# FORGÓSZÁRNYAS REPÜLŐGÉPEK

08

Gausz Tamás

Budapest, 2014

# Figyelem:

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

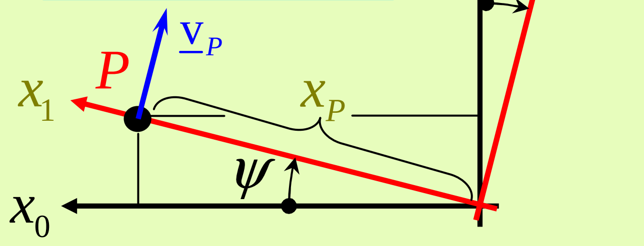
# Forgó rendszer – differenciálás az idő szerint

A differenciálás operátora: $\dfrac{d}{dt}(\;)=\dfrac{\delta}{\delta t}(\;)+\underline{\omega}\times(\;)$

*(Az operátor bevezetése!)*

$\underline{r}^1=\underline{\underline{A}}_{1,0}\,\underline{r}^0$

$\dot{\psi}\neq 0$ - azaz forog!




Tekintsük a „ $P$ ” pontot: $\underline{r}^1_P=\begin{bmatrix}x_P\\0\\0\end{bmatrix}$

(legyen - először - a „ $P$ ” az „$x_P$”-hez rögzítve.)

$$\underline{r}^0_P=\underline{\underline{A}}^T_{1,0}\,\underline{r}^1_P=\begin{bmatrix}\cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_P\\0\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_P\mathrm{c}\,\psi\\ x_P\mathrm{s}\,\psi\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}x_1\\y_1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_0\\y_0\\0\end{bmatrix}$$

A „ $P$ ” pont sebessége:

$$\underline{\mathrm{v}}^0_P=\frac{d}{dt}\underline{r}^0_P=\begin{bmatrix}-\dot{\psi}x_P\mathrm{s}\,\psi\\ \dot{\psi}x_P\mathrm{c}\,\psi\\ 0\end{bmatrix}\rightarrow\underline{\mathrm{v}}^1_P=\underline{\underline{A}}_{1,0}\,\underline{\mathrm{v}}^0_P=\begin{bmatrix}0\\ \dot{\psi}x_P\\ 0\end{bmatrix}\quad\leftrightarrow\quad\underline{\mathrm{v}}^1_P=\underline{\omega}^1\times\underline{r}^1_P=\begin{bmatrix}\underline{i} & \underline{j} & \underline{k}\\ 0 & 0 & \dot{\psi}\\ x_P & 0 & 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ \dot{\psi}x_P\\ 0\end{bmatrix}$$

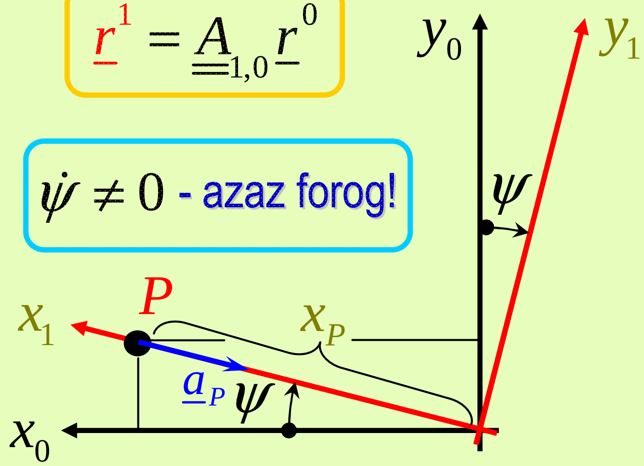
**Sebesség (azonos eredményre jutunk!)**

# Forgó rendszer – differenciálás az idő szerint

A differenciálás operátora: $\frac{d}{dt}(\ )=\frac{\delta}{\delta t}(\ )+\underline{\omega}\times(\ )$

$\underline{r}^1=\underline{\underline{A}}_{1,0}\,\underline{r}^0$

$\dot{\psi}\neq 0$ - azaz forog!




