

Varga Béla

LÉGCSAVAROK AERODINAMIKÁJA

Ha megvizsgáljuk a légsavarak működését, láthatjuk, hogy bizonyos mértékben a fába befűrődő facsavarhoz vagy a csavaranyába becsavaródó csavarhoz hasonló. Ezért érthető, hogy a légsavar, de még korábban szülőanyja a hajócsavar, fokozatosan fejlődött ki az egyszerű csavarból.

A légsavarnak repülés céljára való gyakorlati felhasználásával először Lomonoszov próbálkozott meg, amikor 1754-ben egy kis óraszerkezettel működte-tett gépet épített. A szerkezet kialakítása hasonlított a mai koaxiális helikopterek felépítéséhez. A gép azonban önállóan nem volt képes a felemelkedéshez.

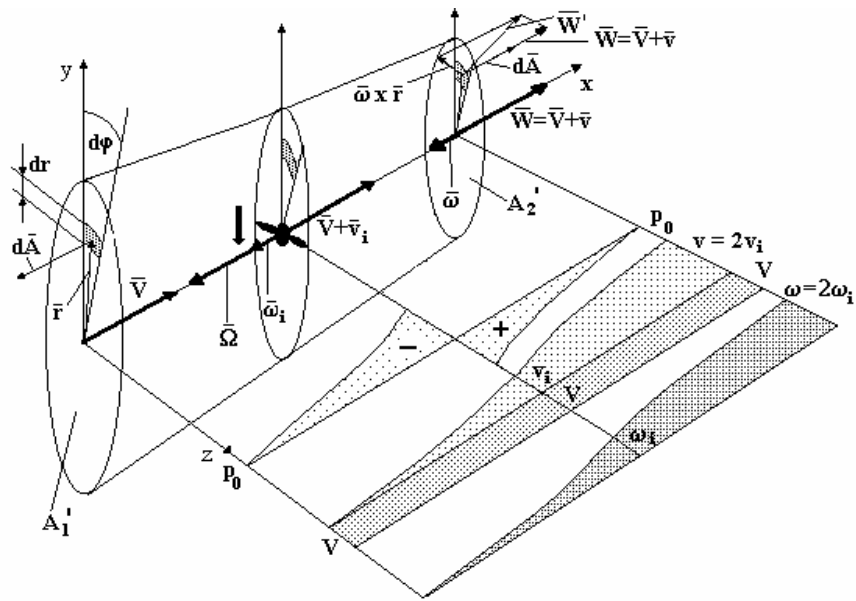
A döntő lökést azonban a XIX. század végén a repülés területén bekövetkezett hatalmas fejlődés adta meg. Ekkorra mind a kormányozható léghajók, mind a repülőgépek eljutottak a célegyenesbe. A sikeres felemelkedéshez már csak megfelelően könnyű és megbízható motorra, illetve megfelelően hatékony légsavarra volt szükség.

Kezdetben fa légsavarakat alkalmaztak, majd a 30-as évektől a motor teljesítmények növekedésével a tervezők áttértek a nagyobb szilárdságú fém légsavarakra, ezzel együtt elterjedtek a három-, majd négyágú légsavarak is. A repülési sebesség növekedése pedig szükségessé tette az állítható légsavarak alkalmazását. Mindezzel együtt is a hagyományos légsavarak a II. világháború végére elérték fejlődésük végső határát.

Manapság egyrészt tovább növekedett a légsavarlapátok száma, másrészt egészen speciális hajlított légsavarlapátokat alkalmaznak, hogy a lapátvégi M_{krit} értékének növelésével növelhető legyen a lapátok végén elérhető kerületi sebesség.

AZ IDEÁLIS LÉGCSAVAR VIZSGÁLATA IMPULZUS ÉS A PERDÜLETTÉTEL SEGÍTSÉGÉVEL

Az ideális légsavar elméletében feltételezzük, hogy a levegő súrlódásmentes ideális közeg, illetve, hogy a légsavar által indukált tengely irányú sebesség a légsavar által súrolt teljes felületre állandó, a levegősugár forgásából eredő kerületi sebesség pedig a sugárral egyenes arányban változik. Vagyis úgy tekinthetünk egy adott keresztmetszetet, mintha egy merev test forogna.



1. ábra

Ilyen esetek vizsgálatánál optimális az impulzus-, illetve a perdülettétel. Tulajdonképpen ebben az esetben nem vizsgáljuk magát a légcsavart, csak az általa a közegben létrehozott tengelyirányú sebesség és szögsebesség változásokat. Az 1. ábrán láthatjuk az ideális légcsvavar körüli áramlást, illetve annak ellenőrző felületekkel körül határolt vizsgált részét. A szakirodalomban ezt általában légcsavarsugárnak nevezik. Ez egy olyan enyhén szűkülő kör keresztmetszetű áramcső, ahol a belépő és a kilépő keresztmetszetek (A_1' és A_2') párhuzamosak a légcsvavar forgási síkjával és attól egy-egy légcsvavar átmérőnyi távolságra vannak. Erről az áramlásról előljárójában annyit kell tudnunk, hogy az áramlás mintegy az A_1' belépő keresztmetszettől vesz tudomást a légcsvavar jelenlétéről. Tehát ebben a keresztmetszetben a nyomás a környezeti nyomással (p_0) egyenlő, az áramlási sebesség a repülési sebességgel egyenlő és az áramlásnak nincs forgása. Az A_2' kilépő keresztmetszetben a nyomás már újra a környezeti nyomásnak felel meg, és azt tapasztaljuk, hogy az áramlás valamilyen mértékben felgyorsult, illetve forgásba jött a légcsvavar hatására.

