FORGÓSZÁRNYAS REPÜLŐGÉPEK

07

Gausz Tamás

Budapest, 2014

Figyelem:

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

Helikopter, rakétahajtásos rotorral

Az állásszög és a csúszási szög

A repülési sebesség a TEST kr.-ben:

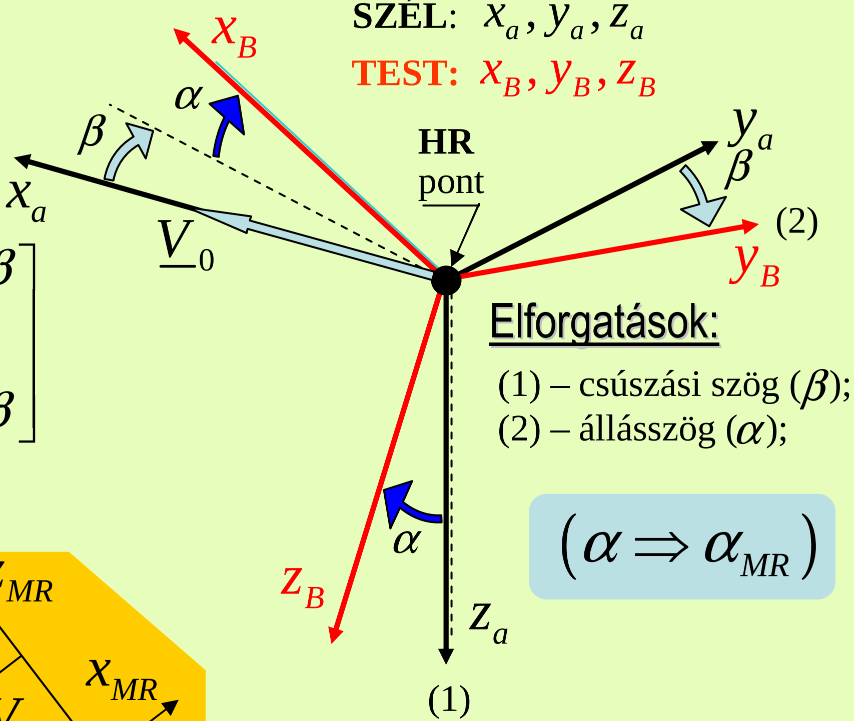
$$\underline{V}_0^B = \underline{\underline{A}}_{B,a}\underline{V}_0^a$$

$$\underline{V}_0^B = \begin{bmatrix} c\alpha_{MR}c\beta & c\alpha_{MR}s\beta & -s\alpha_{MR} \\ -s\beta & c\beta & 0 \\ s\alpha_{MR}c\beta & s\alpha_{MR}s\beta & c\alpha_{MR} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 c\alpha_{MR}c\beta \\ -V_0 s\beta \\ V_0 s\alpha_{MR}c\beta \end{bmatrix}$$

Koordináta rendszerek:

SZÉL: x_a, y_a, z_a

TEST: x_B, y_B, z_B



Elforgatások:

(1) – csúszási szög (β);
(2) – állásszög (α);

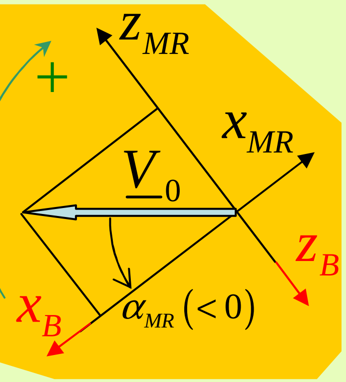
$$(\alpha \Rightarrow \alpha_{MR})$$

Az állásszög (jelenleg rögtön a rotor-állásszög):

$$\alpha_{MR} = \mathrm{Arctg}\left(\frac{V_{0z}^B}{V_{0x}^B}\right) = \mathrm{Arctg}\left(\frac{V_0 s\alpha_{MR}c\beta}{V_0 c\alpha_{MR}c\beta}\right)$$

$$\alpha_{MR} = \mathrm{Arctg2}\left(V_{0z}^B, V_{0x}^B\right)$$

A pozitív forgásirány mindkét rendszerben az óramutató járásával megegyező irány:



Csúszás nélkül:

$$\underline{V}_0^B = \begin{bmatrix} V_0 c\alpha_{MR} \\ 0 \\ V_0 s\alpha_{MR} \end{bmatrix}$$

A csúszási szög:

$$\beta = \begin{cases} \mathrm{Arctg2}\left(-V_{0y}^B, V_{0x}^B / c\alpha_{MR}\right) \\ \mathrm{Arctg2}\left(-V_{0y}^B, V_{0z}^B / s\alpha_{MR}\right) \end{cases}$$

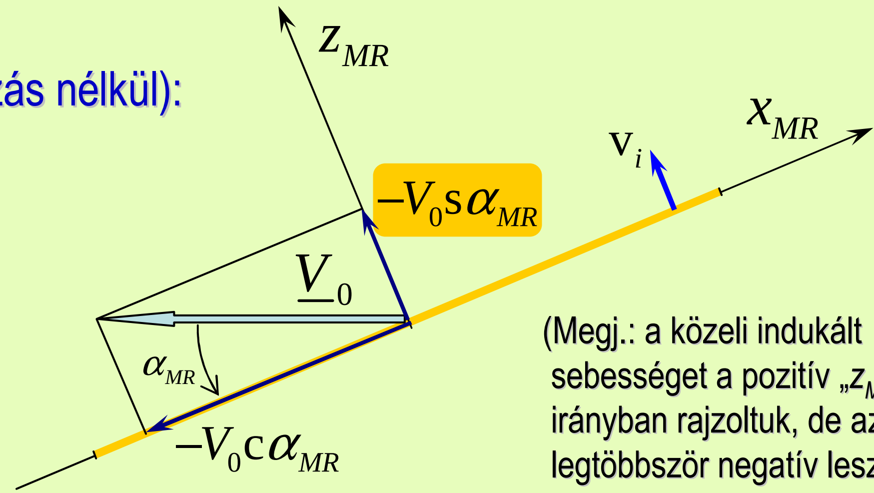
← TEST { ELTOLT-FÖLD / SZÉL (AËRODINAMIKAI)

LAPÁT ← FORGÓ ← FŐROTOR ← TEST

A repülési sebesség

A repülési sebesség a „ROTOR" rendszerben (csúszás nélkül):

$$\underline{V}_0^{MR} = \begin{bmatrix} -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \\ 0 \\ -V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \end{bmatrix}$$



(Megj.: a közeli indukált sebességet a pozitív „z_{MR}" irányban rajzoltuk, de az legtöbbször negatív lesz, azaz „lefele" mutat!)

