



# FORGÓSZÁRNYAS

03

# REPÜLŐGÉPEK

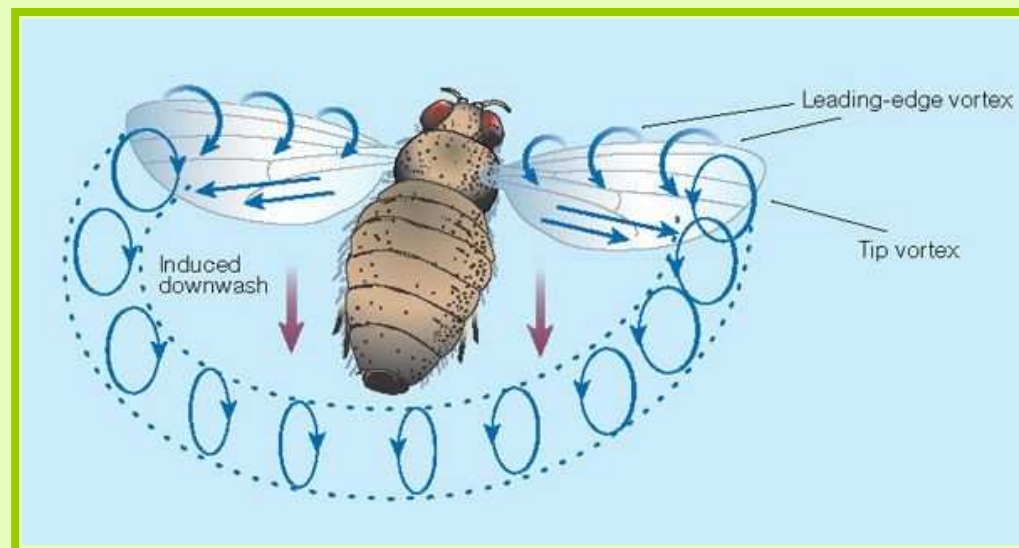
Gausz Tamás

Budapest, 2014



## Figyelem:

A következő képeken közölt ismeretek az előadásokon elhangzottakkal együtt képeznek érthető és tanulható egységet!





Merev testek mozgásegyenletei (alapok)

Megmaradási elvek

Mozgásmennyiség változás = impulzus-változás

Newton II. törvénye

$$\Delta(m\underline{V}) = \underline{F} \Delta t \quad \Rightarrow \quad \underline{F} = \left( \frac{dm}{dt} \right) \underline{V} + m \left( \frac{d\underline{V}}{dt} \right) \quad \Rightarrow \quad \underline{F} = m\underline{a}$$

Ciolkovszkij-egyenlet

az a az abszolút gyorsulás

A fenti vektor-egyenlet egy merev test 3, haladó (transzlációs) mozgását írja le (3 szabadságfok).  
A forgómozgást a perdület megmaradás elvén alapuló, alábbi vektor-egyenlet írja le (további 3 szabadságfok – összesen 6 DOF):

$$\frac{d}{dt}(\underline{\pi}) = \underline{M}_0 - (\underline{\rho}_s \times \underline{a}_0) m$$

ahol a perdület:

$$\underline{\pi} = \underline{\Theta} \underline{\omega}$$

és a tehetetlenségi tenzor mátrixa

$$\underline{\underline{\Theta}} = \begin{bmatrix} \Theta_x & -D_{xy} & -D_{xz} \\ -D_{yx} & \Theta_y & -D_{yz} \\ -D_{zx} & -D_{zy} & \Theta_z \end{bmatrix} \approx \langle \Theta_x \quad \Theta_y \quad \Theta_z \rangle$$

(Megjegyzések!)

Egyes szerzők szerint a „tenzor” elnevezés a rugalmasságtanban használt tenzió = feszültség szóból származik.  
A rugalmas test és a folyadék feszültség-állapota a feszültség tenzonnal írható le.



## Áramlástan / aërodinamika

## Részecske - kontinuum

A közegek részecskékből állnak → a tulajdonságaikat a részecske szemlélet alapján definiáljuk.

- A legfontosabb tulajdonságok:
- nyomás (statikus, dinamikus, össz, abszolút, túl);  $\{N/m^2 ; Pa; bar; vomm...\}$
  - sűrűség (fajtérfogat);  $\{\rho = m/V\}$
  - hőmérséklet (statikus, dinamikus, össz.);  $\{p = \rho RT\}$
  - viszkozitás (dinamikai, kinematikai, anyagszerkezeti, turbulens-látszólagos)  $\{\tau = \mu (dV/dy)\}$
  - Newton-i és nem Newton-i közegek;
  - nyomás, hőmérséklet, sebesség, viszkozitás mérések!

A matematikai leírásban egyenlőre leginkább a kontinuum szemléletet (a teret folytonosan kitöltő anyag) alkalmazzuk.





## Áramlásban / aërodinamika

1916. IV. évfolyam.

1—2. szám.



# Az Aëro

**A repülés, léghajózás, automobilizmus  
és aërológia folyóirata**

1.

**A MAGYAR AËRO-SZÖVETSÉG HIVATALOS LAPJA**  
*Offizielles Journal des Ungarischen Aëro-Verbandes*

Megjelenik havonként kétszer  
Előfizetési ára egész évre 10 kor.  
Egyes szám ára 40 fillér



Szerkesztőség és kiadóhivatal:  
Budapest, I., Retek-utca 46.  
Telefon: 114—76.

Szerkeszti: MASSÁNY ERNŐ dr., az országos magyar kir. meteorológiai intézet assistense





## Áramlásban / aërodinamika

2.

### FŐMUNKATÁRSÁK:

**BÁNKI DONÁT**  
műegyetemi r. tanár

**BÖSZÖRMÉNYI JENŐ**  
okl. gépészmérnök,  
aëromotorgyári igazgató

**BRESZTOVSZKY BÉLA dr.**  
műegyetemi r. tanár

**HOROVITZ GYÖRGY dr.**  
okl. gépészmérnök,  
aëromotorgyári igazgató

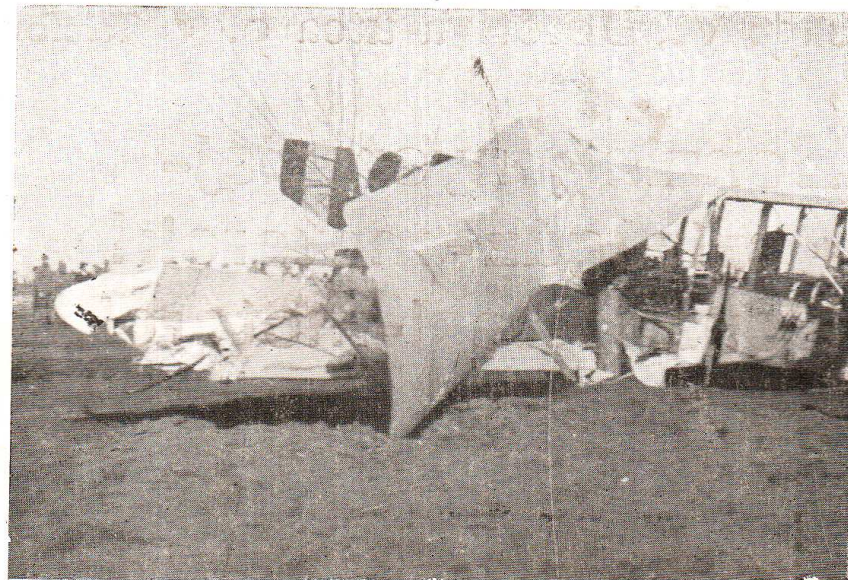
**JANISCH ADOLF**  
okl. gépészmérnök,  
repülőgépgyári igazgató

**MARKHÓT JENŐ**  
m. kir. kereskedelemügyi  
min. iparfőfelügyelő

**PRODÁN GYÖRGY**  
okl. gépészmérnök

**SCHIMANEK EMIL**  
műegyetemi r. tanár

**Gróf ZICHY BÉLA REZSŐ**  
a Magyar Aëro-Szövetség  
elnöke



*Az Isonzo-fronton repülünk által lelőtt ériádsi Caproni típusu olasz repülőgép roncsai.*

*Dr. Magyar Lajos tőrszótvoos felvétele.*



Áramlástan / aërodinamika (alapismeretek)

Megmaradási elvek

Anyag – változás oka lehet a forrás / nyelő;  
folytonosság törvénye (kontinuitás)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \underline{V}) = 0 \quad \rho AV = \text{áll.}$$

Mozgásmennyiség – változás oka a külső erő → Navier-Stokes egyenlet / impulzus tétel

$$\frac{d\underline{V}}{dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \underline{\Phi} + \underline{g} \quad \int_A \underline{V} \rho V dA = \int_A \underline{\Phi} dA + \int_V \rho \underline{g} dV + \underline{F}$$

Energia – változás oka lehet a be vagy elvitt munka / energia / hő;

Bernoulli egyenlet (igen egyszerűen)

$$\left[ \frac{V^2}{2} + U + \frac{p}{\rho} \right]_1 = 0$$

és az energia egyenlet

$$\frac{V^2}{2} + c_p T = c_p T_0$$

Perdület – változás oka lehet a külső nyomaték.

Kelvin, Helmholtz tétel:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 0 \quad \text{örvénycső mentén } \Gamma = \text{áll.}$$

Biot-Savart törvény:  
(megjegyzés: ÖTE)

$$\underline{w}_i = \frac{\Gamma}{4\pi} \int \frac{d\underline{s} \times \underline{r}}{r^3}$$

Mechanikai alapok – minimum elv

Variációs elvek

A Lagrange féle másodfajú egyenletek általunk tárgyalt alakja:

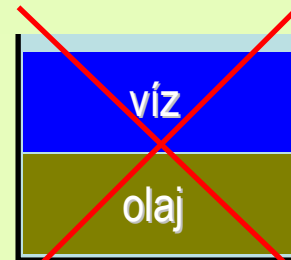
$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k \quad (L = K - U) \rightarrow \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} = Q_k$$

Hidrostatika példa:

$K \equiv 0$ , akkor  $U = \min!$



$U_A$



$U_B$

<

Newton II. törvénye – példa:

$K = m \frac{V^2}{2}$ , és  $\dot{q} := V$ , akkor  $\frac{\partial K}{\partial \dot{q}} = mV$ , ezzel  $\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} = \frac{d}{dt} (mV)$ , végül  $Q_k := F$

Végeredményben:

$\frac{d}{dt} (m\underline{V}) = \underline{F}$

A Lagrange egyenleteket alkalmazó tárgyalást leggyakrabban a rotorlapátok rugalmas mozgását leíró egyenletek levezetésénél (illetve az un. aeroelasztkius jelenségek pl. flutter-számítás esetében) használjuk.





