

C) A SZÁRNYAS HAJÓK ELMÉLETE

1. A szárny felületek kialakítása

A szárnyas hajók víz alatti felületeinek kettős feladata van: egyrészt a lehető legkisebb ellenállás keltésével ki kell emelniük a hajótestet a víz felszíne fölé, másrészt a kiemelkedett helyzetben kellő kereszt- és hosszirányú stabilitást is kell biztosítaniuk, sőt ezt a szerepet már a kiemelkedés folyamán fokozatosan át kell venniük a hajótesttől. E kettős feladat betöltését alapvetően befolyásolja:

- a szárny, vagy szárnyak felületének és fő méreteinek célszerű megválasztása;
- a feladatnak leginkább megfelelő szárnyszelvény kiválasztása;
- a szárnyak száma, geometriai kialakítása, valamint egymáshoz és a hajó súlypontjához viszonyított helyzetük.

Ezek egyúttal a stabilizálás és a merülési mélység vezérlésének elvét is meghatározzák.

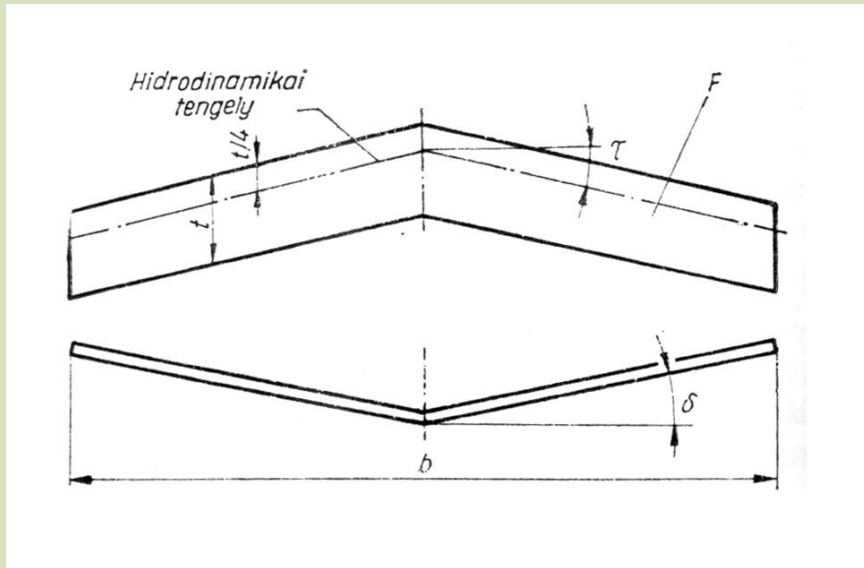
A hajó manőverképességére – tehát fordulékonyására, valamint a kiemelkedés és a leállás gyorsaságára- és a hullámokkal szembeni magatartásra különösen az utolsó pontban összefoglalt tényezők gyakorolnak döntő hatást.

a) Megnevezések, jelölések, a szükséges szárnyfelület nagysága

Egy szárnyfelület főbb geometriai jellemzőit a **70. ábra** jelöléseivel a következőkben foglalhatjuk össze:

- b a fesztávolság, vagy szárnyszélesség,
- t a szárny mélysége, ami az alkalmazott szelvény húrhosszával egyenlő,
- F a szárny alaprajzi területe,
- δ a V-állásszöge,
- τ a „nyílazás” szöge, ami a szárny középvonalára húzott merőleges és a hidrodinamikai tengely hajlásszögével egyenlő,
- $\Lambda = \frac{F}{b^2}$ az oldalviszony és
- $\lambda = \frac{b^2}{F}$ a szárny karcsúsága

A szárny felületének meghatározásakor abból a sebességből indulnak ki, amelyet a hajóval a leggazdaságosabb üzemi állapotban kívánnak elérni. Mivel kiemelkedett menetben a vízben keletkezett ellenállások egészének 70-80%-át a szárnyfelületek ébresztik, nyilvánvaló a törekvés minimális méretű felületek alkalmazására és az optimális felhajtóerő/ellenállás viszonyok elérésére legalább a hajó feladatkörének megfelelő gazdaságos üzemi sebességek tartományában.



70. ábra.
Jelölések

A szükséges szárnyfelület nagyságát a tervezési sebesség ismeretében a (4) képlet átalakításával számíthatjuk ki:

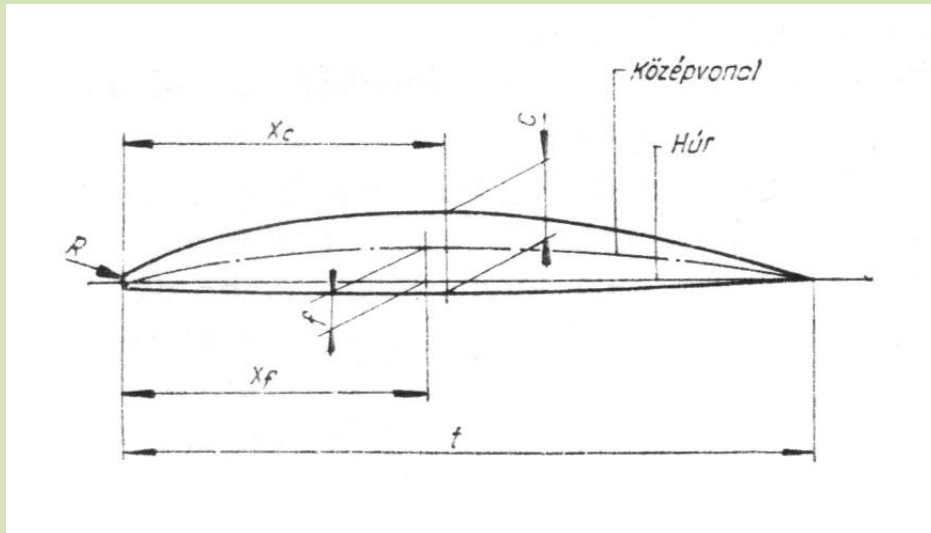
$$F_{szüks} = \frac{P_y}{\frac{\rho}{2} \cdot v_{terv}^2 \cdot c_y} [m^2] \quad (26)$$