A repülési sebesség a „FORGÓ" rendszerben:

$$\underline{V}_0^{F} = \underline{\underline{A}}_{F,MR} \underline{V}_0^{MR} = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\psi_{MR} & \mathrm{s}\psi_{MR} & 0 \\ -\mathrm{s}\psi_{MR} & \mathrm{c}\psi_{MR} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \\ 0 \\ -V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{c}\psi_{MR} \\ V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{s}\psi_{MR} \\ -V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \end{bmatrix}$$

hacsak δ_L elegendően kicsi :

$$\underline{\underline{A}}_{L,F} = \begin{bmatrix} \mathrm{c}\beta_L & 0 & -\mathrm{s}\beta_L \\ 0 & 1 & 0 \\ \mathrm{s}\beta_L & 0 & \mathrm{c}\beta_L \end{bmatrix}$$

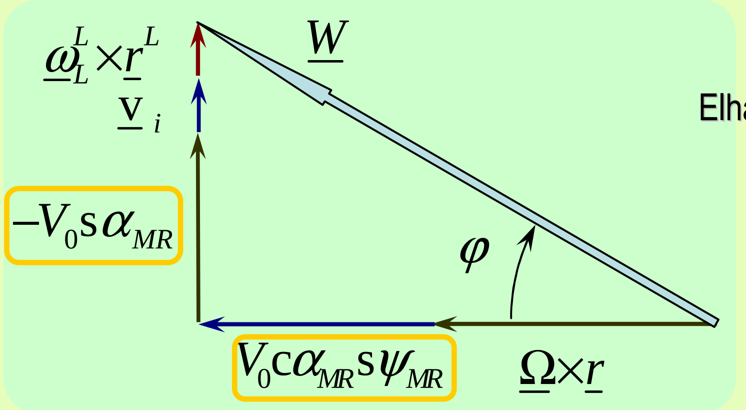
A repülési sebesség a „LAPÁT" rendszerben (többféle elhanyagolással):

$$\underline{V}_0^{L} = \underline{\underline{A}}_{L,F} \underline{V}_0^{F} = \begin{bmatrix} -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{c}\psi_{MR} \mathrm{c}\beta_L + V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \mathrm{s}\beta_L \\ V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{s}\psi_{MR} \\ -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{c}\psi_{MR} \mathrm{s}\beta_L - V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \mathrm{c}\beta_L \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{c}\psi_{MR} \\ V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR} \mathrm{s}\psi_{MR} \\ -V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR} \end{bmatrix}$$

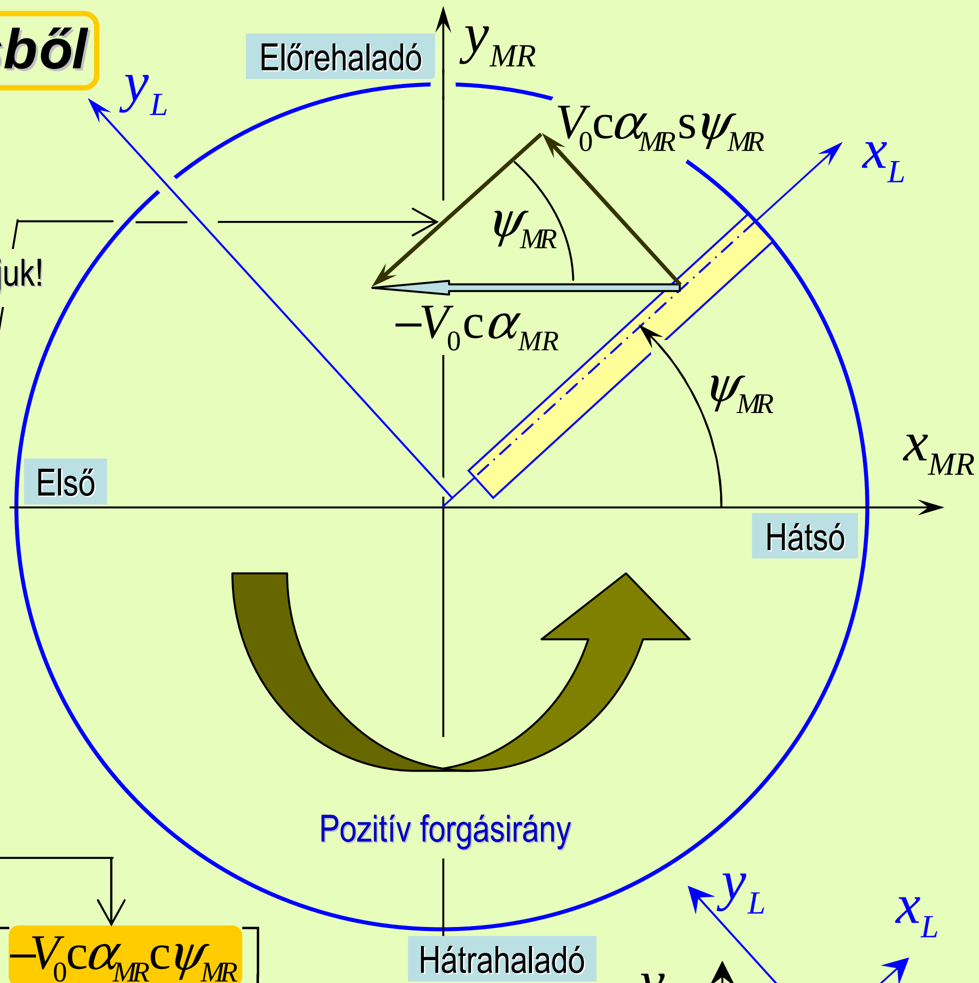
~ kb. a rotorlapátra merőleges sebesség-összetevő

~ rotor-forgástengely irányú sebesség-összetevő

A rotorlapát sebességei - ***repülésből***



Elhanyagoljuk!



→ Csapkodó mozgásból adódó sebesség;

→ Indukált sebesség;

→ Repülési sebesség „merőleges” összetevője;

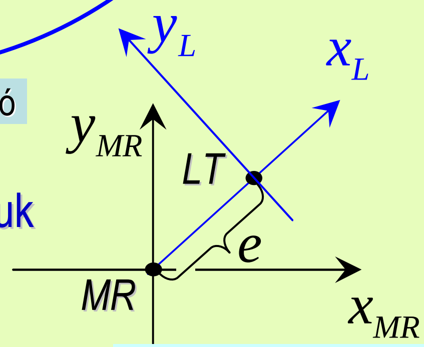
→ Repülési sebesség lapátra merőleges összetevője;

→ Forgásból származó sebesség.

$$\underline{V}_0^L = \underline{\underline{A}}_{L,F}\,\underline{V}_0^F = \begin{bmatrix} -V_0 c\alpha_{MR} c\psi_{MR} c\beta_L + V_0 s\alpha_{MR} s\beta_L \\ V_0 c\alpha_{MR} s\psi_{MR} \\ -V_0 c\alpha_{MR} c\psi_{MR} s\beta_L - V_0 s\alpha_{MR} c\beta_L \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -V_0 c\alpha_{MR} c\psi_{MR} \\ V_0 c\alpha_{MR} s\psi_{MR} \\ -V_0 s\alpha_{MR} \end{bmatrix}$$