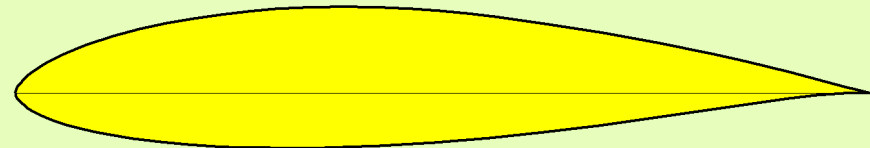
## A szárnyprofilok és alkalmazási területeik

Szárnyprofilok segítségével építjük fel:

- az örvény-szivattyúk lapátozását;
- a ventilátorok lapátozását;
- a repülőgép szárnyakat;
- a repülőgép vezérsíkokat és kormányfelületeket;
- a légcsavar lapátokat;
- a hajócsavar lapátokat;
- a szárnyas-hajó szárnyakat;
- a helikopter és autogíró lapátokat;
- a szélkerék (szélturbina) lapátokat;
- a vízturbina lapátokat;
- a gázturbinák lapátozását;
- és még sok mást.....

Kis ellenállás mellett nagy felhajtóerőt termelnek!

(Forgószárny ← szárny ← szárnyprofil)



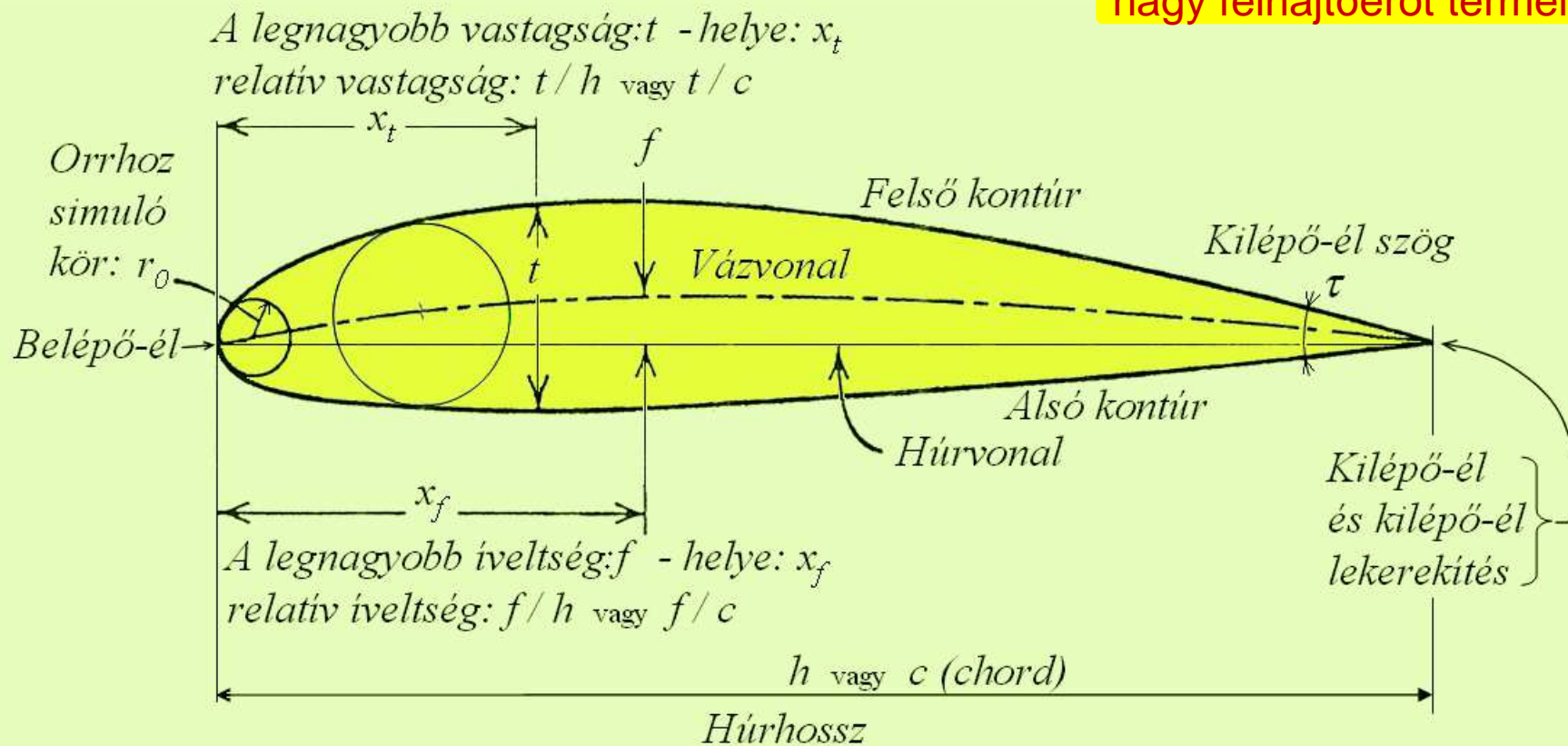
$$F_{\text{FELÜLETI ERŐ}} = \int_A \underline{\Phi} d\underline{A} \Rightarrow \begin{cases} a \text{ megfúvásra merőleges} \rightarrow \text{felhajtóerő} \\ a \text{ megfúvással párhuzamos} \rightarrow \text{ellenállás} \end{cases}$$



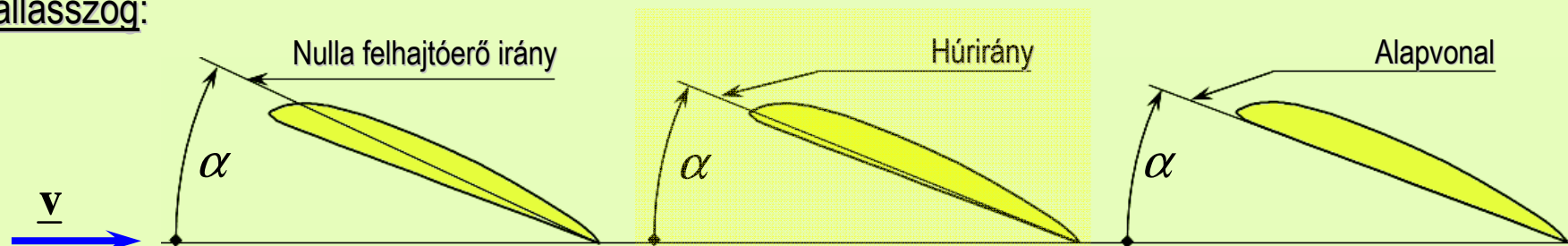


**Szárnyprofil (geometriai jellemzők)**

Kis ellenállás mellett nagy felhajtóerőt termelnek!



**Az állásszög:**





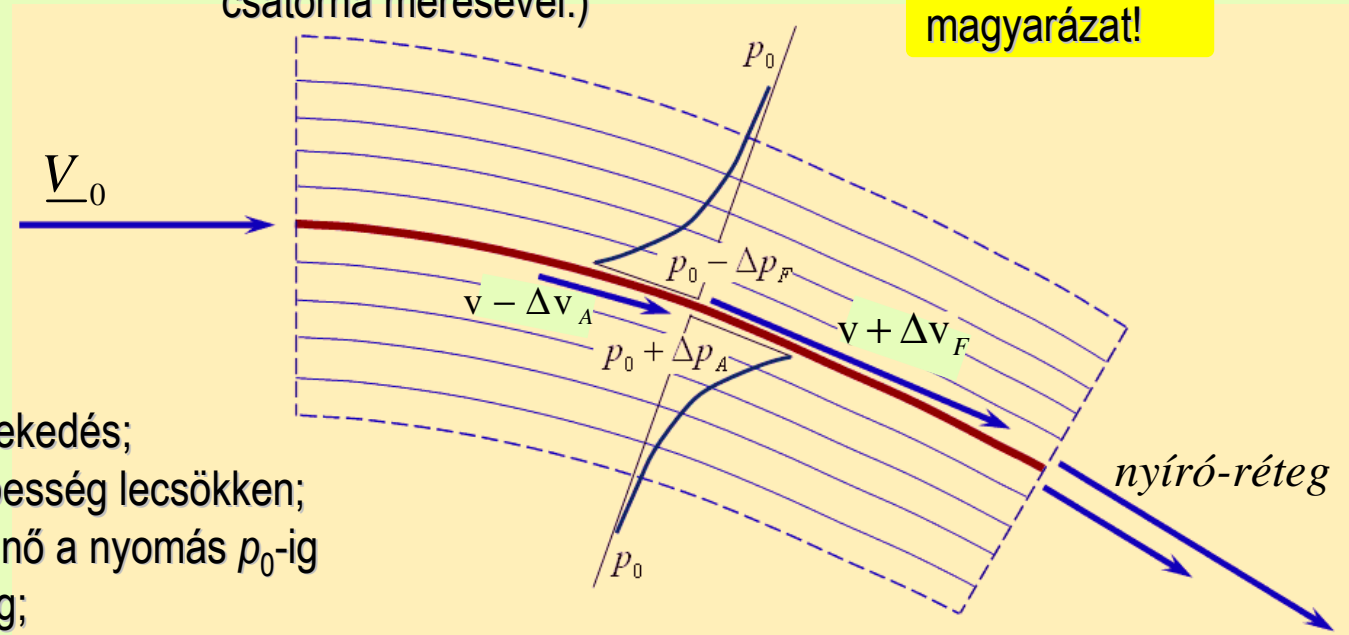
A felhajtó erő

(Meghatározása: számítással vagy szárny-modell szélcsatorna mérésével.)

