



# FORGÓSZÁRNYAS 04 REPÜLŐGÉPEK

Gausz Tamás  
Budapest, 2014



## Figyelem:

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





## Véges szárnyak

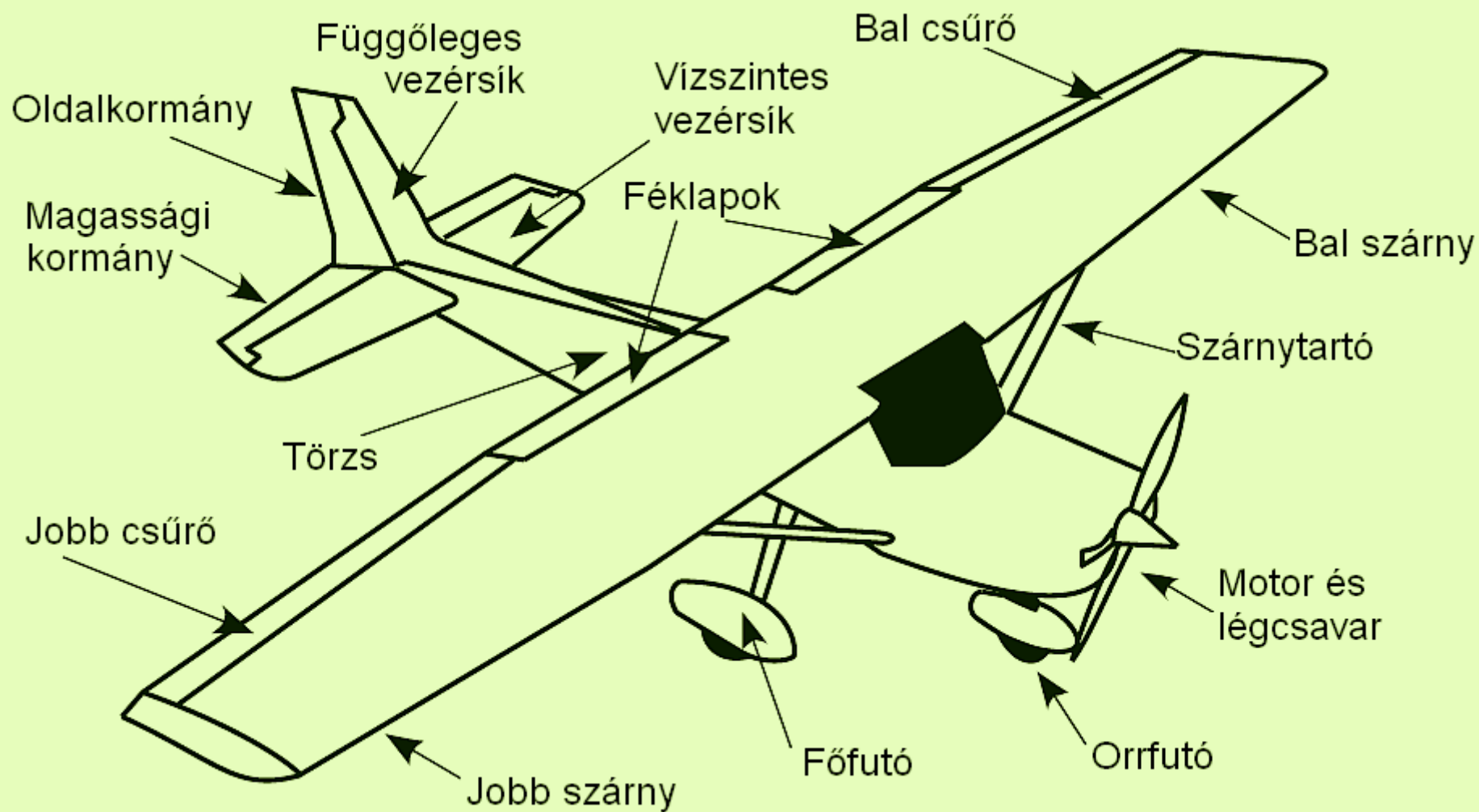
Szárnyprofilokból felépítve → véges szárny (a képen kétfedelű repülőgép – *biplán* – látható)



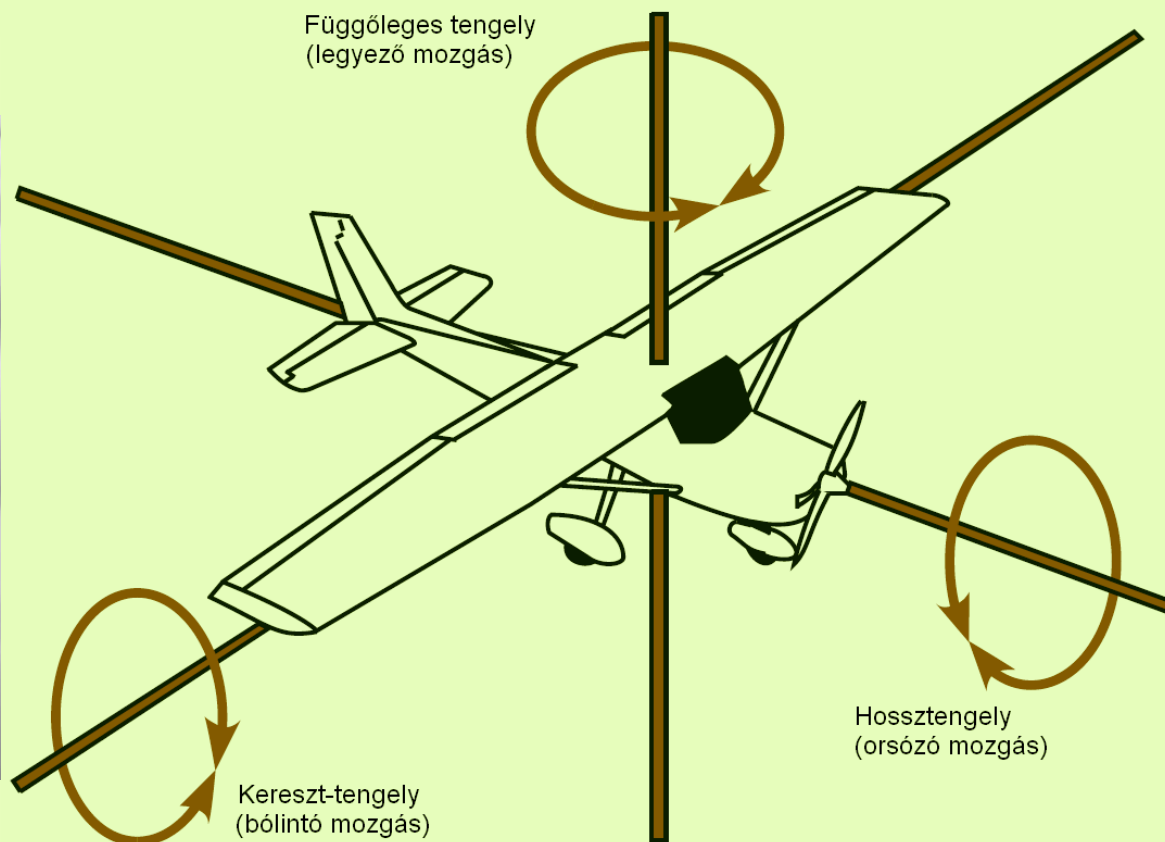
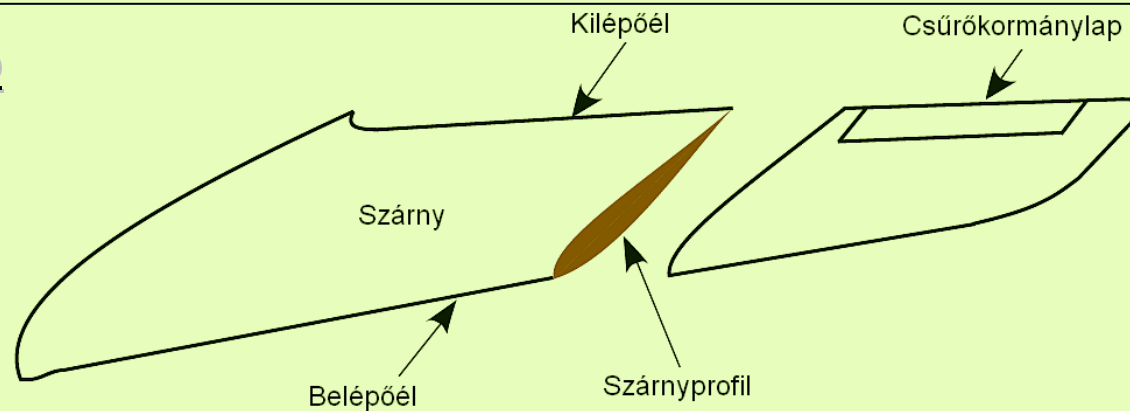
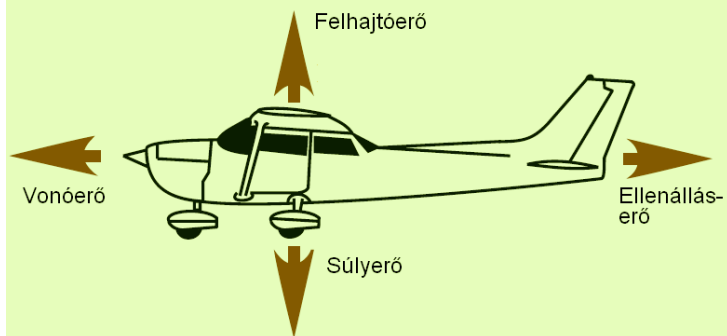
(Az alsó/felső szárny természetesen szárny, de a vízszintes és függőleges vezérsík is az!)