Az ideális légcsvavar impulzus elmélete

Az impulzustétel általános esetre:

$$\int_{A'} \bar{c} \cdot \rho \cdot \bar{c} \cdot d\bar{A} + \int_{A'} p \cdot d\bar{A} - \int_V \rho \cdot \bar{g} \cdot dV = \bar{F} \quad (1)$$

ahol:

- A' — az ellenőrző felületekkel kijelölt rész áramlás szempontjából szabad felületei (ezeken a felületeken áramvonalak léphetnek át), jelen esetben az áramcső be és kilépő keresztmetszete;
 \bar{c} — a szabad felületeken átáramló közeg áramlási sebessége;
 ρ — a közeg sűrűsége;
 $d\bar{A}$ — elemi felület, jelen esetben $|d\bar{A}| = r \cdot d\varphi \cdot dr$
 p — a közeg nyomása a szabad felületeken;
 \bar{g} — nehézségi gyorsulás;
 dV — elemi térfogat a kijelölt térfogatban;
 \bar{F} — a közegre gyakorolt erő.

A vizsgált esetben (1) egyenlet bal oldalának második és harmadik tagja gyakorlatilag zérussal egyenlő, mivel a második tagnál mind a belépő, mind a kilépő keresztmetszetben a nyomás a környezeti nyomással egyenlő, a felületkülönbség pedig jelentéktelen. A harmadik tag pedig az ellenőrző felületekkel határolt részben lévő levegő súlyával egyenlő, ami szintén minimális. Tehát az első tagot kell tovább vizsgálnunk a légcsavarsugár belépési és kilépési keresztmetszetében. Megállapíthatjuk még továbbá, hogy a $\rho \cdot \bar{c} \cdot d\bar{A}$ skalár szorzat a $d\bar{A}$ elemi felületen átáramló $d\dot{m}$ elemi tömegárammal egyenlő.

Tehát felírva az impulzus tételt a vizsgált esetre a következő összefüggést kapjuk:

$$\int_{A_1'} \bar{V} \cdot \rho \cdot \bar{V} \cdot d\bar{A} + \int_{A_2'} (\bar{W} + \bar{\omega} \times \bar{r}) \cdot \rho \cdot (\bar{W} + \bar{\omega} \times \bar{r}) \cdot d\bar{A} = \bar{F} \quad (2)$$

ahol:

- A_1', A_2' — az áramcső belépő és kilépő keresztmetszete, $A' = A_1' + A_2'$;
 \bar{V} — A_1' belépési keresztmetszetben az áramlás sebessége (repülési sebesség);
 \bar{W} — A_2' kilépési keresztmetszetben a kiáramlás tengely irányú sebessége;
 $\bar{\omega}$ — a légcsavarsugár kilépő keresztmetszetében az áramlás szögsebessége;
 \bar{r} — a $d\bar{A}$ felületelem helyvektora.

A (2) egyenletet tovább folytatva:

$$-\int_{A_1'} \bar{V} \cdot d\dot{m} + \int_{A_2'} \bar{W} \cdot d\dot{m} + \int_{A_2'} (\bar{\omega} \times \bar{r}) \cdot d\dot{m} = \bar{F} \quad (3)$$

A bal oldal harmadik tagjánál az $\bar{\omega} \times \bar{r}$ vektori szorzat az áramlás kerületi sebességét (\bar{u}) adja meg az \bar{r} helyvektorral jelölt pontban a légcsavarsugár kilépő keresztmetszetében. Az $(\bar{\omega} \times \bar{r}) \cdot d\dot{m}$ elemi tangenciális erőket ($d\bar{F}_t$) összegezve a

kilépő keresztmetszetben zérus vektort kapunk. Viszont ezek az elemi tangenciális erők hozzák létre az $\bar{r} \times [(\bar{\omega} \times \bar{r}) \cdot d\dot{m}] = \bar{r} \times d\bar{F}_t$ elemi nyomatékokat ($d\bar{M}$), amelyek végső soron az áramlás forgását okozzák (lásd később a perdület tételénél). Az első két tagnál a továbbiakban, mivel a vektorok irányát ismerjük (párhuzamosak a légsavartengellyel), célszerű áttérni a vektor egyenletről skaláris egyenletre.

Ennek megfelelően az áramlást tengelyirányban gyorsító erő a következő lesz:

$$\dot{m} \cdot (W - V) = F \quad (4)$$

Értelemszerűen ez az áramlás irányába fog hatni, az is világos, hogy ennek reakcióerejeként egy ugyanakkora, de ellentétes irányú erő fog hatni a légsavarra, amit légsavár vonóerőnek, vagy propulziós erőnek (F_p) nevezünk.

$$F_p = \dot{m} \cdot (W - V) \quad (5)$$

Az ideális légsavár perdülettétele

A perdülettétel általános alakja:

$$\int_{A'} (\bar{r} \times \bar{c}) \cdot \rho \cdot \bar{c} \cdot d\bar{A} + \int_{A'} \bar{r} \times p \cdot d\bar{A} - \int_V \bar{r} \times \rho \cdot \bar{g} \cdot dV = \bar{M} \quad (6)$$

ahol:

\bar{M} — a közegre gyakorolt nyomaték.

Jelen esetben észrevehetjük, hogy a (6) egyenletben az $\bar{r} \times p \cdot d\bar{A}$ vektori szorzatokat összegezve az A_1' és A_2' légsavarsugár belépő és kilépő keresztmetszetek mentén zérus vektort kapunk, és mivel a sűrűség és a nehézségi gyorsulás is állandó a kijelölt térfogatban, az $\bar{r} \times \rho \cdot \bar{g} \cdot dV$ vektori szorzatok térfogat szerinti összegzése után is zérus vektort kapunk.

A (6) egyenletet tovább folytatva:

$$\int_{A_1'} (\bar{r} \times \bar{V}) \cdot d\dot{m} + \int_{A_2'} (\bar{r} \times [\bar{W} + (\bar{\omega} \times \bar{r})]) \cdot d\dot{m} = \bar{M} \quad (7)$$

A (7) egyenletet tovább bontva:

$$\int_{A_1'} (\bar{r} \times \bar{V}) \cdot d\dot{m} + \int_{A_2'} (\bar{r} \times \bar{W}) \cdot d\dot{m} + \int_{A_2'} (\bar{r} \times (\bar{\omega} \times \bar{r})) \cdot d\dot{m} = \bar{M} \quad (8)$$

A (8) egyenletben az $\bar{r} \times \bar{V}$ és az $\bar{r} \times \bar{W}$ vektori szorzatokat összegezve az A_1' és A_2' légsavarsugár belépő és kilépő keresztmetszetek mentén zérus vektort

kapunk. A harmadik tagnál célszerűbb áttérnünk a vektor egyenletről skalár egyenletre, mivel tudjuk, hogy az $[\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})]d\dot{m} = d\vec{M}$ elemi nyomatékvektorok a légcsavar tengellyel párhuzamosak, irányuk a légcsavar forgási irányától függ. Abszolút értékük pedig a $|d\vec{M}| = r^2 \cdot \omega \cdot d\dot{m}$ összefüggéssel határozható meg.