Közelítő jellegű magyarázat!

A felhajtó erő keletkezése:

- irányelaterelés;
- görbült áramvonalak;
- a görbület miatt nyomásnövekedés;
- alul megnő a nyomás, a sebesség lecsökken;
- felül depresszió van, onnan nő a nyomás  $p_0$ -ig fent tehát megnő a sebesség;
- a profil (húrvonalának) alsó és felső oldala között kialakuló nyomáskülönbség eredményezi a felhajtóerőt;
- a profilról „nyíró réteg” áramlik le, fent nagy, lent kicsi a sebesség → ezek kiegyenlítődnek, ennek következtében a valóságos áramlás tovább görbül „lefele” – kialakul a második indukált sebesség.



A felhajtóerőt a leggyakrabban a felhajtóerő tényező segítségével számítjuk:

$$c_f (\text{felhajtóerő}) = c_L (\text{Lift}) = c_A (\text{Auftrieb})$$

$$c_L = \frac{L}{(\rho/2) V^2 A} = \frac{L}{(\rho/2) V^2 h \cdot 1} (\text{profilra})$$





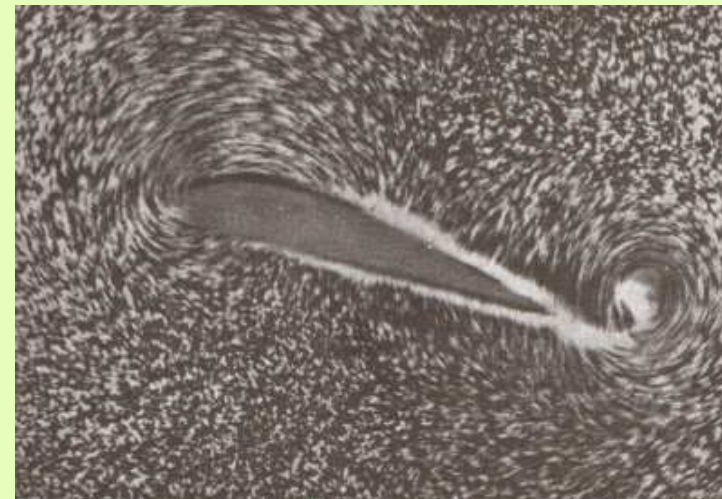
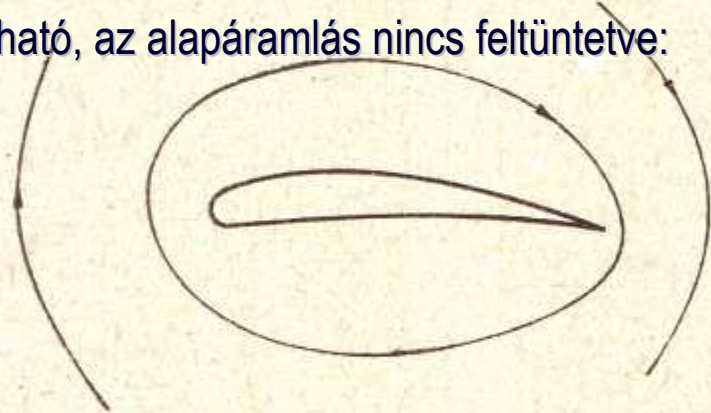


## A cirkuláció keletkezése

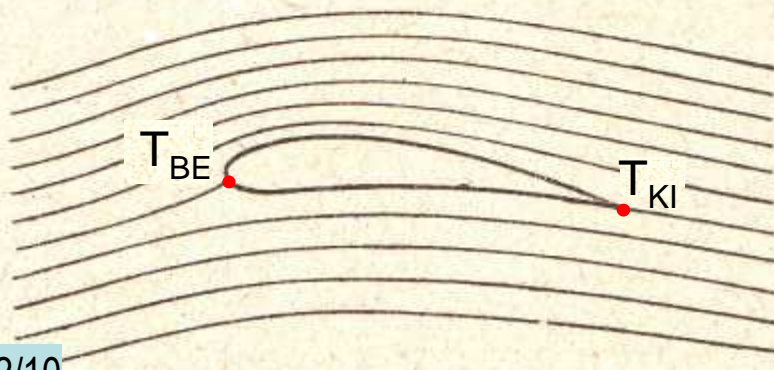


Kezdeti pillanat: a kilépő torlópont ( $T_{KI}$ ) fent van a profil hátoldalán;

Kialakul a cirkuláció – csak a cirkuláció áramképe látható, az alapáramlás nincs feltüntetve:



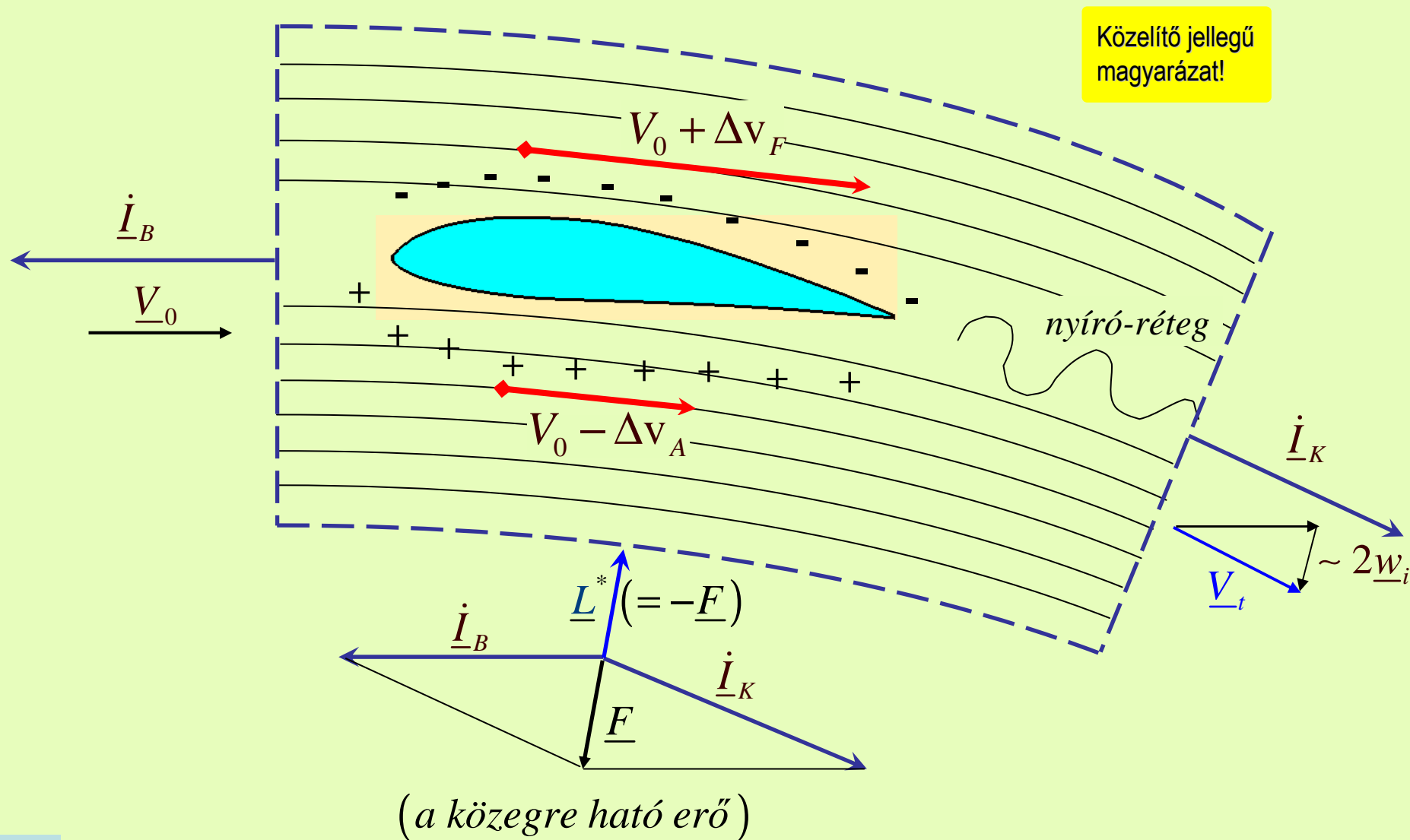
A profil körüli cirkuláció (örvény) kialakulásával egy időben alakul ki a profilról leúszó, indulási örvény ( $\rightarrow$  örvénytelek – Kelvin tétel);



Az eredő áramkép: a belépő torlópont ( $T_{BE}$ ) lefele, a kilépő torlópont ( $T_{KI}$ ) hátrafele, pontosan a kilépő élre csúszik – a Kutta-Zsukovszkij feltétel szerint!



