

## C) A SZÁRNYAS HAJÓK ELMÉLETE

### c) A szárnyszelvény kiválasztásának szempontjai

A szárnyszelvényt egy sor –egymástól alig szétválasztható- hidrodinamikai és szilárdsági követelmény alapján választják ki vagy a modellkísérleti intézetek mérési eredményei (ilyen adatokat a göttingeni aerodinamikai kísérleti intézet, a CAGI Centralnűj Aero-Gidrodinamicseszkij Institut, a NACA stb. tett közzé), vagy számított szelvényjellemzők, esetleg előre megadott nyomáseloszlás alapján. Az előbbi Csudinov módszerével történhet, az utóbbira pedig Nishiyama dolgozott kis számítási módszert, ismertetése azonban túlmenne e könyv keretein.

A szelvények kiválasztásának főbb szempontjai:

1. A szárnynak a kehető legkisebb ellenállás mellett biztosítania kell a hajótest felemeléséhez szükséges felhajtóerőt. Siklós számának tehát kicsinynek kell lennie valamennyi számbajövő sebességnél, de elsősorban a hajó gazdaságos sebességének környezetében. Mivel a szárny ellenállása:  $W_{szárny} = c_x \cdot q \cdot F$  a felülettel egyenesen arányos, a lehetőleg kicsiny méretek elérése minél nagyobb felhajtóerőtényezőt kellene alkalmazni. Az alkalmazható  $c_y$  nagyságának azonban határai vannak. A jó ellenállásviszonyok elérésére az volna a legkedvezőbb, ha a szóba jövő szárnyszelvények közül a legjobb  $\frac{c_x}{c_y}$  viszonyút alkalmaznánk, természetesen ehhez a legjobb siklós számhoz tartozó állásszöggel. Ennek a lehetőségnek azonban az alkalmazható szelvényvastagság szab határt.

Nem alkalmazhatunk sem túlságosan vastag, sem pedig túlságosan vékony szelvényt, az előbbit a kavitáció veszélyének csökkentése érdekében, az utóbbit szilárdsági okokból. Nyilvánvaló, hogy adott szárnyfelület mellett az indukált ellenállás lehetőleg kis értékre szorítása érdekében minél nagyobb karcsúságra kell törekedni. A nagy karcsúsággal azonban kis húr hossz és ezzel kicsiny vastagság adódik. A szelvény magassága azonban igen fontos a szárny hajlítoszilárdsága szempontjából. Ha túlságosan vékony profilt alkalmazunk, akkor szilárdsági nehézségek adódhatnak elő. Ezen több támasztódúcs alkalmazásával segíthetnénk, de az ismét csak az ellenállás növekedéséhez vezetne.

2. Nagy sebességek esetén még akkor is számolni kell a kavitáció veszélyével, ha vékony szelvényeket alkalmazunk. A  $h$  merülési mélység növelése ilyen szempontból előnyös. Mélyen a vízfelszín alá merült, teljes merülésű szárnyakkal nagyobb sebességet lehet elérni, mint a felszín közelében mozgókkal. A kavitáció fellépte azonban a sebesség tetszés szerinti növelésének –hagyományos alakú szárnyszelvények alkalmazásakor- mindenféle szárnyrendszer esetén gátat emel.

Különösen jól látható ez, ha a víz alatti szárnyakhoz alkalmazható felhajtóerőtényező nagyságát keressük. Nyilvánvaló, hogy adott felhajtóerő elérése nem a felület növelése, hanem a nagy  $c_y$  alkalmazása útján gazdaságos. Nagy felhajtóerőtényező azonban vastagabb szelvényt és nagyobb állásszöveget jelent, azaz összegezve: a szárnyszelvény körül nagy  $\frac{\Delta p}{q}$

(mindenekelőtt nagy  $-\frac{\Delta p}{q}$ ) értékeket. A kavitáció keletkezésének viszont éppen ez a feltétele: a  $-\frac{\Delta p}{q}$  erős növekedése, illetve az ezzel jellemzett helyi nyomásnak a folyadék  $e$  telített gőznyomása alá süllyedése.

Walchner szerint a  $\sigma$  kavitációs szám és a  $c_y$  felhajtóerőtényező között a következő összefüggés áll fenn:

$$\sigma = 1,04 c_y + 0,213 c_y^2$$

Ez a kifejezés nem utal közvetlenül az állásszög, illetve a szelvényvastagság hatására. Az alkalmazható állásszög nagyságát ilyen szempontból az a követelmény korlátozza, hogy az áramlás lehetőség szerint érintőlegesen –tehát ütközés nélkül- fusson a belépőélnél a szárnyfelületre. A vastagság alsó határát –mint láttuk- szilárdsági követelmények szbják meg. A felső határra vonatkozólag *Van Manen* összefüggése alapján kapunk útbaigazítást. Szerinte körszelet szelvényekre az alábbi egyenlet érvényes:

$$\frac{c_y}{\bar{c}} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{\frac{\Delta p}{q}}{\bar{c}} - \frac{8}{\pi} \right) \quad (36)$$

Ha még éppen kavitációmentes áramlást tételezünk fel, akkor ebből az adott  $\bar{c}$  vastagságviszonyú szelvény  $c_y$  tényezője  $\frac{\Delta p}{q} = \sigma$  helyettesítéssel:

$$c_y = \frac{\pi \cdot \sigma}{2} - 4\bar{c} \quad (37)$$

A kavitációs számot a következő alakban fejezzük ki:

$$\sigma = \frac{p_l + \gamma \cdot z - e}{\frac{\rho}{2} \cdot v^2}$$

és ebből a maximális kavitációmentes sebesség:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{p_l + \gamma \cdot z - e}{\sigma}}$$