Felhasználva ezt:

$$\int_0^R \int_0^{2\pi} r^2 \cdot \omega \cdot \rho \cdot W \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr = M \quad (9)$$

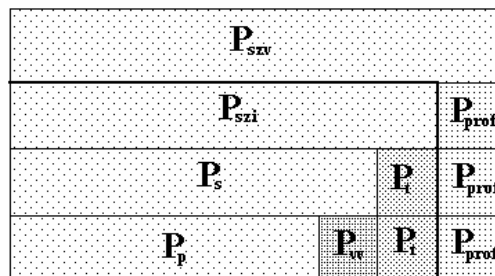
A kettős integrálást elvégezve megkapjuk annak a nyomatékvektornak a nagyságát, amely a légcsavar forgástengelyébe esik, iránya pedig a légcsavar forgásirányától függ. Ez a nyomaték okozza az áramlás forgását. Ennek reakció nyomatéka (M_r) a repülőszerkezetre hat vissza, amelyet értelemszerűen ki kell egyensúlyozni (pl. helikoptereknél faroklégcsavarral).

$$M = \frac{\dot{m} \cdot R^2 \cdot \omega}{2} \quad (10)$$

Teljesítmények, veszteségek, hatásfokok

A bevezetőben említettük, hogy ideális sűrűségmentes közegben vizsgáljuk a légcsavar működését.

A teljesítményeket és veszteségeket számolhatjuk a hagyományos teljesítményszámítási módszerekkel, illetve a mozgási energiák időegység alatti megváltozásából is. Mint később ki fog derülni, ez több szempontból is hasznos lesz számunkra. A teljesítmények és veszteségek értelmezésénél segítséget nyújt a 2. ábra, de az impulzus- és perdülettételekkel történő vizsgálat során csak a vastagabb vonallal körülkerített bal alsó sarok teljesítményei és veszteségei jelennek meg, mivel a profilellenállás legyőzéséhez szükséges teljesítményt ezzel a módszerrel nem tudjuk figyelembe venni.



2. ábra

Az ideális légcsvár szükséges teljesítménye (P_{szi})

Az ideális légcsvár által felhasznált összes teljesítmény. Ez az a teljesítmény, amelyet befektetünk az ideális légcsvár forgatásába.

$$P_{szi} = M \cdot \Omega \quad (11)$$

ahol:

Ω — a légcsvár szögsebessége.

A másik módszer szerint ez a teljesítmény egyenlő lesz a repülőgéphez, mint vonatkoztatási rendszerhez képest a légcsvársugár teljes mozgási energiájának időegység alatti megváltozásával. A belépő keresztmetszetben (A_1') az áramlás sebessége a repülőgéphez képest \bar{V} , a kilépő keresztmetszetben (A_2') pedig $\bar{W}' = \bar{W} + \bar{\omega} \times \bar{r}$. Mivel \bar{W} és az $\bar{\omega} \times \bar{r}$ vektorok egymásra merőlegesek, így $|\bar{W}'| = \sqrt{|\bar{W}|^2 + |\bar{\omega} \times \bar{r}|^2}$, vagyis skalárisan $W' = \sqrt{W^2 + (r \cdot \omega)^2}$. A vektorok irányának és nagyságának ismeretében célszerűbb itt is skalár egyenletet felírni.

Tehát a légcsvársugár teljes mozgási energia változása időegység alatt a következő lesz:

$$P_{szi} = \frac{1}{2} \int_{A_2'} W'^2 \cdot d\dot{m} - \frac{1}{2} \int_{A_1'} V^2 \cdot d\dot{m} \quad (12)$$

A (12) egyenletet folytatva:

$$P_{szi} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W \int_0^R \int_0^{2\pi} [W^2 + (r \cdot \omega)^2] \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \int_0^R \int_0^{2\pi} V^2 \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr \quad (13)$$

Elvégezve az integrálásokat:

$$P_{szi} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W^2 - V^2) + \frac{1}{4} \cdot \dot{m} \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (15)$$

A jobb oldal első tagját egy kis matematikai ügyeskedéssel tovább bonthatjuk:

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W^2 - V^2) = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot [(W - V)^2 + (2WV - 2V^2)] \quad (16)$$

vagyis a (15) egyenlet a következőképpen is felírható:

$$P_{szi} = \dot{m} \cdot (W - V) \cdot V + \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W - V)^2 + \frac{1}{4} \cdot \dot{m} \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (17)$$

Láthatjuk a 2. ábra utolsó sorában, hogy a P_{szi} teljesítmény három részre bontható, ez megfelel a (17) egyenlet jobb oldalán látható bontásnak.

Tangenciális veszteség (P_t)

A tangenciális veszteség a (17) egyenlet jobb oldalának utolsó tagja:

$$P_t = \frac{1}{4} \cdot \dot{m} \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (18)$$

Vagyis a légcsavarsugár forgásából adódó időegység alatti mozgási energia változás (mind a nyugvó közeghez képest, mind a repülőgéphez képest ugyanakkora). Ez a forgás a repülőgép mögött felemészthető a súrlódás hatására, ennek megfelelően ez a teljesítményvesztés hővé alakul. Értékét ebben az esetben is meghatározhatjuk a hagyományos teljesítményszámítási módszerrel is.

$$P_t = M \cdot \omega_i = \frac{\dot{m} \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \omega_i}{2} \quad (19)$$

ahol:

ω_i — a légcsvavar síkjában a légcsvavar sugár szögsebessége, indukált szögsebesség. A (18) és a (19) egyenleteket egyenlővé téve azonnal látjuk, hogy $\omega = 2\omega_i$, vagyis az egész szögsebesség-növekmény fele jön létre a légcsvavar síkjáig.