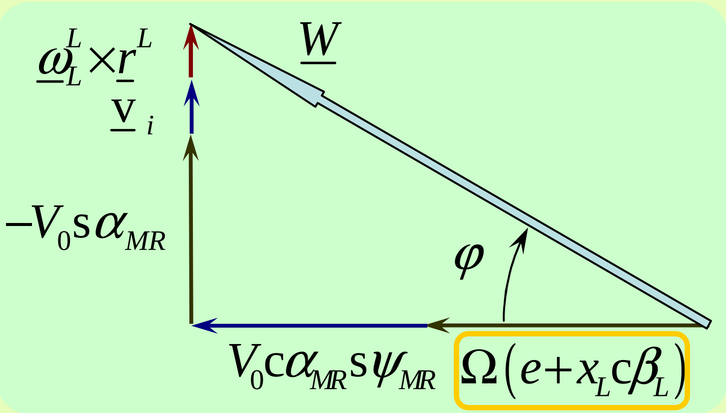
Ezeket használjuk

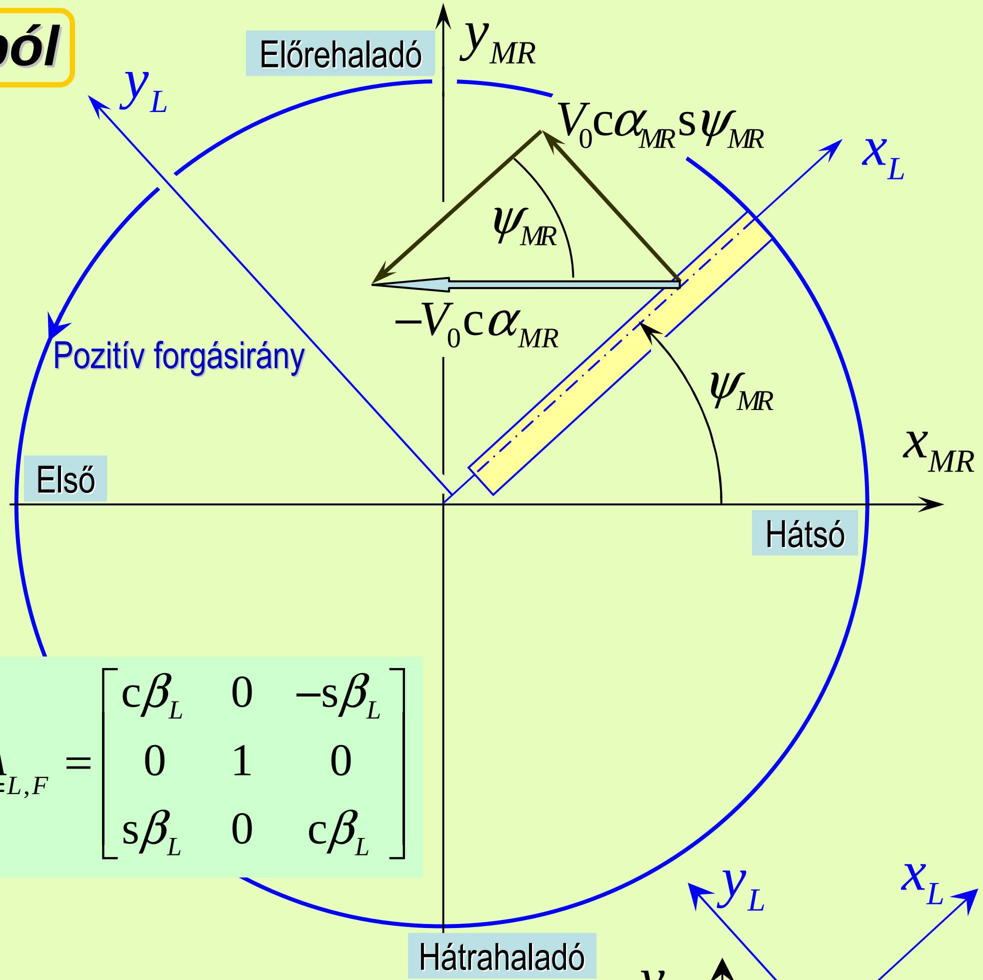
Elhanyagolunk: $|\beta_L|$ *kicsi* $\Rightarrow s\beta_L \approx 0$ *és* $c\beta_L \approx 1$



„e” – a csapkodó csukló széthelyezése

A rotorlapát sebességei - ***forgásból***





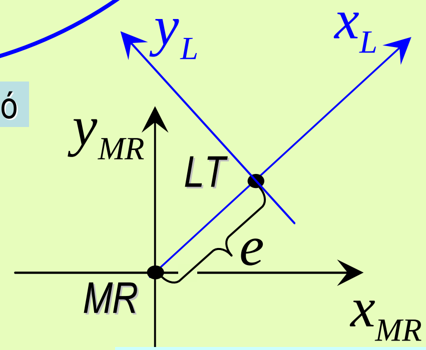
- → Csapkodó mozgásból adódó sebesség;
- → Indukált sebesség;
- → Repülési sebesség „merőleges” összetevője;
- → Repülési sebesség lapátra merőleges összetevője;
- → Forgásból származó sebesség.

$$\underline{\underline{A}}_{L,F} = \begin{bmatrix} c\beta_L & 0 & -s\beta_L \\ 0 & 1 & 0 \\ s\beta_L & 0 & c\beta_L \end{bmatrix}$$

$$\underline{r}^F = \begin{bmatrix} e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \underline{\underline{A}}_{L,F}^T \begin{bmatrix} x_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e + x_L c\beta_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

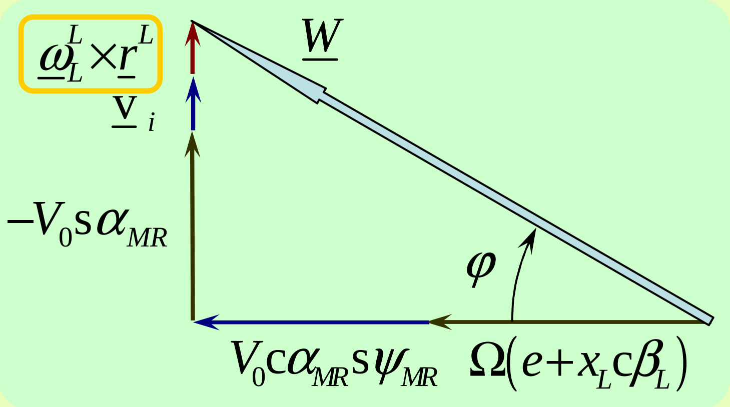
→ **Forgásból származó sebesség**: $\underline{\Omega}^F \times \underline{r}^F = \begin{bmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 0 & 0 & \Omega \\ e + x_L c\beta_L & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega\left(e + x_L c\beta_L\right) \\ 0 \end{bmatrix}$