## Merevszárnyú kisrepülőgép



# Merevszárnyú kisrepülőgép

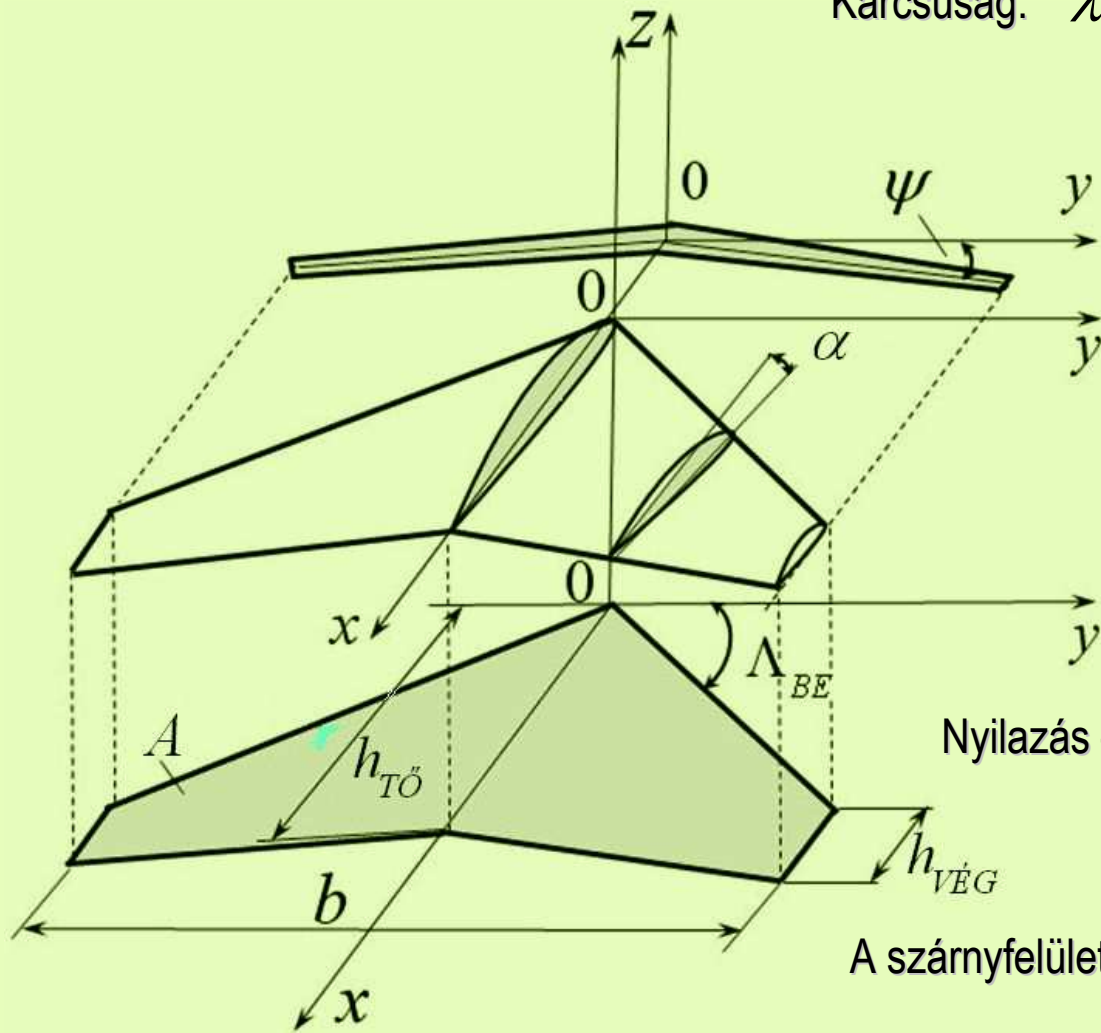




A szárnyak geometriai jellemzői



Karcsúság:  $\lambda = \frac{b^2}{A}$



„V” állás – itt negatív;

Az „i” a beállítási szög – geometriai elcsavarás;

Profil változtatás a fesztáv mentén:  
– aerodinamikai elcsavarás;

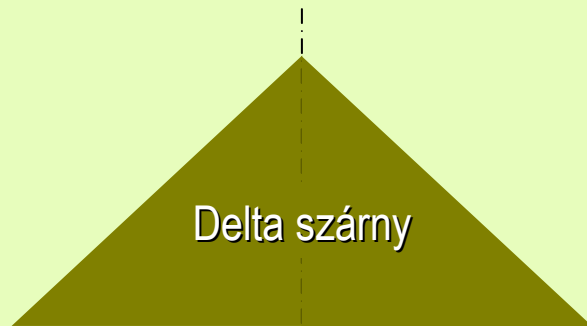
Nyilazás – itt hátranyilazás látható;

Tő-húrhossz:  $h_{TŐ}$ ; vég-húrhossz:  $h_{VÉG}$ ;

A szárnyfelület (**A**) a szárny vetületi felülete!

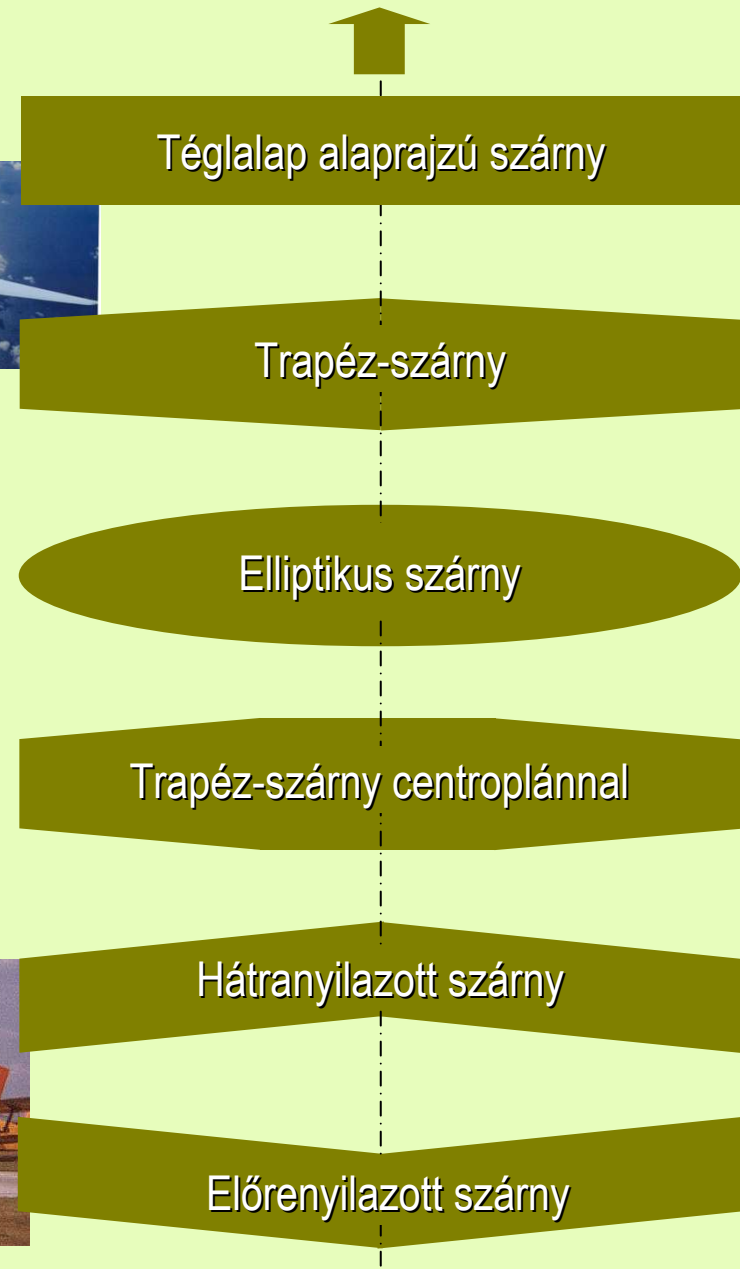
## Szárny alaprajzok

Vitorlázó repülőgép	$\lambda \geq 20 \div 22$
Utasszállító repülőgép	$\lambda \sim 6 \div 12$
Concorde	$\lambda = 1.85$
Tu 144	$\lambda = 1.89$
Vadászrepülő (szsz)	$\lambda \sim 2 \div 3.5$
Albatrosz	$\lambda \sim 19 \div 20$
Ezüst sirály	$\lambda \sim 10$

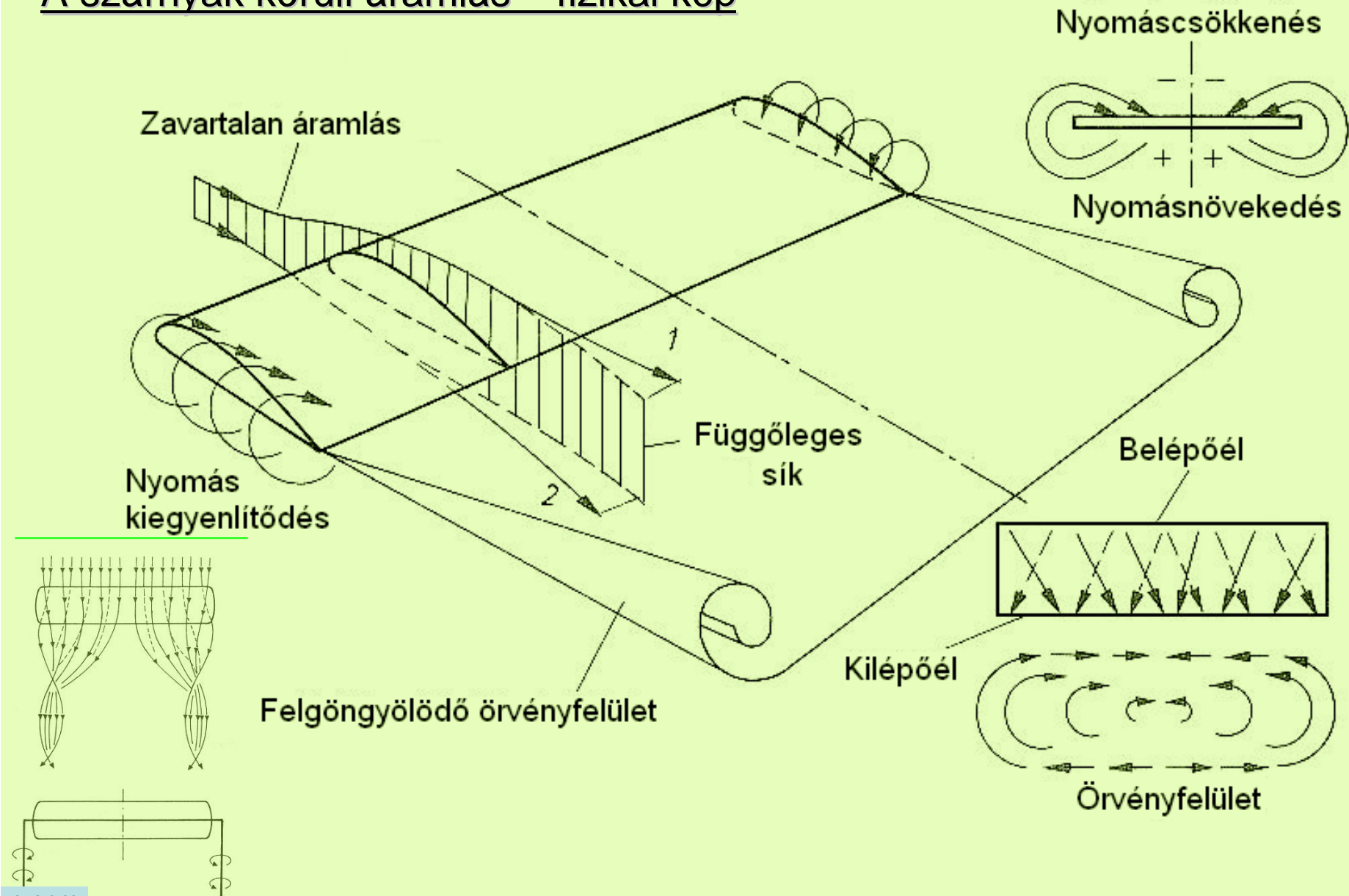


A karcsúság:

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



## A szárnyak körüli áramlás – fizikai kép





## A szárnyvég-kialakítások (winglet)

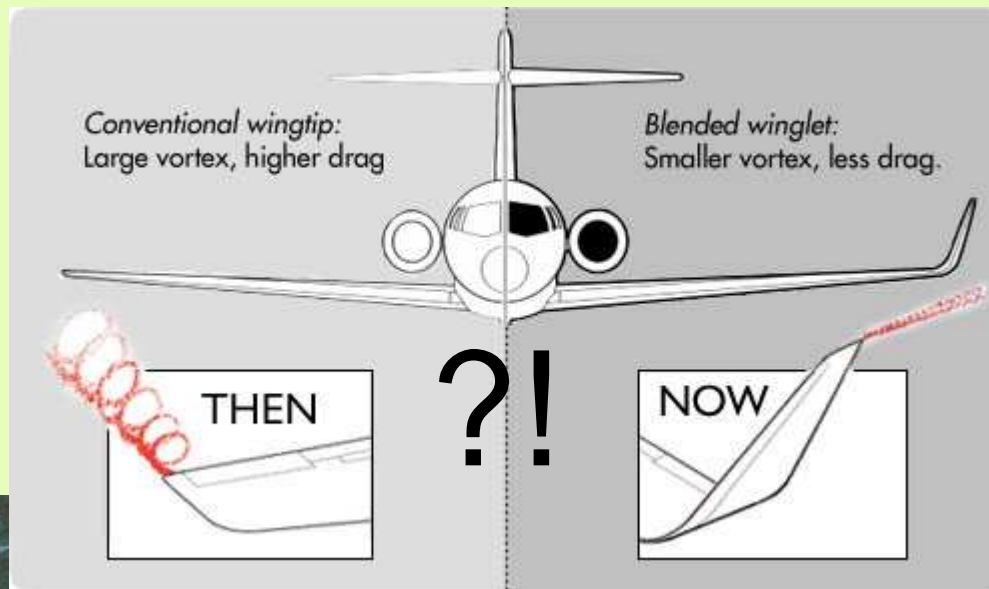


Airbus – A319



Evolution Strategy vitorlázó repülőgép (2008)

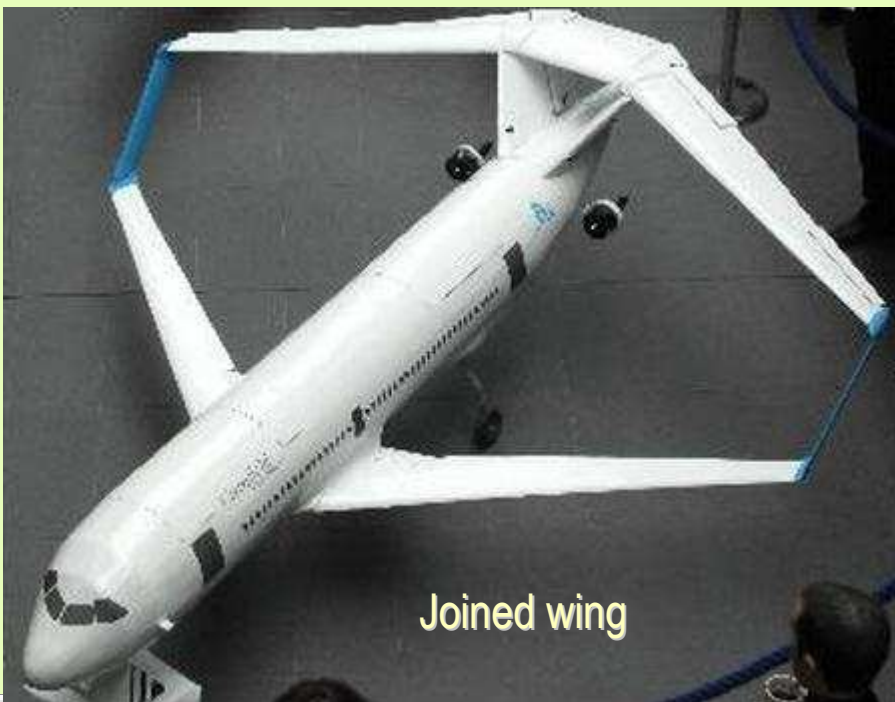
Winglet: akár igaz is lehet.....(csűrőkormány!)



Boeing 787 - Dreamliner



Néhány érdekesség...

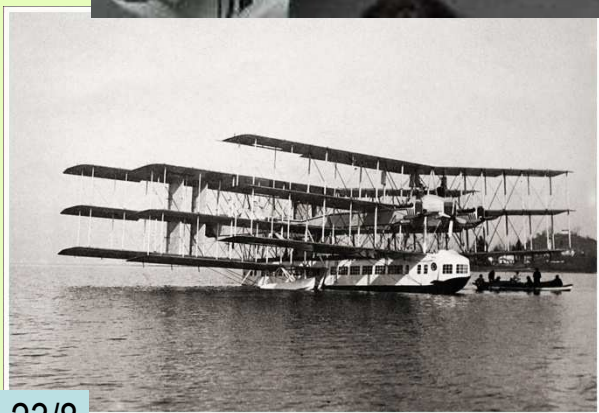


Joined wing

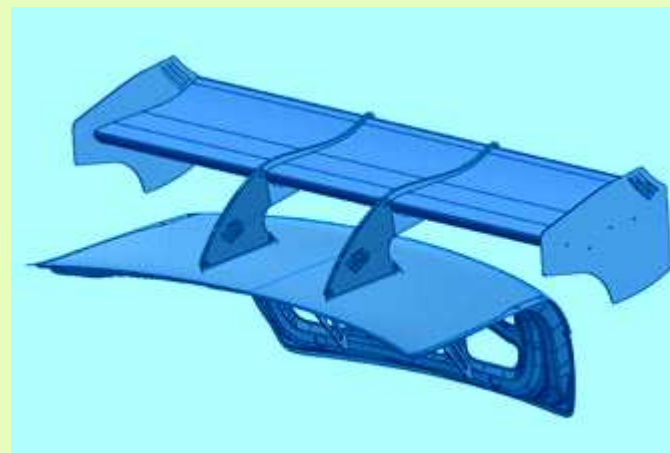


Gyűrűs szárny (Snecca C.450-15-Coleoptere)

Autóra szerelt, szárnyvéglapos szárny



Multiplan  
Caproni Ca-60  
(1921)





## Madárszárny

Szárny-külső → hajtómű

Szárny-közép → szárny  
(centroplán)





## Forgószárnyak

Légcsavarok

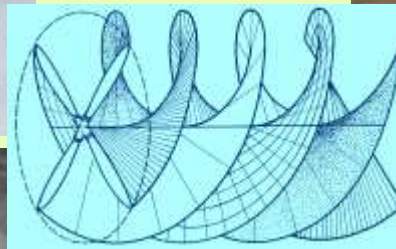
Szélkerekek

Helikopter rotorok

Autogíró rotorok

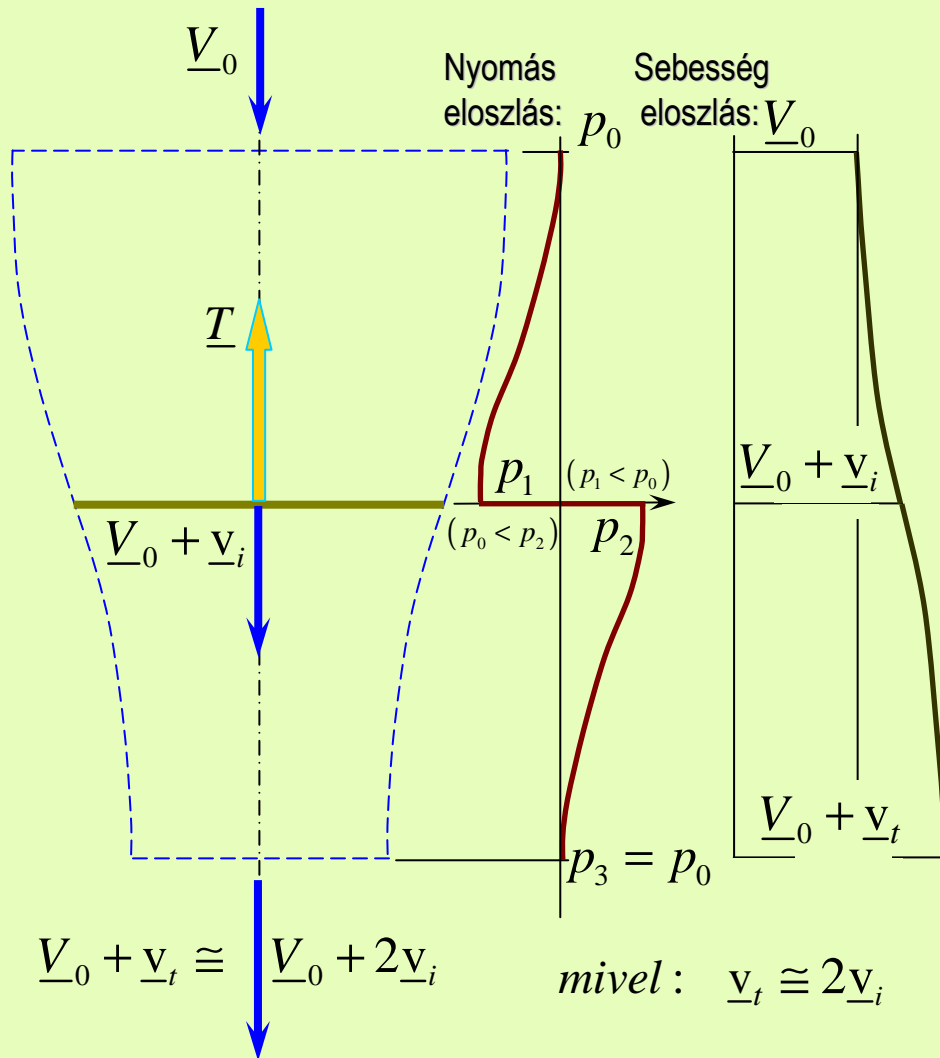
Többnyire nagyjából tengelyirányú áramlásban működnek