Sugár teljesítmény (P_s)

A sugár teljesítmény a (17) egyenlet jobb oldalának első két tagja, vagy visszaalakítva a (15) egyenlet jobb oldalának első tagja:

$$P_s = \dot{m} \cdot ((W - V) \cdot V + \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W - V)^2) = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot (W^2 - V^2) \quad (20)$$

Vagyis a repülőgéphez, mint vonatkoztatási rendszerhez képest a légcsavarsugár tengelyirányú sebességváltozásból adódó időegység alatti mozgási energia változás. A mozgási energia időegység alatti megváltozása egyenlő lesz azzal a teljesítménnyel, amelyet a tengelyirányú sebesség növelés létrehozására befektettünk.

Tangenciális hatásfok (η_t)

A tangenciális hatásfok a sugárteljesítmény és az ideális légcsvavar szükséges teljesítménye közötti viszonyt fejezi ki.

$$\eta_t = \frac{P_s}{P_{szi}} = \frac{P_{sz} - P_t}{P_{szi}} = 1 - \frac{P_t}{P_{szi}} = 1 - \frac{\omega_i}{\Omega} = 1 - \bar{\omega}_i = 1 - \bar{u}_i \quad (21)$$

ahol:

$\bar{\omega}_i$ — viszonyított indukált szögsebesség (a felülvonás itt nem vektor jelölés);

\bar{u}_i — viszonyított indukált kerületi sebesség valamely tetszőleges sugáron,
 $u_i = r \cdot \omega_i$, illetve $U = r \cdot \Omega$ kerületi sebességek hányadosa.

Vontatási veszteség (P_{vv})

A vontatási veszteség a (17) egyenlet jobb oldalának középső tagja:

$$P_{vv} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W - V)^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (22)$$

ahol:

v — a teljes sebességnövekmény a kilépő keresztmetszetig (A_2)

Vagyis a légcsavarsugár nyugvó közeghez képesti tengelyirányú felgyorsulásából adódó időegység alatti mozgási energia változás. Ez a $v = W - V$ sebességnövekmény is, hasonlóan a légcsavarsugár forgásához a repülőgép mögött felemésztyődik a súrlódás hatására, ennek megfelelően ez a teljesítmény-veszteség is hővé alakul. Értékét ebben az esetben is meghatározhatjuk a hagyományos teljesítményszámítási módszerrel is.

$$P_{vv} = F_p \cdot v_i = \dot{m} \cdot (W - V) \cdot v_i = \dot{m} \cdot v \cdot v_i \quad (23)$$

ahol:

v_i — a légcsvár síkjáig létrejövő sebesség növekmény, indukált sebesség;

A (22) és a (23) egyenleteket egyenlővé téve azonnal látjuk, hogy $v = 2v_i$, vagyis az egész sebesség növekmény fele jön létre a légcsvár síkjáig. Megjegyzendő, hogy a Bernoulli egyenletet felhasználva is eljuthatunk erre az eredményre.

Vontatási teljesítmény (P_p)

A vontatási teljesítmény a (17) egyenlet jobb oldalának első tagja. Tulajdonképpen ez a hasznos teljesítmény számunkra, amely a repülőgép vontatására fordítódik.

$$P_p = \dot{m} \cdot (W - V) \cdot V = F_p \cdot V \quad (24)$$

Propulziós hatásfok (η_p)

A propulziós hatásfok a propulziós teljesítmény és a sugárteljesítmény közötti viszonyt fejezi ki.

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_s} = \frac{P_s - P_{vw}}{P_s} = 1 - \frac{\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W - V)^2}{\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (W^2 - V^2)} = 1 - \frac{W - V}{W + V} = \frac{1}{1 + \bar{v}_i} \quad (25)$$

ahol:

\bar{v}_i — viszonyított indukált sebesség, az indukált és a repülési sebesség hányadosa (a felülvonás itt nem vektor jelölés).

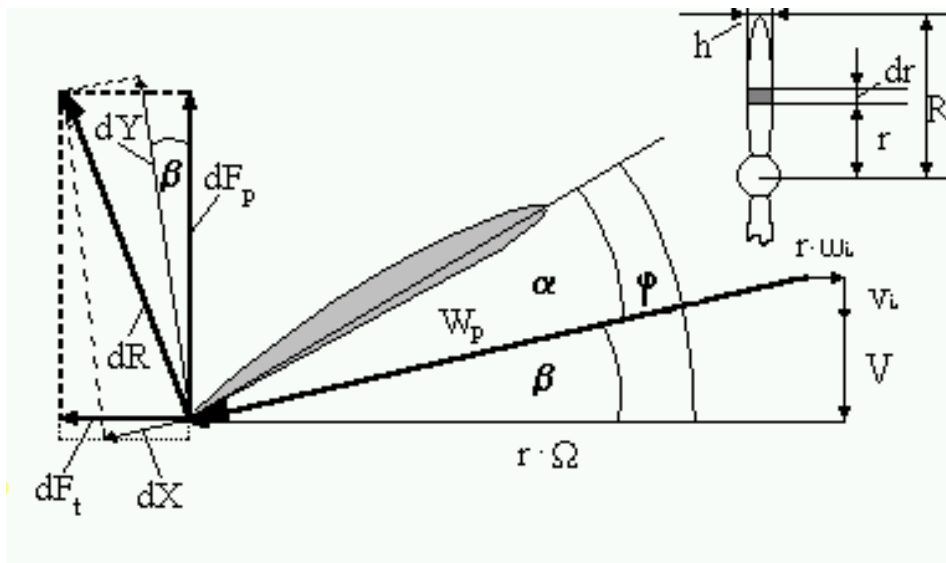
Az ideális (súrlódásmentes) légcsavar hatásfoka (η_i)

Az ideális légcsavar hatásfoka a propulziós teljesítmény és az ideális légcsavar szükséges teljesítménye közötti viszonyt fejezi ki.

$$\eta_i = \frac{P_p}{P_{szi}} = \frac{P_s}{P_{szi}} \cdot \frac{P_p}{P_s} = (1 - \bar{u}_i) \cdot \frac{1}{1 + \bar{v}_i} = \eta_p \cdot \eta_t \quad (26)$$

A LÉGCSAVAR VIZSGÁLATA LAPELEM ELMÉLETTEL

A lap elem elmélet esetében a légcsavart egy szárnynak foghatjuk fel, ahol az áramlást úgy vizsgálhatjuk, mint egy szárnyprofil körüli áramlást.