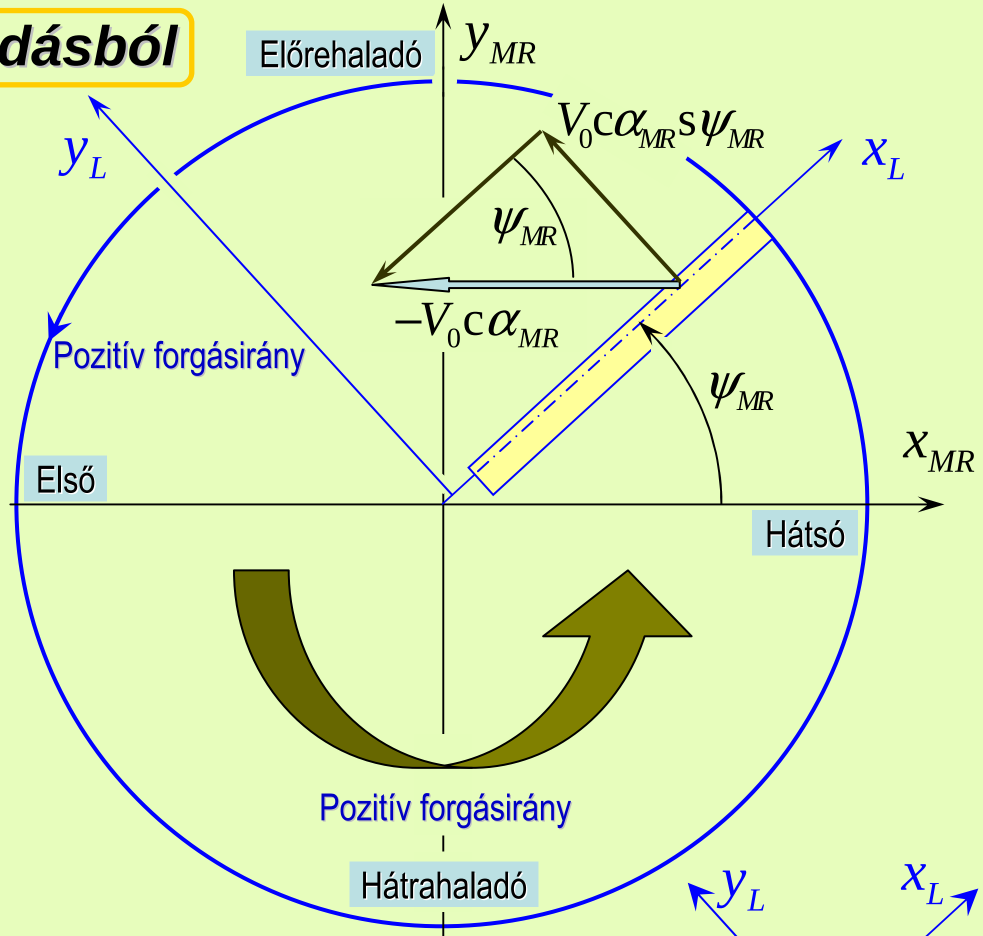
$$\left(\underline{\Omega}^F \times \underline{r}^F\right)^L = \underline{\underline{A}}_{L,F}\left(\underline{\Omega}^F \times \underline{r}^F\right) = \underline{\Omega}^F \times \underline{r}^F$$



„e” – a csukló széthelyezése

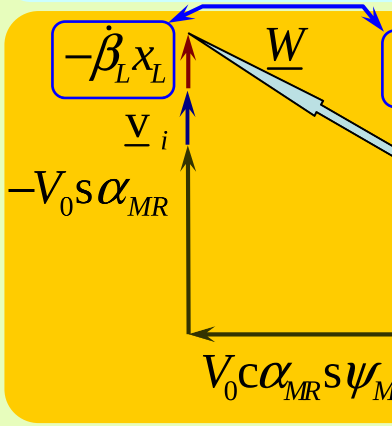
A rotorlapát sebességei - ***csapkodásból***





→ Csapkodó mozgásból adódó sebesség:

$$\underline{\omega}_L^L \times \underline{r}^L = \begin{bmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ 0 & \dot{\beta}_L & 0 \\ x_L & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\beta}_L x_L \end{bmatrix}$$

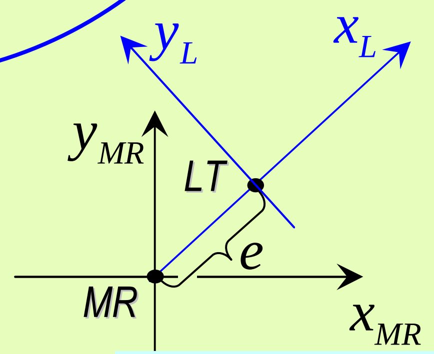


$$-\dot{\beta}_L x_L = -\beta_L' \Omega x_L$$

Az idő szerinti deriválás átírása:

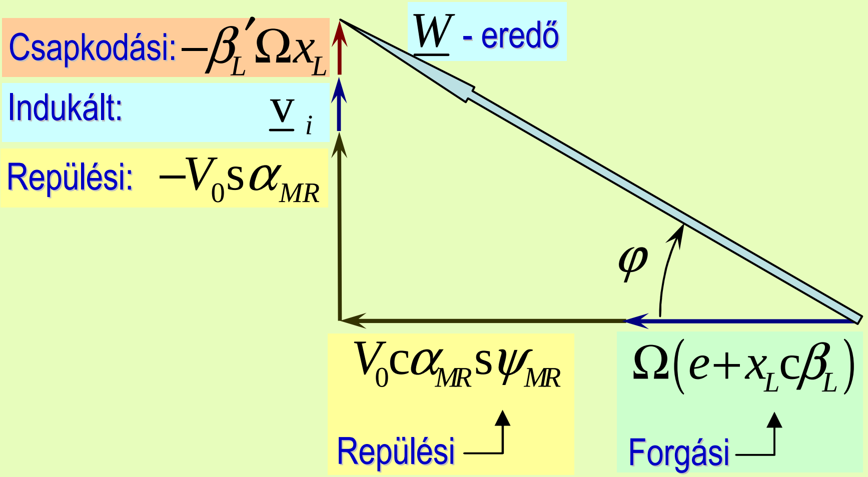
$$\frac{d\dot{\beta}_L}{dt} = \frac{d\dot{\beta}_L}{d\psi_{MR}} \frac{d\psi_{MR}}{dt} = \frac{d\dot{\beta}_L}{d\psi_{MR}} \Omega = \Omega \beta_L'$$