és ha  $\sigma$ -t a (37) egyenletből fejezzük ki, akkor a szelvény vastagságviszonyának hatása is érvényesül:

$$\sigma = \frac{2}{\pi} (c_y + 4\bar{c})$$

és így:

$$v = \sqrt{\frac{\pi}{\rho} \cdot \frac{p_l + \gamma \cdot z - e}{c_y + 4 \cdot \bar{c}}}$$

adott  $z$  mélységben azonban:

$$\frac{\pi}{\rho} \cdot p_l + \gamma \cdot z - e = C$$

azaz állandó és így a keresett sebesség végül:

$$v = \sqrt{\frac{C}{c_y + 4 \cdot \bar{c}}} \quad (38)$$

A megengedhető legnagyobb kavitációmentes  $c_y$  tényező a  $\bar{c}$  vastagságviszony és a  $v$  sebesség függvényében:

$$c_y = \frac{C}{v^2} - 4\bar{c} \quad (39)$$

A következő táblázatban különféle vastagságú szelvények megengedhető  $c_y$  értékeit számítottuk ki Van Manen képlete alapján  $z = 0,5m$  mélységre meghatározott kavitációs számokkal. mivel a levegő nyomása a felszínre:

$$p_l = 10\,330 \text{ kp/m}^2$$

és 15 C° hőmérsékleten a víz telített gőznyomása:

$$e = 174 \text{ kp/m}^2$$

az állandó:

$$C = \frac{\pi}{2} \cdot 10330 + 500 - 174 = 328$$

tehát:

$$c_y = \frac{328}{v^2} - 4\bar{c}$$

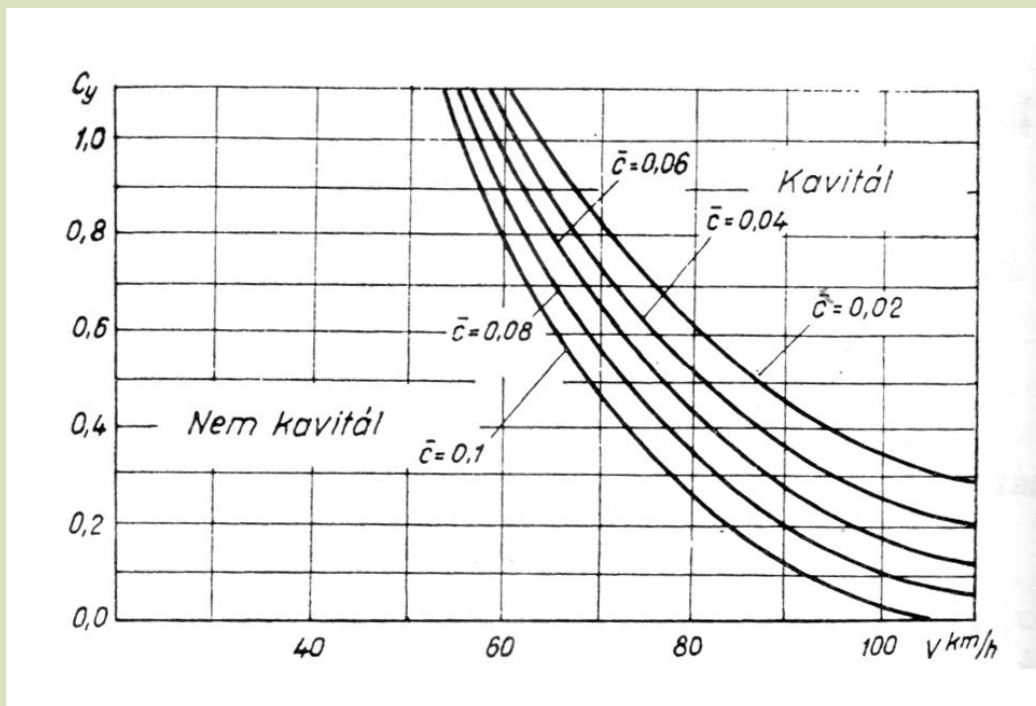
A legnagyobb kavitációmentes sebességet nyilván  $c_y = 0$ -val lehet elérni, így

$$v_{max} = \sqrt{\frac{C}{4\bar{c}}} = \frac{18,1}{\sqrt{4\bar{c}}}$$

$\bar{c}$	$v_{max}$ [km/h]	$v$					
		100 km/h		80 km/h		60 km/h	
		$c_y$	$c_y \cdot q$ [kp/m <sup>2</sup> ]	$c_y$	$c_y \cdot q$ [kp/m <sup>2</sup> ]	$c_y$	$c_y \cdot q$ [kp/m <sup>2</sup> ]
0,02	230	0,344	13 558	0,585	14 702	1,096	15 589
0,04	163	0,264	10 405	0,505	12 692	1,016	14 451
0,06	132	0,184	7 251	0,425	10 681	0,936	13 313
0,08	115	0,104	4 098	0,345	8 670	0,856	12 175
0,10	103	0,024	945	0,265	6 660	0,776	11 037