3. ábra

A légcsavarlapát geometriai és áramlástanai jellemzői

Tekintsük át a 3. ábra alapján a lapát, a lapátprofil és a körülötte kialakult áramlás jellegzetességeit. Láthatjuk, hogy a lapátprofil alakja megegyezik a szárnyprofil alakjával, így tehát mindazok a geometriai jellemzők, amelyekkel a szárnyprofil esetében találkoztunk (húrhossz, vastagság, íveltség, orrgörbületi sugár, középvonal, stb.), itt is érvényesek lesznek. A 3. ábra szerint:

R, D — légcsavarsugár, illetve légcsavarátmérő;

r, \bar{r} — egy tetszőleges lapátprofil távolsága a légcsavartengelytől, illetve

$$\text{ennek viszonyított értéke, } \bar{r} = \frac{r}{R};$$

h — a lapátprofil húrhossza, légcsavarnál általában lapátszélességnek nevezzük;

$h \cdot dr$ — a vizsgált lapátszelvény felülete;

$r \cdot \Omega$ — a légcsvavar forgásából adódó kerületi sebesség;

V — repülési sebesség;

v_i — indukált sebesség a légcsvavar forgási síkjában;

$r \cdot \omega_i$ — a légcsavarsugár forgásából adódó kerületi sebesség a légcsvavar forgási síkjában;

W_p — a profil eredő megfűvási sebessége;

β — az eredő megfűvás (W_p) és a légcsvavar forgási síkja által bezárt szög, értéke a lapát hossza mentén változik a kerületi sebesség változása miatt;

φ — a vizsgált profil beállítási szöge, a húr és a légcsvavar forgási síkja által bezárt szög, értéke szintén változik a lapát hossza mentén β értékének változása miatt, ezt a változást lapátelcsavarásnak nevezzük, ahol a lapát elcsavarásának biztosítania kell, hogy az eredő megfűvás a β szög változásától függetlenül a légcsvavar teljes hosszában azonos α állásszög alatt érje a profilt;

$\varphi_{0,75}$ — a lapát beállítási szöge, a légcsvavarok beállítási szög szerinti összehasonlíthatósága miatt fontos kijelölni egy olyan lapátprofil, amely beállítási szögét jellemzőnek tekintjük az adott légcsvavar lapátra, ez a profil rendszerint $\bar{r} = 0,75$ helyen van;

α — a lapátprofil állásszöge, a húr és az eredő megfűvás által bezárt szög;

$H = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \varphi$ — mértani emelkedés, vagyis az a távolság, amelyet a metszet a légcsvavar egy fordulata alatt tengely irányban megtesz a levegőben, mint egy képzeletbeli anyába csavarodva;

$H_{\text{eff}} = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \beta$ — tényleges emelkedés.

A propulziós erő és a tangenciális erő meghatározása a lapelemen

A propulziós erő és a tangenciális erő meghatározásához először meg kell határoznunk a lapátelemen keletkező elemi felhajtóerőt (dY), ellenállást (dX) és ezek eredőjét (dR). A szárnyprofilhoz hasonlóan a felhajtóerő az eredő megfúvásra merőleges, míg az ellenállás a megfúvás irányába esik, mint ahogy az a 3. ábrán látható.

$$dY = c_y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_p^2 \cdot h \cdot dr \quad (27)$$

$$dX = c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_p^2 \cdot h \cdot dr \quad (28)$$

$$dR = c_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_p^2 \cdot h \cdot dr \quad (29)$$

Nekünk légsavar esetében azonban sokkal kedvezőbb, ha a dR eredő légerőt egy a légsavartengellyel párhuzamos erőre, elemi vonóerőre (dF_p), illetve egy a légsavar forgási síkjába eső, a lapáttengelyre merőleges tangenciális (kerületi) erőre (dF_t) bontjuk. Ezt könnyen megtehetjük, mivel tudjuk, hogy dY és dF_p vektorok által bezárt szög is β -val egyenlő. A 3. ábra alapján felírhatjuk a következő összefüggéseket.

$$dF_p = dY \cdot \cos \beta - dX \cdot \sin \beta = \frac{\rho}{2} \cdot W_p^2 \cdot h \cdot dr \cdot (c_y \cdot \cos \beta - c_x \cdot \sin \beta) \quad (30)$$

$$dF_t = dY \cdot \sin \beta + dX \cdot \cos \beta = \frac{\rho}{2} \cdot W_p^2 \cdot h \cdot dr \cdot (c_y \cdot \sin \beta + c_x \cdot \cos \beta) \quad (31)$$

Új légerő tényezőket kapunk:

$$c_p = c_y \cdot \cos \beta - c_x \cdot \sin \beta \quad (32)$$

$$c_t = c_y \cdot \sin \beta + c_x \cdot \cos \beta \quad (33)$$

ahol:

c_p — vonóerő tényező;

c_t — kerületi erő tényező.

Magát a propulziós erőt és a tangenciális erőket úgy kaphatjuk meg ha a (30) és a (31) egyenleteket a légsavar sugara mentén integráljuk.

$$F_p = z \cdot \int_0^R c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_p \cdot h \cdot dr \quad (34)$$

$$F_t = z \cdot \int_0^R c_t \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_p \cdot h \cdot dr \quad (35)$$

ahol:

z — a légsavarlapátok száma.

