egyenes fedélzetvonal	30
4.1.18. ábra: Fordított fedélzethajlással rendelkező motoros	30
4.1.19. ábra: S alakú fedélzetszél	30
4.1.20. ábra: Kerek és íves-V bordák	31
4.1.21. ábra: Homorú bordák.....	31
4.1.22. ábra: U bordák	32
4.1.23. ábra: Kieső bordák.....	32
4.1.24. ábra: Sarkos vitorlás sík és ívelt fenékrésszel	32
4.1.25. ábra: Több éllel rendelkező sarkos vitorlás	32
4.1.26. ábra: Kerek bordájú modern vitorlás sarokéllal	33
4.1.27. ábra: Lapos fenekű sikló motoros, változó fenékhajlással, homorú orrbordákkal ..	33
4.1.28. ábra: Mérsékelt V motoros	34
4.1.29. ábra: Sikló motoros mély V bordákkal, siklólécekkel, konstans fenékfelhajlási szöggel	34
4.1.30. ábra: Vízkiszorításos és fél-sikló motorosok bordái	34
4.2.1. ábra: Vitorláhajó Reed-diagramja.....	36
4.2.2. ábra: A stabilizáló nyomatéki karok.....	37
4.2.3. ábra: U és kerek bordaforma hatása egyes hajógeometriai jellemzőkre	38
4.2.4. ábra: A pantokaréna különbsége kerek és U formánál	39
4.2.5. ábra: A szélesség hatása az η értékére.....	40
4.2.6. ábra: A hajóalak hatása a stabilitási diagramra	40
4.2.7. ábra: A szabadoldal hatása a Reed diagramra	41
4.2.8. ábra: A kajüttető és cockpit hatása	42
4.2.9. ábra: Régi és mai 60 lábás offshore versenyhajó, kicsi és lényegesen nagyobb kajüttetővel.....	43
4.2.10. ábra: A fedélzet szélesség/vízvonal szélesség arányának hatása.....	43
4.2.11. ábra: A verseny- és túraváltozat k , η és M_{st} diagramjai a dőlés függvényében.....	44
4.2.12. ábra: A tömeg hatása a kezdeti metacentrum helyzetére (balra a kisebb, jobbra a nagyobb tömegű hajó).....	45
4.2.13. ábra: A súlypont hatása egytestű és katamarán formánál.....	46

4.2.14. ábra: Különböző tökesúlyok és súlypontjaik	47
4.2.15. ábra: A stabilizáló nyomatéki karok aszimmetrikus tömegelrendezésnél	48
4.2.16. ábra: Sandbagger-ek	49
4.2.17. ábra: A legénység stabilizáló hatása egy magyar Libera-n	49
4.2.18. ábra: Billenthető tökesúly	50
4.2.19. ábra: Vízballaszt kialakítások	50
4.2.20. ábra: A legénység aszimmetrikus elhelyezkedésének hatása	51
4.2.21. ábra: Aszimmetrikus tömegeloszlás hatása a stabilitásra	52
4.2.22. ábra: STIX számítás táblázata egy vízballasztos (WB) hajóra	55
4.3.1. ábra: A hullámellenállás a Froude-szám függvényében	58
4.3.2. ábra: Vitorláhajó ellenállásának összetevői	59
4.3.3. ábra: Sikló motoros nedvesített felülete különböző sebességek mellett	60
4.3.4. ábra: A nedvesített felület változása a dőlésszög függvényében néhány vitorláhajó-típusnál	61
4.3.5. ábra: Kerek bordametszetű vitorlás vízvonalai megdőlt helyzetben is szimmetrikusak maradnak	62
4.3.6. ábra: CODE8-as vitorlás a jellegzetes sarokéllal	62
4.3.7. ábra: A hidraulikailag sima felülethez megengedhető legnagyobb relatív felületi érdesség	63
4.3.8. ábra: Optimális c_p és LCB értékek vitorlásoknál	65
4.3.9. ábra: A siklólécek és a lépcsős fenék	67
4.3.10. ábra: ...és hatása a nedvesített felületre	67
4.3.11. ábra: Lekerekített medersorú hajók fajlagos ellenállása a karcsúság függvényében	68
4.3.12. ábra: Telfer-tényező a Froude-szám függvényében, különböző hajóalakoknál	69
4.3.13. ábra: A fajlagos ellenállás a bemerült tükörfelület arányának függvényében	70
4.3.14. ábra: Trimlap egy motorcsónak tükrén	71
4.3.15. ábra: A súlypont optimális helye a minimális fajlagos ellenálláshoz	72
4.3.16. ábra: Chine-walking	73
4.3.17. ábra: A motoroson keletkező erők kanyarodáskor	74
4.3.18. ábra: Tervezési segédlet motorosok kialakításához	74
5.1.1. ábra: A vitorláhajók élessége különböző történelmi korokban	75
5.1.2. ábra: Klasszikus hosszúgerinces kedvtelési célú vitorlás	76
5.1.3. ábra: Rövid tőkével rendelkező klasszikus vitorlás	76
5.1.4. ábra: Vitorlás külön kormányval, de a testhez szervesen kapcsolódó tökesúllal	77