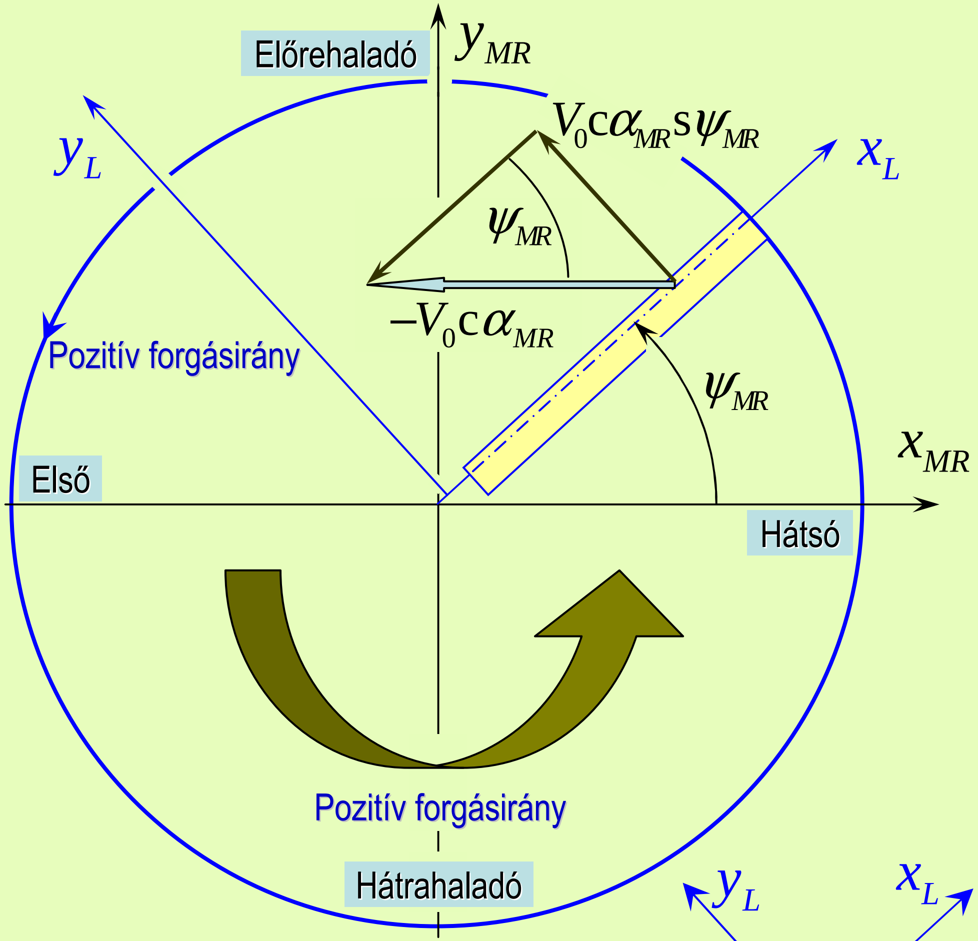
és: $\boxed{\ddot{\beta}_L = \Omega^2 \beta_L''}$

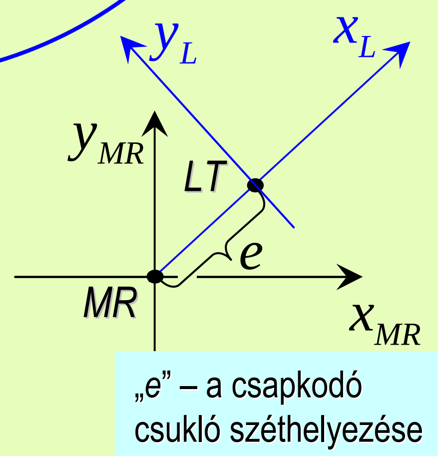


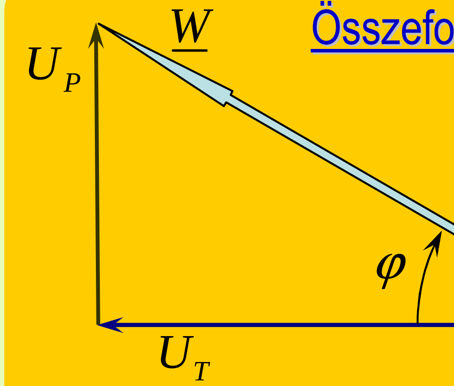
„e" – a csapkodó csukló széthelyezése

A rotorlapát sebességei









Összefoglaló jelölés:

$$U_P = -\beta_L' \Omega x_L + v_i - V_0 s \alpha_{MR}$$
$$U_T = V_0 c \alpha_{MR} s \psi_{MR} + \Omega(e + x_L c \beta_L)$$

A rotorlapát-metszet sebességei – sebességi „háromszög”

$W=\sqrt{U_P^2+U_T^2}$ → az eredő sebesség

$\varphi=\mathrm{Arctan2}\{U_P,U_T\}$ → a sebességi háromszög-szög

$$\left(U_P=-\beta_L'\Omega x_L+\mathrm{v}_i-V_0 \mathrm{s}\alpha_{MR}\right)$$

$$\left(U_T=V_0 \mathrm{c}\alpha_{MR}\mathrm{s}\psi_{MR}+\Omega\left(e+x_L \mathrm{c}\beta_L\right)\right)$$

$$\alpha_{PR}=\vartheta-\varphi \;\Rightarrow\; c_L=c_L\left(\alpha_{PR},\mathrm{Re},Ma\ldots\right) \;\Rightarrow\; c_D=c_D\left(\alpha_{PR},\mathrm{Re},Ma\ldots\right) \;\Rightarrow\; c_M=c_M\left(\alpha_{PR},\mathrm{Re},Ma\ldots\right)$$