A légsavar hatásfokának meghatározása ($\eta_{\text{lég}}$)

Amikor a légsavar impulzus elméletét vizsgáltuk, meghatároztuk az ideális légsavar hatásfokát (η_i). Lapelem elmélet segítségével meghatározhatjuk a légsavar teljes hatásfokát figyelembe véve a profil ellenállás legyőzéséhez szükséges teljesítményt is. Itt az értelmezéshez a teljes 2. ábrát figyelembe vehetjük, vagyis a légsavarhatásfok a propulziós (vontatás számára hasznos) teljesítmény és a valóságos szükséges teljesítmény közötti viszonyt fejezi ki. A hatásfok felírásához érdemes a (30) és (31) egyenletekben meghatározott elemi mennyiségekhez visszatérni.

$$\eta_{\text{lég}} = \frac{dP_p}{dP_{\text{szv}}} = \frac{dF_p \cdot V}{dM_v \cdot \Omega} = \frac{dF_p \cdot V}{dF_t \cdot r \cdot \Omega} = \frac{c_p \cdot V}{c_t \cdot r \cdot \Omega} = \frac{c_p \cdot V}{c_t \cdot U} \quad (36)$$

A $\frac{c_p}{c_t}$ hányados a (32) és (33) egyenletek alapján.

$$\frac{c_p}{c_t} = \frac{c_y \cdot \cos \beta - c_x \cdot \sin \beta}{c_y \cdot \sin \beta + c_x \cdot \cos \beta} = \frac{c_y \cdot \cos \beta \cdot (1 - \varepsilon \cdot \text{tg} \beta)}{c_y \cdot \sin \beta \cdot (1 + \varepsilon \cdot \text{ctg} \beta)} = \frac{1 - \varepsilon \cdot \text{tg} \beta}{\text{tg} \beta + \varepsilon} \quad (37)$$

ahol:

dM_v — a valóságos (súrlódásos) légsavar forgatásához szükséges elemi nyomaték, ebben az esetben már nem csak a légsavarsugár forgatásához szükséges nyomaték, hanem a profilellenállás legyőzéséhez szükséges nyomaték is megjelenik;

dP_{szv} — a valóságos légsavar forgatásába befektetett elemi teljesítmény;

$\varepsilon = \frac{c_x}{c_y}$ — az úgynevezett siklószám.

Vizsgáljuk meg a $\frac{V}{U}$ hányadost is. A 3. ábra alapján felírhatjuk, hogy:

$$\text{tg} \beta = \frac{V + v_i}{r \cdot \Omega - r \cdot \omega_i} = \frac{V + v_i}{U - u_i} = \frac{V}{U} \cdot \frac{1 + \bar{v}_i}{1 - \bar{u}_i} \quad (38)$$

Innen:

$$\frac{V}{U} = \operatorname{tg}\beta \cdot \frac{1 - \bar{u}_i}{1 + \bar{v}_i} \quad (39)$$

Visszatérve a (36) egyenlethez és összegezve az eredményeket a következő összefüggést kapjuk a valóságos légsavar hatásfokára. A jobb átláthatóság miatt a szorzatokat zárójelekkel részekre bontottam.

$$\eta_{lég} = [1 - \bar{u}_i] \cdot \left[\frac{1}{1 + \bar{v}_i} \right] \cdot \left[\operatorname{tg}\beta \cdot \frac{1 - \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\beta + \varepsilon} \right] \quad (40)$$

Megvizsgálva a (40) egyenletet, érdekes felismerésre juthatunk. Az egyenlet jobb oldalán az első két szorzattag visszaadja a (26) egyenletben megkapott ideális légsavarhatásfokot (η_i), következésképpen tehát a harmadik tag a profil ellenállásból adódó veszteségből származik, vagyis ez lesz az úgynevezett profilhatásfok (η_{prof}). Ezt könnyen igazolhatjuk, ugyanis sűrűdásmentes áramlást feltételezve $c_x = 0$, következésképpen $\varepsilon = \frac{c_x}{c_y} = 0$, amiből adódik, hogy $\eta_{\text{prof}} = 1$. Azt is láthatjuk, hogy a

3. ábránál a W_p eredő sebesség meghatározásakor akár a v_i , akár az $r \cdot \omega_i$ komponenseket elhanyagoljuk (tudjuk, hogy ezek veszteségforrások), értelemszerűen a hozzájuk tartozó hatásfokok eggyel válnak egyenlővé.

LÉGSAVAR-JELLEGGÖRBÉK

Általában a légsavarvonóerő, -nyomaték és -teljesítmény meghatározásakor nem az előzőekben levezetett összefüggéseket használjuk, hanem gyakorlati képleteket alkalmazunk. Ezeket a gyakorlati képleteket dimenzióanalízis segítségével határozhatjuk meg.

Dimenzió analízis

A dimenzióanalízis lényege, hogy tudjuk, hogy egy fizikai mennyiség milyen változóktól függ, de nem tudjuk, hogy az összefüggésben milyen hatványkitevőkkel fognak szerepelni. Ezeket a hatványkitevőket az adott fizikai mennyiség mértékegysége alapján meghatározhatjuk. Például vizsgáljuk meg a vonóerőt. Tudjuk, hogy a vonóerő nagysága függ a sűrűségtől, fordulatszámától, légsavar-átmérőtől és egy dimenziótlan tényezőtől, amit az előzőekhez hasonlóan vonóerő tényezőnek (c_p) nevezünk.

Tehát $F_p = f(c_p; \rho; n'; D)$, így a képletünk a következő alakot fogja felvenni:

$$F_p = c_p \cdot \rho^x \cdot n'^y \cdot D^z \quad (41)$$

ahol:

n' — a légszavár másodpercenkénti fordulatszám.