5.1.5. ábra: Vitorlás különálló, kis és nagy karcsúságú tőkesúllyal	77
5.1.6. ábra: Modern T és L tőkesúlyos hajó bulbával.....	77
5.2.1. ábra: Hagyományos tőkesúly	78
5.2.2. ábra: Kis és nagy karcsúságú bulbás tőkesúly.....	78
5.2.3. ábra: Szárnyas tőkesúly	79
5.2.4. ábra: Iker tőkesúlyos hajók.....	79
5.2.5. ábra: Tandem tőkesúly	80
5.2.6. ábra: Billenthető tőkesúly.....	80
5.2.7. ábra: Felhúzható, bulbás tőkesúly	81
5.2.8. ábra: Felhajtható tőkesúly.....	81
5.2.9. ábra: Szimpla, középen felhúzható uszony.....	82
5.2.10. ábra: Klasszikus jolle csap körül elfordítható uszonnal	82
5.2.11. ábra: Duplasvertes kishajó (Yxilon jolle).....	82
5.2.12. ábra:Uszony-tőkesúly	83
5.3.1. ábra: A nyomásmegoszlás egy NACA0012 profilkerülete mentén 6°-os állásszögnél	84
5.3.2. ábra: Nyomáseloszlás a profil mentén és véges szárnyon a hossz mentén	84
5.3.3. ábra: A szárnyon keletkező indukált örvények (két nézetben).....	85
5.3.4. ábra: Az indukált örvények keresztmetszetei (A kép a BME Áramlástan tanszékének szélcsatornájában készült, a fotót készítette: a szerző)	86
5.4.1. ábra: A tőkesúly jellemző méretei.....	87
5.4.2. ábra: Különböző NACA profilok alakja.....	88
5.5.1. ábra: A profil menti nyomáseloszlás változása a különböző profiloknál.....	89
5.5.2. ábra: A profilellenállás a felhajtóerő-tényező függvényében, különböző profilok esetén	90
5.5.3. ábra: A profilvastagság hatása az átesési szögre	91
5.5.4. ábra: Profil típus hatása az átesésre	91
5.5.5. ábra: Terelőlap egy America's Cup yacht tőkesúlyán.....	92
5.5.6. ábra: Terelőlapos tőkesúly profilja.....	93
5.5.7. ábra: A nyomáseloszlás alakulása a húrhossz mentén a terelőlap kitérített és kitérítetlen állapotában (63-012-es profil 5°-os állásszögben)	93
5.5.8. ábra: A felhajtóerő-tényező alakulása terelőlapos profiloknál	94
5.5.9. ábra: Az ellenálláserő-tényező változása terelőlapos profiloknál (Larsson).....	94
5.5.10. ábra: Heyman-féle terelőlapos profil.....	95
5.5.11. ábra: A c_L és c_D alakulása a karcsúság függvényében.....	96

