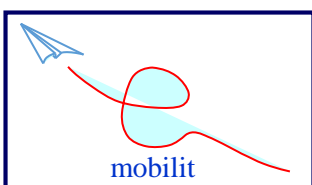


KIS SEBESSÉGŰ REPÜLŐGÉP ELŐZETES AERODINAMIKAI SZÁMÍTÁSA

HALLGATÓK ÁLTAL SZERKESZTETT ANYAG - 2018



TARTALOM

| | |
|---|----|
| Tartalom | 2 |
| 1. Bevezetés | 3 |
| 2. Repülőgép geometriai jellemzői | 4 |
| 2.1 A szárny | 4 |
| 2.1.1 Karakterisztika számítása: | 6 |
| 2.2 Vezérsík | 7 |
| 2.3 Törzs, hajtómű és gondola | 7 |
| 3. Ellenállás | 10 |
| 3.1 Felhajtóerő független ellenállás tényező számítása | 10 |
| 3.1.1 A szárny | 10 |
| 3.1.2 Törzs | 13 |
| 3.2 Repülőgép felhajtóerő független ellenállás tényezője | 18 |
| 4. A repülőgép felhajtóerő tényezőjének meghatározása | 20 |
| 4.1 A maximális felhajtóerő tényező (cl_{max}) | 20 |
| 5. A repülőgép polár diagramja | 21 |
| 6. Repülőgép polárisa felhajtóerő növelő berendezések használatával | 22 |
| 7. Források | 25 |

1. BEVEZETÉS

A dokumentum a repülőgépek aerodinamikai tulajdonságainak előzetes becslésével, annak számításával foglalkozik. A dokumentum a Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék Aerodinamika című tárgyának házfeladatához használt aerodinamikai számítási segédlet alapján a hallgatók által szerkesztve, annak magyarra fordításával és rövidítésével, a nagysebességű repülőgépek és az azzal kapcsolatos számítási módok elhagyásával.

2. REPÜLŐGÉP GEOMETRIAI JELLEMZŐI

2.1 A szárny

Nevezéktan:

A – szárny karcsúság

b – szárny fesztáv

$b_{f,s}$ – fékszárny szerkezeti fesztáv

b_s – szárny szerkezeti fesztáv

c – húrhossz

S – bruttó szárny felület

S_f – fékszárny által kezelt felület

S_{net} – nettó szárny felület

S_{wet} – nedvesített felület

t – profil vastagsága

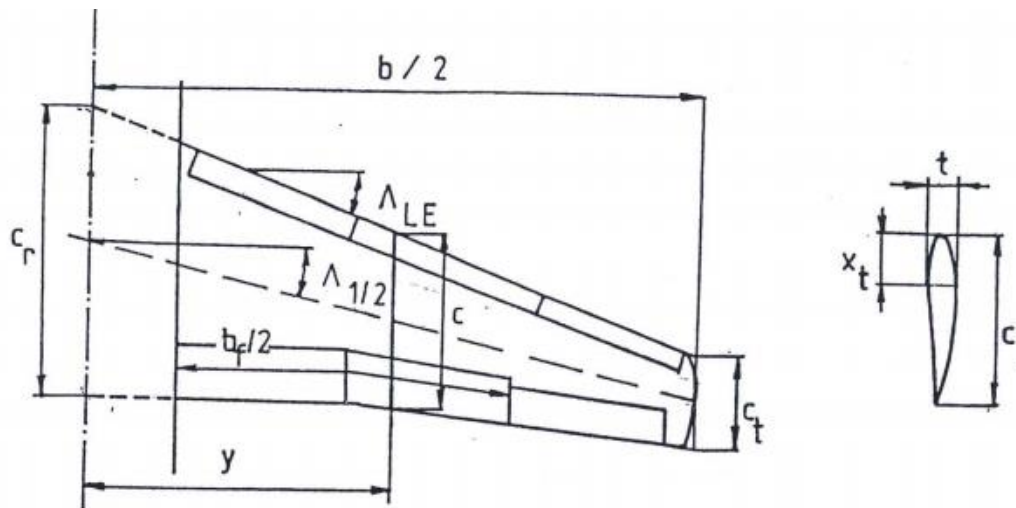
t/c – relatív vastagság (a vastagság és a húr aránya)

$\Lambda_{1/2}$ – félhúr nyilazási szöge

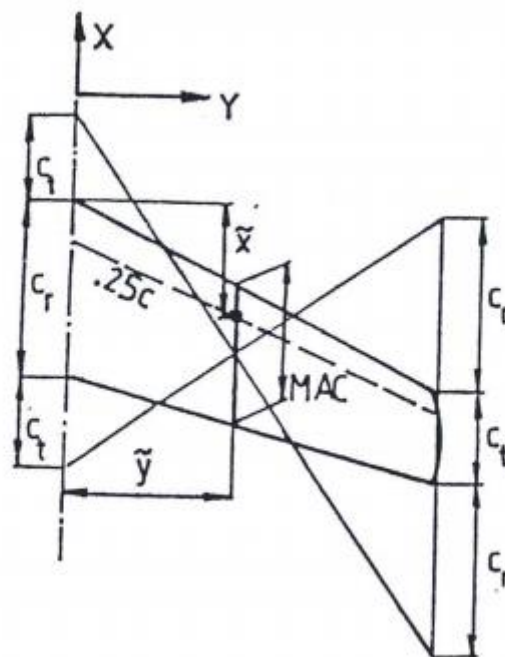
Λ_{le} – belépőél nyilazási szög

$\Lambda_{1/4}$ – negyed húr nyilazási szög

$\Psi_{1/4}$ – szárny V-beállítási szöge



1. ábra Szárny Geometriai jellemzői



2. ábra Közepes aerodinamikai húr meghatározása szerkesztéssel

Indexek:

b – bázis

f – szárny

le – belépőél

r – szárnytő

sp – spoiler

t – szárnyvég

te – kilépőél

w – szárny

2.1.1 Karakterisztika számítása:

Trapéz viszony:

$$\lambda = \frac{c_t}{c_r}$$

SMC – Közepes geometriai húrhossz:

$$c_g = \frac{S}{b}$$

Szárny karcsúság:

$$A = \frac{b^2}{S}$$

Közepes aerodinamikai húrhossz:

$$\bar{c} = \frac{2}{S} \int_0^{b/2} c^2 dy$$

Közepes aerodinamikai húrhossz egyenes trapéz alakú szárnyakra:

$$\bar{c} = \frac{2}{3} c_r \frac{1 + \lambda + \lambda^2}{1 + \lambda}$$

Közepes aerodinamikai húrhossz. Fél szárny esetén a közepes aerodinamikai húrhossz 0.25 \bar{c} -nél található, melynek koordinátái:

$$\tilde{x} = 0,25 \cdot c_r + \frac{2 \cdot \tan \Lambda_{1/4}}{S} \int_0^{b/2} c \cdot y dy$$

$$\tilde{y} = \frac{2}{S} \cdot \int_0^{b/2} c \cdot y dy$$

$$\tilde{z} = \frac{2 \cdot \tan \Lambda_{1/4}}{S} \int_0^{b/2} c \cdot y dy$$

Egyenes trapéz szárny esetén a közepes aerodinamikai húr hossz koordinátája a középtengelyen (fél szárnyra):

$$\tilde{y} = \frac{b}{2} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \lambda}{3 \cdot (1 + \lambda)}$$

2.2 Vezérsík

A vezérsík geometriai jellemzői megegyeznek a repülőgép szárnyának fő geometriai jellemzőivel így annak külön tárgyalása nem szükséges

Nevezéktan:

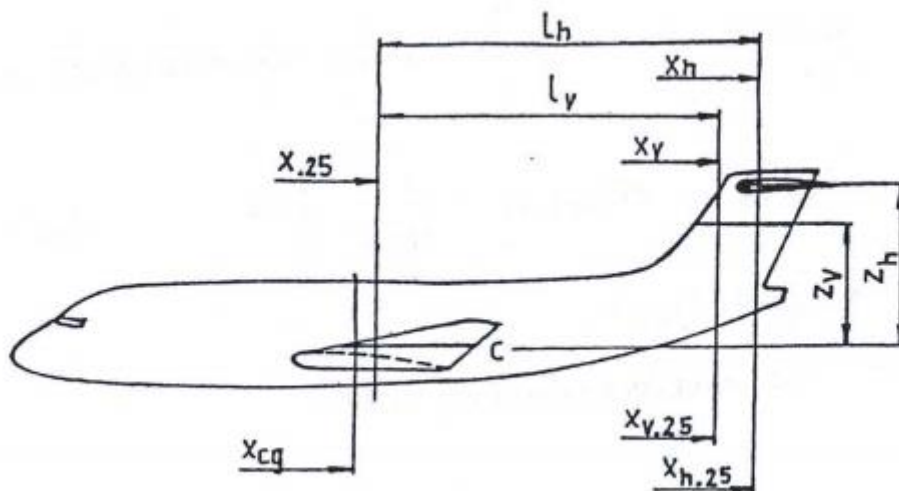
l – hosszúság

h – magasság

Indexek:

h – vízszintes vezérsík

v – függőleges vezérsík



3. ábra Repülőgép vezérsíkjának geometriai tulajdonságai

2.3 Törzs, hajtómű és gondola

Nevezéktan:

D – átmérő

D_e – ekvivalens átmérő

h – magasság

l – hossz

S – felület

λ – karcsúság ($\lambda=L/D$)

Indexek:

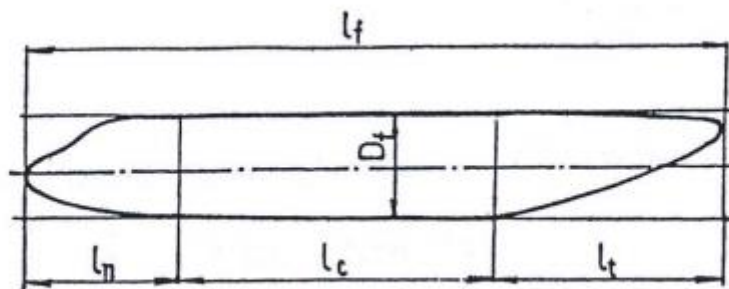
c – szelvény, hengeres középrész

n – gondola, orr

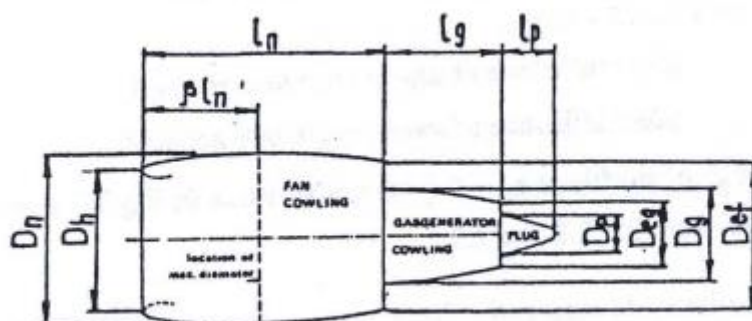
t – farokrész, üzemanyagtank

fus – törzs

wet – nedvesített felület



4. ábra Repülőgép törzsének jellemző geometriai tulajdonságai



5. ábra Hajtómű geometria paraméterei

Keresztmetszet felülete:

$$S_c = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$$

Nedvesített felület:

A következő közelítés hengeres közepszerű törzsekre alkalmazható:

$$S_{wet,fus} = \pi \cdot D_{fus} \cdot l_{fus} \cdot \left(1 - \frac{2}{\lambda_{fus}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{2}{\lambda_{fus}^2}\right), \lambda_{fus} \geq 4,5$$

vagy

$$S_{wet,fus} = 2,53 \cdot D_{fus} \cdot l_{fus}$$

Külső nedvesített felület a ventilátor – fokozat borításánál:

$$S_{wet,fus} = l_n \cdot D_n \cdot \left\{ 2 + 0,35\beta + 0,8\beta \frac{D_h}{D_n} + 1,15 \cdot (1 - \beta) \cdot \frac{D_{ef}}{D_n} \right\}$$

A gáz generátor nedvesített felülete:

$$S_{wet,fus} = \pi \cdot l_g \cdot D_g \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{D_{eg}}{D_g}\right) \left\{ 1 - 0,18 \cdot \left(\frac{D_g}{l_g}\right)^{5/3} \right\} \right]$$

A hajtóművég nedvesített felülete:

$$S_{wet,fus} = 0,7\pi \cdot D_p \cdot l_p$$

3. ELLENÁLLÁS

Az ellenállás tényező felbontása a következőképpen alakul:

$$c_d = c_{d0} + c_{di} + \Delta c_d$$

ahol,

c_{d0} – nincs felhajtóerőhöz tartozó ellenállástényező

c_{di} – indukált ellenállástényező

Δc_d – leválás okozta ellenállás növekedés

$$c_{d0} = 1,05 \cdot (c_{d_{0w}} + c_{d_{0fus}} \cdot \frac{S_{fus}}{S} + \frac{\sum_i^n (c_{d_{0i}} \cdot S_i)}{S})$$

$\Delta c_{d0(i)}$ – a repülőgép i. elemének ellenállástényezője

S_i – az i. elem felülete

1,05 – korrekciós tényező

3.1 Felhajtóerő független ellenállás tényező számítása

3.1.1 A szárny

A szárny felhajtóerő független ellenállás tényezője

$$c_{d0w} = c_{d0pw} + c_{d0wwave}$$

ahol,

c_{d0pw} – a szárnyprofil ellenállástényezője (súrlódás és alakellenállás)

$c_{d0wwave}$ – hullámmellenállás tényező

A profilellenállás gyakorlati képlete:

$$c_{d0w} = c_{d0pwIS} (1 - k_{int} \frac{S_{fu}}{S}) + c_{d0w}$$

ahol,

c_{d0pwlS} – az elkülönített szárny profilellenállás tényezője

k_{int} – a törzs és a szárny közötti zavarást reprezentáló állandó

S_{fu} – a törzs alatti szárnyfelület

k_{int} egyenlő:

0,25 – alsó szárny és hengeres törzs

0,50 – alsó szárny és ovális törzs

0,85 – középszárny

0,95 – felső szárny

0,60 – alsó szárny és szögletes törzs

Δc_{d0w} – kisméretű szerkezeti elemek, rések, kötőelemek, stb. miatti ellenállástényező növekmény

$$\Delta c_{d0w} = (0,1 - 0,2) c_{d0pwlS}$$

Az elkülönített szárny profil-ellenállásának meghatározásához az áramlásba helyezett síklap ellenállás tényezőjét vesszük alapul:

$$c_{d0pwlS} = 2c_{ps} \cdot \eta_t \cdot \eta_M$$

ahol,

$2c_{ps}$ – síklap ellenállás-tényezője összenyomhatatlan közegben

η_t – a szárny vastagságát figyelembe vevő együttható

η_M – az összenyomhatóságot figyelembe vevő együttható

A $2c_{ps}$, η_t , η_M tényezőket az 6., 7., 8. ábráról tudjuk meghatározni. Szükséges még tudnunk a Reynolds-szám (Re) és a határréteg (x_{tp}) közötti átváltási pontot:

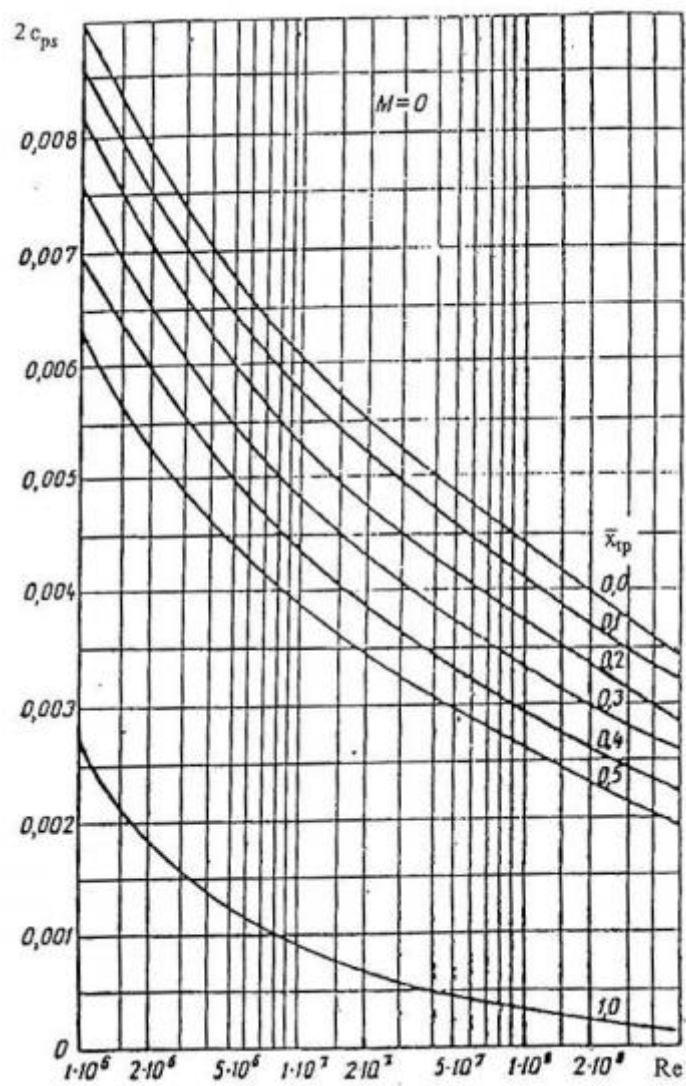
$$Re = \frac{V \cdot c_g}{\nu}$$

Az átváltási pont relatív koordinátája:

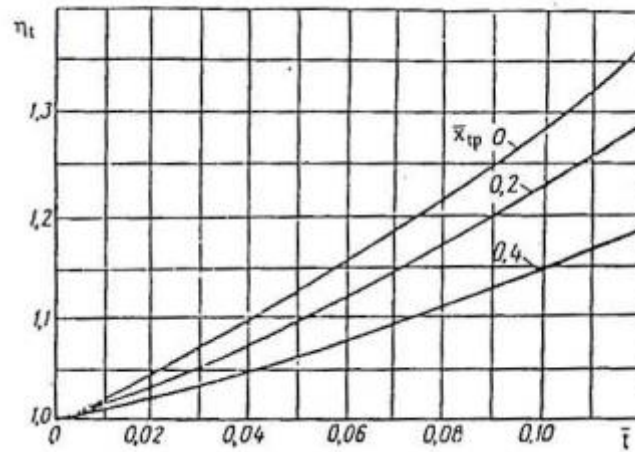
$$\bar{x}_{tp} = \frac{x_{tp}}{c_g} = \frac{Re_t}{Re}$$

ahol,

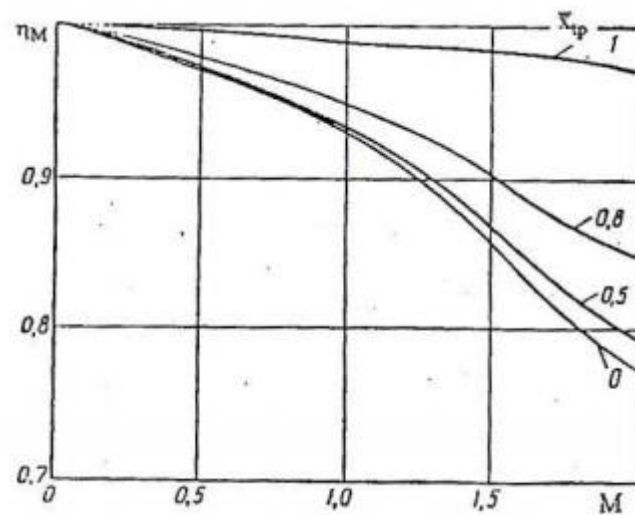
Re_t – átváltási Reynolds-szám



6. ábra $2c_{ps}$ meghatározása



7. ábra η_t meghatározása



8. ábra η_M meghatározása

3.1.2 Törzs

A törzs esetén a c_{dofus} együtthatót ugyanúgy kell kezelni, mint a szárny esetén:

$$c_{dofus} = c_{dpfus} + c_{dfusn} + c_{dfust} + c_{dfusb} + \Delta c_{dfus}$$

ahol,

c_{dpfus} – törzs alaki ellenállás tényezője

c_{dfusn} – orr-rész nyomáskereső tényezője

c_{dfust} – nyomáskereső tényezője a farok részen

c_{dfusb} – bázis felület ellenállás tényezője

Δc_{dfus} – kiálló részek okozta ellenállás tényező növekedés

A profil ellenállás-tényezője:

$$c_{dpflus} = \frac{2}{2} c_{ps} \cdot \eta_t \cdot \eta_M \cdot \frac{S_{wet,fus}}{S_{c,fus}}$$

ahol,

$2c_{ps}$ – síklap ellenállás tényezője

η_t – profil vastagságát figyelembe vevő együttható

η_M – levegő összenyomhatóságából adódó együttható

$S_{wet,fus}$ – a törzs nedvesített felülete

A törzs karcsúsága:

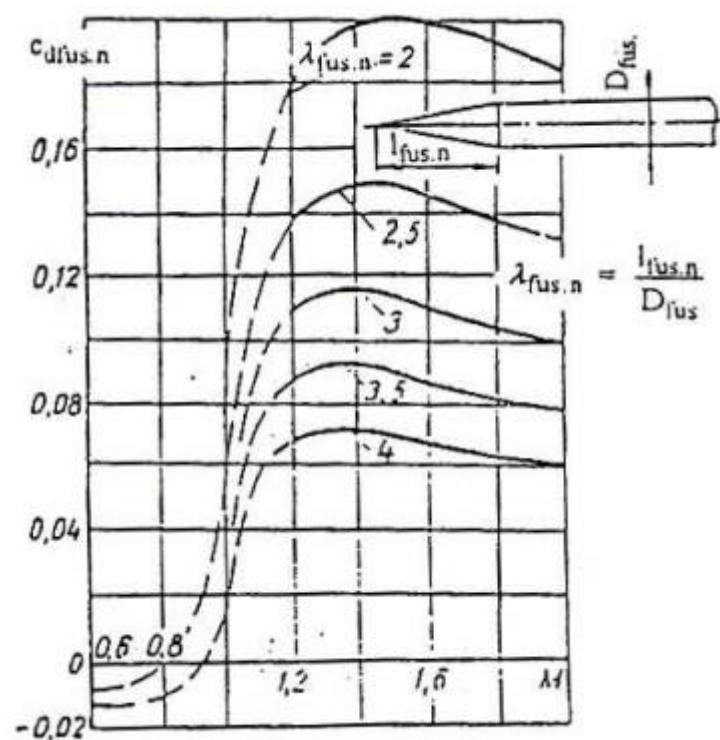
$$\lambda_{fus} = \frac{l_{fus}}{D_{fus}}$$

ahol,

D_{fus} – törzs átmérője, vagy ekvivalens átmérője

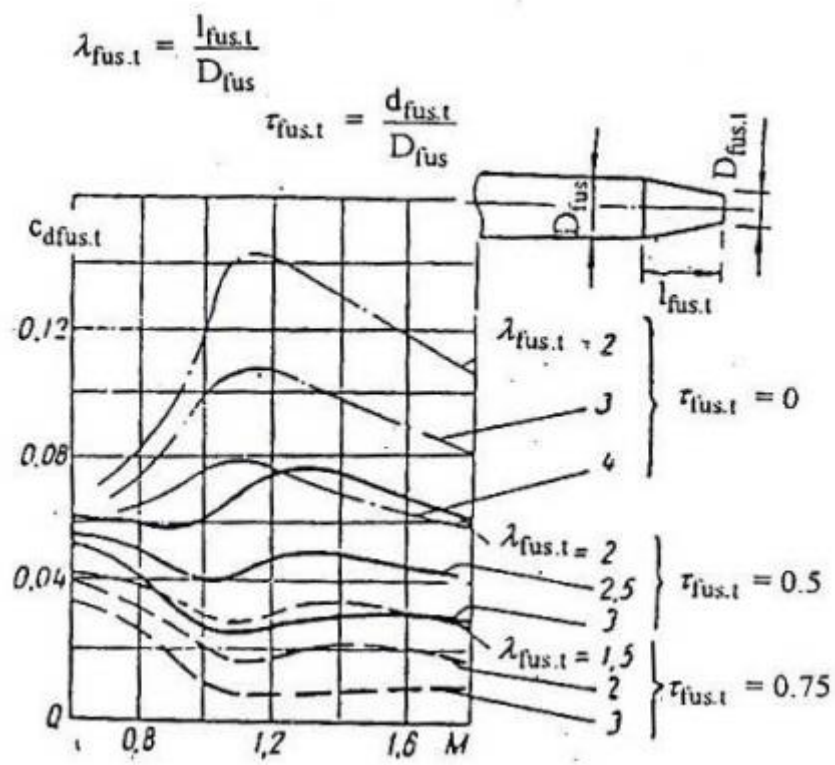
A törzs orr-részének ellenállástényezője (c_{dfusn}) a Mach-számtól és a karcsúság arányától függ

($\lambda_{fusn} = \frac{l_{fus,n}}{D_{fus}}$), melynek értéke a 9. ábrából olvasható le.