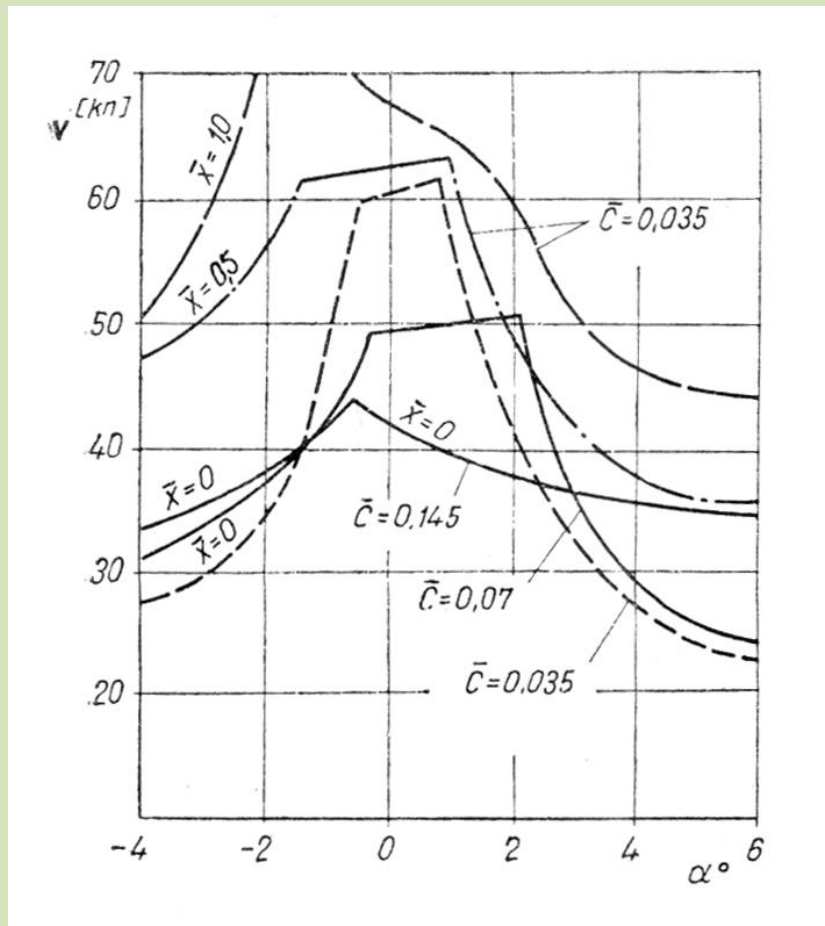
A táblázat adatait a **80. ábrán** grafikusan is ábrázoltuk. ebből kitűnik, hogy a kavitáció veszélye nélkül alkalmazható  $c_y$  rohamosan csökken a sebesség növekedésével, a kavitáció kezdetéhez tartozó sebesség pedig fordított arányban áll a szelvény vastagságviszonyával.

A **81. ábra** a kavitáció terjedését szemlélteti kísérletek alapján, a sebesség és az állásszög függvényében. Az  $\bar{x} = 0$  görbék azt az állapotot jellemzik, amikor a kavitáció még csak kialakulóban van a belépőél környékén.  $\bar{x} = 0,5$ -nél a húr hossz feléig,  $\bar{x} = 1,0$ -nál pedig már a teljes húr hosszra kiterjedt a kavitációs mező. A kavitáció kezdetéhez tartozó sebesség  $\alpha = \mp 2^\circ$  alatt mindhárom vastagságviszonynál közelítőleg állandó, de ennél nagyobb pozitív és negatív állásszögeknél erősen csökken.