A felhajtó erő – magyarázat az impulzus tétel szerint

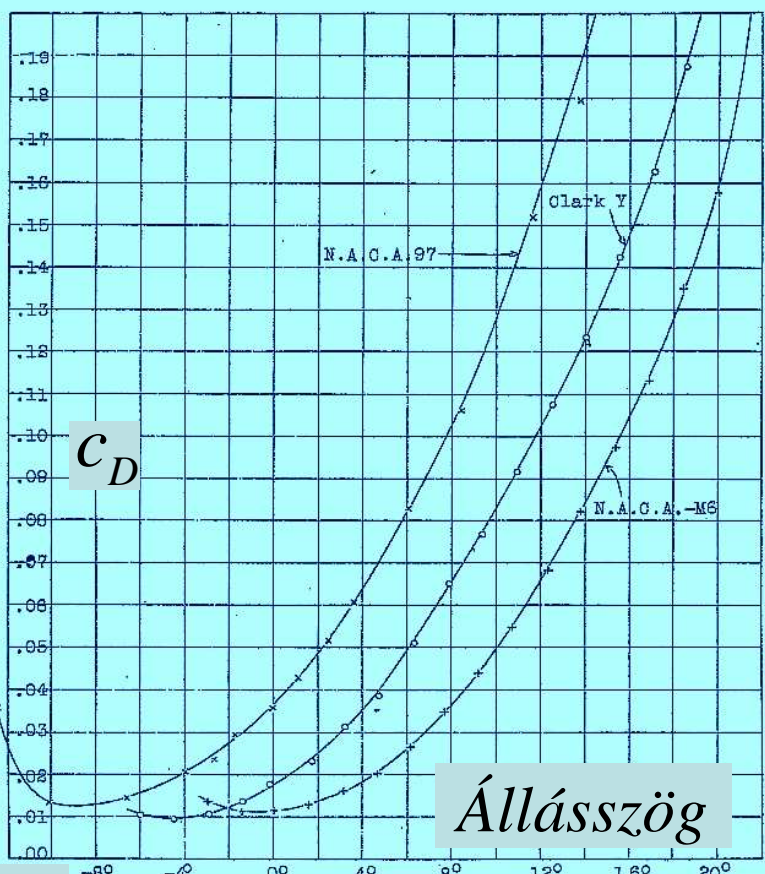




Az ellenállás

$$\underline{F}_{FELÜLETI ERŐ} = \int_A \underline{\Phi} d\underline{A} \Rightarrow \begin{cases} a \text{ megfúvásra merőleges} \rightarrow \text{felhajtóerő} \\ a \text{ megfúvással párhuzamos} \rightarrow \text{ellenállás} \end{cases}$$

$$\underline{F}_{FELÜLETI ERŐ} = \int_A \underline{\Phi} d\underline{A} \Rightarrow \begin{cases} \text{nyomásból} \\ \text{csúsztató feszültségből} \end{cases}$$



Az ellenállás részei:

- alakellenállás (szárnyprofilok esetében, normál állásszög tartományban kicsi);
- hullámellenállás (nagyobb Mach számok esetében válik jelentőssé).

- súrlódási ellenállás (szárnyprofiloknál, mérsékelt sebesség esetében ez a döntő rész);

Ellenállás tényező :

$$c_D = \frac{D}{(\rho/2)V^2 A}$$

$$= \frac{D}{(\rho/2)V^2 h \cdot 1} \text{ (profilra)}$$

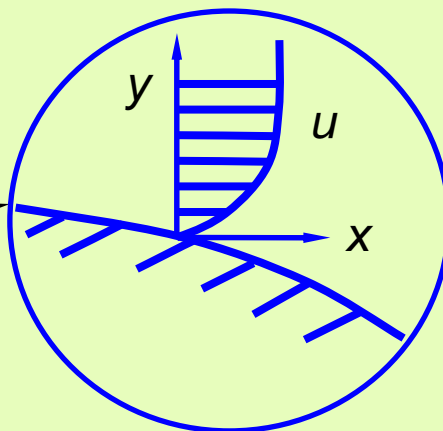
(Meghatározása: számítással vagy szárny-modell szélcsatorna mérésével.)  
 $c_e$  (ellenállás) –  $c_D$  (Drag)  
 $c_w$  (Widerstand)



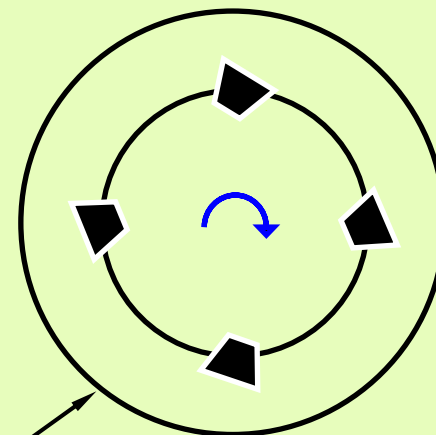


## Az áramlási tér felosztása

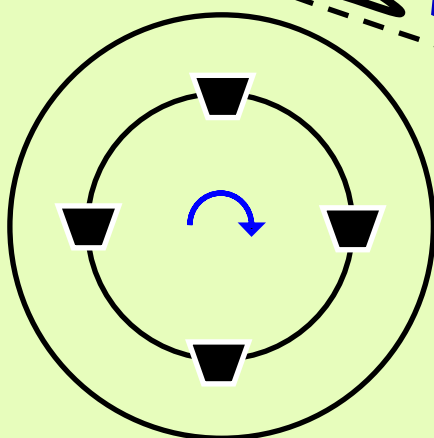
Lényegében nincs súrlódás  
 → ideális közeg



$$\text{rot}(\text{rot } \underline{V}) \neq \underline{0}$$



van súrlódás → valóságos közeg



$$\text{rot } \underline{V} \equiv \underline{0}$$

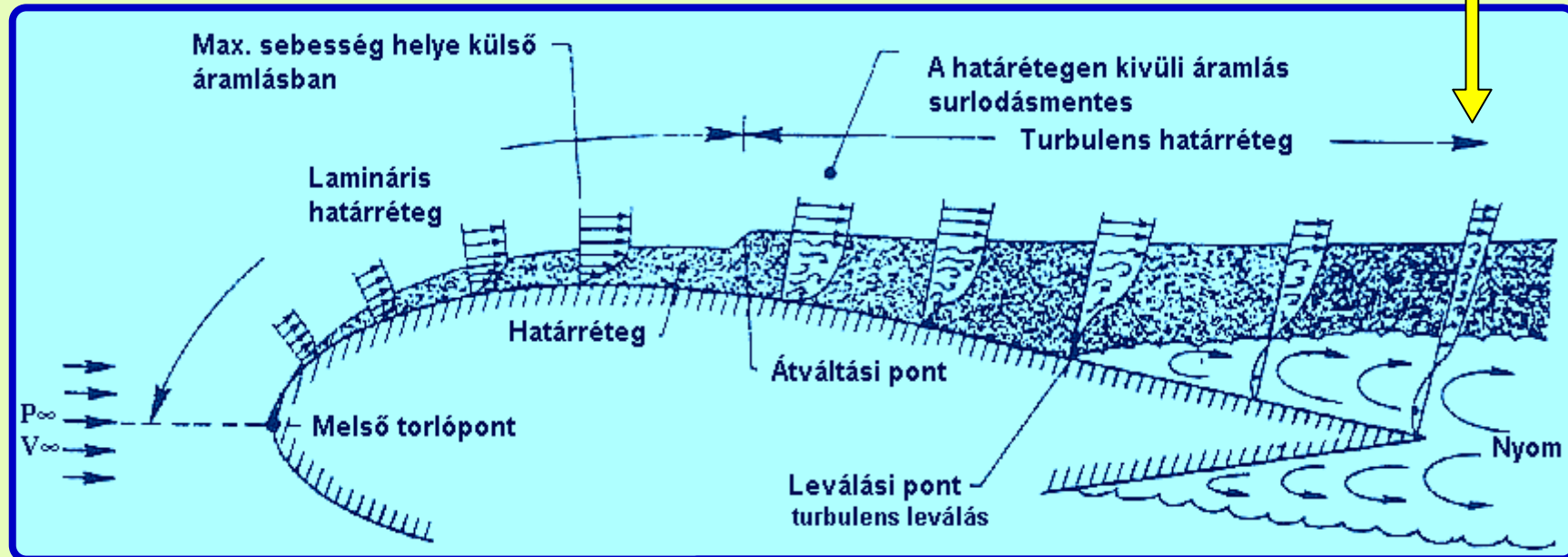
Lényegében nincs súrlódás  
 → ideális közeg

(Nullmértékű halmazoktól eltekintve!)



Valóságos közeg – határréteg - átesés

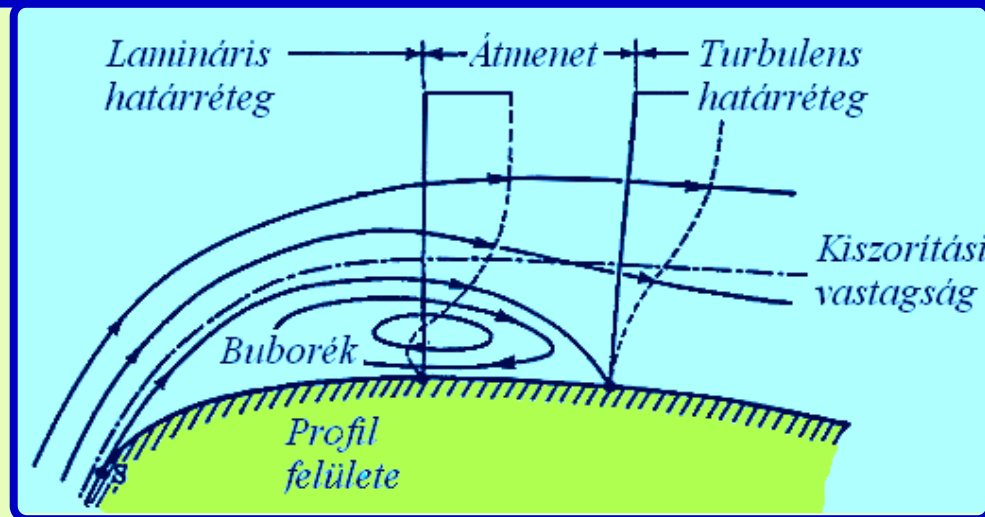
Kilépő éltől induló leválás



A határrétegben a statikus nyomás, a felületre merőlegesen sok esetben nem változik:

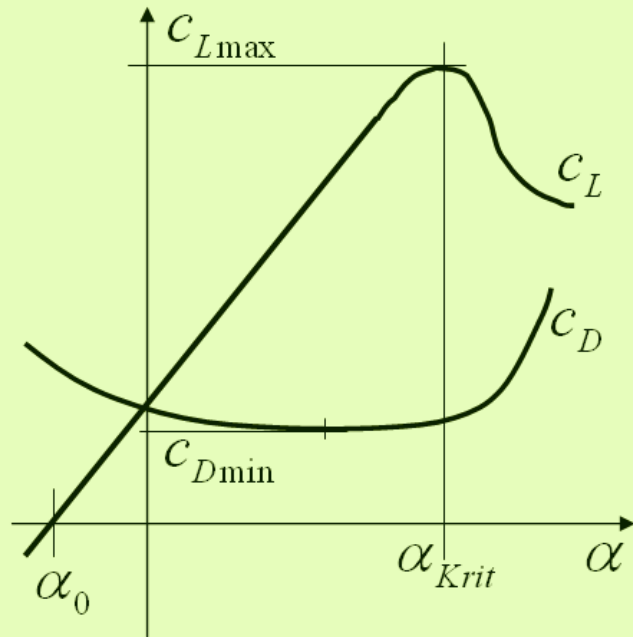
$$\frac{\partial p}{\partial n} \approx 0$$