aho $P_y = G$ az egész hajó súlya (mivel a szárnyak és egyéb vízbemerült részek elenyészően kicsiny vízkiszorításától kiemelkedett állapotban eltekinthetünk), v_{terv} az alapul vett sebesség és c_y a szárnymetszet alakjától és az állásszögtől függő felhajtóerőtényező.

Több szárny alkalmazása esetén az egyes felületek részarányát a hajó súlypontjától vett távolságuk szabja meg az emelőszabály szerint. A kellő stabilitás biztosítására általában minél szélesebb felületekre, azaz minél nagyobb fesztávra törekednek. Határt általában a hajótest szélessége állít, bár egyes elrendezéseknél (pl. a vízfelszín áttörő V-szárnyaknál) ezen túl is nyúlhat a szárny. A fesztávolság növelése az indukált ellenállás szempontjából is fontos, ugyanis ez a $\lambda = \frac{b^2}{F}$ karcsúság növekedésével csökken.

A c_y tényező végtelen kiterjedésű közegben csak a szelvény alakjától és az állásszögtől függ. Mivel a víz alatti szárnyak többé-kevésbé a felszín közelében, illetve közvetlenül alatta haladnak, ezeken kívül a felszín hatása is jelentkezik és

$$c_y = c_{y(\bar{h})} = f(\bar{h}, \alpha, \bar{c}, \bar{f}, \lambda, F_r)$$



71. ábra.
A szárnyszelvény geometriai jellemzői

b) A szárnyszelvények geometriai és hidrodinamikai jellemzői

Valamely szárnyszelvény hidrodinamikai jellemzőinek alakulását geometriai kialakítása határozza meg. A **71. ábra** jelöléseivel:

- t a szelvény húzhossza,
- f a középvonal íveltsége,
- x_f a legnagyobb ívmagasság helye,
- c a szelvény vastagsága,
- x_c a legnagyobb vastagság helye,
- R az orrgömbület sugara.

A geometriai jellemzőket általában a t húrhosszúság százalékában fejezik ki, és ilyenkor az előző jelölések $\bar{x}_f, \bar{f}, \bar{c}, \bar{x}_c$ -re változnak.

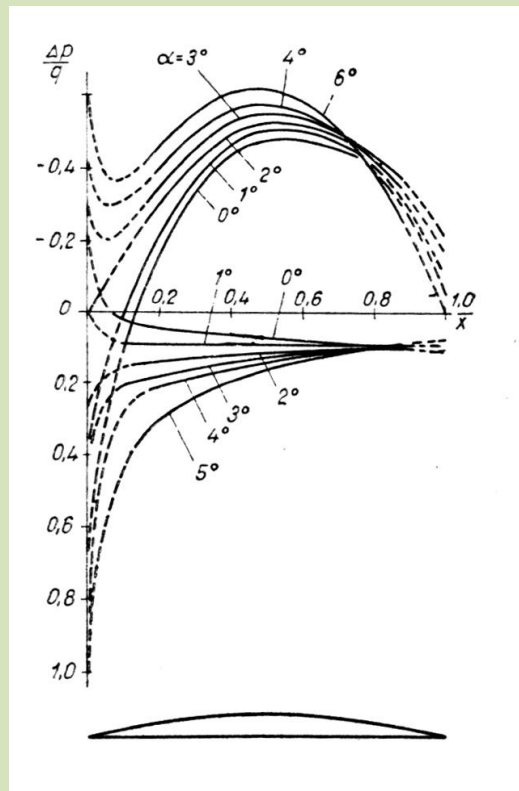
Az előző fejezetben láttuk, hogy a szárnyon az áramlásban körülötte beálló nyomásváltozások eredményeképpen jönnek létre erők. Az erők meghatározásához az áramlásban a test közelében uralkodó p nyomásnak a testtől távolabbi p_∞ nyomástól való eltérését kell ismerni. Ezt a nyomáskülönbséget a testtől távolabb uralkodó v_∞ sebesség dinamikus nyomáshoz viszonyítjuk:

$$\frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} \cdot v_\infty^2} = \frac{\Delta p}{q}$$

A test felületének különböző pontjai felett a $\frac{\Delta p}{q}$ érték független a tőle távolabb uralkodó sebesség nagyságától és egyedül a szelvény alakjától függ.

Az áramlás belsejében a nyomás $p = p_l + \gamma z + \frac{\rho}{2} v_\infty^2$ -nél nem lehet nagyobb, így $\frac{\Delta p}{q}$ sem lehet 1-nél nagyobb.

A testek torlópontjában azonban ezt az értéket mindig eléri. A görbült felület felett felgyorsuló áramlás nyomáscsökkenése (szívása) ezzel szemben a torlónyomás értékének sokszorosa is lehet, tehát $\frac{\Delta p}{q}$ nagy negatív szám is lehet.