$dL=\left(\frac{\rho}{2}W^2\right)c_L h\,dx_L$ → a felhajtóerő

$dD=\left(\frac{\rho}{2}W^2\right)c_D h\,dx_L$ → a légellenállás

$dM=\left(\frac{\rho}{2}W^2\right)c_M h^2\,dx_L$ → a csavaró nyomaték

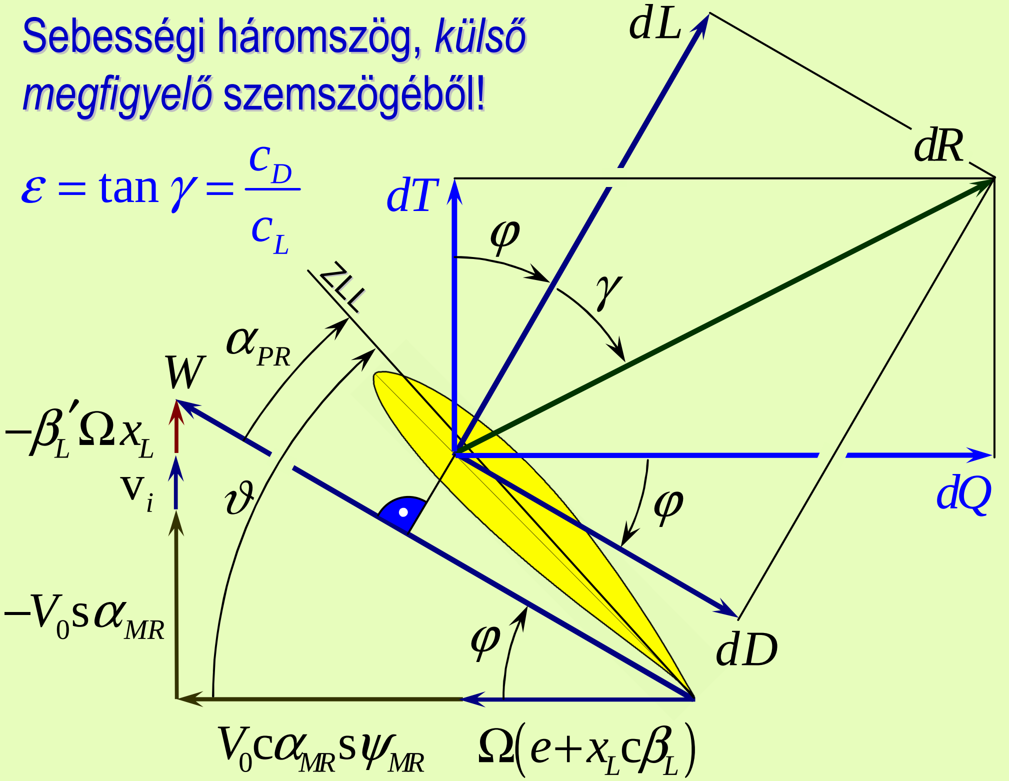
$dT=dL\cos\varphi-dD\sin\varphi$ → az emelőerő

$dQ=dL\sin\varphi+dD\cos\varphi$ → a forgást akadályozó erő

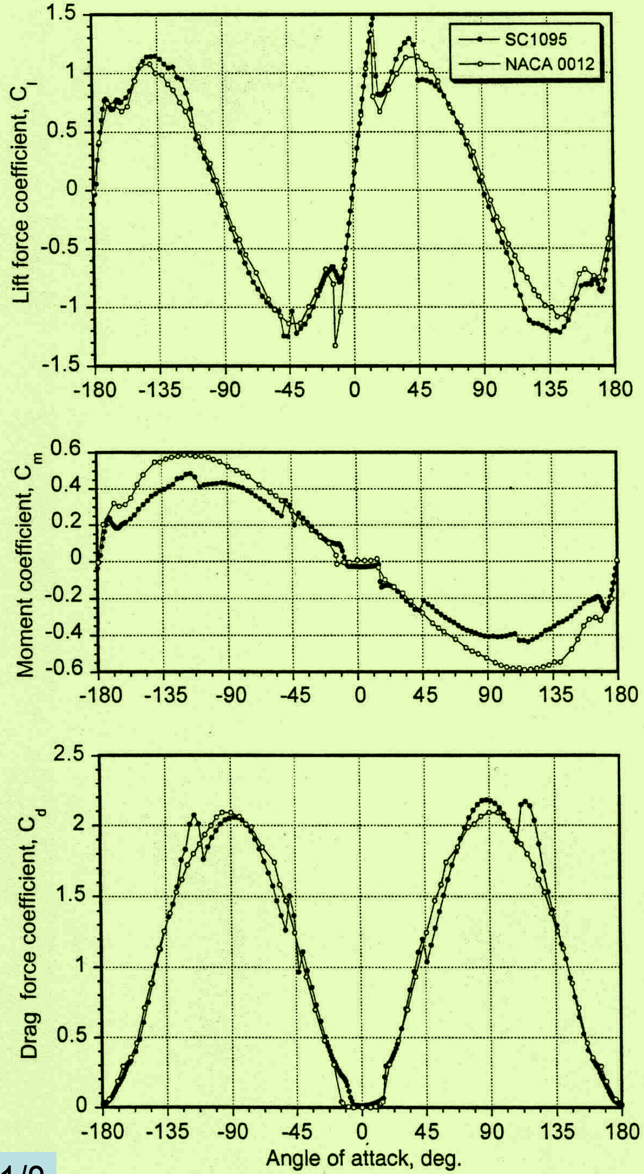
$dM_{FORG}=\left(e+x_L \mathrm{c}\beta_L\right)dQ$ → a forgást akadályozó nyomaték

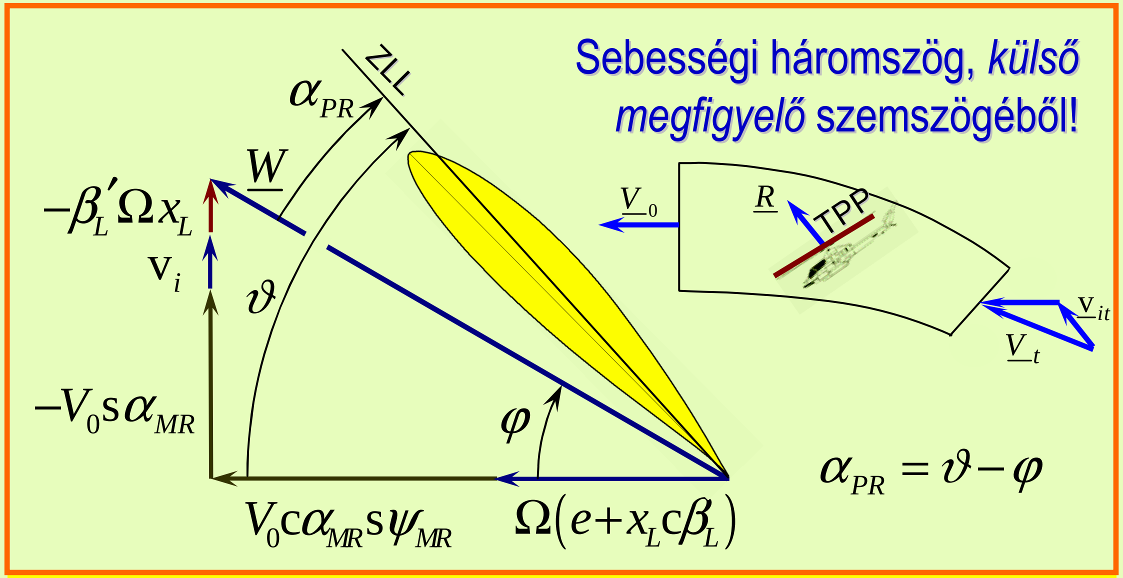
Sebességi háromszög, *külső megfigyelő* szemszögéből!