A következő lépésben a mértékegységeiket behelyettesítem az adott fizika mennyiségek helyébe, és mintegy egyenletet megoldom.

$$kg \cdot m \cdot s^{-2} = (kg \cdot m^{-3})^x \cdot (s^{-1})^y \cdot m^z = kg^x \cdot m^{-3x+z} \cdot s^{-y} \quad (42)$$

Innen már könnyedén meghatározhatjuk a kitevőket, ami: $x = 1$; $y = 2$; $z = 4$ lesz. Ugyanezt a légszavárnyomatékra is elvégezhetjük, így az alábbi képleteket kapjuk:

$$F_p = c_p \cdot \rho \cdot n'^2 \cdot D^4 \quad (43)$$

$$M_v = c_M \cdot \rho \cdot n'^2 \cdot D^5 \quad (44)$$

A légszavár forgatásához szükséges nyomaték segítségével a szükséges teljesítmény.

$$P_{szv} = M_v \cdot \Omega = c_M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot n'^3 \cdot D^5 = c_N \cdot \rho \cdot n'^3 \cdot D^5 \quad (45)$$

ahol:

M_v — a valóságos légszavár forgatásához szükséges nyomaték;

P_{szv} — a valóságos légszavár forgatásába befektetett összes teljesítmény;

c_M — nyomatéki tényező;

$c_N = 2 \cdot \pi \cdot c_M$ — teljesítménytényező.

Ezeknek a gyakorlati képleteknek a segítségével meghatározhatjuk a légszavárhatásfokot is.

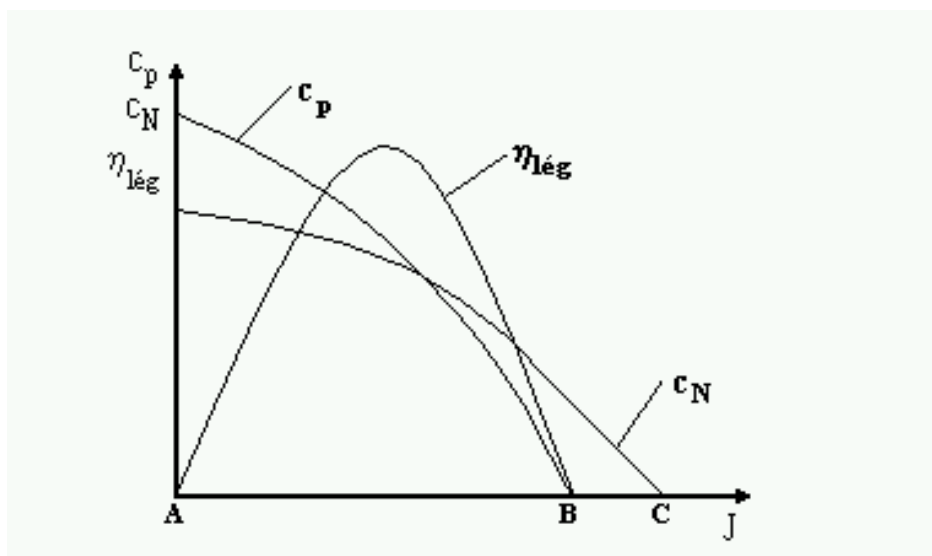
$$\eta_{lég} = \frac{P_p}{P_{szv}} = \frac{F_p \cdot V}{M \cdot \Omega} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot n'^2 \cdot D^4 \cdot V}{c_N \cdot \rho \cdot n'^3 \cdot D} = \frac{c_p}{c_N} \cdot \frac{V}{n' \cdot D} = \frac{c_p}{c_N} \cdot J \quad (46)$$

ahol:

J — úgynevezett előrehaladási fok.

Mind a c_p , mind c_N értéke a J előrehaladási foktól függ. Ezt egyszerűen beláthatjuk, ha végig gondoljuk, hogy c_p ; $c_N = f(c_y; c_x; \beta)$ és ahol c_y ; $c_x = f(\alpha)$, de mivel $\alpha = \varphi - \beta$, ahol φ rögzített a légszavár kialakítása miatt, így $c_p; c_N = f(\beta)$. Ugyanakkor

$$J = \frac{V}{n' \cdot D} = \frac{V}{\frac{\Omega}{2 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot R} = \frac{V \cdot \pi}{R \cdot \Omega} = f(\beta), \text{ ami belátható a 3. ábrából.}$$



4. ábra

A 4. ábra egy adott $\varphi_{0,75}$ beállítási szöggel rendelkező légsavár jelleggörbéit ábrázolja. Jellegzetes pontjai alapján követhetjük a légsavár üzemmódjait.

A légsavár üzemmódjai

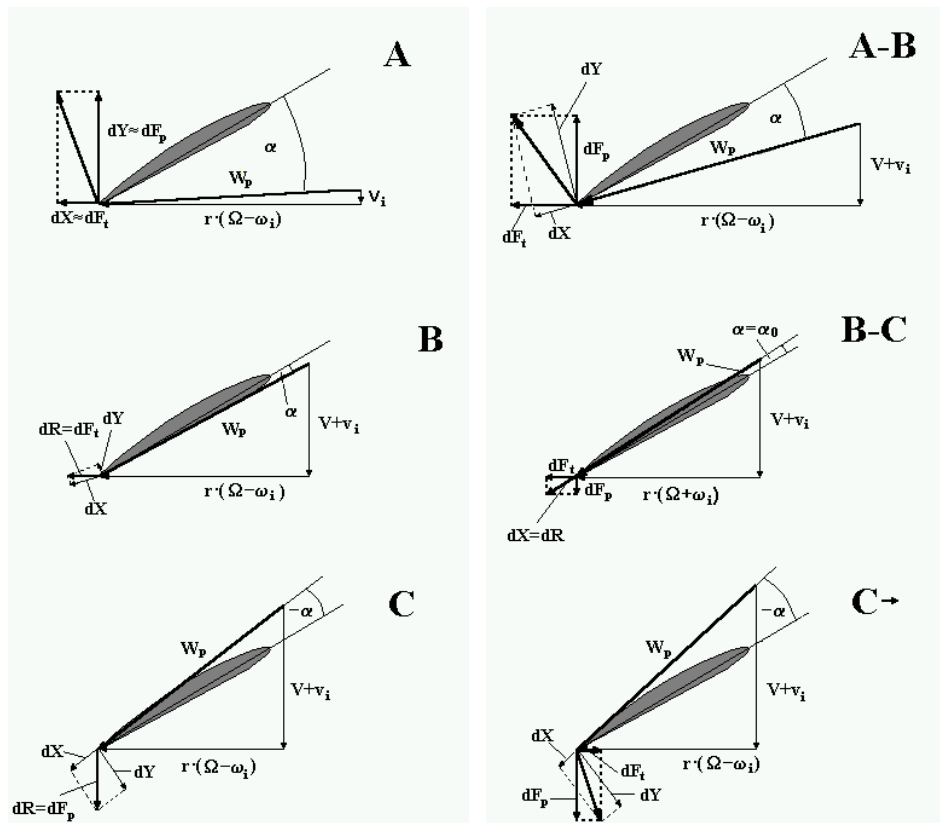
Az 5. ábrán nyomon követhetjük ezeknek a jellegzetes pontoknak, vagy tartományoknak a megfúvási viszonyait is.