5.5.12. ábra: A nyilazási szöghöz tartozó h_a/h_f (TR) értékek.....	97
5.5.13. ábra: A $c_{L\alpha}$ a nyilazási szög és a karcsúság függvényében	98
5.5.14. ábra: Az Australia II tőkesúlya.....	99
5.5.15. ábra: Tandem tőkesúly egy versenyhajón	100
5.5.16. ábra: A megkerülő áramlásból származó szárnyakon keletkező erők.....	102
5.6.1. ábra: A hossz/szélesség arányának hatása a bulba összellenállására	104
5.6.2. ábra: 16-es sorozatú profil a 0012-höz hasonlítva	104
5.6.3. ábra: Kör- és ellipszis keresztmetszetű bulbák	104
5.6.4. ábra: Egy America's Cup hajó bulbája a szárnyakkal.....	105
5.6.5. ábra: IMS jellegű bulbás tőkesúly	106
5.6.6. ábra: Egyedi, könnyen gyártható bulba kiteríthető felületekkel	106
5.6.7. ábra: Az alsó profilok szélesítésével a tömeg lefelé koncentrálható.....	107
7.1.1. ábra: A kompozitok szilárdságának összetevői.....	112
7.1.2. ábra: Tipikus laminát szakítódiaagram	113
7.1.3. ábra: Szálanyagok szakadási nyúlása	114
7.1.4. ábra: Szendvics-szerkezet hajlító terhelés alatt.....	115
7.1.5. ábra: Az izoftál poliésztergyanta kémiai felépítése.....	116
7.1.6. ábra: Poliészter gyanta alap- (balra) és kikötött állapotban (jobbra)	117
7.1.7. ábra: A vinilészter gyanta kémiai felépítése	118
7.1.8. ábra: Vinilészter gyanta alap- (balra) és kikötött állapotban (jobbra).....	118
7.1.9. ábra: Epoxi molekula szerkezete.....	119
7.1.10. ábra: Komplex epoxi molekula ideális kémiai szerkezete	119
7.1.11. ábra: Kikötött epoxigyanta felépítése.....	120
7.1.12. ábra: A gyanták mechanikai jellemzőinek összehasonlítása.....	121
7.1.13. ábra: Multiaxiális szövetek típusai.....	130
7.1.14. ábra: Irdalt és merev lemez PVC habok.....	131
7.1.15. ábra: Alumínium (balra) és Nomex méhsejt (jobbra), még tömbben	133
7.1.16. ábra: Balza maganyag 7.1.17. ábra: Coremat anyag	134
8.1.1. ábra: Az építőállványzat és rajta a bordaváz (balra), a belécezett és pozdorjalemezzel borított szerkezet (jobbra).....	135
8.1.2. ábra: Az ősminta szerkezete üvegszálás poliészter laminát bevonattal (balra) és sok gittelés-csiszolás fázis után (jobbra).....	136
8.1.3. ábra: A végleges felületképzés után elkészült ősminta	136
8.1.4. ábra: 5-tengelyes CNC maróval készített ősminták	137

8.1.5. ábra: Kishajó alsóhéj készítése 5-tengelyes CNC maróval	137
8.1.6. ábra: Kishajó elfordítható sablonja, acélszerkezet merevítéssel	138
8.1.7. ábra: A kézi felrakóeljárás vázlata.....	138
8.1.8. ábra: Alsóhéj kézi laminálása	139
8.1.9. ábra: A szóró eljárás lényege.....	140
8.1.10. ábra: Belső (balra) és külső keverésű szórópisztoly(jobbra).....	141
8.1.11. ábra: Szálszórás	141
8.1.12. ábra: A vákuumtechnika speciális rétegei	142
8.1.13. ábra: A SCRIMP eljárás vázlata.....	143
8.1.14. ábra: A gyantavezetés elemei	144
8.1.15. ábra: Szendvics-panel készítése infúzióval	144
8.1.16. ábra: A sablonba bekerültek a gyantavezetők a tépő-szövet és a száraz laminát fölé	145
8.1.17. ábra: A vákuumfóliát elhelyezik a sablonon	145
8.1.18. ábra: Bekötik a gyantabevezető csatornákat, majd elindítják az infúziót.....	145
8.1.19. ábra: A gyanta terjed egyik csatornától a másikig.....	145
8.1.20. ábra: Amint a gyanta elér egy újabb csatornát, az előzőt lezárják, azt meg kinyitják	145
8.1.21. ábra: A gyantát a sablon peremén elhelyezett csöveken keresztül szívják el.....	145
8.1.22. ábra: A teljes felület átítatódott	146
8.1.23. ábra: A kész hajótest (kikeményedés után)	146
8.1.24. ábra: Előimpregnált anyagok alkalmazása héjszerkezet készítéséhez	147
8.2.1. ábra: A C-Flex anyag.....	148
8.2.2. ábra: A legyártott építőbordák és az állványzat.....	149
8.2.3. ábra: Az elkészült vázszerkezet és az első réteg C-Flex felvitele	149
8.2.4. ábra: A teljes felület elkészült, el lehet kezdeni az átítatást	149
8.2.5. ábra: A kikötött C-Flex lelaminalható, majd következhet a gittelés-csiszolás.....	150
8.2.6. ábra: Szendvicsszerkezetű hajó építése hab táblákkal (a gerincnél látható a tömör fa betét)	150
8.2.7. ábra: A hab táblák rögzítése és az üvegszövet méretre szabása	151
8.2.8. ábra: A külső rétegek laminálása.....	151
8.2.9. ábra: Bölcső készítése és az élek rézselése belül.....	151
8.2.10. ábra: A belső laminát elkészítése kézi laminálással	152
8.2.11. ábra: Easy-Plank® és a belőle készített csónak.....	153