72. ábra.
Nyomáseloszlás a húrhossz mentén

A **72. ábrán** egy 3,5 % -os vastagságú, körszelet alakú szelvény körül különböző állásszögek esetén mérésrel meghatározott nyomáseloszlásokat látunk. A függőleges tengelyen a $\frac{\Delta p}{q}$ viszonyt mérték fel, azonban a megszokottól eltérően: a pozitív értékeket lefelé, a negatív értékeket pedig felfelé. Így a szárny alatti nyomásnövekedés a diagram alsó részére, a szárny feletti nyomáscsökkenés pedig a felső részre kerül, szemléltetve a valóságos helyzetét.

Megfigyelhetjük, hogy az alsó görbék a $\frac{\Delta p}{q} = +1$ értéket minden állásszögnél eléri. A görbék menete körülbelül a szelvény alakját követi és a legnagyobb nyomáscsökkenés a legvastagabb hely fölött, a húrhossz közepe táján van, jelezve az áramlási sebesség maximumának a helyét. Nagyobb állásszögek esetén a belépőélnél is alakul ki szíváscsúcs, mert a torlópont a szelvény alsó részére kerül és az áramlás a belépőél megkerülése közben erősen felgyorsul. Ez a szíváscsúcs lényegesen nagyobb lehet a legvastagabb hely felett mérhetőnél.

A nyomásgörbék területe a szelvény alapvonalára merőleges normálerővel, ill. az erre jellemző normálerőtényezővel arányos:

$$c_n = \frac{1}{q} \cdot \int_0^1 \Delta p \, dx$$

és mivel kis állásszögekről van szó, a normálerő jó közelítéssel a felhajtóerővel egyenlőnek vehető, így :

$$c_n \approx c_y$$

A nyomásgörbék területéből érdekes megállapítást tehetünk a hidrodinamikai felhajtóerőre vonatkozólag. Az egész felhajtóerő ugyanis 2/3-ad részben a szárny feletti nyomáscsökkenés, 1/3-ad részben pedig az alatta fellépő nyomásnövekedés eredménye. A szelvény feletti áramlás zavartalansága tehát különösen fontos.

A görbék területe és ezzel a felhajtóerőtényező bizonyos határig az állásszöggel arányosan változik. A lineáris növekedés végén, a maximális $c_{y \max}$ felhajtóerőtényező elérése után c_y visszaesik egy kb. állandó értékre. Ennek az az oka, hogy az áramlás a $c_{y \max}$ -hoz tartozó *kritikus állásszög* elérésekor leválik a szárny felületéről és örvények keletkeznek.

Kis állásszögek esetén a szárny ellenállása gyakorlatilag egyenlő a felület súrlódási ellenállásával (2) és (2a).

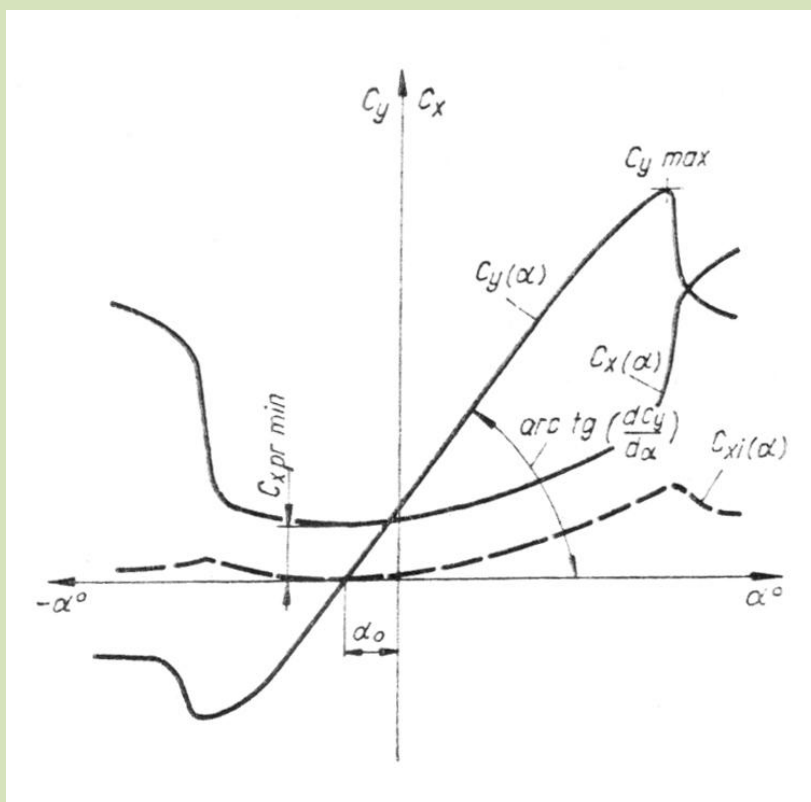
A véges vastagság figyelembevételével a legkisebb ellenállástényező $\bar{c} = 0,25$ vastagságviszonyú szelvényeknél $4 \cdot 10^5$ Reynolds-számmal:

$$c_{x \min} = 0,0046 + 0,044\bar{c} + 0,48\bar{c}^3$$

vagy *Hoerner* szerint a sík lap ellenállástényezőjéhez viszonyítva:

$$\frac{c_{x \min}}{c_{x \text{ sík lap}}} = 1 + 2\bar{c} + 60\bar{c}^4$$

A $c_{x \text{ pr}}$ profilellenállási tényező kis állásszögtartományon belül állandónak tekinthető, míg a leválást megelőző örvények keletkezése nagyobb állásszögeknél erősen megnöveli. Véges – tehát valóságos – szárnyak esetében természetesen ehhez még az indukált ellenállás is hozzáadódik, amely c_y^2 -el változva ugyancsak az állásszög függvénye (**73. ábra**).