A pont: A repülőgép álló helyzetében működik a légsavár. Gyakorlatilag $dY = dF_p$, illetve $dX = dF_t$. Az állásszög maximális, c_p és c_N maximális, a vonóerő maximális, de a légsavárhatalásfok zérus, mivel a repülési sebesség zérus.

A-B pontok közötti tartomány: Normál üzemi tartomány, amely közben a sebesség növekedésével az állásszög értéke folyamatosan csökken. A légsavár hatásfok egy maximális érték után újra csökkenni kezd.

B pont: Határpont, az állásszög értéke zérushoz közeli. A profilon még pozitív felhajtóerő keletkezik, de az eredőerő pont a légsavár forgási síkjába esik, vagyis megegyezik a kerületi erővel, következésképpen a légsavár forgatására teljesítményt kell fordítanunk, de sem pozitív, sem negatív vonóerőt nem kapunk.

B-C pontok közötti tartomány: Motoros fékezési üzemmód. Ennek egyik jellegzetes pontja lesz, amikor az állásszög egyenlő a zérus felhajtóerőhöz tartozó állásszöggel ($\alpha = \alpha_0$). Ez esetben $dX = dR$. Erre a tartományra az a jellemző, hogy teljesítményt kell befektetnünk a légsavár forgatásába, de negatív vonóerő keletkezik. Ezt az üzemmódot a leszállás közbeni kigurulási úthossz csökkentésére lehet felhasználni.



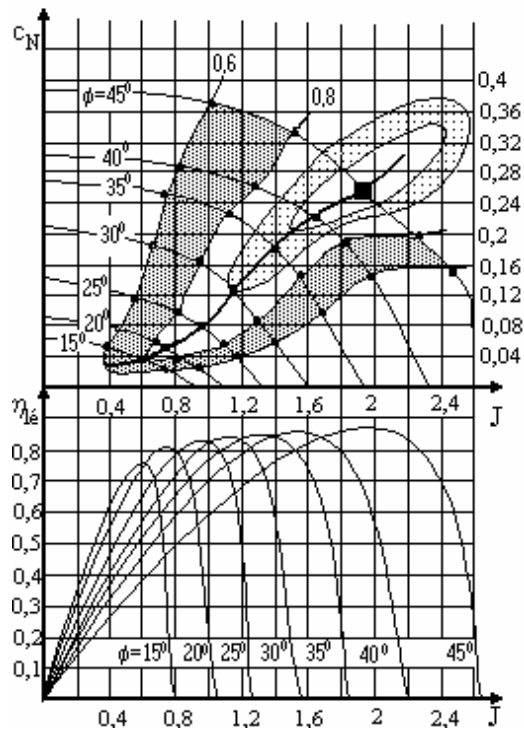
5. ábra

C pont: Határpont, az állásszög negatív. A profilon negatív felhajtóerő képződik, de dR éppen a légsavartengellyel lesz párhuzamos, vagyis negatív vonóerő keletkezik, de a kerületi erő éppen zérus lesz.

C ponton túli tartomány: Szélkerék-üzemmód. A negatív állásszög tovább nő, a kerületi erő a légsavar forgási irányába mutat, vagyis a légsavar forgatja a hajtóművet. Ez az üzemmód kikapcsolt motorral történő sikláskor fordulhat elő.

A légsavar-jelleggörbék gyakorlati alkalmazása

A légsavarok jelleggörbéi azért szükségesek, hogy segítségükkel ki lehessen választani a legmegfelelőbb légsavart. Ezért a jelleggörbéket általában nem egy adott légsavarra ábrázolják, mint tettük azt a 4. ábrán, hanem egy egész légsavarsaládra.



6. ábra

Ezek a légsavarok geometriailag egyformák lesznek, csupán egyetlen paraméterben különböznek egymástól, ez pedig a lapát beállítási szöge ($\phi_{0,75}$).

A 6. ábrán láthatunk erre egy példát, ahol a beállítási szögek 15° -tól 45° -ig terjednek. A diagram alsó részén a légsavarhatásfokok ($\eta_{\text{lég}}$), felül pedig a teljesítménytényezők (c_N) vannak ábrázolva az előrehaladási fok (J) függvényében. A c_N görbékre felrakhatjuk a légsavarhatásfok megfelelő pontjait, az alsó diagramból és ezen pontok összekötésével megkapjuk az állandó hatásfokgörbéket. Mint látjuk az állandó hatásfokgörbék zártak, e zárt görbék magja megfelel az alsó diagram hatásfok-görbesereg burkoló görbéjének. A fekete téglalappal jelzett pont pedig megadja a légsavarcsalád ($\eta_{\text{lég max}} = 0,87$) maximális légsavar hatásfokát. Ezt a diagramot fel lehet használni, hogy egy adott sebességtartományra merev légsavart válasszunk, illetve még inkább alkalmas, hogy állítható légsavar esetében meghatározhassuk az optimális lapátállítás módját. Az ábrából azt is láthatjuk, hogy miért előnyös az állítható légsavar alkalmazása, hiszen bármelyik zárt görbét vizsgáljuk meg, láthatjuk, hogy állítható légsavar esetén sokkal szélesebb üzemmód tartományban lesz képes a légsavarunk egy viszonylag magas hatásfoktartományban működni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Barnes W. MCCORMICK, PH.D : Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics. The Pennsylvania State University Department of Aerospace Engineering, Pennsylvania, 1995.
- [2] DR RÁCZ Elemér : Repülőgépek. Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar. Budapest, 1978.
- [3] V. L. ALEXANDROV : Légcsavarok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1953.