10. IRODALOMJEGYZÉK

2. fejezet

- L. Larsson, R. E. Eliasson, *Principles of Yacht Design*, 2nd edition, Adlard Coles Nautical, London, 2000;
M. Peters, *Peters On (Fast) Powerboats I. és II.*, Professional Boatbuilder Magazin, 126-127. szám, 2010;

3. fejezet

- 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;

4. fejezet

- Becske Ö., Kishajók szerkesztése és építése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974;
Benedek Z., Hajók I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1981;
MSZ EN ISO 12217-1,2,3 szabványok;
D. Gerr, *Nature of Boats*, International Marine, 1992;
P. van Oossanen és mások, *Hull Form Design for the Displacement to Semi-Displacement Speed Range*, Royal Institution of Naval Architects, Proceedings of 10th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST 2009, Athens, Greece; , letölthető: <http://www.oossanen.nl/news-articles/publications/>
Claughton, Wellicom, Sheno, *Sailing Yacht Design – Theory*, Addison Wesley Longman, 1998;
Claughton, Wellicom, Sheno, *Sailing Yacht Design – Practice*, Addison Wesley Longman, 1998;
M. Peters, *Peters On (Fast) Powerboats I. és II.*, Professional Boatbuilder Magazin, 126-127. szám, 2010;
P. van Oossanen, *Resistance prediction of small, high speed displacement vessels: State of the art*, letölthető: <http://www.oossanen.nl/news-articles/publications/>
D. L. Blount, J. A. McGrath, *Resistance characteristics of semi-displacement mega yacht hull forms*, Trans RINA, Vol 151, Part B2, Intl J Small Craft Tech, 2009 Jul-Dec
P. van Oossanen, *A method for the calculation of resistance and side force of sailing yachts*, letölthető: <http://www.oossanen.nl/news-articles/publications/>
P. van Oossanen, *Predicting the speed of sailing yachts*, letölthető: <http://www.oossanen.nl/news-articles/publications/>
L. Larsson, R. E. Eliasson, *Principles of Yacht Design*, 2nd edition, Adlard Coles Nautical, London, 2000;
S. Killing, D. Hunter, *Yacht Design Explained*, W. W. Norton & Company, New York, 1998;

5. fejezet

- C. A. Marchaj, *Aero- and Hydrodynamics of Sailing*, Adlard Coles Nautical, London, 1979;
L. Larsson, R. E. Eliasson, *Principles of Yacht Design*, 2nd edition, Adlard Coles Nautical, London, 2000;
S. Killing, D. Hunter, *Yacht Design Explained*, W. W. Norton & Company, New York, 1998;
Lajos T., Simongáti Gy. *A tökesúly áramlástana*, HAJÓ Magazin, 44. szám;
Simongáti Gy. *Tökesúly-variációk a sekély Balatonra – I. rész*, HAJÓ Magazin, 105. szám;
Simongáti Gy. *Tökesúly-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;

- P. van Oossanen, *Optimizing the performance of keels for sailing yachts*, letölthető:
<http://www.oossanen.nl/news-articles/publications/>
<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>
Claughton, Wellicom, Sheno, *Sailing Yacht Design – Theory*, Addison Wesley Longman, 1998;
Claughton, Wellicom, Sheno, *Sailing Yacht Design – Practice*, Addison Wesley Longman, 1998;

7. fejezet

- Claughton, Wellicom, Sheno, *Sailing Yacht Design – Theory*, Addison Wesley Longman Ltd., 1998.
Becske Ö., *Kishajók szerkesztése és építése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
Steward, R., M., *Boatbuilding Manual*, 4th edition, International Marine/McGraw-Hill, 1994.
Gerr, D., *The Nature of Boats*, International Marine/McGraw-Hill, 1995.
Gerr, D., *Boat Strength*, Adlars Cole Nautical, 2000.
Roberts, B., *The complete guide to metal boats*, International Marine/McGraw-Hill, 2001.
Gurit, *Gurit Guide to Composites*, www.gurit.com
www.jafholz.hu
www.sykestimber.co.uk

8. fejezet

- Gurit, *Gurit Guide to Composites*, www.gurit.com
Becske, Ö., Wágner, I., *Műanyag hajók és héjszerkezetek készítése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
www.mollicam.com
www.airtech.com
www.sintesfiberglass.com
www.easyplank.hu