Tekintsük a „ $P$ ” pontot: $\underline{r}_P^1=\begin{bmatrix}x_P\\0\\0\end{bmatrix}$

(legyen a „ $P$ ” az „$x_P$”-hez rögzítve.)

$$\begin{bmatrix}x_1\\y_1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\psi & \sin\psi & 0\\-\sin\psi & \cos\psi & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_0\\y_0\\0\end{bmatrix}$$

A „ $P$ ” pont gyorsulása (az álló rendszerből indulva):

$$\underline{a}_P^0=\frac{d^2}{dt^2}\underline{r}_P^0=\begin{bmatrix}-\ddot{\psi}x_P\mathrm{s}\psi-\dot{\psi}^2x_P\mathrm{c}\psi\\ \ddot{\psi}x_P\mathrm{c}\psi-\dot{\psi}^2x_P\mathrm{s}\psi\\0\end{bmatrix}\Rightarrow\underline{\underline{A}}_{1,0}\,\underline{a}_P^0=\begin{bmatrix}-\dot{\psi}^2x_P\\ \ddot{\psi}x_P\\0\end{bmatrix}$$

← ez a centripetális gyorsulás;
← ez a szöggyorsulásból származó gyorsulás;

**Gyorsulás**

# Forgó rendszer – differenciálás az idő szerint

A differenciálás operátora: $\frac{d}{dt}(\ )=\frac{\delta}{\delta t}(\ )+\underline{\omega}\times(\ )$

A „*P*” pont gyorsulása
(a forgó rendszerből indulva)

$$\underline{a}_P^1=\frac{d^2}{dt^2}\underline{r}_P^1=\frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta}{\delta t}\underline{r}_P^1+\underline{\omega}^1\times\underline{r}_P^1\right)=\frac{\delta^2\underline{r}_P^1}{\delta t^2}+\frac{\delta\underline{\omega}^1}{\delta t}\times\underline{r}_P^1+2\underline{\omega}^1\times\frac{\delta\underline{r}_P^1}{\delta t}+\underline{\omega}^1\times\left(\underline{\omega}^1\times\underline{r}_P^1\right)$$

ez a viszonylagos gyorsulás;
(ebben az esetben a „*P*” pont
a piros rendszerhez képest mozoghat

ez a szöggyorsulásból származó gyorsulás;

ez a Coriolis gyorsulás;

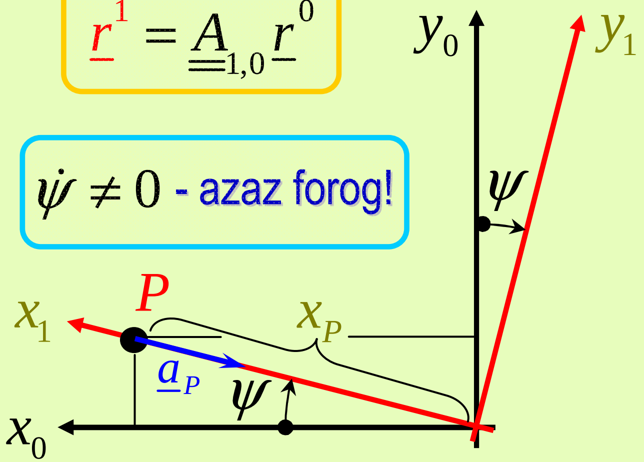
ez a centripetális gyorsulás;

Legyen egyenlőre még: $\frac{\delta^2\underline{r}_P^1}{\delta t^2}=\frac{\delta\underline{r}_P^1}{\delta t}=0$

ebben az esetben: $\underline{a}_P^1=\frac{\delta\underline{\omega}^1}{\delta t}\times\underline{r}_P^1+\underline{\omega}^1\times\left(\underline{\omega}^1\times\underline{r}_P^1\right)$

$$\underline{r}^1=\underline{\underline{A}}_{1,0}\,\underline{r}^0$$

$\dot{\psi}\neq 0$ - azaz forog!




$$\underline{a}_P^1=\begin{bmatrix}\underline{i}&\underline{j}&\underline{k}\\0&0&\ddot{\psi}\\x_P&0&0\end{bmatrix}+\underline{\omega}\times\begin{bmatrix}\underline{i}&\underline{j}&\underline{k}\\0&0&\dot{\psi}\\x_P&0&0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\\ddot{\psi}x_P\\0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\underline{i}&\underline{j}&\underline{k}\\0&0&\dot{\psi}\\0&\dot{\psi}x_P&0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\dot{\psi}^2x_P\\\ddot{\psi}x_P\\0\end{bmatrix}$$

$$\underline{a}_P^1=\begin{bmatrix}-\dot{\psi}^2x_P\\\ddot{\psi}x_P\\0\end{bmatrix}\begin{array}{l}\leftarrow \text{ez a centripetális gyorsulás;}\\\leftarrow \text{ez a szöggyorsulásból származó gyorsulás;}\\\ \end{array}$$

$$\begin{bmatrix}x_1\\y_1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\psi&\sin\psi&0\\-\sin\psi&\cos\psi&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_0\\y_0\\0\end{bmatrix}$$