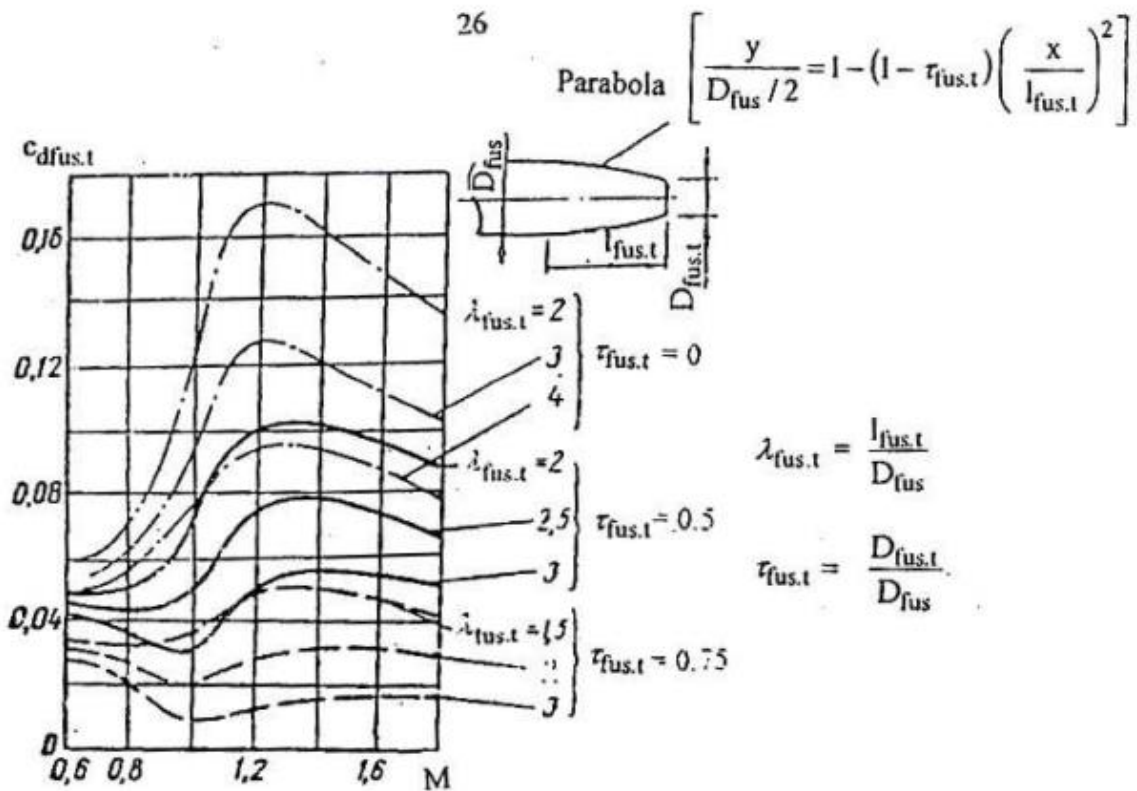


9. ábra A törzs orr rész ellenállástényezője

A törzs farokrészének ellenállás tényezőjét (c_{dfust}) a Mach-szám, a $\lambda_{fust,t}$ karcsúság és a $\tau_{fust,t}$ trapézviszony ismeretében a 10. és a 11. ábráról olvashatjuk le, mind a kúpos, mind pedig a parabolikus alakokra.



10. ábra : A törzs farokrészének az ellenállástényezője kúpos alakra



11. ábra A törzs farokrészének az ellenállástényezője parabolikus alakra

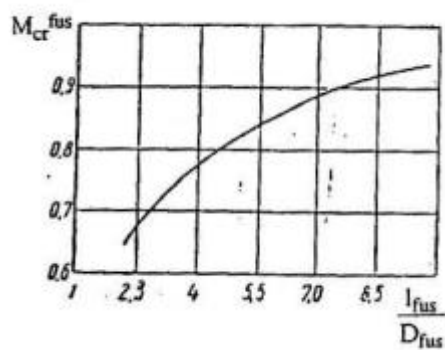
A bázis felület ellenállás tényezője: A bázis felület ellenállás tényezőjével akkor szükséges számolni, ha a törzs hátsó összeszűkülő kúpos hátsó része hiányzik, vagy az csonka kúpként került kialakításra, és az így kiképzett bázis felületet nem valamely hajtómű kiömlő nyílásaként használják. Ha a törzs kialakítása miatt az bázis felületi ellenállás tényezővel rendelkezik, akkor a tényező értéke:

$$a., 0 < M \leq M_{cr.fus}$$

$$c_{dfus,b} = (0,05 + 0,25 \cdot M_{\infty}^2) \cdot \tau_{fus,t}^2$$

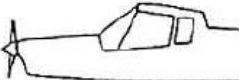


ahol,

$M_{cr.fus}$ – a törzsnél lévő kritikus Mach-szám (ami az 11. ábrán látható)



12. ábra A törzs kritikus Mach-számának meghatározása

A törzs szerkezeti kialakításából adódó ellenállás tényező növekménye (Δc_{dfus}) az alábbi egyszerű táblázat segítségével becsülhető

| Construction | Δc_{dfus} |
|---|-------------------|
|  | 0.041 |
|  | 0.035 |
|  | 0.007 - 0.01 |

Egyéb konstrukciós kialakítások, és részletesebb számítási módszerek alkalmazásához javasolt a [2] és [3] irodalmak tanulmányozása.