Buborék leválás:





## Felhajtóerő és ellenállás tényező (átesés)

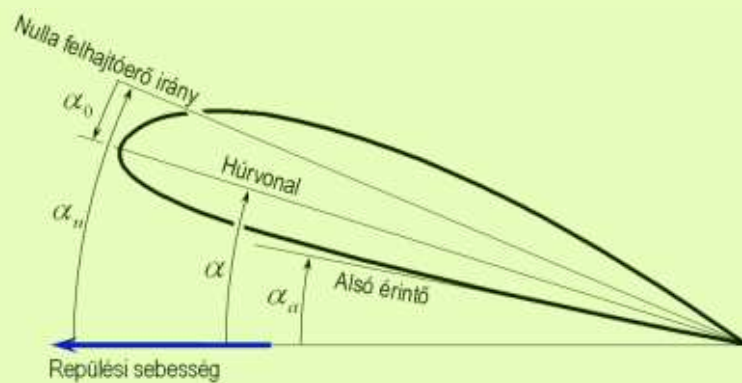


$$c_L = \frac{L}{(\rho/2)V^2 A}$$

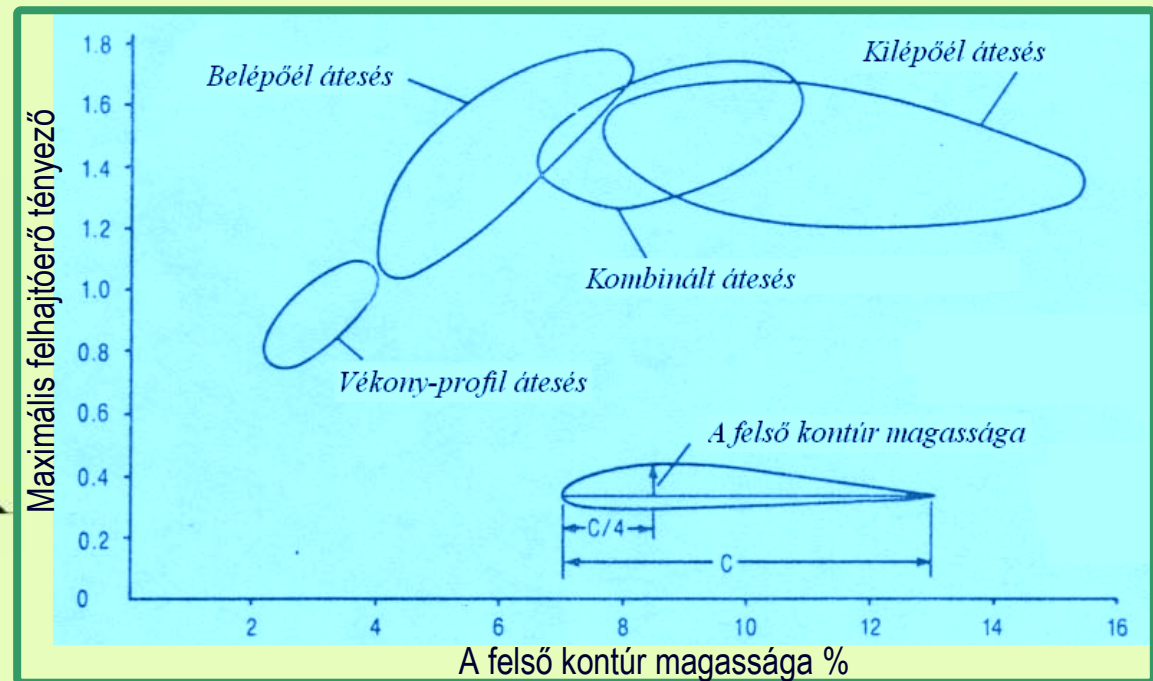
$$c_D = \frac{D}{(\rho/2)V^2 A}$$

Az átesés:

- a felhajtóerő a maximum érték elérése után lecsökken;
- az ellenállás megnövekszik;



Az átesés lehetséges formái →





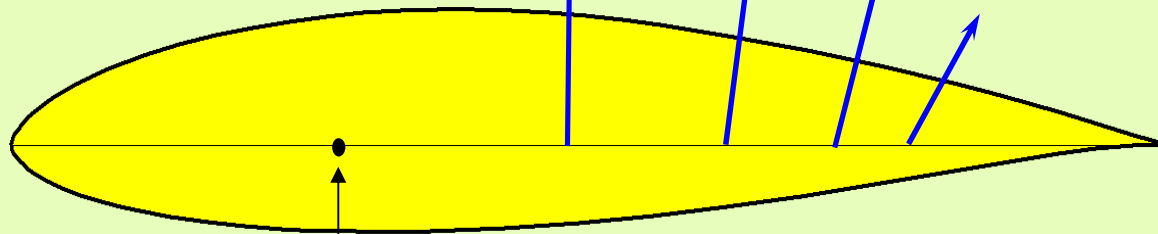
A nyomaték

Nyomatéki tényező :

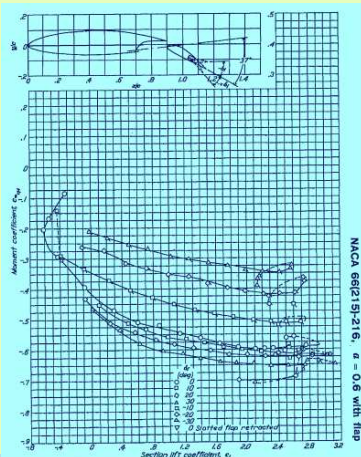
$$c_M = \frac{M}{(\rho/2)V^2 Ah} = \frac{M}{(\rho/2)V^2 (h \cdot 1) h} \text{ (profilra)}$$

A légerő – általában – az állásszög növekedésével előrefele vándorol:

(Meghatározása: számítással vagy szárny-modell szél-csatorna mérésével.)

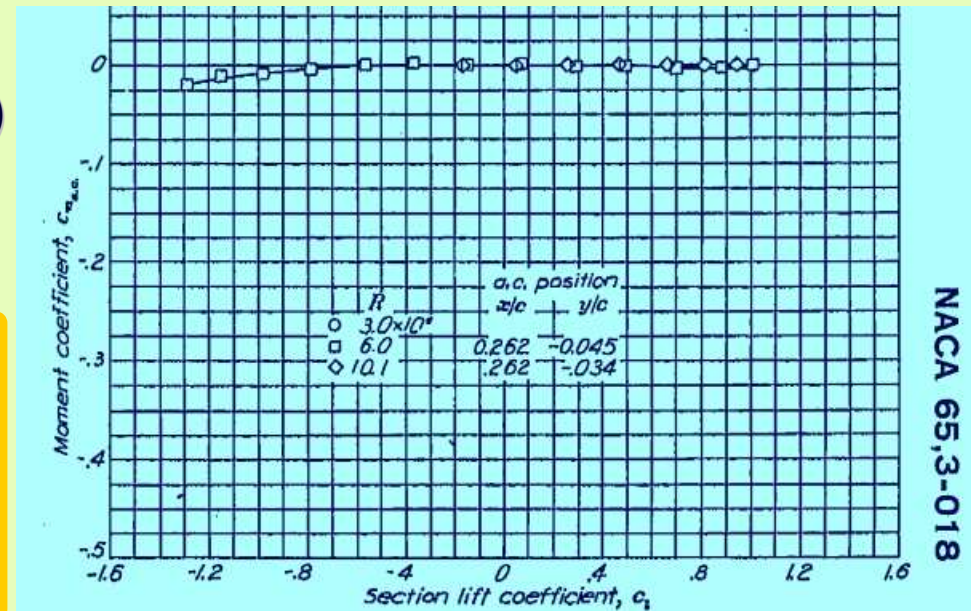
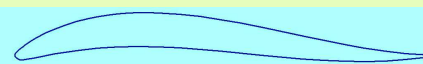


Vonatkoztatási pont  
(aerodinamikai centrum vagy hűrnegyed...)



Megjegyzések:

- „önstabil” profilok;
- hajlító-csavaró lengés;