$$\varepsilon=\tan\gamma=\frac{c_D}{c_L}$$

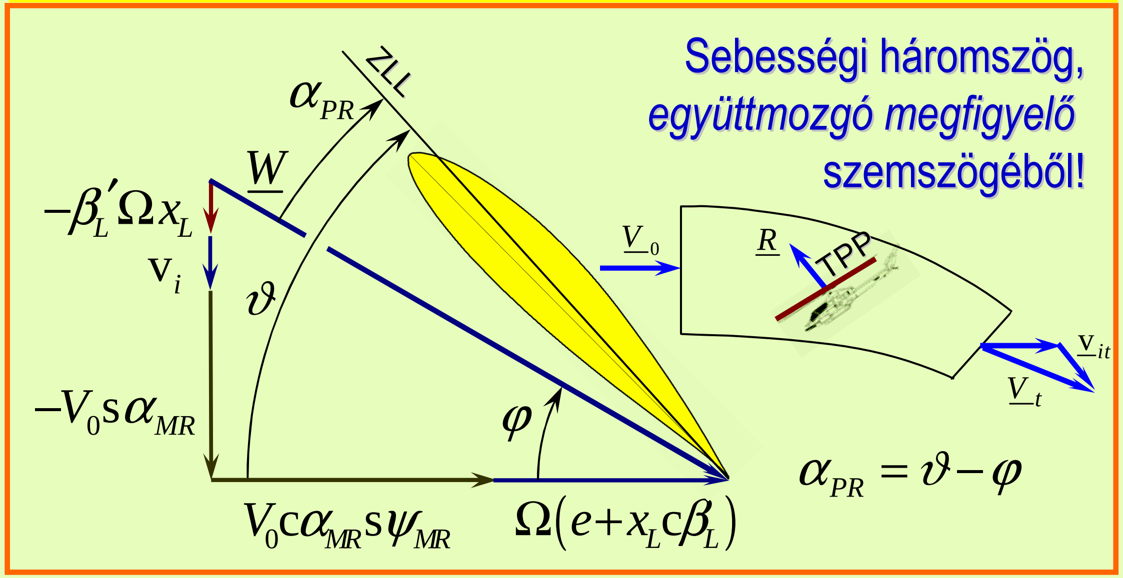


A légerő-tényezők és a sebességi „háromszög” értelmezése





$-180^0 \le \alpha_{PR} \le 180^0$ *és az instacioneritás…*



Az eredő légerő és az átszámítása a „ROTOR” rendszerbe

$$d\underline{R}^{L}=\begin{bmatrix}0\\-dQ\\dT\end{bmatrix}\qquad d\underline{R}^{F}=\underline{\underline{A}}_{L,F}^{T}\,d\underline{R}^{L}=\begin{bmatrix}c\beta_L & 0 & s\beta_L\\0 & 1 & 0\\-s\beta_L & 0 & c\beta_L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\-dQ\\dT\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}dTs\beta_L\\-dQ\\dTc\beta_L\end{bmatrix}$$

$$d\underline{R}^{MR}=\underline{\underline{A}}_{F,MR}^{T}\,d\underline{R}^{F}=\begin{bmatrix}c\psi_{MR} & s\psi_{MR} & 0\\-s\psi_{MR} & c\psi_{MR} & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}dTs\beta_L\\-dQ\\dTc\beta_L\end{bmatrix}$$

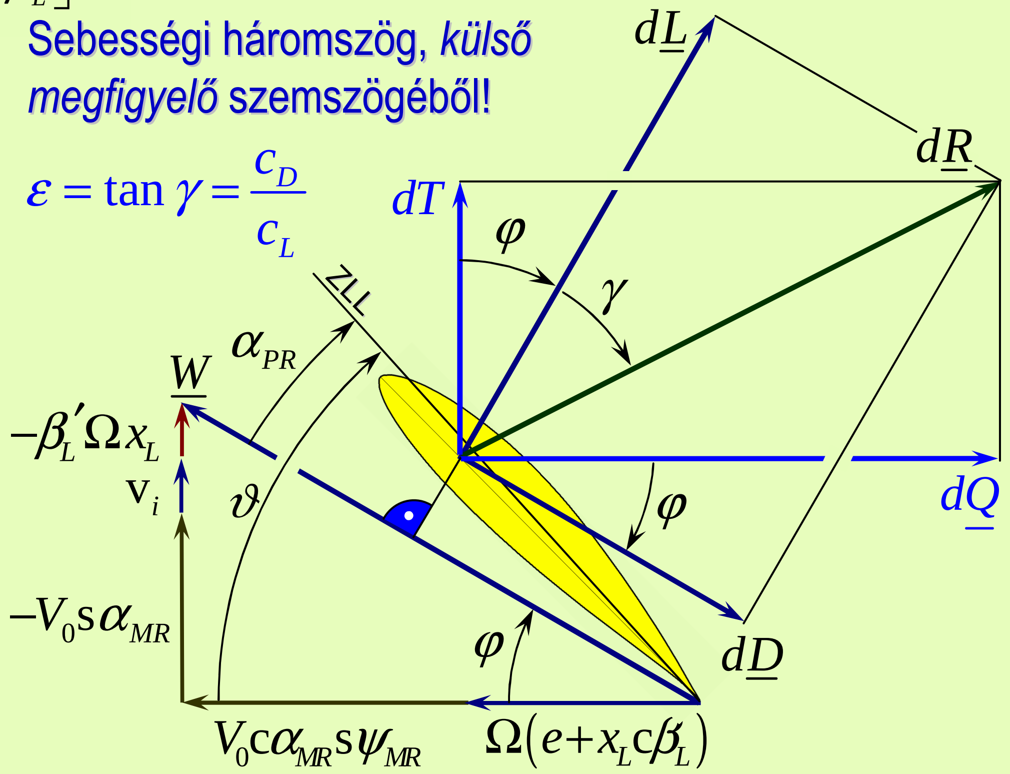
$$d\underline{R}^{MR}=\begin{bmatrix}dTs\beta_L c\psi_{MR}-dQs\psi_{MR}\\-dTs\beta_L s\psi_{MR}-dQc\psi_{MR}\\dTc\beta_L\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}dH_{MR}\\dS_{MR}\\dT_{MR}\end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{A}}_{L,F}=\begin{bmatrix}c\beta_L & 0 & -s\beta_L\\0 & 1 & 0\\s\beta_L & 0 & c\beta_L\end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{A}}_{F,MR}=\begin{bmatrix}c\psi_{MR} & s\psi_{MR} & 0\\-s\psi_{MR} & c\psi_{MR} & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

Sebességi háromszög, *külső megfigyelő* szemszögéből!

$$\varepsilon=\tan\gamma=\frac{c_D}{c_L}$$



Az eredő légerő a „ROTOR” rendszerben

$$T_{MR,1}(\psi_{MR}) = \int_0^L dT_{MR}(x_L, \psi_{MR})$$

$$\tilde{T}_{MR} = (T_{MR}) = \frac{N_B}{2\pi}\int_0^L T_{MR,1}(\psi_{MR})\, d\psi_{MR}$$