73. ábra.

A szárny hidrodinamikai jellemzői

A szárnyas hajózást az teszi lehetővé, hogy a felhajtóerő a szokásos kis állásszögek mellett az ellenállás sokszorososa. Míg pl. a **72. ábrán** nyomáseloszlásával ábrázolt körszelet alakú szelvény felhajtóerőtényezője $\alpha = 2^\circ$ állásszögnél $c_y = 0,16$, addig profilellenállása $c_{xpr} = 0,0069$, tehát két egész nagyságrenddel kisebb. Ha ehhez az indukált ellenállási tényezőt is hozzáadjuk, akkor a c_x/c_y viszony, a *siklószám*:

$$\varepsilon = 0,06 - 0,10$$

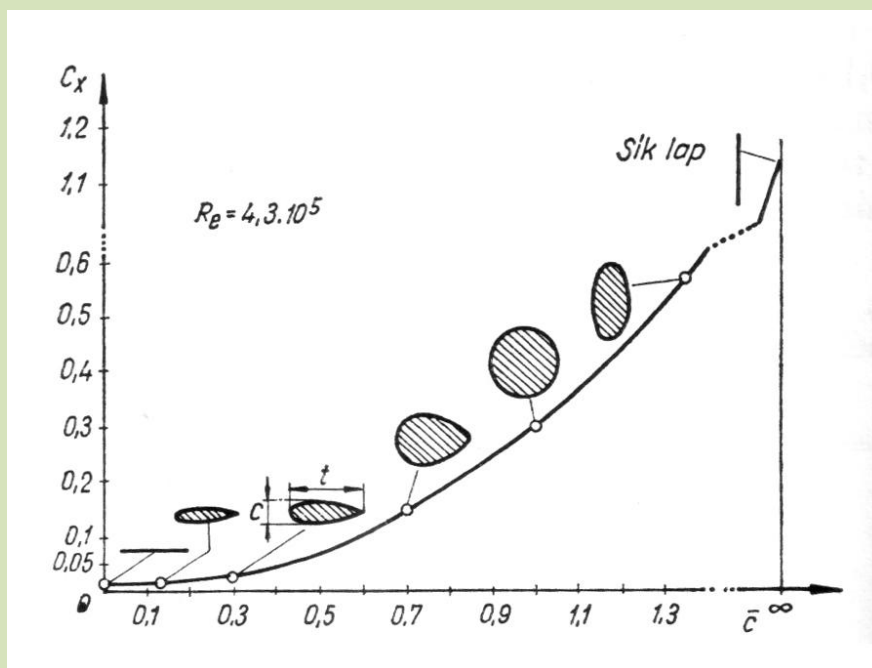
A $c_y = f(\alpha)$ diagramból (**73. ábra**) a szárnyszelvénynek még néhány általános jellemzőjét leolvashatjuk.

$\frac{dc_y}{d\alpha} = a$ a c_y görbe meredeksége. Ha α -t nem ívmértékben adják meg, akkor $a = \frac{dc_y}{d\alpha} \cdot 57,3^\circ$

α_0 a $c_y = 0$ -hoz tartozó állásszög, amely szimmetrikus szelvényeknél 0° , íveltekknél pedig negatív szög. Vastag, ívelt szelvényeknél a Reynolds-szám hatása α_0 értékére nagy, a szárnyas hajókon alkalmazott igen vékony szelvényeknél azonban függetlennek tekinthető a Re-számtól és csupán az íveltséggel változik.

η a profilhatásfok. Elméleti vékonyságú szelvényekre súrlódásmentes áramlásban $a = 2\eta\pi$. Véges vastagságú szelvényeknél és valóságos viszkozú sközegben a profilhatásfok $\eta = a/2\pi$. Értéke általában 0,8-0,9, de a Reynolds-számmal változik. Ha a szelvény $\bar{c} = c/t$ vastagságviszonya nem túlságosan nagy, akkor $1,5 - 2 \cdot 10^6$ Re-számnál $\eta = 1,0$ sőt, egynél nagyobb is lehet.

A közeg viszkozitásának a Reynolds-számban és a g nehézségi gyorsulásnak a Froude-számban kifejezésre jutó hatása a szárnyas hajók üzemi sebességeinél, illetve az alkalmazott kis c_y tényezők mellett elhanyagolható. A B) fejezet c) pontban ismertetett sekélyvízi jelenséget – mint már ott megállapítottuk- a felhajtóerő és az ellenállás szempontjából figyelmen kívül hagyhatjuk. A Reynolds-szám nagysága nagy állásszögek mellett a szelvény c_y tényezőjére és elsősorban a $c_{y \max}$ alakulására gyakorol hatást, de a szárnyas hajók rendes üzemi viszonyai között ezeket az értékeket nem éri el. A Re-szám ellenállásra gyakorolt hatásától azonban már nem tekinthetünk el, mert a szárny ellenállásának tekintélyes részét éppen a Reynolds-számtól függő súrlódási ellenállás képezi.



74. ábra.