3.2 Repülőgép felhajtóerő független ellenállás tényezője

A teljes repülőgép felhajtóerő független ellenállás tényezőjének számításához célszerű az eredményeket táblázatba foglalni és az összegzést annak segítségével végezni.

| Repülőgép része | Jellemző felület | Darabszám (n) | c_{d_0} | S_i/S | $c_{d_0} \cdot \left(\frac{S_i}{S}\right) \cdot n$ |
|------------------------|---------------------|------------------|-----------|---------|--|
| Szárny | S | | | | |
| Törzs | S_{fus} | | | | |
| Függőleges vezérsík | S_{vt} | | | | |
| Vízszintes vezérsík | S_{ht} | | | | |
| ... | | | | | |

4. A REPÜLŐGÉP FELHAJTÓERŐ TÉNYEZŐJÉNEK MEGHATÁROZÁSA

A repülőgép felhajtóerejét általában a szárny, a törzs, a hajtóművek és a farok rész eredményezi. A szárny mögötti rész esetén (hagyományos repülőgép elrendezés esetén) meg lehet állapítani, hogy a felhajtóerő tényező az állásszög függvényében lineárisan változik.

$$c_l = c_{l0} + c_l^\alpha \cdot \alpha + c_l^\delta \cdot \delta_c$$

ahol,

c_{l0} – a repülőgép felhajtóerő tényezője 0° -os állásszög szög esetén

c_l^α – a repülőgép felhajtóerő tényezője α állásszög szög esetén

c_l^δ – magassági kormánykitérés szerinti derivált

δ_c – magassági kormány semleges helyzetétől való kitérés szöge

A felhajtóerő tényező számításának elemzése megmutatja, hogy kis fesztávolság és törzs átmérő arány (D_{fus}/b) és alacsony Mach – szám esetén a teljes repülőgép felhajtóerő tényezője gyakorlatilag megegyezik az egyedülálló szárny felhajtóerő tényezőjével:

$$c_l = c_l^\alpha \cdot (\alpha - \alpha_0)$$

Előfordulhat, hogy a törzs és a hajtómű gondola által termelt felhajtóerő nem nagy, illetve nem pozitív irányú, de a vízszintes vezérsík által termelt felhajtóerő általában negatív és lefelé mutat. Ezek az erők összehasonlítva a szárny által termelt felhajtóerővel elhanyagolhatók.

4.1 A maximális felhajtóerő tényező (c_{lmax})

A maximális felhajtóerő tényező csak a leszállási sebesség (V_1) esetén becsülhető, mivel a polgári légi közlekedésben a nagy állásszög gyakorlatilag csak a végső megközelítés és a felszállás esetén van jelen. A szárny felett 3 – szoros felhajtóerő tényezővel rendelkező szárnyra a következő képletet alkalmazhatjuk:

$$c_{lmax} = c_{Lmax} \cdot k_\lambda \cdot \bar{c}_{lmax}$$

ahol,

c_{Lmax} – szárnyprofil maximális felhajtóerő tényezője

k_λ – trapézviszonyt figyelembe vevő tényező

$\bar{c}_{lmax\Lambda}$ - szárnynyílazást figyelembe vevő tényező

Λ - a szárnyat alkotó szárnyprofilok maximális vastagságának helyeit összekötő vonal nyílazási szöge

5. A REPÜLŐGÉP POLÁR DIAGRAMJA

A poláris görbe egyenlete a következőképpen írható fel:

$$c_d = c_{d0} + c_{di} + \Delta c_d$$

ahol,

c_{d0} – felhajtóerő független ellenállás tényező

c_{di} – indukált ellenállás tényező

Δc_d – nagy állásszögön létrejövő ellenállás növekedés

A polár diagram elkészítéséhez szükségünk van egy adott repülési sebességen érvényes c_{d0} – ra, valamint a c_{di} és a Δc_d tényezőkre is.

A repülőgép által keltett indukált ellenállás tényezője:

$$c_{di} = \frac{c_l^2}{\pi \cdot A_{eff}}$$

ahol az A_{eff} az effektív oldalviszony, amely:

$$A_{eff} = k_\Lambda \cdot \frac{A}{1 + \frac{S_{fu}}{S}}$$

ahol,

S_{fu} – törzs által kitakart szárnyfelület

k_Λ - szárnynyílazást figyelembe vevő tényező

A számítás eredményeit érdemes táblázatos formában meghatározni.

| c_l | c_l^2 | c_{d_0} | c_{d_i} | $\bar{c}_l = \frac{c_l}{c_{l_{max}}}$ | Δc_d | $c_d = c_{d_0} + c_{d_i} + \Delta c_d$ |
|---------------|---------|-----------|-----------|---------------------------------------|--------------|--|
| 0,1 | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| $c_{l_{max}}$ | | | | | | |

6. REPÜLŐGÉP POLÁRISA FELHAJTÓERŐ NÖVELŐ BERENDEZÉSEK HASZNÁLATÁVAL

A repülőgép ellenállás tényezője felhajtóerő növelő eszközök használatával:

$$c_d = c_{d_0} + c_{d_i} + \Delta c_d + \Delta c_{d,hld} \cdot \frac{S_{hld}}{S} + \Delta c_{dg}$$

ahol,

c_{d_0} – ellenállás tényező 0 felhajtóerő esetén

c_{d_i} – indukált ellenállás tényező

Δc_d – ellenállás tényező növekmény a levélások miatt

$\Delta c_{d,hld}$ – ellenállás tényező növekmény az ívelőlapok/fékszárny kitérítése miatt