NACA 65,3-018

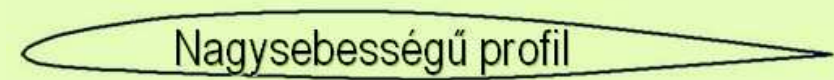
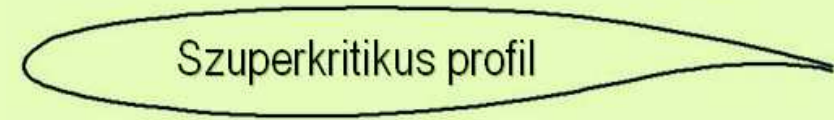
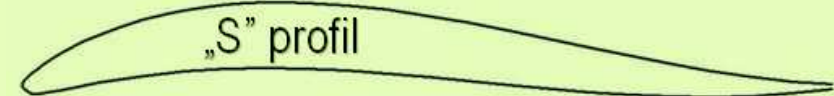
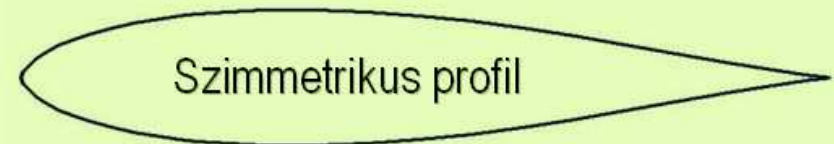
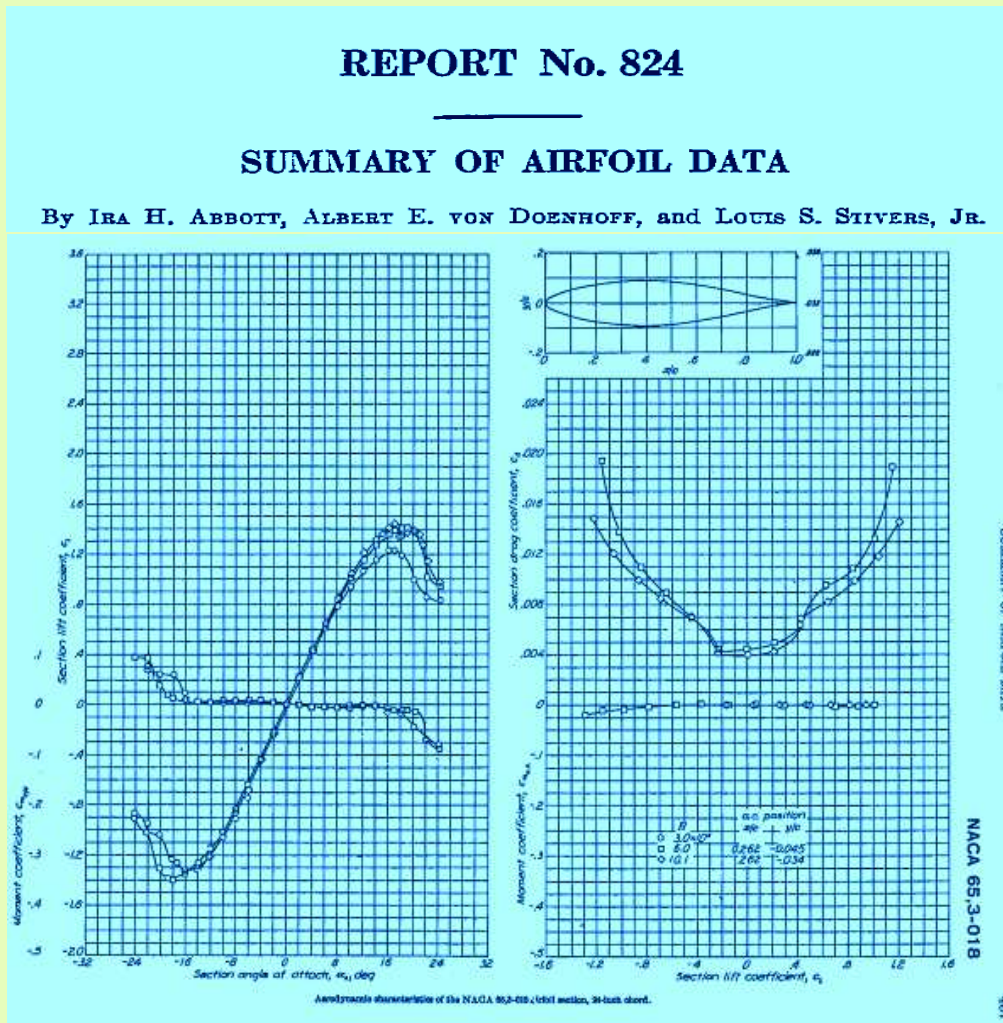




# Szárnyprofilok

NACA, NREL, CAGI, RAF, ONERA, RISO, etc....

**Kis ellenállás mellett nagy felhajtóerőt termelnek!**



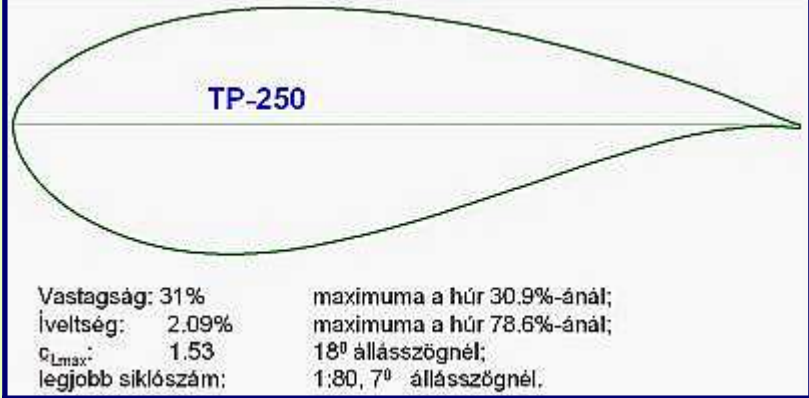
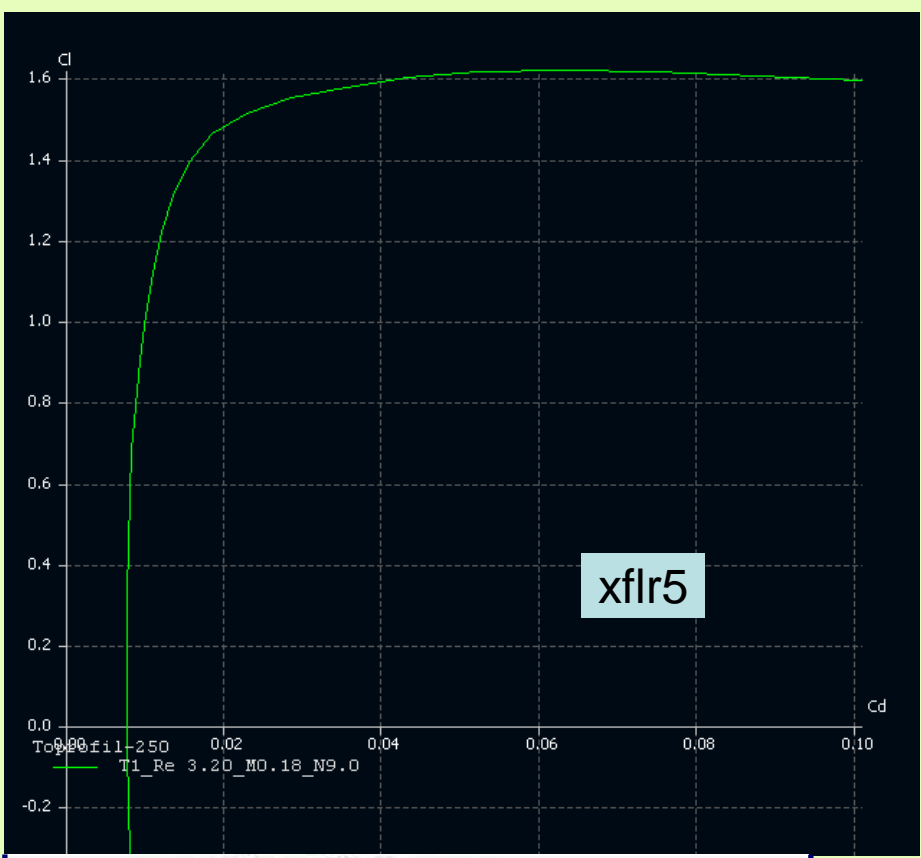
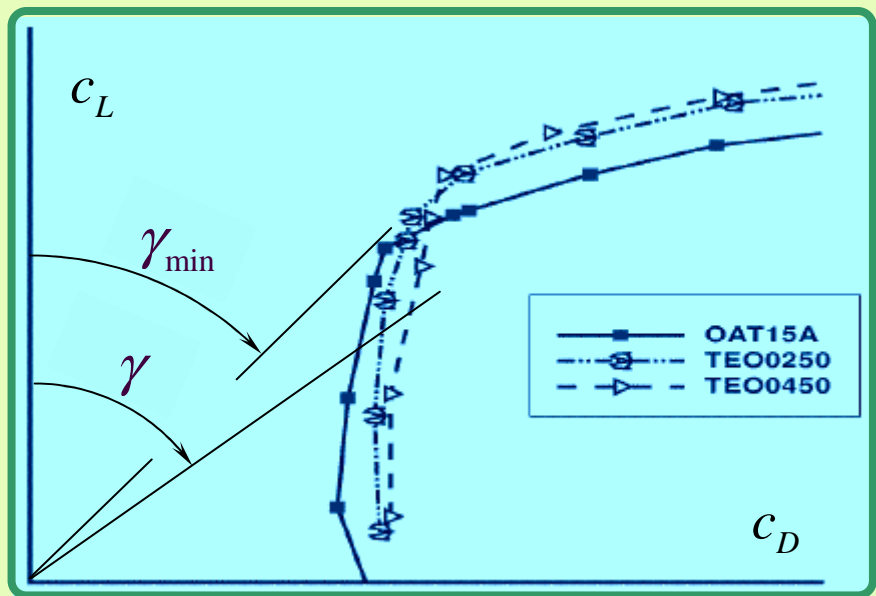


Siklós szám

**Kis ellenállás mellett nagy felhajtóerő!**

$$\text{Siklós szám: } \varepsilon = \tan \gamma = \frac{c_D}{c_L} \quad (\text{pl. } 1:50)$$

$$\text{Aerodinamikai jóság: } K = \frac{c_L}{c_D} \left( = \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

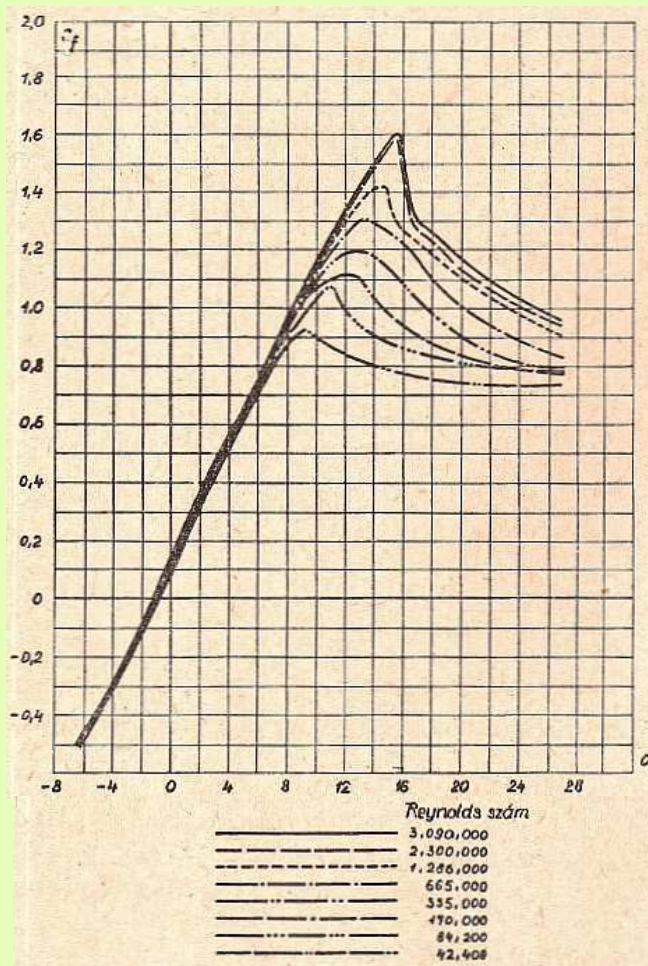


→ xflr5 ( <http://www.xflr5.com/xflr5.htm> )