A szelvény viszonylagos vastagságának hatása az ellenállásra

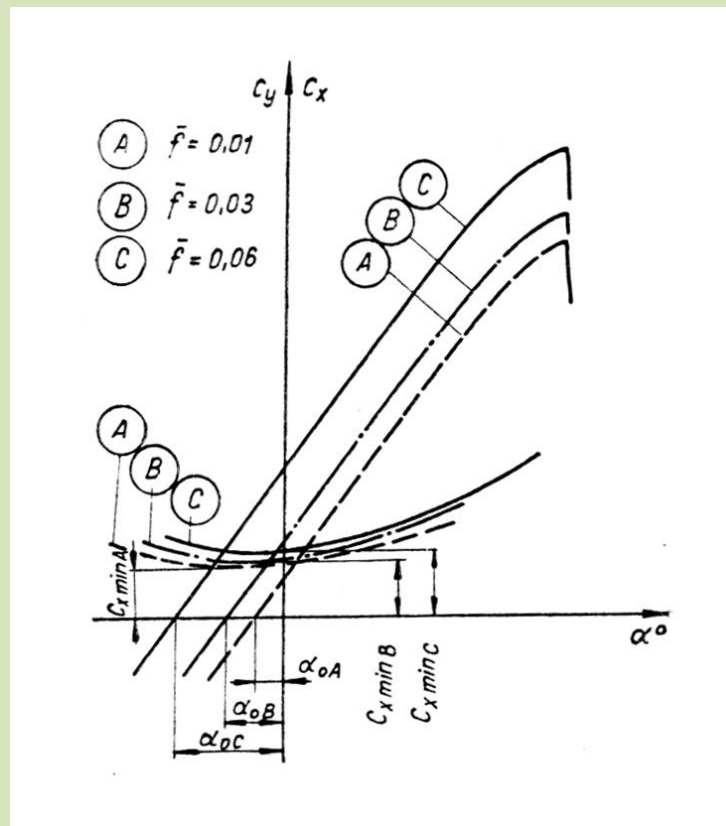
A felhajtóerő-görbe meredeksége $\frac{dc_y}{d\alpha}$, a nulla- felhajtóerőhöz tartozó állásszög (α_0) nagysága és az alaki ellenállás alakulása a szelvény geometriai jellemzőitől: a \bar{c} vastagságviszonytól, az \bar{f} íveltségtől, valamint az \bar{x}_c és \bar{x}_f értékektől függ.

A \bar{c} vastagságviszony kis állásszögek mellett elsősorban az ellenállásra gyakorol hatást. Legkisebb ellenállása a lapjával párhuzamosan megfújt sík leplnek van. Ezen kizárólag súrlódási ellenállás keletkezik, mert körülötte nem alakul ki leváláshoz és örvényképződéshez vezető nyomáseloszlás.

Az alaki ellenállás $\frac{c}{t}$ vastagságviszony növekedésével egyre nő és maximumát a lapjára merőlegesen megfújt sík lapnál éri el (74. ábra). ekkor viszont a súrlódási ellenállás tűnik el és kizárólag örvények okozta alaki-ellenállás keletkezik.

Kis állásszögek esetén az adott állásszöggel elérhető felhajtóerőtényező a vastagság növekedésétől függetlennek tekinthető. \bar{c} növekedésével azonban az elérhető $c_{y \max}$ maximális felhajtóerőtényező bizonyos határig növekszik.

Az ívelt szelvények felhajtóerő szempontjából kedvezőbbek a szimmetrikusoknál. A felhajtóerőtényező változását az íveltség növekedésével a **75. ábra** mutatja be három azonos vastagságú, de különböző íveltségű szelvényen.



75. ábra.

Azonos vastagságú, de különféle íveltségű szelvények

Az íveltség növelésével az elérhető maximális felhajtóerőtényező nő. Hasonlóan: adott állásszöggel íveltebb szelvény nagyobb c_y -t ér el, mint a kevésbé ívelt. Így a c_y görbe nagyobb \bar{f} -nél önmagával párhuzamosan a kisebb állásszögek felé tolódik el, a c_y egyidejű növekedésével. Ez az α_0 nulla-felhajtóerő állásszögnek negatív irányban való eltolódását jelenti. A legkisebb ellenállást az $\bar{f} = 0,0$ íveltségű szelvényenél látjuk, és a hozzátartozó állásszög $\alpha = 0^\circ$. A minimális c_x pr profilellenállási tényező az íveltséggel nő, és mind nagyobb c_y -nál található.

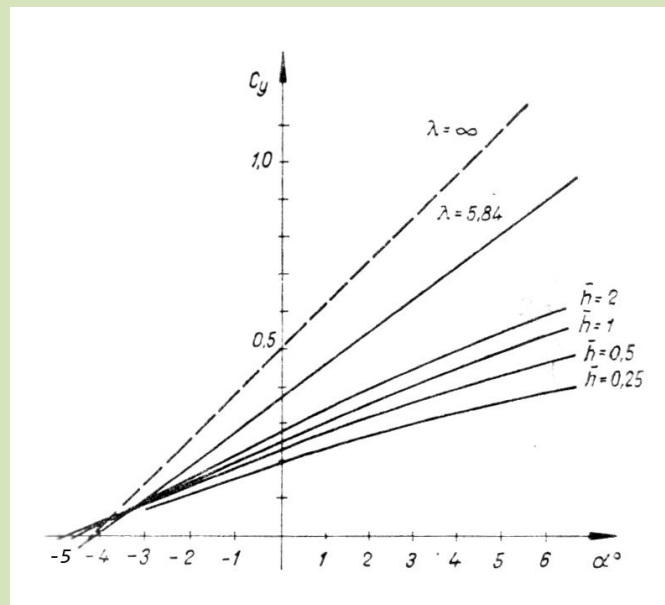
A közép vonal legnagyobb ívmagasságának helyére vonatkozólag nehéz optimális viszonyt megadni. Ha nagy $\frac{c_{y\max}}{c_{y\min}}$ arányt akarunk elérni, akkor a szelvény legnagyobb vastagságának kedvező helye a húr hossz 30%-ban van és kedvező, ha ekkor $\bar{x}_f = 0,4$. Ha a legnagyobb vastagság a húr hossz 50%-ban van, így az ívmagasság kedvező helye a húr hossz 45-50%-ába tolódik el.

