

## B) A VÍZ ALATTI SZÁRNYAK

### 4. A kavitáció

#### a) A kavitáció fogalma

Egy szárnyfelület tovahaladása következtében nyomáskülönbségek alakulnak ki az áramlásnak a felület feletti és alatti része között. e nyomáskülönbségek eredménye a felhajtóerő, de a szárny jóságát és működését kétfelől is befolyásolják. A húrhossz mentén keletkező túlságosan gyors nyomásnövekedés örvények leválásához vezet és ez – mint láttuk – a test-ellenállás egyik oka. Az örvényleválásokat azonban a szárny helyes kialakításával – legalábbis a fő üzemi állapot határain belül- általában el lehet kerülni.

A nyomáskülönbségek azonban sokkal nehezebben leküzdhető káros jelenséget is okoznak. Az összenyomhatatlan közegek statikus nyomása az áramlási sebesség növekedésével négyzetes arányban csökken, viszont valamely közegben uralkodó legkisebb nyomás a közeg telített gőznyomása lehet. Ha egy áramlásba helyezett görbült felület mentén a felület görbülete miatt felgyorsuló áramlás nyomása erre az értékre csökken, akkor a folyadék forrásnak indul és a tér egy részét gőzbuborékokkal vegyes hab tölti ki. Ezt a jelenséget nevezzük *kavitációnak*. A víz alatti szárnyszelvényeken, gyorsan forgó hajócsavarok lapátjain, valamint vízturbinákban léphet fel. Áramlási veszteségekkel, és megfelelő körülmények között a kavitáló folyadék által érintett felületeken eróziós jelenségekkel jár.

A kavitáció beálltakor az áramlás leválik a test felületéről és állandó nyomású szabad felületet alkotva, körülfogja a kavitációs üreget (buborékot). Ez különböző nagyságú lehet, az áramlás irányában mért kiterjedése is változó. Ott, ahol a test tovahaladása miatt a folyadék nyomási ismét nő, a gőzbuborékok hirtelen lecsapódnak. Lecsapódáskor igen nagy nyomások lépnek fel ütősszerűen, és ezek a legkeményebb anyagot is lyukacsosra marják.

A Bernoulli-egyenlet szerint ideális folyadékban az össznyomás

$$p_{össz} = p_l + \gamma z + \frac{\rho}{2} v_\infty^2$$

Az egyenletben  $p_l$  a légnyomás a víz felszínén mérve,  $\gamma$  a víz fajsúlya,  $z$  a felszíntől mér merülés mélysége,  $v_\infty$  pedig a sebesség a testtől nagyobb távolságban. A szárnyhoz viszonyítva egy vízrészecske sebessége  $v_\infty$  -nél kisebb vagy nagyobb lehet. Legyen

$$v = v_\infty + v_f$$

a szárny felületének egy pontja felett, és így a torlónyomás helyileg  $\frac{\rho}{2}(v_\infty + v_f)^2$  -re nő.

Jelöljük a felület adott pontja felett uralkodó statikus nyomást  $p_0$  -al és rögtön belátjuk, hogy a torlónyomás ilyen megnövekedése folytán  $p_0$  csökken:

$$p_0 = p_l + \gamma z - \frac{\rho}{2} (v_\infty + v_f)^2$$

és ha az egyenlet utolsó tagja  $p_l + \gamma z$ , akkor a statikus nyomás 0. ekkor azonban a folyadék elválk a felülettől és beáll a kavitáció. A valóságban valamivel hamarabb,  $p_0 = e$  -nél, a folyadék telített gőznyomásánál bekövetkezik.

A kavitáció feltétele tehát:

$$\frac{p - e}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

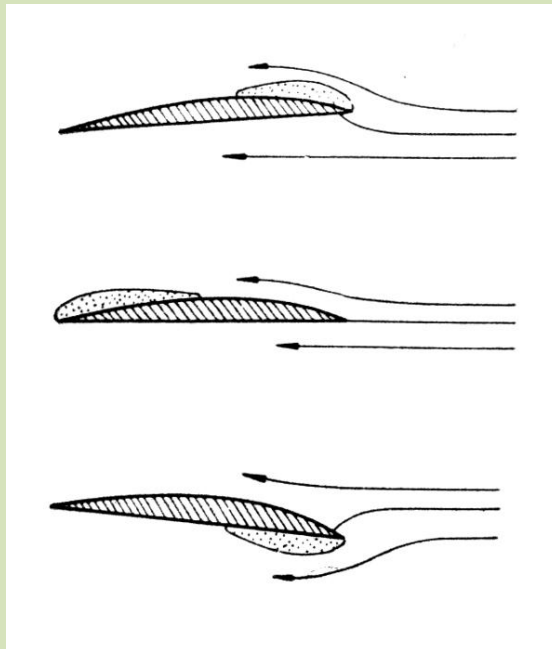
ahol  $p$  a zavartalan áramlásban,  $z$  mélységben mérhető nyomás,  $\Delta p$  a  $\frac{\rho}{2} (v_\infty + v_f)^2$  abszolút értéke. A  $\Delta p/\rho$  viszony szokásos jelölése  $\sigma$ , a *kavitáció-szám*, mely a kavitációs állapotot jellemzi.

#### b) A kavitáció hatása a szárny jellemzőire

A kavitációs veszélyre jellemző  $\sigma$  kavitációs-szám meghatározására alapos és kiterjedt kísérleteket végeztek különféle szelvényeken. A kísérletek azt mutatják, hogy  $\sigma$  csökkenésekor, vagyis fejlődő kavitáció esetén a szárny felhajtóereje rohamosan esik. Más mérések azt mutatták, hogy azok a szelvények, amelyek legnagyobb vastagsága közel van a belépőélhez, különösen kedvezőtlenek kavitáció szempontjából, mert húr hosszmenti nyomáeloszlásuk kiemelkedő csúcsot mutat. A belépőél környezetében erősen felgyorsuló áramlás a nyomást erősen csökkenti. Ezzel szemben a fokozatosan vastagodó szárnyszelvények, amelyek körül hirtelen nyomáscsökkenés nem alakul ki, és amelyek körül a nyomás egyenletesen oszlik meg, sokkal kedvezőbbek. Ilyenek a körszelet alakú szelvények is, melyek legnagyobb vastagsága a húr hossz közepén van. Igen fontos szerepe van azonban a szárny állásszögének is.

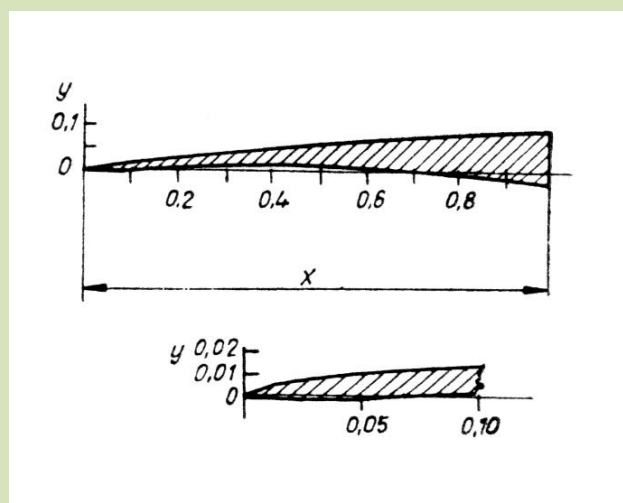
A különféle szárnyszelvényekkel végzett kísérletek három jellegzetes kavitációs formát mutattak:

1. A belépőéltől kiinduló *szívóoldali kavitáció*, amely akkor fejlődik ki, ha a szárnyal találkozó áramlás mellső torlópontja a szelvény alsó (nyomott) oldalán van. Ilyenkor a belépőél körüláramlásakor igen nagy sebességek lépnek fel. A nyomáeloszlás minimuma éppen ezért itt alakul ki.
2. A szelvénynek körülbelül a legvastagabb helyéről kiinduló *szívóoldali kavitáció*, amely akkor keletkezik, ha az áramlás ütközésmentesen találkozik a szárnyal vagy pedig akkor, ha a mellső torlópont a szárny szívott oldalán helyezkedik el.
3. A belépőéltől kiinduló *nyomóoldali kavitáció* keletkezésének feltétele: igen kicsiny, esetleg negatív állásszög, minek következtében a mellső torlópont a szívóoldalon van, és az áramlás egy része erősen felgyorsulva felülről kerüli meg a belépőélt (**67. ábra**).



67. ábra.