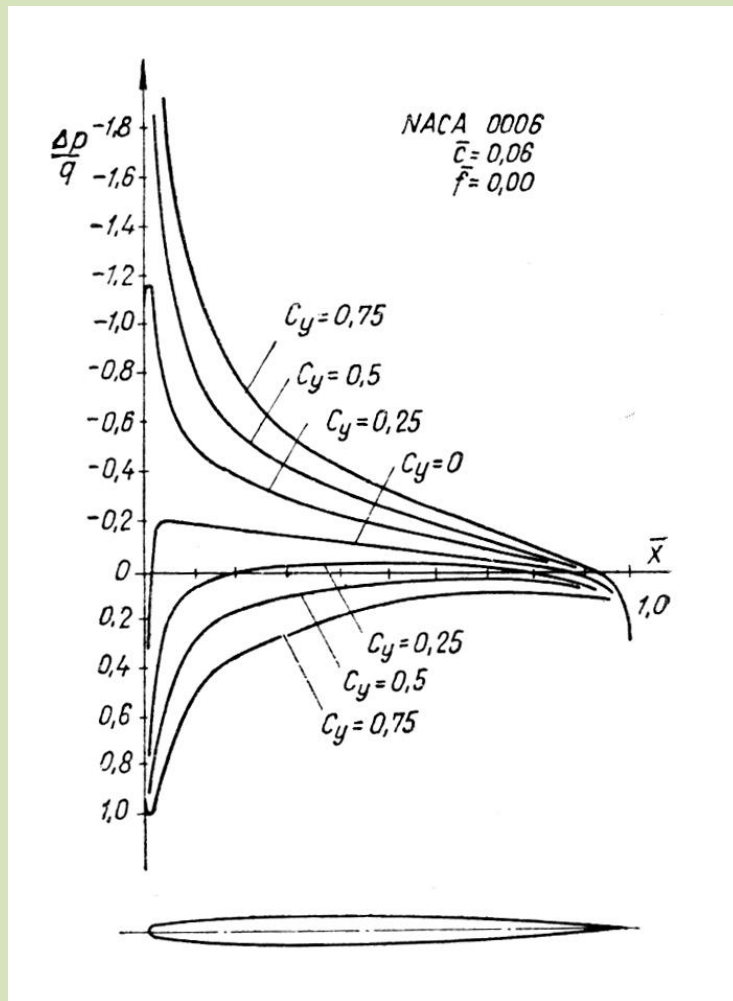
**80. ábra.**

**A kavitáció határa különféle vastagságviszonyú szelvények esetében**



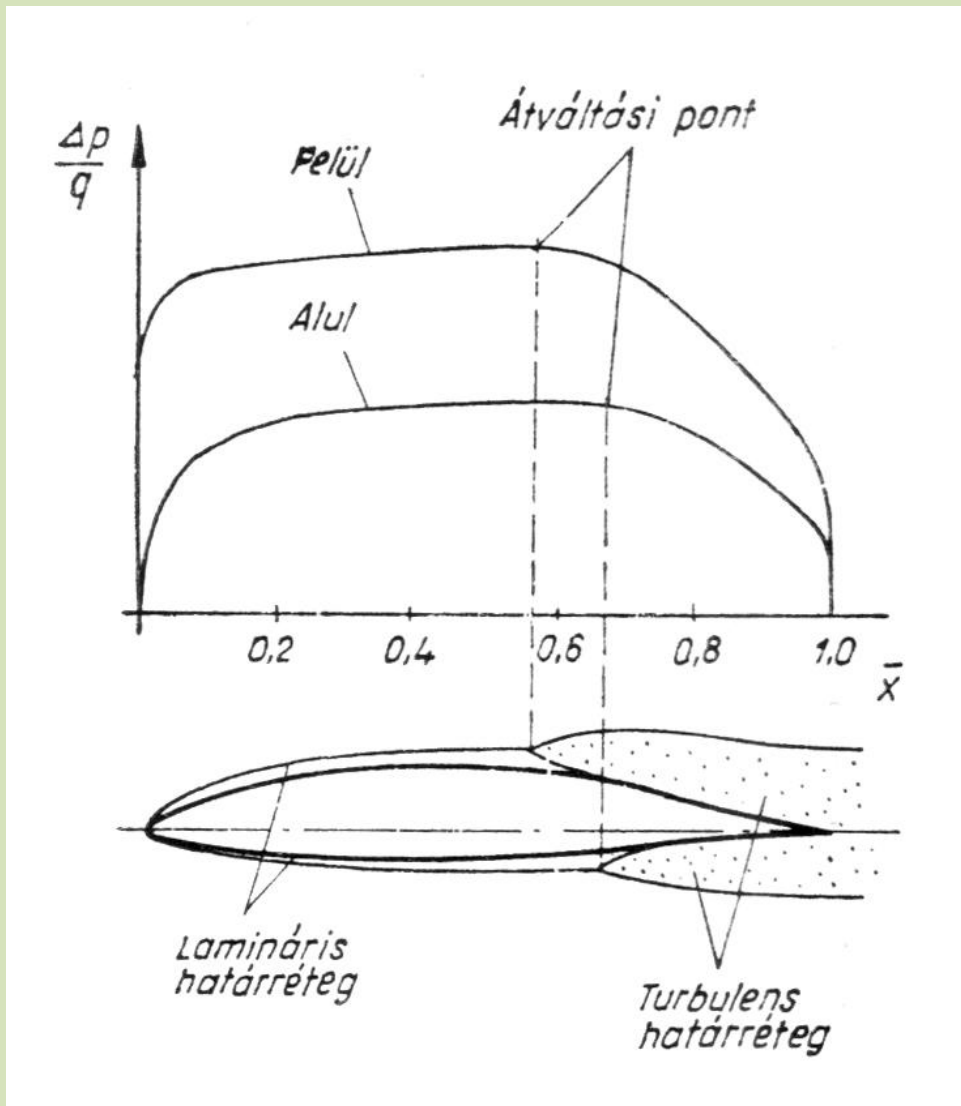
81. ábra.

3. A kavitáció keletkezését a  $\frac{\Delta p}{q}$  nyomásviszony húr hosszmenti eloszlása is befolyásolja. Az áramlás helyi sebességeinek változása a metszet körvonalának íveltségétől függ és a nyomásviszony alakulása szempontjából nem lényegtelen, hogy a szelvény vastagsága hogyan oszlik el a húr hossz mentén. A **82. ábra** a NACA 0006 szelvény nyomáseloszlásait mutatja be különböző állásszögeknél. A szelvény legnagyobb vastagsága meglehetősen elől, a húr hossz 30%-ában van. Az ábrán jól látható, hogy a  $c_y$  értékeknél, tehát nagy állásszögek esetén az ilyen szelvényekre jellemző szíváscsúcsok alakulnak ki, amelyek különösen kedvező feltételeket teremtenek a kavitáció számára. Az ilyen szelvények szárnyas hajókhoz nem alkalmasak. A körvonal viszonylag kis átalakításával már megfelelő nyomáseloszlást alakíthatunk ki. A szíváscsúcsok elkerülésére a legnagyobb vastagság helyét a húr hossz nagyobb százalékában kell hátrátolni úgy, hogy a szelvény mellső részén a körvonal laposan, enyhén emelkedve fusson. A sebesség így fokozatosan nő és az áramlásnak nem is kell olyan nagyon felgyorsulnia. Az ilyen profilok  $\frac{\Delta p}{q}$  görbéi az előbbieknél teltebbek és a korai kavitáció szempontjából veszélyes csúcsok nélkül szolgáltatják a felhajtóerőt (**83. ábra**).