A orr lekerekítési rádiuszának nagysága ugyan c_y nagy állásszögek melletti alakulása szempontjából fontos, azonban a víz alatti szárnyaknál a nagy állásszögek és a nagy c_y tényezők esetén fennálló kavitációveszély miatt minél élesebb belépőélre van szükség. Ugyanezért fontos a szelvény íveltségének és vastagságának húr irányú eloszlása is, mint erről a c) szakaszban szó lesz.

A szárny végességének hatása az indukált ellenállás keletkezésében jelentkezik. Az indukált állásszöggel csökkent effektív állásszöggel kisebb felhajtóerő érhető el, mint azonos szelvényű, de végtelen karcsúságú szárnyon. c_y annál kisebb adott állásszög mellett, mennél kisebb λ . Mivel az indukált ellenállási tényező $c_{xi} = \frac{c_y^2}{\pi \cdot \lambda}$, ezért $c_y = 0$ -val nem keletkezik indukált ellenállás. A szelvény α_0 null-felhajtóerő állásszöge így λ változásával nem változik meg, azonban ettől eltérő minden más állásszög mellett csökken az elérhető c_y nagysága. A $c_y(\alpha)$ görbe tehát csökkenő oldalviszonnyal laposodik. A véges fesztávú szárny esetére kapott a_∞ kifejezést át kell alakítanunk:

$$a = \frac{1}{\frac{1}{a_\infty} + \frac{1}{\pi\lambda}} \quad (27)$$

A vízfelszín közelsége a szárnyszelvény hidrodinamikai jellemzőinek alakulását módosítja. mint láttuk, hatása $\bar{h} < 3$ -nál nagyobb, mint a végtelen merülési viszonyoknak tekinthető $\bar{h} > 3$ esetében. A kísérletek és az elméleti eredmények azt mutatják, hogy $\frac{dc_y}{d\alpha}$ a felszín közelségének hatására csökken. A **76. ábrán** Schuster és Schwanecke kísérletei után ábrázoltuk egy $\bar{c} = 0,075$ vastagságviszonyú körszelet-szelvény felhajtóerőgörbéit különféle \bar{h} relatív merülések esetén. Az egy fok állásszögváltozásra jutó felhajtóerőváltozás kettős csökkenése jól látható; egyszer a $\lambda = 5,84$ -re csökkenő karcsúság hatására végtelen kiterjedésű közegben, majd ismét a felszín közelségének hatására \bar{h} függvényében. Látható, hogy míg pl. $\alpha = 2^\circ$ -os állásszöggel és $\lambda = \infty$ karcsúsággal $c_y = 0,72$ lenne elérhető, addig $\lambda = 5,84$ csak $c_y = 0,55$, de $\bar{h} = 2$ esetén ez az érték $c_y = 0,38$ -ra csökken. $\bar{h} = 0,25$ -ös relatív merülés esetén a felhajtóerőtényező már csak $c_y = 0,260$, az eredetinek alig 35%-a.



76. ábra.

A felhajtóerő ilyen csökkenése a felszín által az áramlás irányával szemben indukált járulékos sebesség következménye. Ez a szárny körüli áramlást lelassítja és az effektív állásszöget csökkenti. Hatására az összfelhajtóerőben megnő a nyomott oldal részaránya, a szívott oldalon viszont lecsökken. Mivel a felhajtóerő nagyobb részben a szívott oldalon beálló

nyomáscsökkenés eredménye, a felszín hatása a c_y csökkenésére vezet. Az áramkép a felszín hatására úgy alakul át, mintha a szelvény íveltsége a valóságosnál kisebb lenne. Ez, mint láttuk, az α_0 nullfelhajtóerő-állásszög csökkenését vonja maga után. Mivel azonban a felhajtóerővel együtt az indukált állásszög is csökken, az effektív állásszög viszonylag megnő. Ezzel az indukált ellenállás bizonyos mértékben csökken. A járulékos áramlás miatti kisebb sebesség következtében a profilellenállás is csökken, különösen a sebességtől erősen függő súrlódási ellenállásrész.

Schuster és Schwanecke mérései szerint a effektív íveltség csökkenése miatt bekövetkező effektív állásszögcsökkenés, valamint az indukált ellenállás csökkenése miatt bekövetkező effektív állásszögnövekedés kiegyenlíti egymást. A felhajtóerőcsökkenés okának ezzel az effektív áramlási sebesség felszín közelében beálló csökkenését tekintik.

Ezek a bonyolult és egymással kölcsönösen összefüggő hatások modellkísérletek útján vehetők figyelembe egyértelműen. Ezek hiányában a végtelen kiterjedésű közegre érvényes, általában szélcsatornában végzett mérésekkel kapott profiljellemzőket át kell számítani $\frac{c_{y(\bar{h})}}{c_y} = f(\bar{h})$ függvény ismeretében az adott relatív merülésre. Az átszámítás a Weinigtól származó összefüggésekkel nem ütközik nehézségbe. A (10) és (11) kifejezésekben c_y helyébe a modellkísérleti intézet által megadott értéket kell behelyettesítenünk, és $c_{y(\bar{h})}$ -val a kívánt merülésviszonyhoz tartozó felhajtóerőtényezőt kapjuk. Nagy merülésviszonynál:

$$c_{y(\bar{h})} = c_y \left(1 - \frac{c_y}{c_y + 8 \cdot \pi \cdot \bar{h}} \right)^2 \quad (28)$$

és kis $\frac{h}{t}$ -knél:

$$c_{y(\bar{h})} = c_y \left(1 - \frac{c_y}{(2 + \sqrt{2})c_y + 8 \cdot \pi \cdot \bar{h}} \right)^2 \quad (29)$$

A **77. ábrán** láthatjuk a $\frac{c_{y(\bar{h})}}{c_y}$ arányt különféle felhajtóerőtényezőkre.