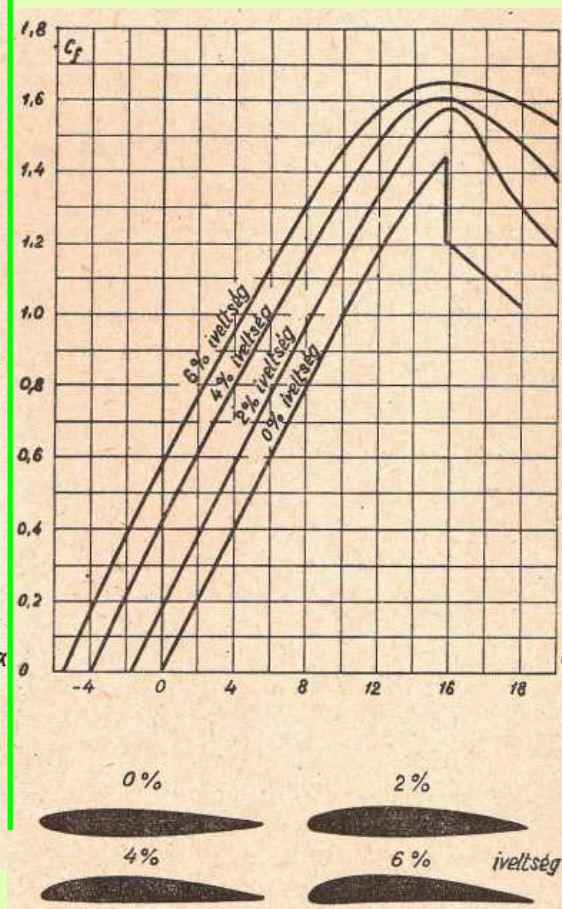


## A szárnyprofilok tulajdonságai – Reynolds szám, vastagság, íveltség

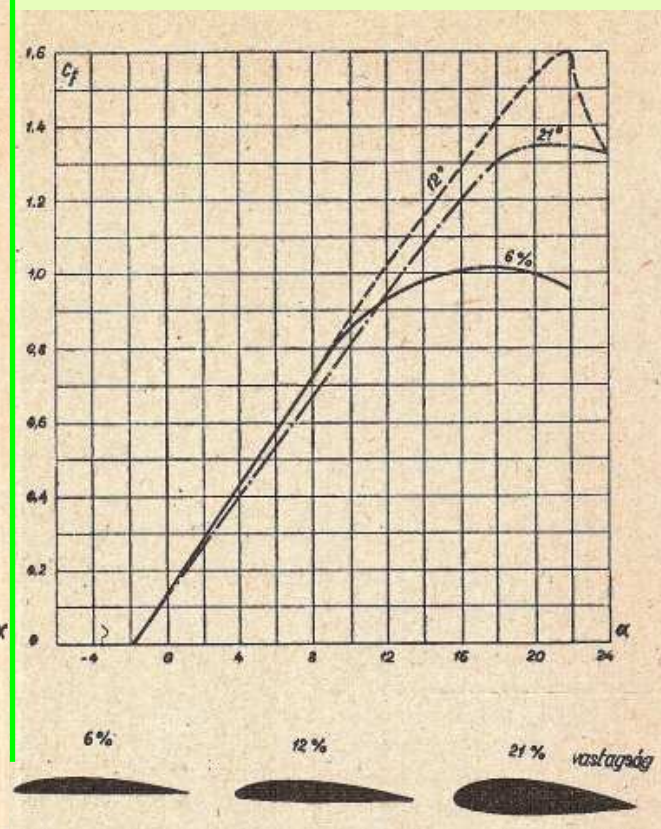


A Reynolds-szám hatása

Az íveltség hatása

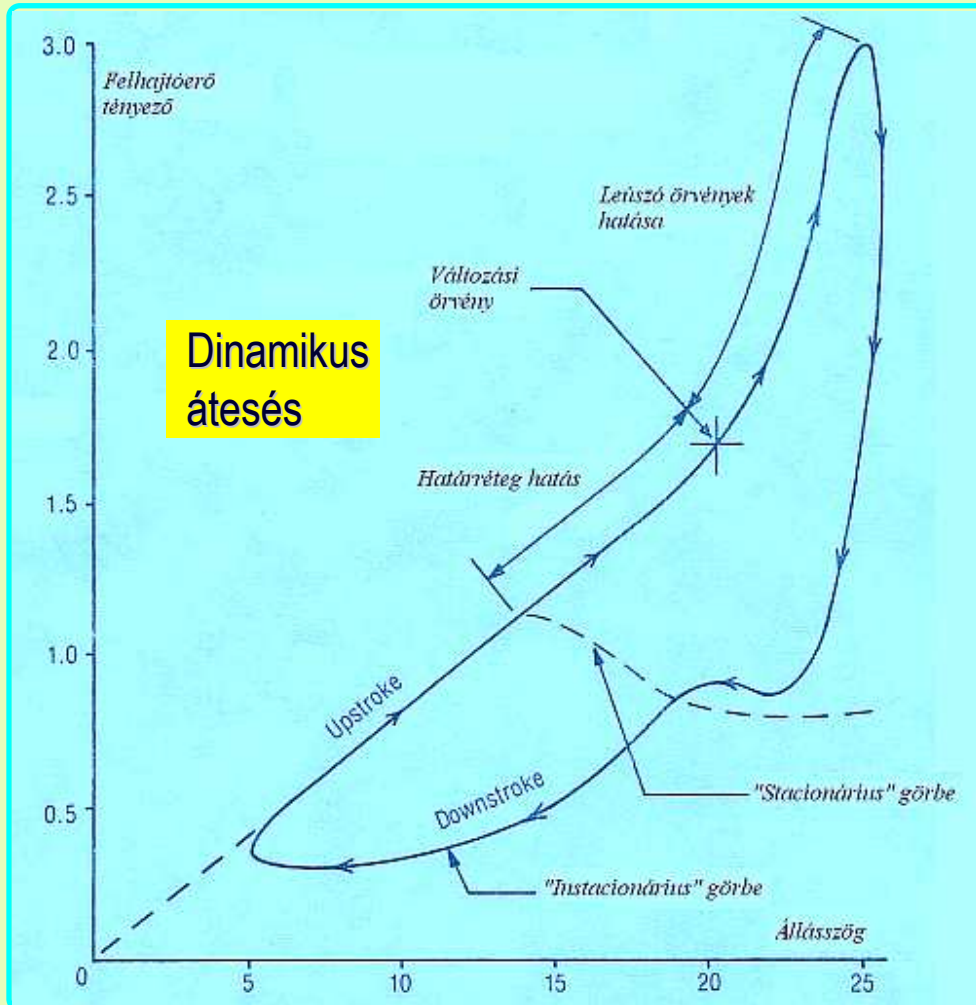


A vastagság hatása

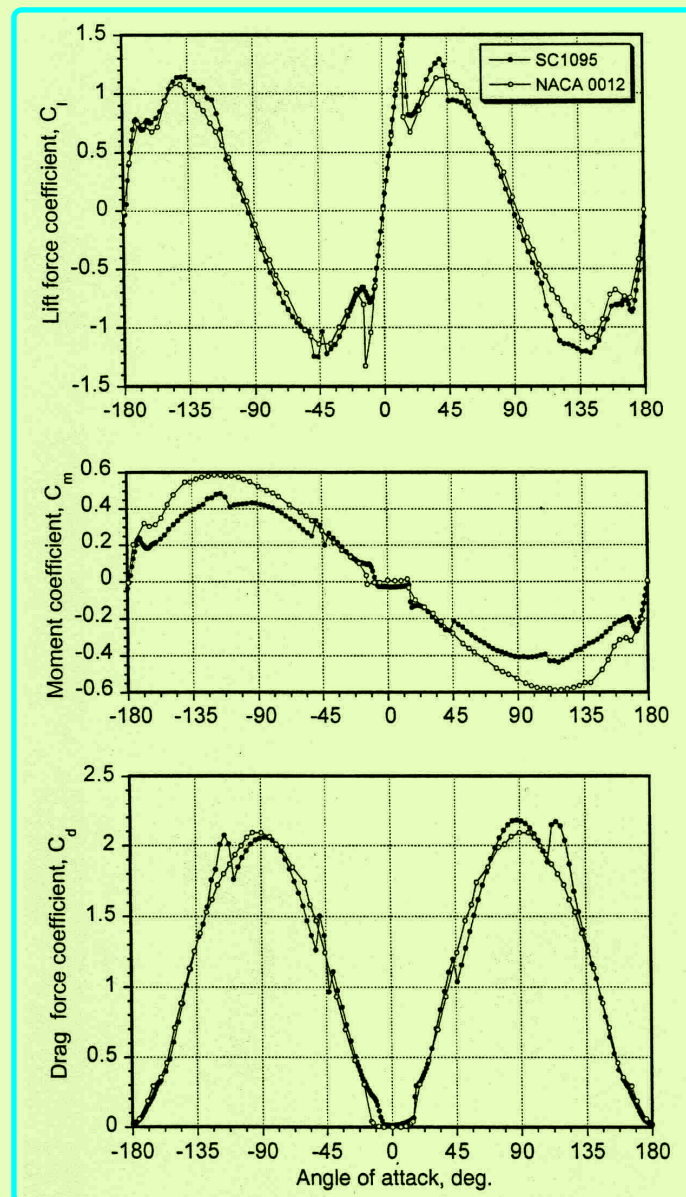




## A szárnyprofilok tulajdonságai – instacionárius viselkedés



$$k = \frac{\omega h}{2V} \begin{cases} 0 \leq k \leq 0.05 & \text{kvázi-stacionárius áramlás} \\ 0.05 < k \leq 0.2 & \text{instacionárius áramlás} \\ 0.2 > k & \text{erősen instacionárius áramlás} \end{cases}$$