**Gyorsulás (ugyanaz, mint 8-8/2-n)**

# Forgó rendszer – differenciálás az idő szerint

A perdület:

$$\underline{\pi} = \underline{\underline{\Theta}}\,\underline{\omega} = \begin{bmatrix} \theta_x & -D_{xy} & -D_{xz} \\ -D_{yx} & \theta_y & -D_{yz} \\ -D_{zx} & -D_{zy} & \theta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

A differenciálás operátora: $\dfrac{d}{dt}(\ ) = \dfrac{\delta}{\delta t}(\ ) + \underline{\omega} \times (\ )$

A tehetetlenségi nyomaték:

$$\theta_x = \int_m \left( y^2 + z^2 \right) dm$$

A deviációs nyomaték:

$$D_{xy} = \int_m x\,y\,dm$$

A perdület idő szerinti deriváltja:

$$\frac{d\underline{\pi}}{dt} = \frac{\delta \underline{\pi}}{\delta t} + \underline{\omega} \times \underline{\pi} \quad \rightarrow \quad \frac{d\underline{\pi}}{dt} = \underline{\underline{\Theta}}\,\underline{\dot{\omega}} + \underline{\omega} \times \left( \underline{\underline{\Theta}}\,\underline{\omega} \right)$$

A deviációs nyomatékokat több esetben elhanyagoljuk (pl. ha van szimmetria sík, akkor a síkra merőleges és a síkba eső tengely párra a deviációs nyomaték eleve nulla):

$$\underline{\underline{\Theta}} \cong \begin{bmatrix} \theta_x & 0 & 0 \\ 0 & \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & \theta_z \end{bmatrix} = \left\langle \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z \right\rangle$$

Megjegyzés: a tehetetlenségi tenzor mátrixa szimmetrikus → mindig van három különböző, valós sajátértéke, ehhez tartoznak a főtehetetlenségi irányok (tengelyek).

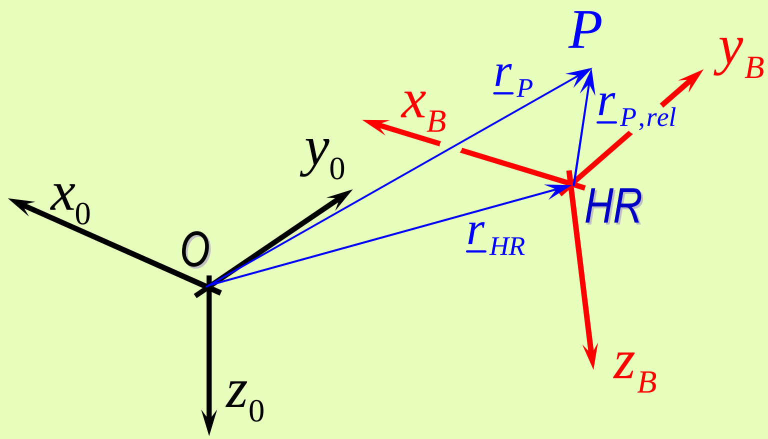
# Abszolút = szállító + relatív

$$\underline{r}_{P,absz} = \underline{r}_{HR} + \underline{r}_{P,rel}$$

$$\underline{v}_{P,absz} = \underline{v}_{HR} + \underline{v}_{P,rel}$$

$$\underline{a}_{P,absz} = \underline{a}_{HR} + \underline{a}_{P,rel}$$

$$\boxed{\underline{F} = m\underline{a}_{absz}}$$




ahol:

$$\underline{a}_{HR} = \frac{\delta^2 \underline{r}_{HR}}{\delta t^2} + \frac{\delta \underline{\omega}_B}{\delta t} \times \underline{r}_{HR} + 2\underline{\omega}_B \times \frac{\delta \underline{r}_{HR}}{\delta t} + \underline{\omega}_B \times \left(\underline{\omega}_B \times \underline{r}_{HR}\right)$$ ← ez a szállító gyorsulás;

$$\underline{a}_{P,rel} = \frac{\delta^2 \underline{r}_{P,rel}}{\delta t^2} + \frac{\delta \underline{\omega}_B}{\delta t} \times \underline{r}_{P,rel} + 2\underline{\omega}_B \times \frac{\delta \underline{r}_{P,rel}}{\delta t} + \underline{\omega}_B \times \left(\underline{\omega}_B \times \underline{r}_{P,rel}\right)$$ ← ez a relatív gyorsulás;