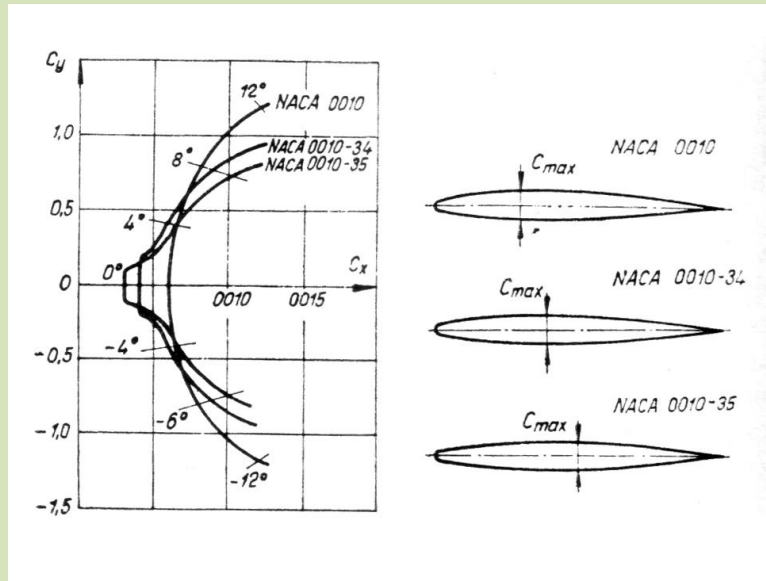
**82. ábra.**  
**Nyomáseloszlás a húr hossz mentén**

Ha a legnagyobb vastagság a belépőél közelében van, akkor a belépőél lekerekítési sugara kényszerűen nagy. Emiatt ezen a környéken nagy sebességek alakulnak ki. Ha a legnagyobb vastagság a fenti módon hátrább fekszik, akkor a belépőélt kisebb sugárral lehet lekerekíteni és élességét végeredményben csak gyártási feltételek szabják meg. A legkisebb lekerekítési sugár a szárny anyagától függően 1-2 mm lehet; igen nagy szilárdságú anyagoknál, amelyeknél az üzem közbeni deformáció valószínűsége kisebb, még ennél is kevesebb.



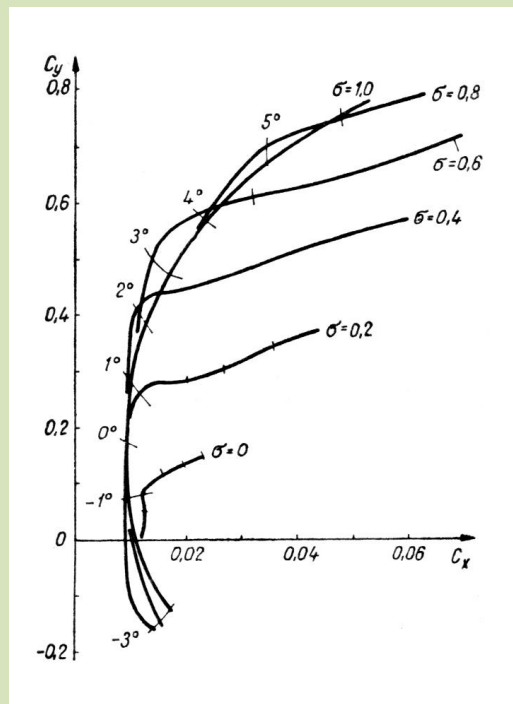
83. ábra.  
Nyomáseloszlás lamináris szelvényen

A legkedvezőbbek azok a szelvények, amelyek legnagyobb vastagsága a húrhossz 40%-ában, vagy hátrább van. Ezek még azzal az előnnyel is rendelkeznek, hogy mivel a nyomás az orrponttól kiindulva fokozatosan, hosszú szakaszon csökken, a szárnyfelület nagy része felett lamináris áramlás alakulhat ki. Mivel a lamináris határréteg súrlódási ellenállása kisebb, ez az összellenállás csökkenését okozza. Természetesen igen fontos az ellenállás szempontjából a legnagyobb vastagság mögötti rész is, és itt nem szabad hirtelen nyomásnövekedésnek fellépnie. Az így kialakított *lamináris szárnyszelvényeket* előszeretettel használják a hangsebességnél lassúbb repülőgépeknél is. Az a tulajdonságuk, amely ott hátrányosnak mondható, hogy ti. a legkedvezőbb  $\frac{c_x}{c_y}$  viszonyt viszonylag szűk állásszögtartományon belül, kis állásszögek mellett éri el, a szárnyas hajóknál a kavitációveszély miatt még előnyösebb is mondható (84. ábra).



**84. ábra.**  
Lamináris szelvények jellemzői

4. Kedvező nyomáseloszlással rendelkeznek a körszelet szelvények is. Walchener által különböző kavitáció-számoknál végzett ellenállás és felhajtóerőmérések eredményeit látjuk a **85. ábrán**. Walchner úgy találta, hogy a  $\sigma = 5\bar{c}$  értéknél körszelet szelvényeken már észrevehető mértéket ölt a kavitáció.



**85. ábra.**  
A felhajtóerő csökkenése a kavitáció hatására

Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy a kavitációmentesen kialakított szárnyak felhajtóerőtényezője viszonylag szűk határok között mozoghat és a  $c_y = 0,3$  -at nem lépheti túl. Ebből az következik, hogy kavitációmentes szárnyak – a kedvező siklószámot és a kielégítő szilárdságot is figyelembe véve- mintegy 70 km/h sebességig építhetők.



Természetesen ilyen sebességeknél elsősorban a mélyen a vízfelszín alá merült teljes merülésű szárnyak jöhetnek szóba.