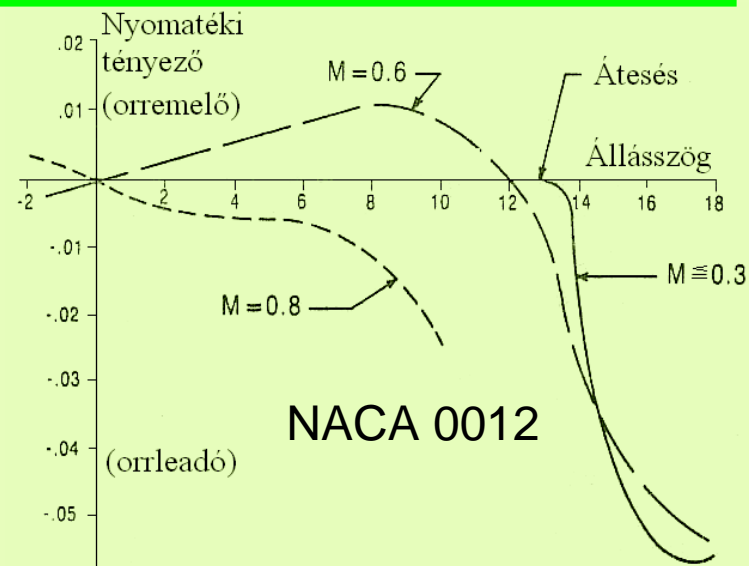
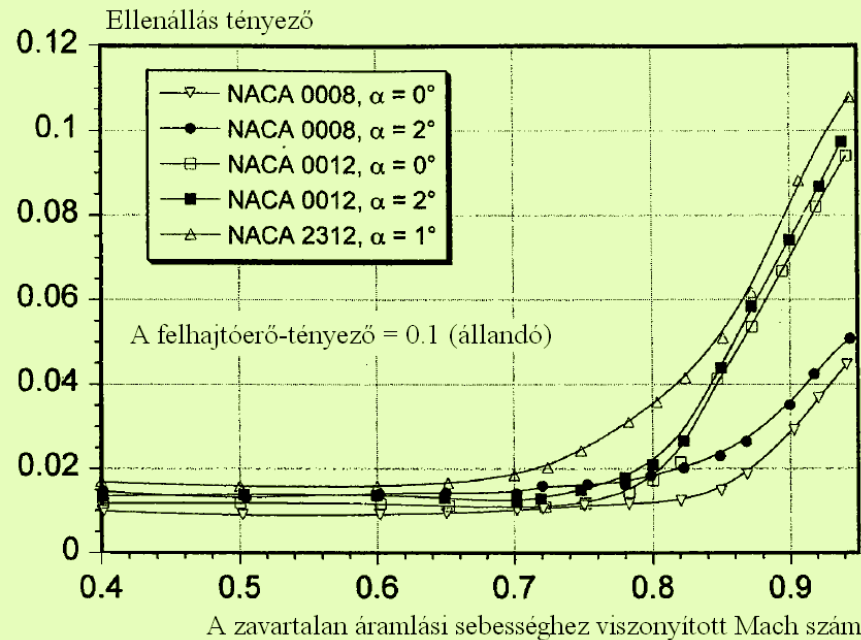
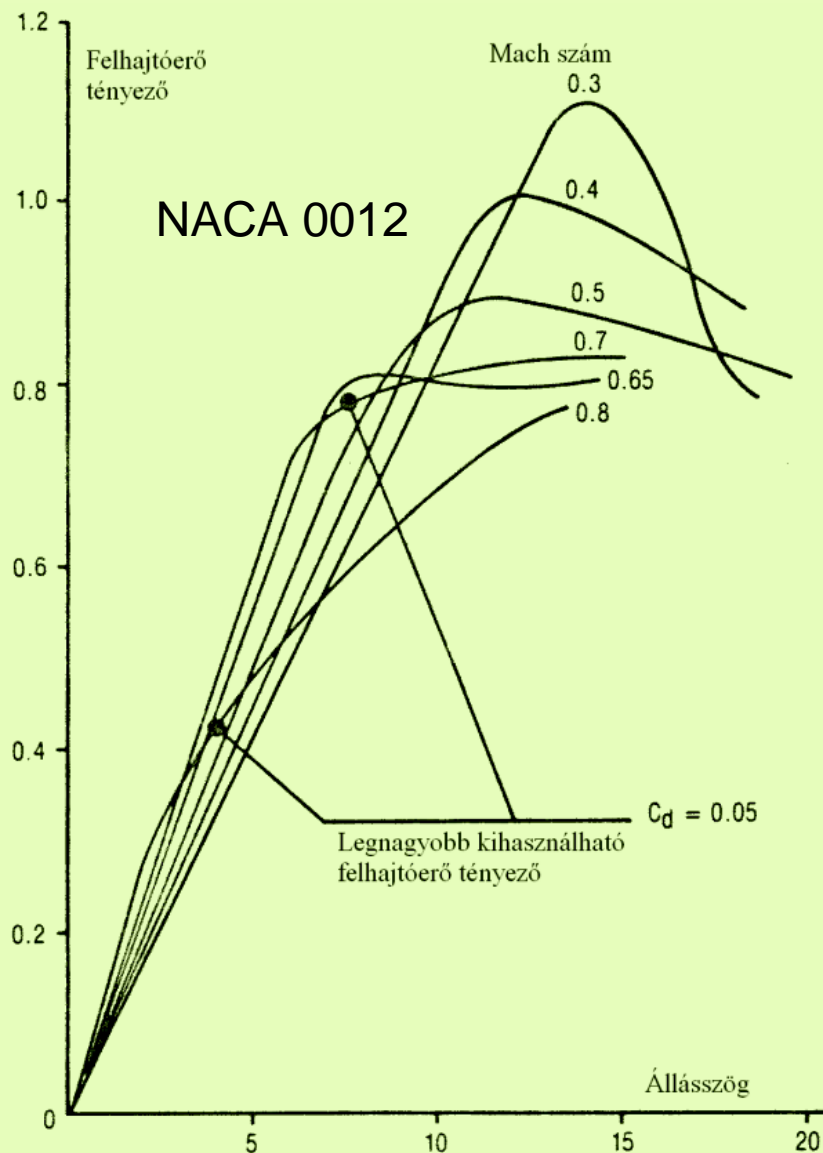


Profijellemzők 360 fokos állásszög tartományon





## A szárnyprofilok tulajdonságai – a Mach szám hatása



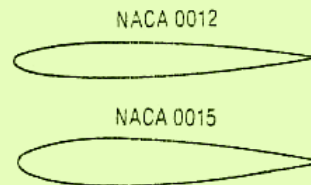


## A rotorlapát-profilokkal szemben támasztott követelmények

### Követelmények:

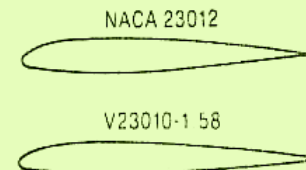
- nagy maximális felhajtó erő;
- kis ellenállás;
- magas kritikus Mach szám;
- kis nyomaték;
- jó instacioneritás.

#### Symmetrical Airfoils 1940—1965



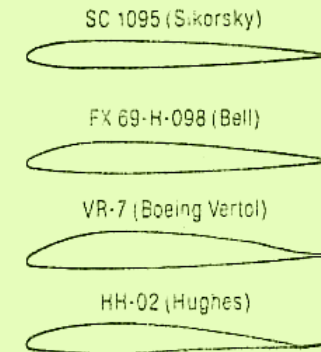
Sikorsky R-4  
Bell 47  
Hiller 12E  
Sikorsky S-55  
Sikorsky S-56  
Hughes 269  
Vertol CH-46A  
Sikorsky S-61  
Hughes OH-6  
Sikorsky CH-53A

#### Drooped-Nose Symmetrical Airfoils 1965—1970

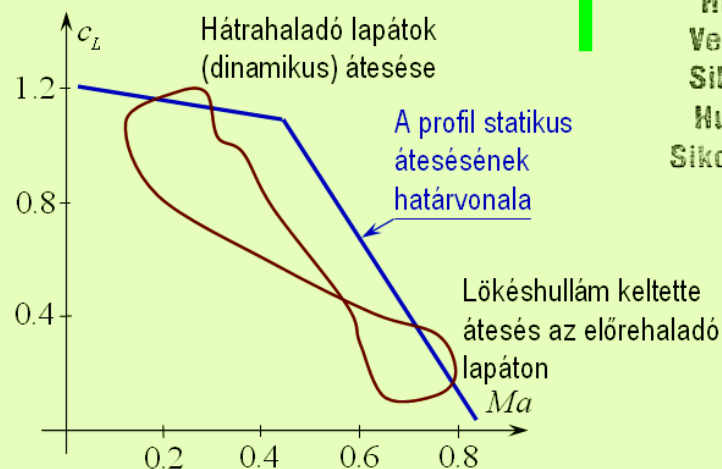


Vertol CH-46D  
Vertol CH-47C  
Lockheed AH-56

#### Fully Cambered Airfoils 1970—



HH-02 (Hughes)  
Sikorsky UH-60  
Sikorsky CH-53E  
Sikorsky S-76  
Bell 222  
Boeing Vertol CH-47D  
Hughes AH-64



**Profil - történelem**



**Köszönöm a figyelmet!**