A $c_y = f(\bar{h})$ függvényt Weinigen kívül mások is felállították. Az egyik függvény szerint:

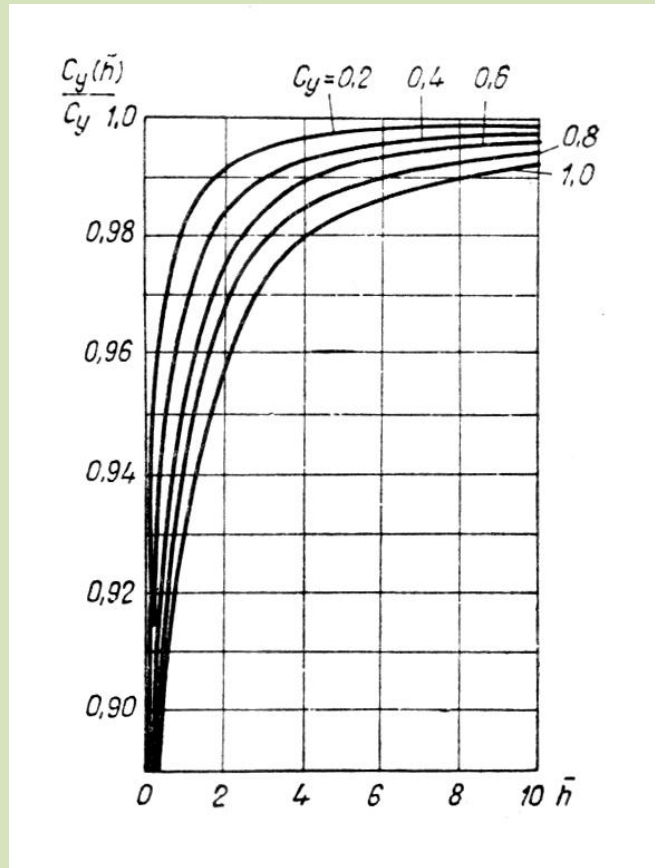
$$c_{y(\bar{h})} = c_y(0,44 + 0,56\varphi) - 1,06\bar{c}(1 - \varphi) \quad (30)$$

ahol $\varphi = 1 - e^{-2(\bar{h})^\chi}$ és ebben a χ az oldalviszonyra jellemző szám. *Tinney* a vízfelszint áttörő, V-szárnyakra ad összefüggést

$$c_{y(\bar{h})} = c_y(1 - 0,422 e^{-1,454 \bar{h}_k}) \quad (31)$$

ahol a \bar{h}_k a felszínhez viszonyítva ferdén elhelyezkedő szárny relatív merülésének közepes értéke.

Ezek az összefüggések valamely ismert szárnyszelvény alkalmazásakor használhatók fel. Pontos számításához és tetszőlegesen kialakított szelvényhez *Csudinov* vezette le a felhajtóerő összefüggéseit a felszínhatás figyelembevételével.



77. ábra.

A felhajtóerőtényező változása a relatív merülés függvényében

Csudinov a vékony profilok elméletéből indult ki. Szerinte $\lambda = \infty$ karcsúságú szárny igen vékony, és ezért középvonalával helyettesíthető szelvényének felhajtóerőtényezője, ha a középvonal parabolaívhez hasonló:

$$c_{y(\bar{h})} = \gamma \cdot \alpha_{\infty}(\alpha + \alpha_0 - \Delta\alpha_0) \quad (32)$$

A képletben $\alpha_{\infty} = \eta \cdot 2 \cdot \pi$ a felhajtóerő-görbe meredeksége végtelen kiterjedésű közegben, α a szárny állásszöge $\alpha_0 = \eta \cdot 2 \cdot \bar{f}$ a null felhajtóerőhöz tartozó állásszög és ez utóbbi korrekciója a falszínhatás miatt:

$$\Delta\alpha_0 = \eta \cdot \bar{c} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right)$$

A felszínhatást $\gamma = \gamma(\bar{h})$ veszi figyelembe:

$$\gamma(\bar{h}) = 1 - \frac{1}{2} e^{-2,37(\bar{h})^{2/3}} \quad (33)$$

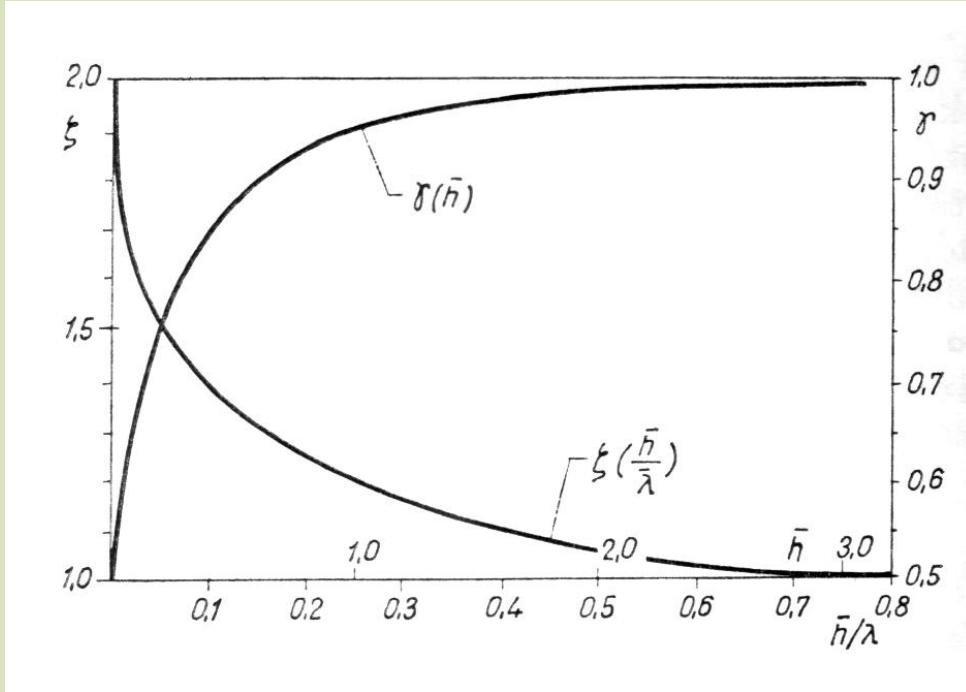
Ha $\bar{h} \rightarrow \infty$, akkor $\gamma \rightarrow 1$ (78. ábra) és így az ismert, sík lap felhajtóerejére vonatkozó:

$$c_y = \eta \cdot 2 \cdot \pi(\alpha + \alpha_0)$$

kifejezést kapjuk. $\bar{h} = 0$ esetén:

$$c_y = \eta \cdot \pi(\alpha - \alpha_0)$$

és itt természetesen α_0 a szárny nyomott oldalára vonatkozik.



78. ábra.

A $\gamma(\bar{h})$ és (\bar{h}/λ) függvények

Véges oldalviszonynál α mindössze a (\bar{h}) és a $(\frac{\bar{h}}{\lambda})$ kiegészítő tagokban különbözik a (27)-től, melyek a felszín által $c_y(\alpha)$ görbe meredekségére, a nullfelhajtóerő-állásszögre és az effektív állásszögváltozásra gyakorolt hatást veszik figyelembe. ezekkel:

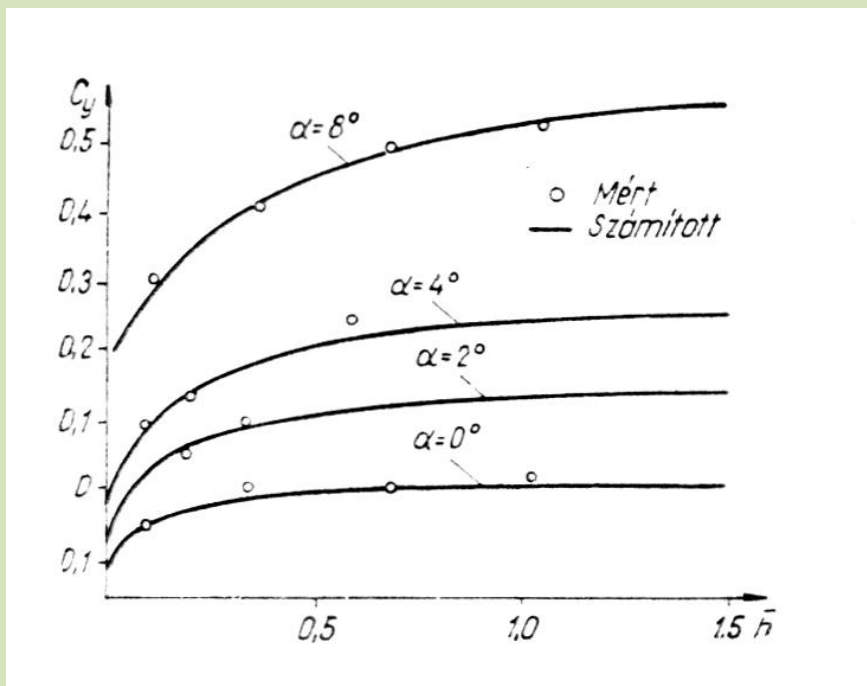
$$c_{y(\bar{h})} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma \cdot \alpha_{\infty}} + \frac{\zeta}{\pi \cdot \lambda}} (\alpha + \alpha_0 - \Delta\alpha_0) \quad (34)$$

ζ -nak a relatív merüléstől és az oldalviszonytól függő menetét a 78. ábrán látjuk:

$$\zeta(\bar{h}) = 1 + e^{-5,35(\frac{\bar{h}}{\lambda})^{2/3}} \quad (35)$$

A víz alatti szárnyak felhajtóerejének meghatározása Csudinov módszerével rendkívül egyszerű. Az előtervezésben megadott \bar{h} relatív merüléssel és λ karcsúsággal meghatározzuk a γ és ζ függvényeket. ezután kiszámítjuk α és $\Delta\alpha_0$ értékét, végül a (34) képlet segítségével kiszámítjuk a $c_{y(\bar{h})}$ felhajtóerőtényezőt.

A módszer pontosságára vonatkozólag a 79. ábra tesz bizonyosságot, amelyen a CAGI-nál Vladimirov és Frolov által által végzett mérések eredményét láthatjuk. kísérleteiket NACA 0009 szelvényű $\lambda = 6$ karcsúságú szárnyon végezték, és mint az ábra mutatja, a számított értékek jól egyeznek a kísérlet eredményeivel.



79. ábra.