A kavitációs határok megállapításához még egy igen fontos tényezőt kell figyelembe venni. A szárnyas hajó nem halad állandóan sima vízen, ahol a szárny körüli áramlás főiránya megegyezik a haladási sebesség  $v_\infty$  irányával. Hullámzó vízen a hullámmozgásból származó orbitális sebesség állásszögváltozást idéz elő. Ezt a szárny beállítási szögének meghatározásánál figyelembe kell venni. Az az állásszögváltozás, amelyet a hullámozgás a szárnyakon létrehozhat, a hajó feladatkörének (belvizi vagy tengeri szolgálat) megfelelő hullámméreték ismeretében *Büller* szerint:

$$\Delta\alpha = \pm 225 \cdot \frac{a}{v_\infty \sqrt{L}}$$

ahol  $v_\infty$  (m/ses) a haladási sebesség,  $a$  (m) a hullám magassága és  $L$  (m) a hullámhossz.

#### *d) Az ellipszistől eltérő alaprajzú szárnyak felhajtóerőeloszlása és indukált ellenállása*

Az eddigiekben általában feltételeztük, hogy az indukált ellenállás szempontjából legkedvezőbb ellipszis alaprajzú szárnyról van szó. A víz alatti szárnyak elliptikus kialakítása azonban igen nagy gyártási nehézségekbe ütközik és a megépült hajók talán kivétel nélkül téglalap-, trapéz-, vagy egyszerű, egyenes vonalú összetett szárnyakkal készülnek. Az ilyen szárnyak indukált ellenállása természetesen nagyobb, mint az optimális ellipszisé. Mint korábban láttuk, az indukált ellenállás a  $w$  leáramlási sebesség nagyságától és fesztáv menti eloszlásától függ, ez viszont a cirkuláció-, illetőleg a felhajtóerő fesztáv menti eloszlásától.

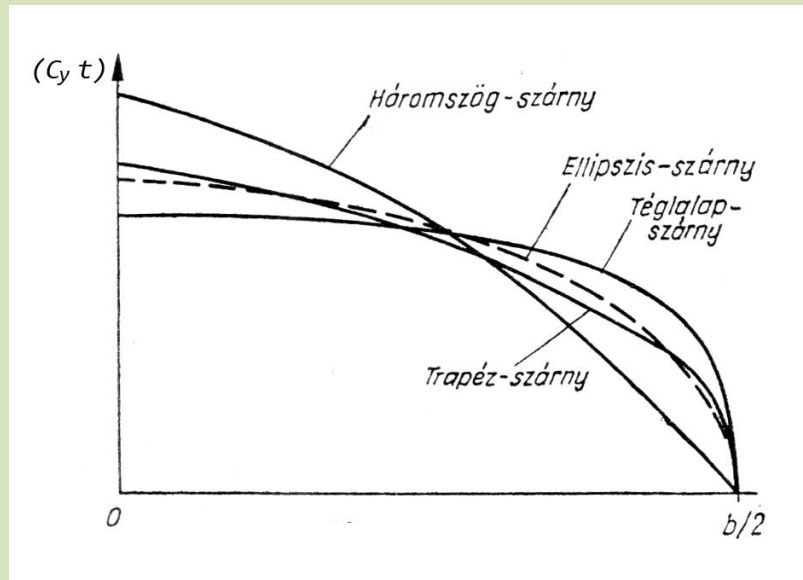
A felhajtóerő fesztáv menti eloszlása a szárny alaprajzi alakjától, a szelvények alakjától és az egymás mellett levő szelvények azonos, vagy változó állásszögétől függ.

Ha a szárny valamennyi metszete geometriailag hasonló és a szelvények húrjai egymással párhuzamosak, ezenkívül a szárny alaprajza ellipszis alakú, akkor a cirkuláció, ill. a  $(c_y \cdot t)$  felhajtóerő-eloszlás is elliptikus.

Ha a szárny szelvényei azonosak és húrjaik is párhuzamosak egymással, de az alaprajz nem ellipszis alakú, akkor a felhajtóerő fesztáv menti eloszlása eltér az optimálistól és ezzel együtt az indukált ellenállás is nagyobb lesz. A felhajtóerő eloszlás ilyen esetekben is meghatározható, és erre nem csak a szárny hidrodinamikai tulajdonságainak alakulása, hanem

terhelések megállapítása, szilárdsági méretezése, valamint stabilitási viszonyainak meghatározása végett is szükség van.

A Prandtl-féle szárnyelmélet segítségével a cirkuláció, illetve a felhajtóerő-eloszlás geometriai adatok alapján meghatározható. *Multhopp* pontos számítási módszert dolgozott ki a repülőgépek szárnyaira vonatkozólag, *Schrenk* pedig kielégítő pontosságú közelítő módszert.