Többnyire általános megfúvásban működnek





Működés tengelyirányú áramlásban (lebegés – emelkedés – süllyedés)



Tárcsa modell („actuator disk” modell)

➤ 
$$\int_A \underline{V} \rho \underline{V} dA = \int_A \underline{\Phi} dA + \int_V \rho \underline{g} dV + \underline{F}$$

➤ Azaz rövidebben: 
$$\underline{I}_0 + \underline{I}_3 = - \int_A p dA - \underline{T}$$

➤ A tömegáram: 
$$\dot{m} = \rho (R^2 \pi) (V_0 + v_i)$$

➤ A mozgásmennyiség-változás vektorok:

$$\underline{I}_0 = \begin{bmatrix} \dot{m} V_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_3 = \begin{bmatrix} -\dot{m} (V_0 + v_t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ Megállapítható, hogy: 
$$\int_A p dA = \underline{0}$$

➤ Végeredményben a „T” erő: 
$$T = \dot{m} v_t$$

➤ A „T” erő a nyomáskülönbséggel is felírható:

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \dot{m} v_t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^2 \pi (p_2 - p_1) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



## Közeli és távoli indukált sebesség

➤ Bernoulli egyenlet 0-1 és 2-3 közé:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{(V_0 + v_i)^2}{2} \quad -$$

$$+ \quad \frac{p_2}{\rho} + \frac{(V_0 + v_i)^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{(V_0 + v_t)^2}{2}$$

➤ Összegezzük őket:

$$\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} = \frac{(V_0 + v_t)^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} = \frac{2V_0v_t + v_t^2}{2}$$

➤ Számítsuk ki a nyomáskülönbséget a „T” erő segítségével:

$$\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} = \frac{T}{R^2 \pi \rho} = \frac{\dot{m} v_t}{R^2 \pi \rho} = (V_0 + v_i) v_t$$

➤ Vessük össze a két eredményt:

$$(V_0 + v_i) v_t = \frac{2V_0v_t + v_t^2}{2} \Rightarrow 2(V_0 + v_i) v_t = (2V_0 + v_t) v_t$$

➤ Ebben az esetben a távoli indukált sebesség egyenlő a közeli indukált sebesség kétszeresével:

$$2(V_0 + v_i) = (2V_0 + v_t) \Rightarrow \boxed{2v_i = v_t}$$



Robinson R22 / R44 hintás rotoragy (90 fok!)



### A propulziós hatások és a statikus emelőerő / tolóerő

$$\eta_P = \frac{P_{id}}{\Delta E_{kin}} = \frac{TV_0}{\dot{m} \left[ \frac{(V_0 + 2v_i)^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} \right]} = \frac{(\dot{m}2v)V_0}{\dot{m} \left[ \frac{(V_0 + 2v_i)^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} \right]} = \frac{1}{1 + \frac{v_i}{V_0}}$$

➤ Lebegés („statikus”, azaz álló helyzeti jellemzők):

$$T_{ST} = \rho R^2 \pi v_i v_t = \rho R^2 \pi 2v_i^2$$

➤ illetve:  $P_{ST} = \dot{m} \frac{v_t^2}{2} = (\dot{m}2v_i) \frac{2v_i}{2} = T_{ST} v_i$

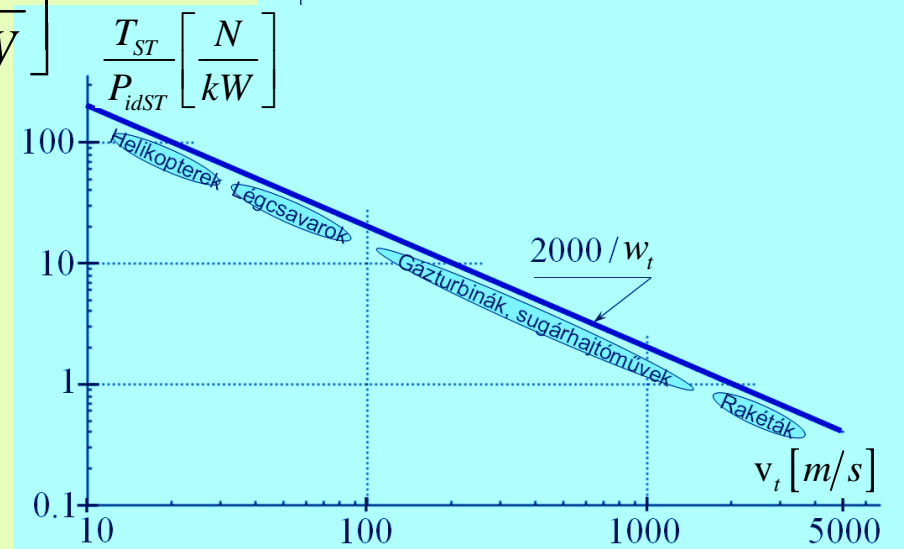
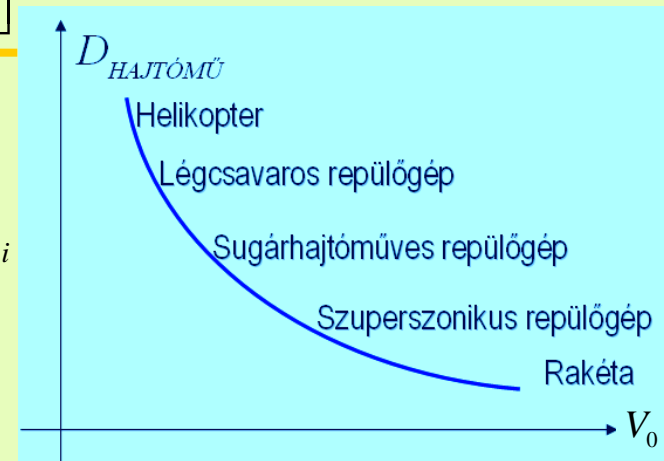
➤ A statikus (emelő)erő és az ideális teljesítmény viszonyozása:

$$\frac{T_{ST}}{P_{idST}} = \frac{T_{ST}}{T_{ST} v} = \left( \frac{\rho R^2 \pi v_i \cdot v_t}{\rho R^2 \pi v_i \cdot v_t v_i} \right) = \frac{1}{v_i} = \frac{2}{v_t} \left[ \frac{N}{W} \right]$$

$$\frac{T_{ST}}{P_{idST}} = \frac{2000}{v_t} \left[ \frac{N}{kW} \right]$$

➤ Megjegyzés (a valóságos erő):

$$T_{STvalóságos} = \xi_0 T_{ST} \quad (\xi_0 = 0.5 \sim 0.7)$$





Power loading (PL)

$$1 \cdot [lb/hp] = 5.959 \cdot [N/kW]$$

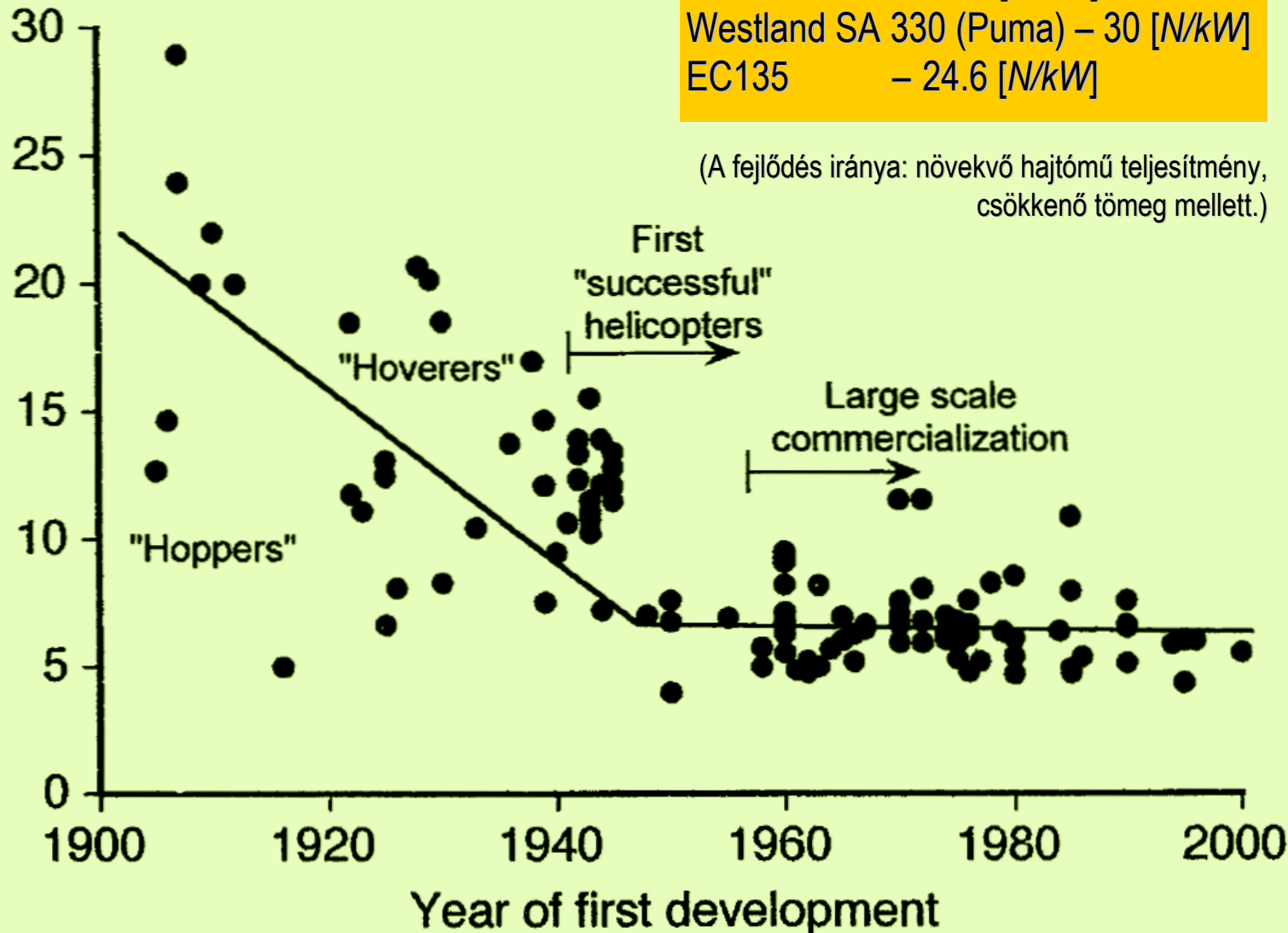
~180 [N/kW]