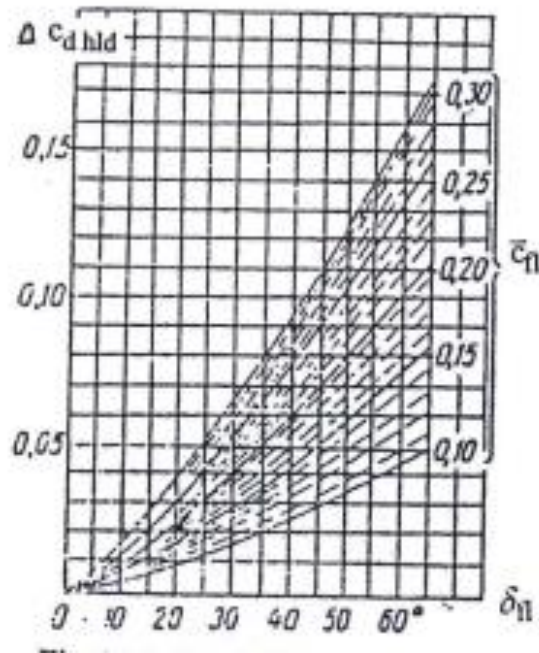
S_{hld} – a fékszárny által kezelt felület

A $c_{d,hld}$ ellenállás tényezőt a 13. ábrából kapjuk. Ott átlagos értéket kapunk az ívelőlap okozta ellenállásra, melyet a $\Delta c_{d,hld}$ számításához használhatunk kitérített ívelőlap esetére. $\Delta c_{d,hld}$ értéket a kitérítés mértéke és a $\bar{c}_H = \frac{c_H}{c_g}$ arány függvényében becsülhetjük. Modern repülőgépre:

$$\delta_{flap} \approx 0,25 - 0,4 \text{ rad (felszállás esetén)}$$

$$\delta_{flap} \approx 0,6 - 0,8 \text{ rad (leszállás esetén)}$$

$$\bar{c}_{flap} = 0,3 - 0,36$$



13. ábra $c_{d,hd}$ ellenállás tényezőt

A kiengedett futómű ellenállásértékét $0,35 c_{d0}$ – ra vehetjük, ha a behúzás az áramlással párhuzamosan történik és $0,5 c_{d0}$, ha az áramlásra merőlegesen.

Az indukált ellenállás számításánál figyelembe vesszük a párnahatást. Ez az áramlás eltérítésének csökkenésében mutatkozik és az elméleti A_g karcsúsággal vesszük figyelembe a hatást:

$$c_{di} = \frac{c_l^2}{\pi * A_g}$$

$$A_g = \frac{A_{eff}}{2,23} * \left(\frac{\pi * b}{8 * h} + 2 \right)$$

vagy

$$A_g \approx 2,5 * A_{eff}$$

ahol,

A_{eff} – a effektív karcsúsága

b – fesztáv

h – A földön álló gép esetén a föld és a KAH $\frac{1}{4}$ pontja közötti távolság

Ahhoz, hogy meghatározzuk a repülési állásszögeket és ezeket elhelyezzük a polárdiagrammon meg kell határoznunk a $c_2 = c_2(\alpha)$ függvényt a felhajtóerő növelő eszközöket használó repülőgépre. Ebben az esetben a c_{lmax} :

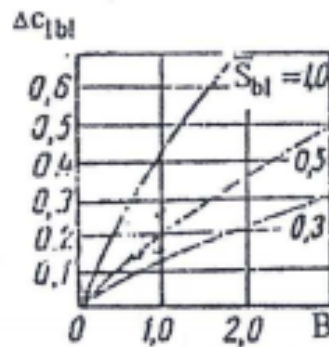
$$c_{lmax.hld} = c_{lmax} + \Delta c_{l.hld} + \Delta c_{lg} + \Delta c_{lbl}$$

ahol,

c_{lmax} – maximális felhajtóerő tényező felhajtóerő növelő eszközök nélkül

Δc_{lg} – a felhajtóerő tényező megváltozása a párnahatás miatt a z x. ábrán $\frac{h_{fl}}{c_{gfl}}$ arányból becsülhető

Δc_{lbl} – felhajtóerő növekmény a légcsavar(ok) megfúvása miatt. A megfújott felületek arányából és terhelési többszörösből becsülhető (14.ábra).



14. ábra Δc_{lbl} felhajtóerő növekmény

$\Delta c_{l.hld}$ – felhajtóerő növekmény a felhajtóerő növelő berendezések miatt

$$\Delta c_{l.hld} = 4,35 \cdot \bar{S}_{hld} \cdot \Delta \alpha_{lhd} \cdot \cos^2 \Lambda$$

ahol,

$\Delta \alpha_{lhd}$ – a 0 felhajtóerőhöz tartozó állásszögváltozás a felhajtóerő növelő berendezés használata miatt

Λ - az ívelőlap belépőélének nyílzási szöge

A fel- és leszálló üzemmód polárdiagramja hasonlóan készül, mint az utazó üzemmódé. A polárdiagramokat és a $c_L = c_L(\alpha)$ függvényeket erre a két üzemmódra is meg kell határozni.

7. FORRÁSOK

[1] – Gausz Zsanna: Aerodinamikai számítási segédlet (angol), BME VRHT

[2] – Roskam J.: Airplane Design Part VI.: : Preliminary Calculation of Aerodynamic Thrust and Power Characteristics ,ISBN-13: 978-1884885525

[3] – R.D Finck; D.E. Hoak: USAF Stability and Control DATCOM Volume 2.