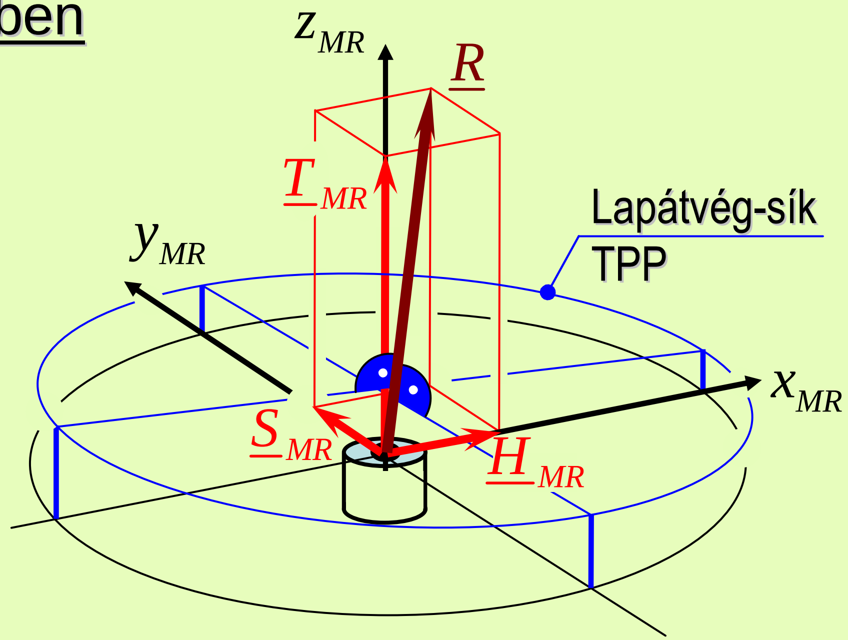
$$H_{MR,1}(\psi_{MR}) = \int_0^L dH_{MR}(x_L, \psi_{MR})$$

$$\tilde{H}_{MR} = (H_{MR}) = \frac{N_B}{2\pi}\int_0^L H_{MR,1}(\psi_{MR})\, d\psi_{MR}$$

$$S_{MR,1}(\psi_{MR}) = \int_0^L dS_{MR}(x_L, \psi_{MR})$$

$$\tilde{S}_{MR} = (S_{MR}) = \frac{N_B}{2\pi}\int_0^L S_{MR,1}(\psi_{MR})\, d\psi_{MR}$$

N_B - a lapátszám



Az $\underline{R}$ kb. merőleges a lapátvég-síkra!

Az átlagos és az ingadozás kérdése:
→ az átlagos erők mozgatják a helikoptert;
→ az ekörüli periodikus erő-rész pedig ráz.

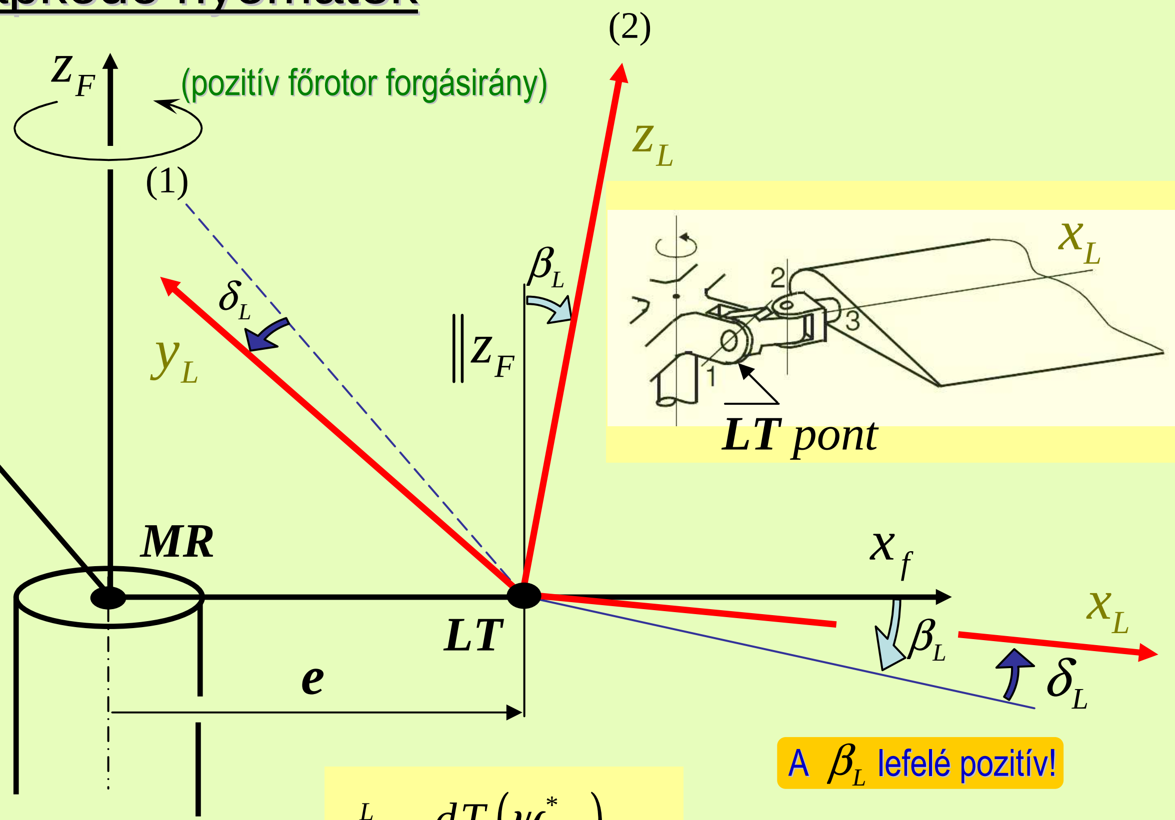
A légerőkből származó, csapkodó nyomaték

Definíció: $\underline{M} = \underline{r} \times \underline{F}$

$$\underline{r}^L = \begin{bmatrix} x_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad d\underline{R}^L = \begin{bmatrix} 0 \\ -dQ \\ dT \end{bmatrix}$$

$$d\underline{M}_{AE}^L = \underline{r}^L \times d\underline{R}^L$$

$$d\underline{M}_{AE}^L = \begin{bmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ x_L & 0 & 0 \\ 0 & -dQ & dT \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_L dT \\ -x_L dQ \end{bmatrix}$$



Legyen $\psi_{MR} := \psi_{MR}^*$ rögzített,

A csapkodás aërodinamikai nyomatéka: $\underline{M}_{AE}^L \Big|_{y_L} \left(\psi_{MR}^*\right) = -\int_0^L x_L \dfrac{dT\left(\psi_{MR}^*\right)}{dx_L} dx_L$

A matatás aërodinamikai nyomatéka: $\underline{M}_{AE}^L \Big|_{z_L} \left(\psi_{MR}^*\right) = -\int_0^L x_L \dfrac{dQ\left(\psi_{MR}^*\right)}{dx_L} dx_L$

$$dT = dL\cos\varphi - dD\sin\varphi$$

$$dQ = dL\sin\varphi + dD\cos\varphi$$

Köszönöm a figyelmet!