~120 [N/kW]

~60 [N/kW]

~30 [N/kW]

Power loading -  $lb\ hp^{-1}$



Cornu (1907)	– 114 [N/kW] (19 [lb/hp])
Bell UH-1	– 42.2 [N/kW]
Westland SA 330 (Puma)	– 30 [N/kW]
EC135	– 24.6 [N/kW]

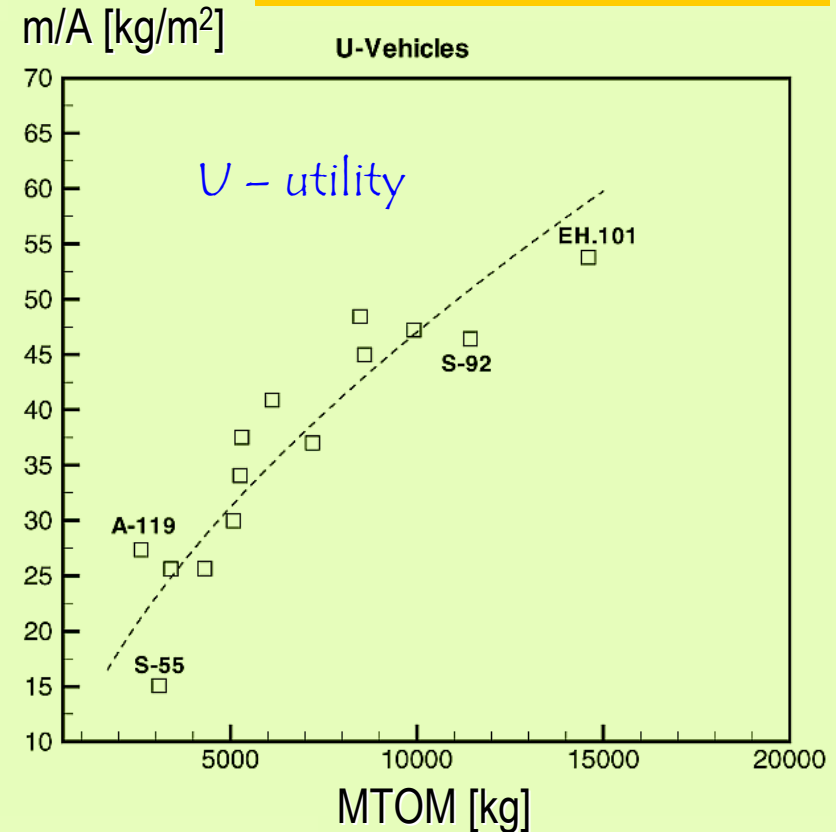
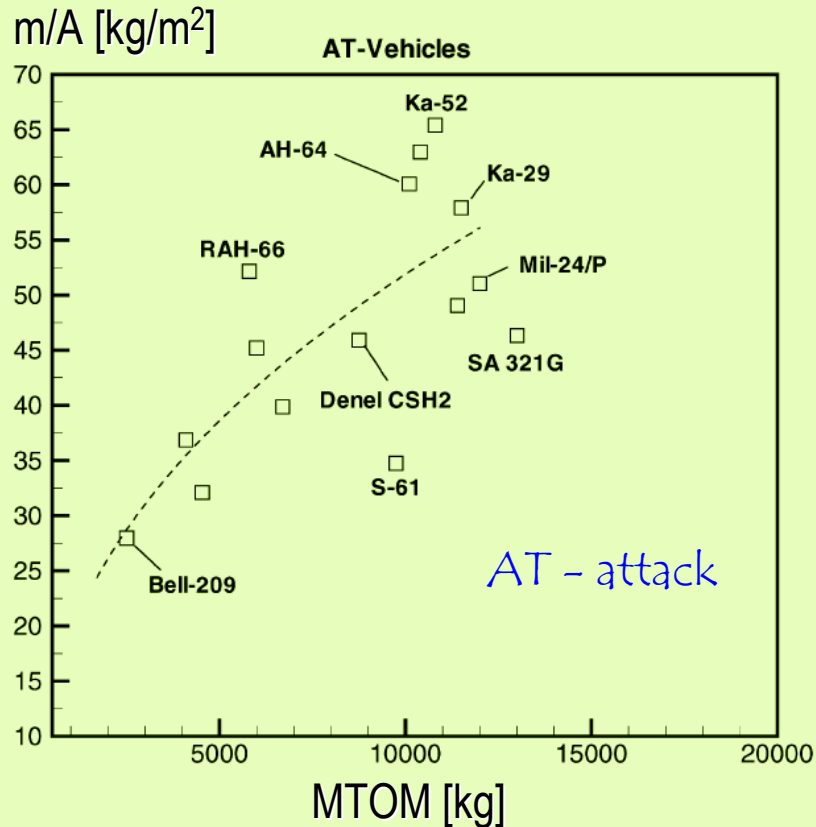
(A fejlődés iránya: növekvő hajtómű teljesítmény, csökkenő tömeg mellett.)





**A felületi terhelés (*DL* – disk loading)**

$(DL \approx 200 \sim 600 [N/m^2])$



$(m/A)_{AT} = 18.9 + 0.00448 \cdot m - 1.1 \cdot 10^{-7} \cdot m^2$

$(W/A)_{AT} = 185 + 0.0439 \cdot m - 1.08 \cdot 10^{-6} \cdot m^2$

$(m/A)_{UTIL} = 11 + 0.00433 \cdot m - 7.18 \cdot 10^{-8} \cdot m^2$

$(W/A)_{UTIL} = 108 + 0.0425 \cdot m - 7.04 \cdot 10^{-7} \cdot m^2$

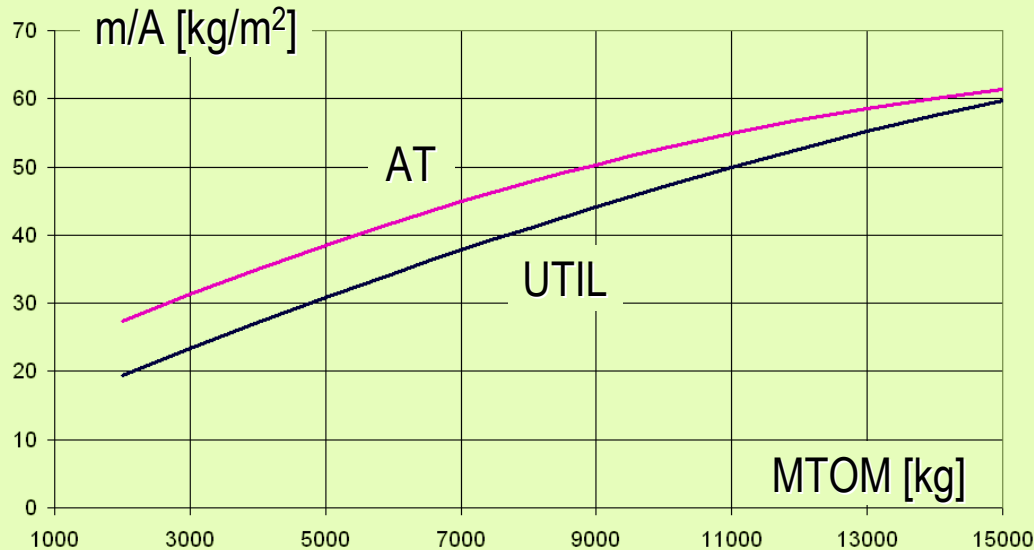
Az eredeti (angol nyelvű) anyagban a tengelyek jelölése:  $W/A$  [kg/m<sup>2</sup>] és MTOW [kg]

*Meglehetősen érdekes!*



A felületi terhelés és az indukált sebesség lebegésben

$(W = mg)$



$W \cong (\rho R^2 \pi v_i)(2v_i)$

$\Rightarrow v_i = \sqrt{\frac{W}{R^2 \pi \rho} \frac{1}{2}}$

$(\rho = 1.225 [kg/m^3])$

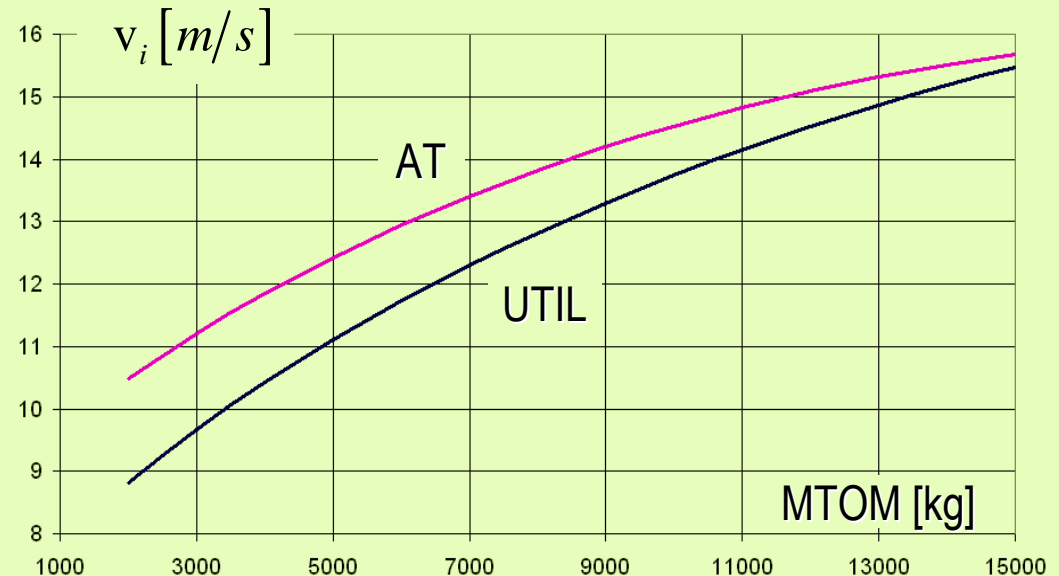
Megj.:  $DL$  (Disk Loading) =  $W / A$

Az átlagos közeli indukált sebesség:

$\tilde{v}_i \approx 12.5 [m/s]$  UTIL

$\tilde{v}_i \approx 13.5 [m/s]$  AT

A számításokban a veszteségek figyelembe vételétől eltekintettünk!