A kavitáció jellege szerint lehet *lemezes kavitáció*, amely nemigen fejt ki erozív hatást, vagy *buborékos kavitáció*, amely a buborékok összeroppanásakor erősen romboló hatású. Érdekes, hogy a kavitáció kezdetén a szelvény ellenállás/felhajtóerő viszonya kissé javul. ennek okát abban kereshetjük, hogy a súrlódási ellenállás kissé csökken, mert a szárny nedvesített felükete a kavitációs buborékok, ill. leválások miatt csökken, másrészt – különösen lemezes kavitáció – a szárnyat mintegy megvastagítja, ami a  $c_y$  felhajtóerőtényező időleges megnövekedéséhez vezet. Ha azonban a kavitáció már kiterjedt a szelvény hosszának nagyobb részére, akkor a kezdeti látszólagos javulás helyébe a hidrodinamikai jellemzők erős romlása lép. *Betz* szerint teljesen kifejlődött kavitációnál a szívott oldal alakja ebből a szempontból teljesen közömbössé válik és ezzel lényegében a szelvény vastagsága is. Ez a felismerés vezetett az újabban elterjedő *superkavitáló* szelvények alkalmazásához, amelyek éles belépőélel rendelkező ékhez hasonlítanak (68. ábra). Mivel a kavitáció következtében a legnagyobb vastagság mögötti rész csupán káros súrlódó felületet jelentene, ez az áramlás irányára merőleges levágással elmarad. Az ilyen szelvények  $2\beta$  „ékszöge” természetesen kicsiny, növekedésével a szelvény  $dc_y/da$  viszonya erősen romlik (69. ábra).



68. ábra

A szokásos kialakítású szelvényekre – elsősorban sík nyomóoldal esetén, pl. a körszelet-szelvényeknél – Betz szerint a felhajtóerőtényező kavitáló áramlásban

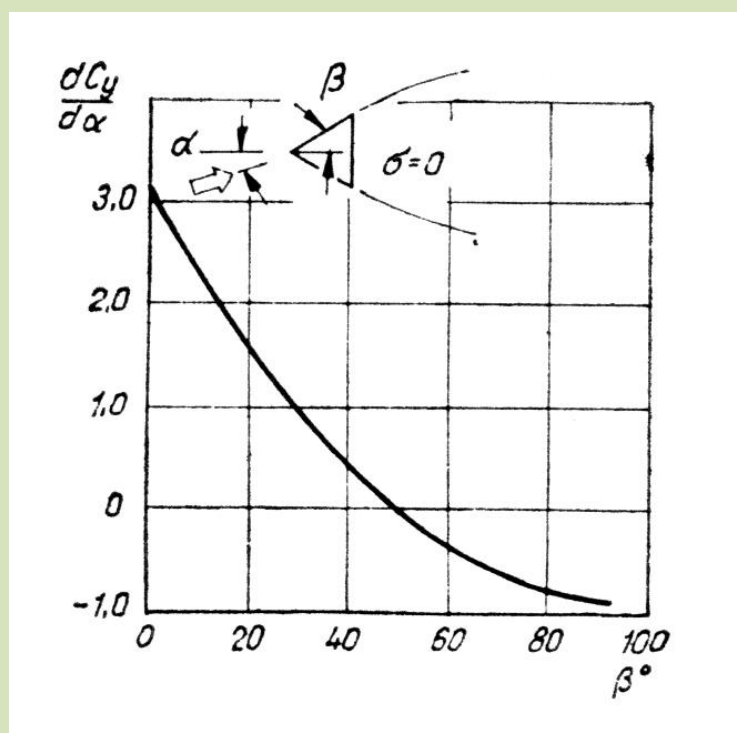
$$c_y = \frac{\pi}{2} \cdot \alpha + \delta$$

Ahol a képlet első tagja a kis  $\alpha$  állásszögű sík lap felhajtóerőtényezője levált áramlás esetén, a másik tag pedig azt veszi figyelembe, hogy a szívott oldalon a zavartalan  $p_0$  nyomás helyett a csekélyebb  $e$  telített gőznyomás uralkodik.

Szintén Betz szerint az ilyen szelvények ellenállástényezője a  $c_{x\text{ surl}}$  súrlódási ellenállástényező figyelembevételével kis állásszögeknél közelítőleg

$$c_x = c_y \cdot \alpha + c_{x\text{ surl}}$$

Betz elméleti megfontolásait a mérések is igazolták mindaddig, amíg a kavitáló áramlás teljesen beborítja a szárny felületét. ehhez képest a szelvény tulajdonságai minden más esetben romlanak.



69. ábra.  
Ékszelvények  $dc_y/d\alpha$  viszonya