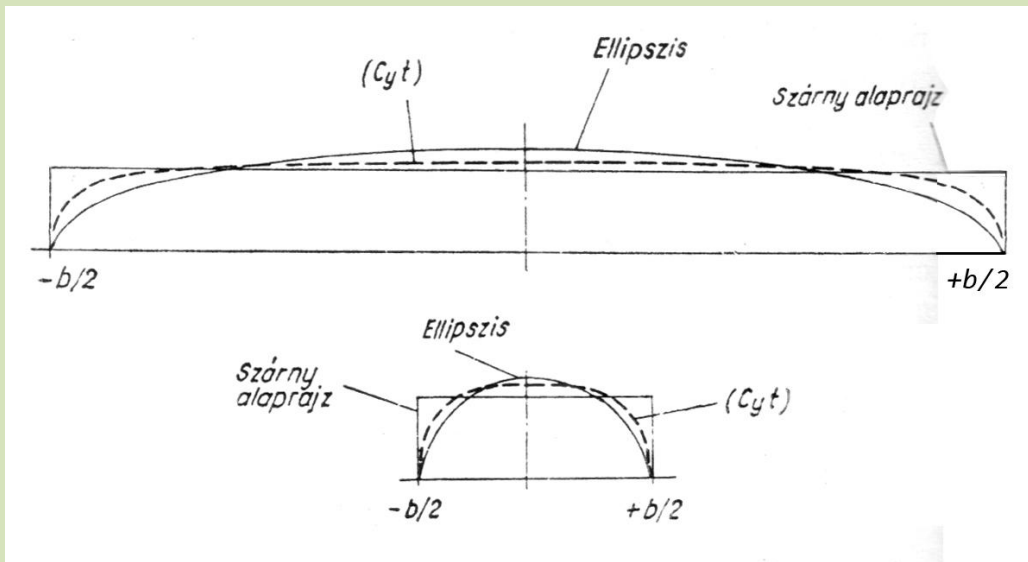


86. ábra.

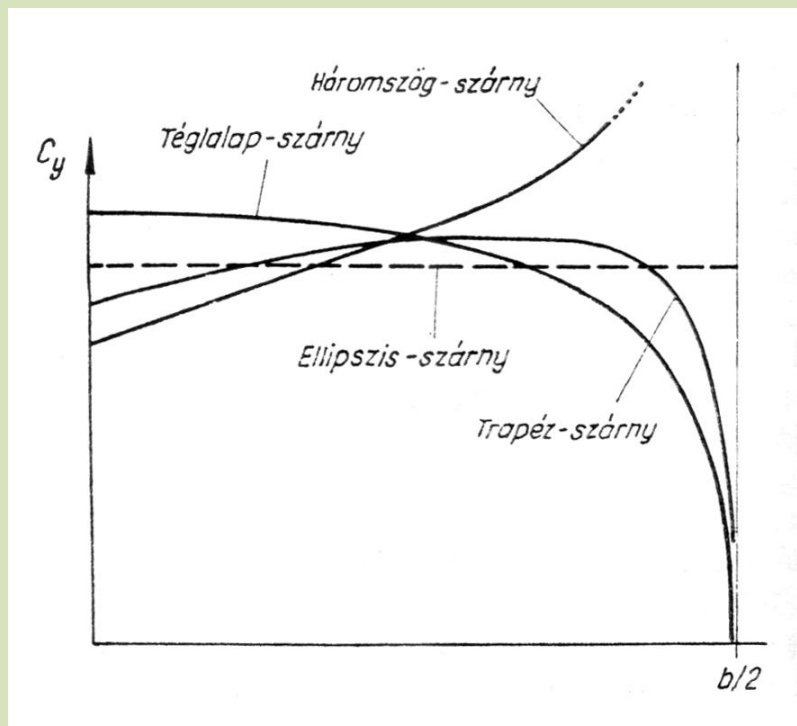
#### A felhajtóerő fesztáv menti eloszlása

A **86. ábrán** néhány jellegzetes alaprajzú szárny felhajtóerő-eloszlását láthatjuk. A ellipszistől leginkább a háromszög és a téglalap alaprajzú szárny felhajtóerő-eloszlása tér el. mint a **87. ábrán** látható, az eltérés annál nagyobb, mennél nagyobb a szárny karcúság. A nem ellipszis alakú szárnyak felhajtóerő-eloszlása Schrenk szerit az alaprajz által meghatározott fesztáv menti  $t$  húreloszlás görbéje, és ennek területével azonos területű, a fesztáv, mint nagytengely fölé írt ellipszis között van, azaz ordinátáik számtani közepe (**87. ábra**).

A helyi felhajtóerőtényezők fesztáv menti eloszlása, -amit úgy kapunk meg, ha a  $(c_y \cdot t)$  értékeket a helyi  $t$  húrhosszal osztjuk- azt mutatja (**88. ábra**), hogy a téglalap alaprajzú szárnyak külső részei csak kevésbé vannak kihasználva, illetőleg ugyanez érvényes a háromszög alaprajzú középrészére. Az ellipszis alaprajz egyenletes  $c_y$  eloszlását legjobban a trapéz szárnyak közelítik meg, melyek minden tulajdonságukban a legközelebb állnak az ellipszis alaprajzúakhoz. A fesztáv mentén változó  $c_y$  eloszlás eredménye, hogy a szárny állásszög változása – ami létrejöhet a hajó eltrimmelődése vagy hullámnázás, esetleg keresztirányú megdőlés következtében- nem egyformán hat ki a teljes felületre. Előfordulhat, hogy bár a szárnyak a hajó hosszdőlése által meghatározott állásszöge kicsiny, az áramlás helyi megzavarása miatt részleges leválása következik be ott, ahol a helyi  $c_y$  a maximumot elérte.



87. ábra.



88. ábra.