Lapátvég veszteség

$$R_{eff} = B \cdot R$$

L. Prandtl szerint (~1935)

$$B \cong 1 - \frac{1.386}{N_B} \lambda$$

- átáramlási tényező:

$$\lambda_i = \frac{v_i}{R\Omega} \left( \lambda = \frac{-V_0 \sin \alpha_{MR} + v_i}{R\Omega} \right)$$

- előrehaladási tényező:

$$\mu = \frac{V_0 \cos \alpha_{MR}}{R\Omega}$$

- vonóerő tényező:

$$c_T = \frac{T}{\rho (R\Omega)^2 (R^2 \pi)}$$

Függészkedésben (  $\lambda = \lambda_i = \lambda_{iH}$  ):

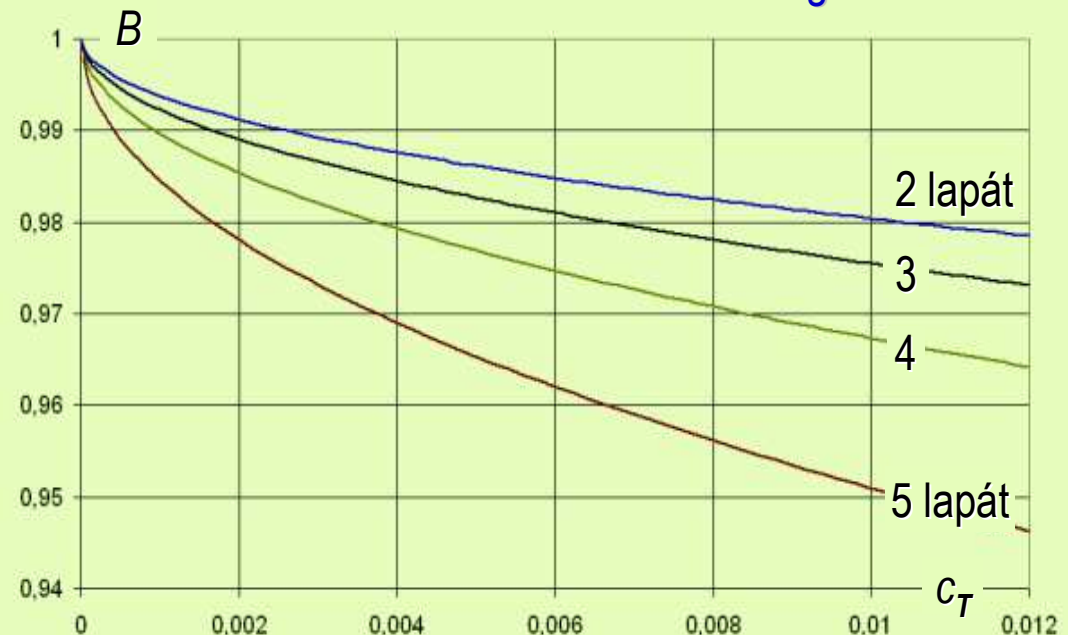
$$c_T \rho (R\Omega)^2 (R^2 \pi) = T = \rho (R^2 \pi) v_i 2v_i$$

$$c_T = 2 \frac{v_i^2}{(R\Omega)^2} = 2 \lambda_{iH}^2 \Rightarrow \lambda_{iH} = \sqrt{\frac{c_T}{2}}$$

$$B \cong 1 - \frac{1.386}{N_B} \lambda_{iH} = 1 - \frac{1.386}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{c_T}}{N_B}$$

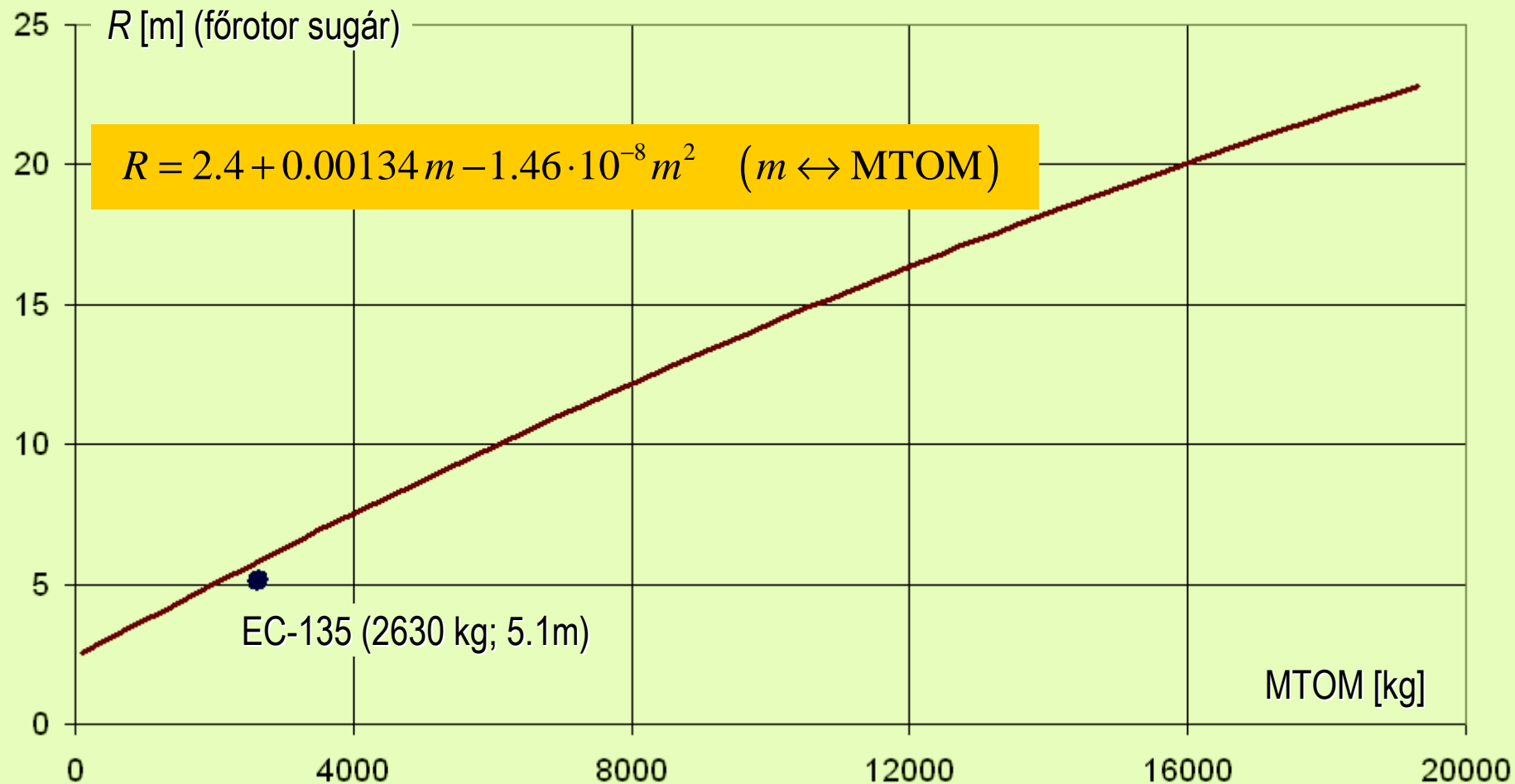
$$\Rightarrow B \cong 1 - 0.98 \frac{\sqrt{c_T}}{N_B}$$

A Prandtl féle lapátvég veszteség tényező lebegésben:





## A főrotor átmérője a max. felszálló tömeg függvényében

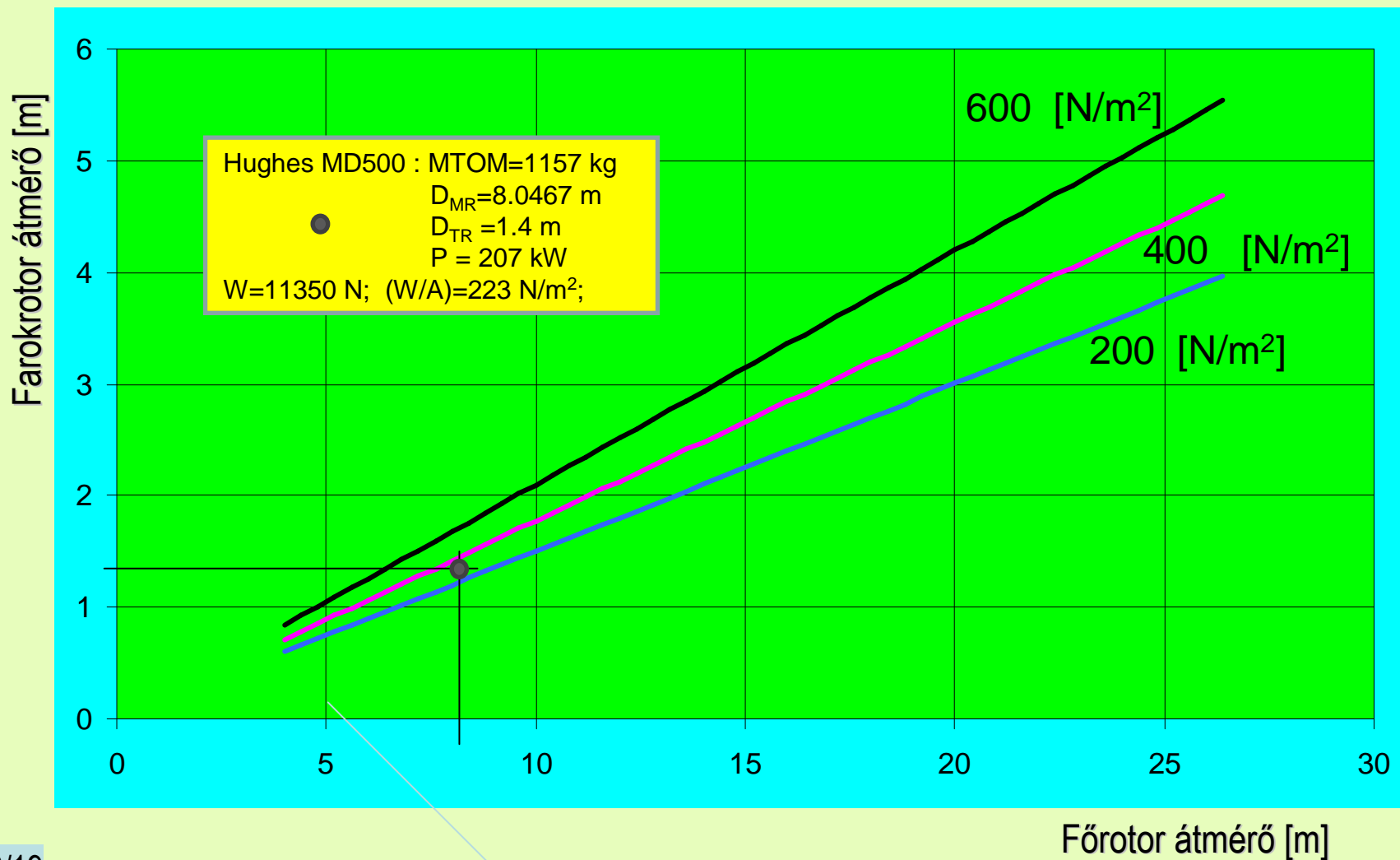


A főrotor átmérője a felszálló tömeg függvényében (statisztika, tehát pontosan nem igazán igaz!)



## A farokrotor átmérője a főrotor átmérőjének függvényében

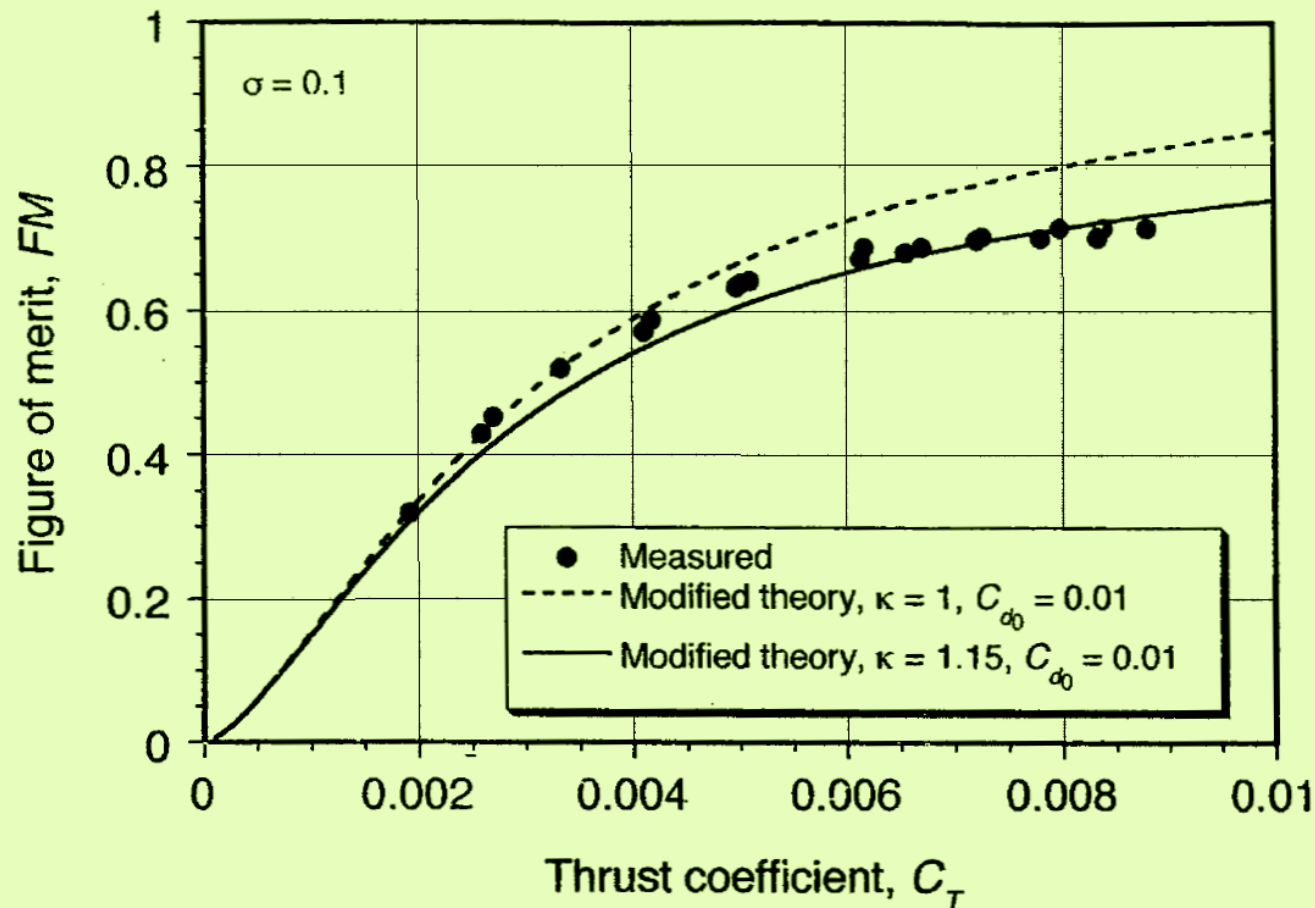
$$\frac{D_{TR}}{D_{MR}} \sim 0.127 \exp\left[\frac{0.0082}{9.81} \left(\frac{W}{A}\right)\right]; \quad [W] = \text{Newton}; \quad A = \frac{D_{MR}^2 \pi}{4}.$$





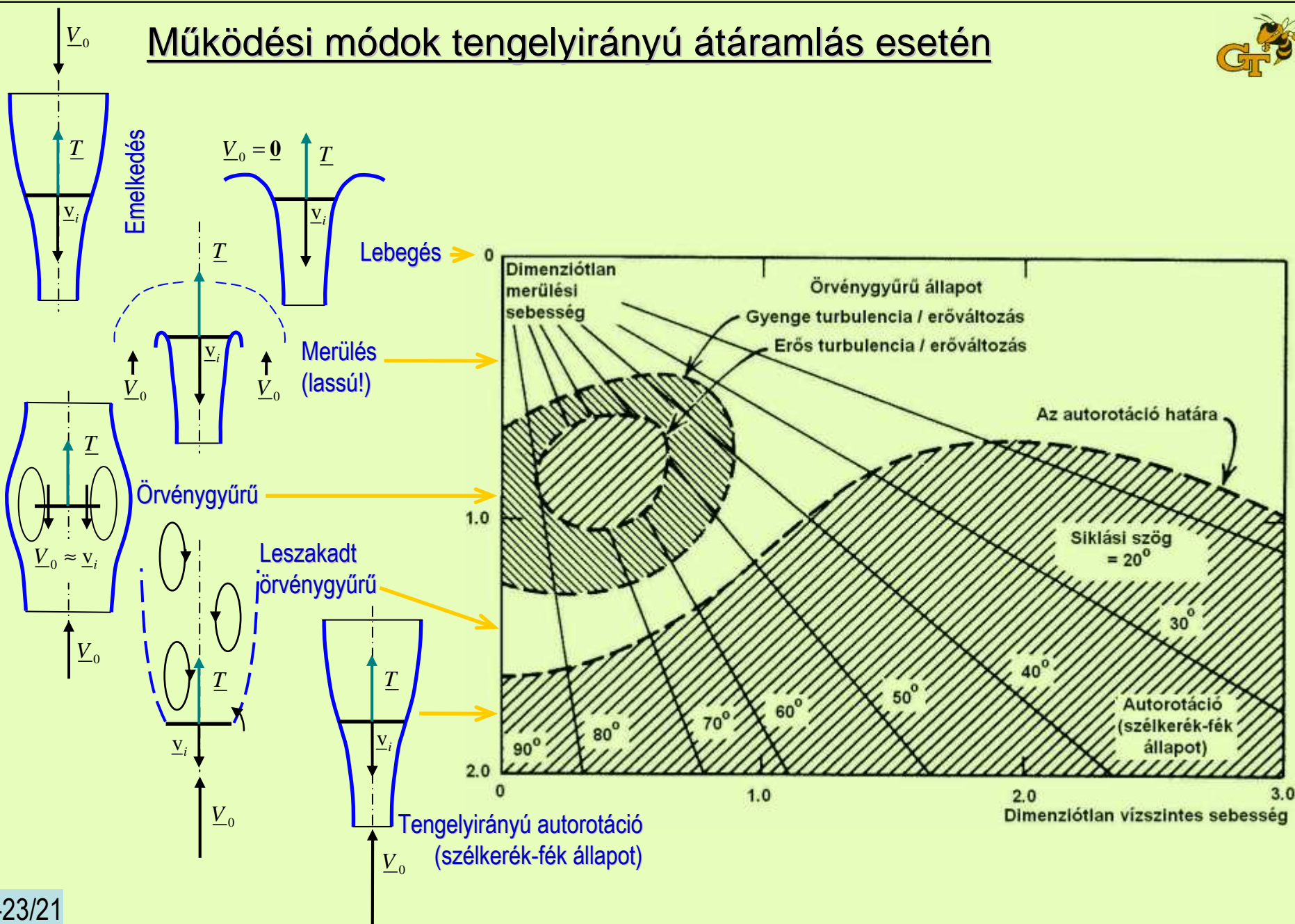
Lebegés – FM – Figure of merit (viszonyított hatásfok)

$$FM = \frac{\text{Lebegéshez szükséges, ideális teljesítmény}}{\text{Lebegéshez szükséges, valódi teljesítmény}}$$