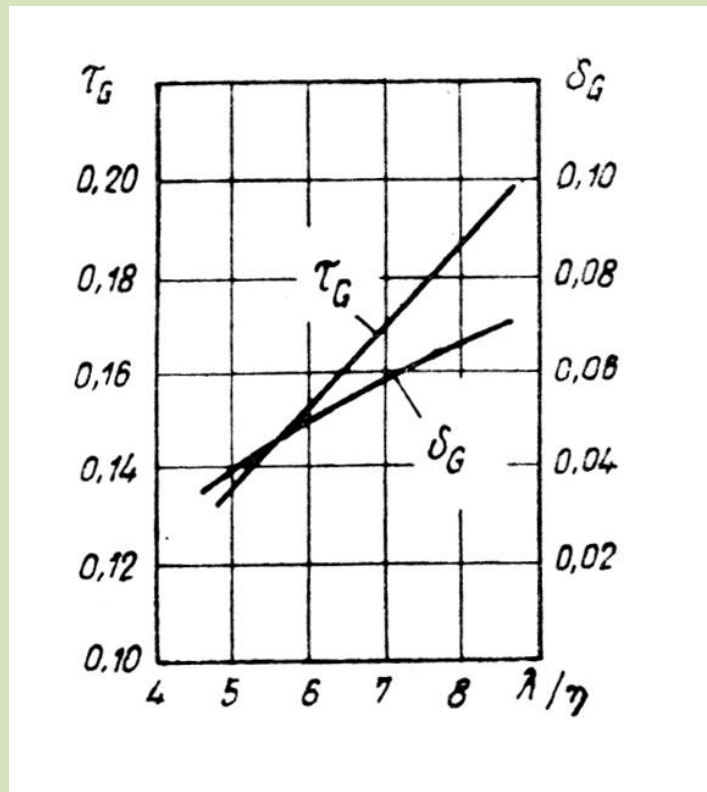
**A felhajtóerőtényező fesztáv menti eloszlása**

A  $w$  leáramlási sebesség eloszlása a cirkuláció, ill. a felhajtóerő eloszlásától függ. Az indukált ellenállási tényező, és az indukált állásszög ezért nem számítható minden további nélkül a (21), ill. (22) képletek segítségével, hanem az alaprajzról függő korrekciós tényezőket is figyelembe kell venni. Ezekkel az ismert összefüggések a következőképpen alakulnak:

$$c_{xi} = \frac{c_y^2}{\pi \cdot \lambda} (1 + \delta_G) \quad (40)$$

illetve:

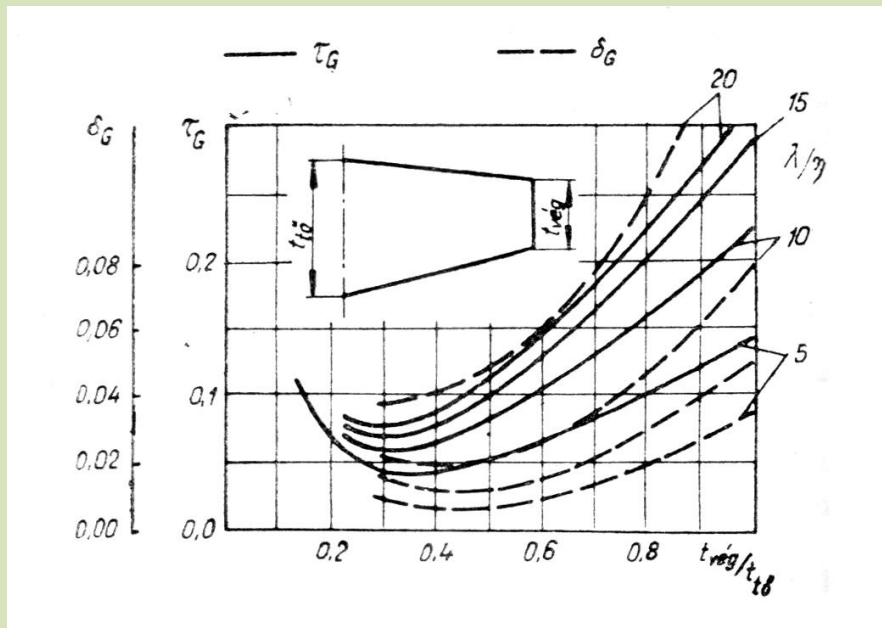
$$\alpha_l = \frac{c_y}{\pi \cdot \lambda} (1 + \tau_G) \quad (41)$$



89. ábra.

Korrekcíós tényezők az indukált ellenállás számításához

A téglalap alaprajzú szárny korrekciós tényezői a 89. ábrán láthatók *Kleinwächter* szerint a  $\lambda/\eta$  függvényében, a **90. ábrán** pedig a trapéz-szárnyakra vonatkozó  $\tau_G$  és  $\delta_G$  értékeket látjuk  $\frac{t_{vég}}{t_{tő}}$  trapézviszony függvényében. A trapézszárnyak ellenállás szempontjából tehát  $\frac{t_{vég}}{t_{tő}} = 0,45$  körül tekinthetők optimálisnak.



90. ábra.

**Korrektíós tényezők az indukált ellenállás számításához**

Vízalatti szárnyakon a repülőgépek és a vízgépek, valamint a hajócsavarok szelvényeit alkalmazzák. A kísérleti intézetek általában téglalap alaprajzú modell-szárnyakkal végzett kísérletek során határozzák meg az áramlási jellemzőket. A mérési eredmények a karcsúság és a Reynolds-szám figyelembevételével a mi esetünkben is felhasználhatók. Ha az általában  $\lambda = 5$  vagy 6-os karcsúságra kapott mdellmérési eredményeket „1” indexszel jelöljük, akkor a korrekciók figyelembevételével az ettől eltérő karcsúságú és alaprajzú szárnyakra:

$$c_{x2} = c_{x1} - \Delta c_{xi} = c_{x1} - \frac{c_y^2}{\pi} \left( \frac{1 + \delta_{G1}}{\lambda_1} - \frac{1 + \delta_{G2}}{\lambda_2} \right) \quad (42)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \Delta \alpha_i = \alpha_1 - \frac{c_y}{\pi} \left( \frac{1 + \tau_{G1}}{\lambda_1} - \frac{1 + \tau_{G2}}{\lambda_2} \right) \quad (43)$$