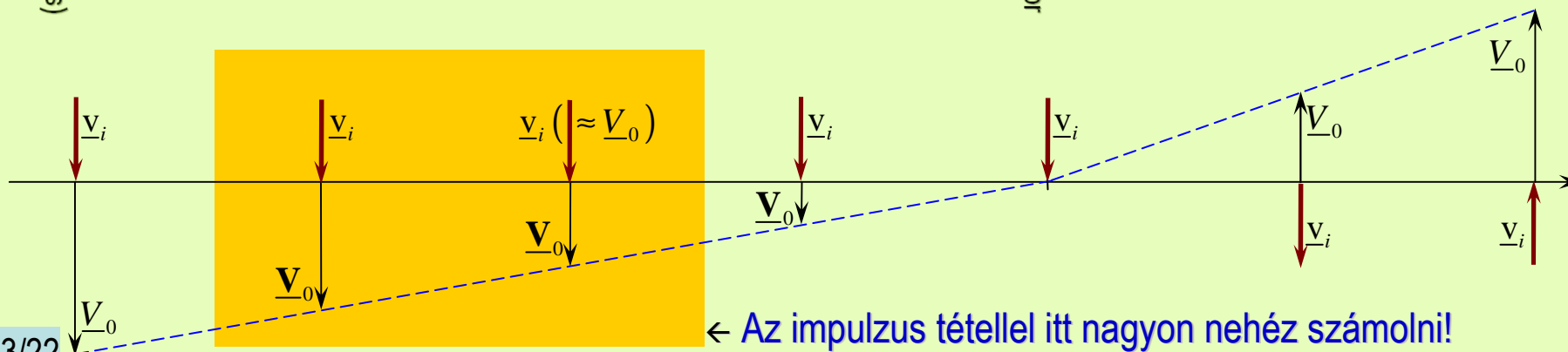
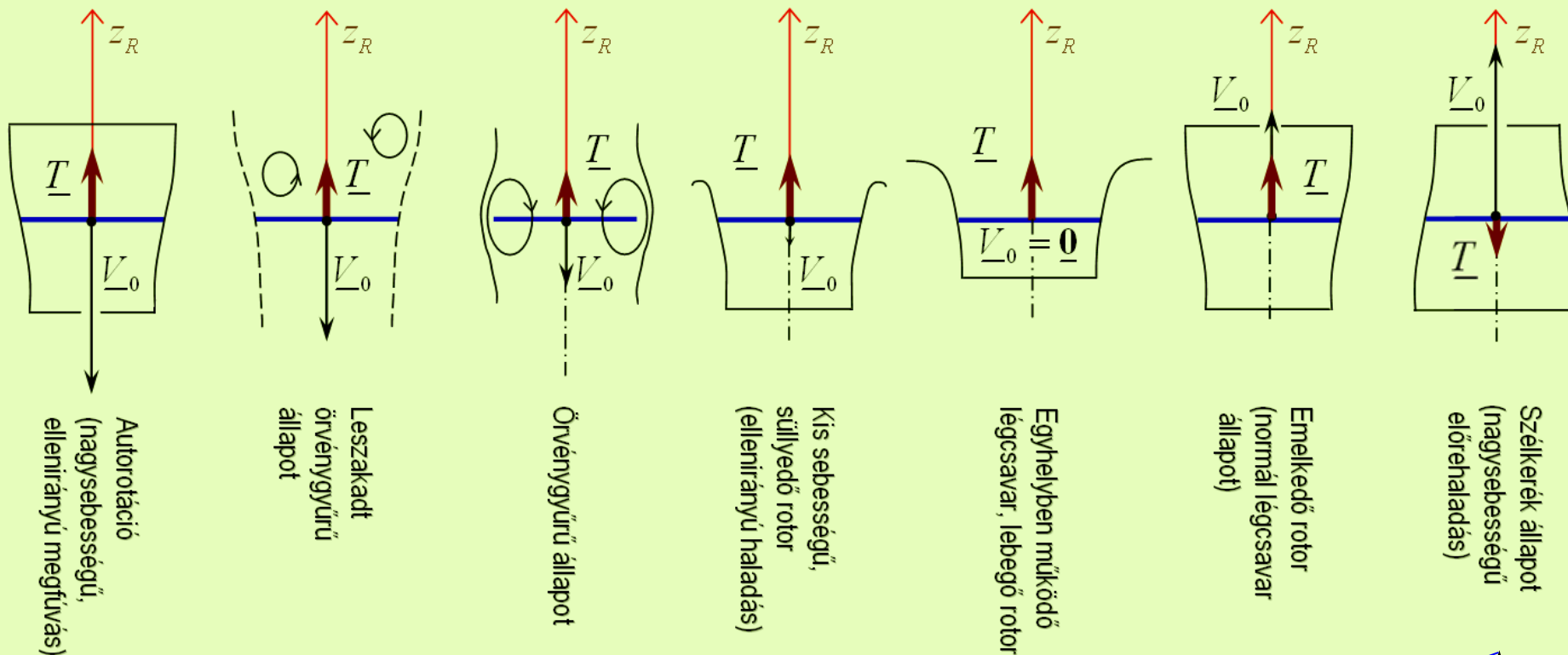


**Működési módok tengelyirányú átáramlás esetén**





## Működési módok tengelyirányú áramlás esetén

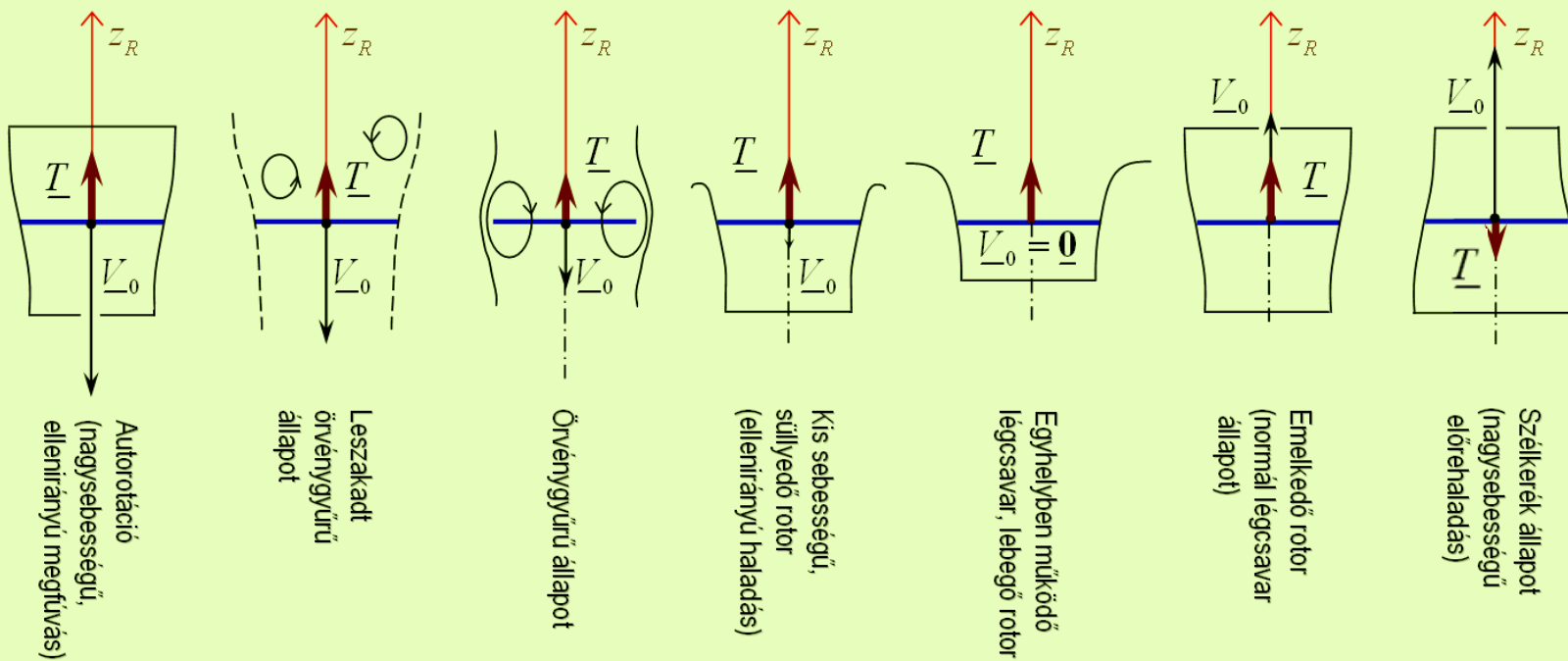




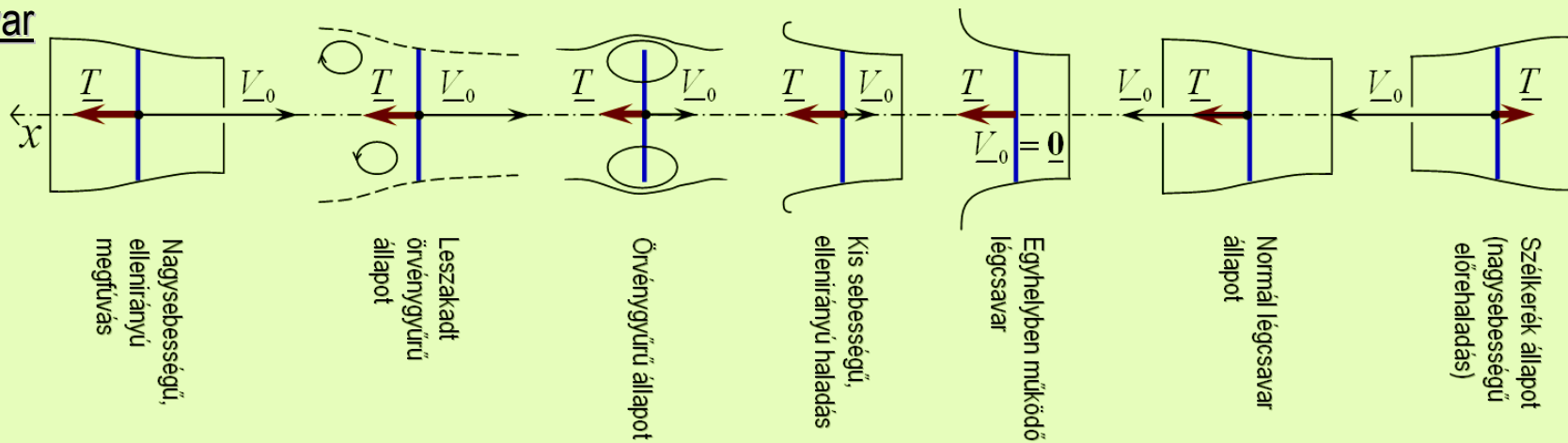


## Működési módok tengelyirányú áramlás esetén

### Rotor



### Légcsavár





**Köszönöm a figyelmet!**