A merevszárnyú repülőgépeknél (például) a „*HR*” pont a repülőhöz rögzített pont lehet a repülő súlypontja, ebben az esetben, a repülőgép súlypontjának a sebességével ( $\underline{V}$ ) számolva az abszolút gyorsulás egyenlő a szállító gyorsulással:

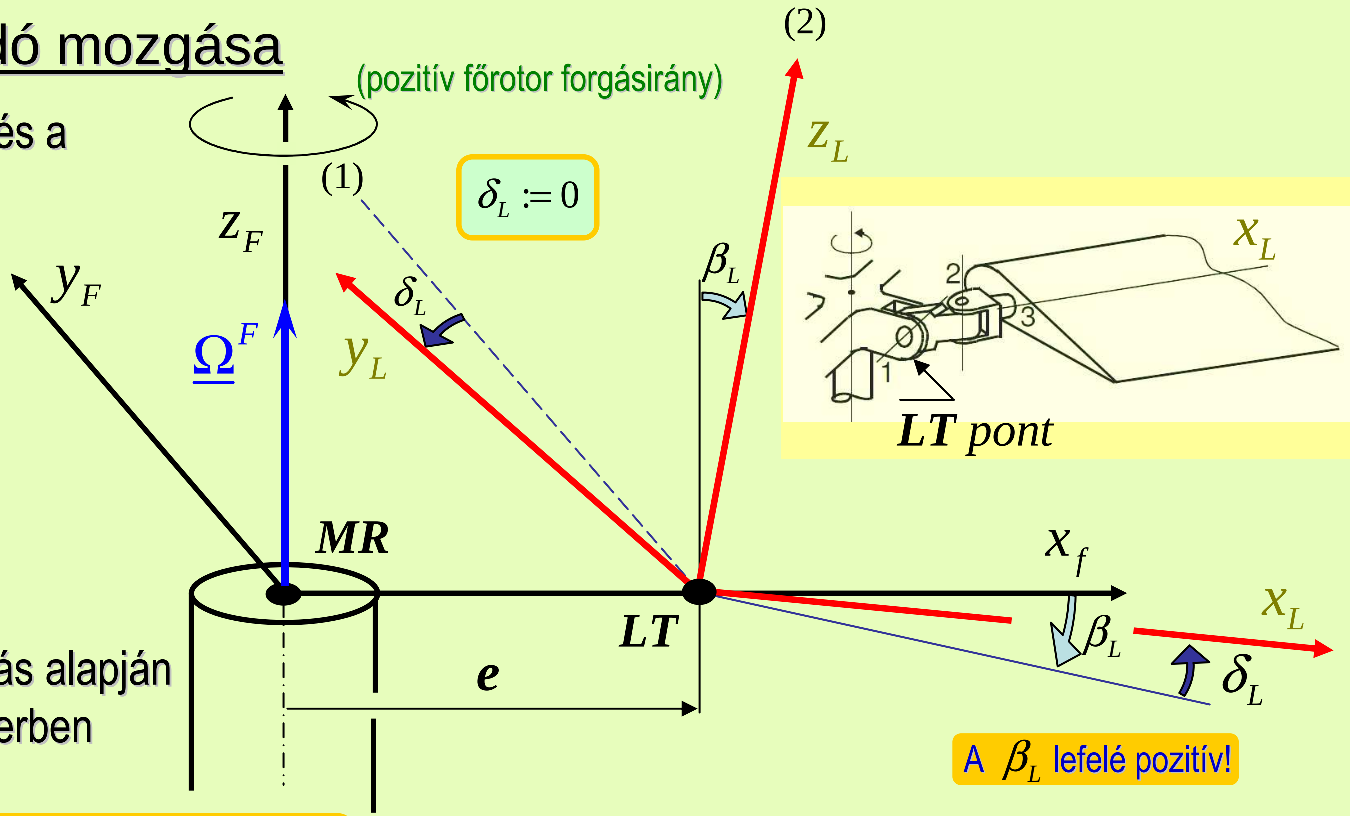
$$\underline{a}_{absz} = \underline{a}_{HR} = \underline{a}_{rg,sp} = \frac{\delta \underline{V}}{\delta t} + \underline{\omega}_{rg} \times \underline{V} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y \\ \dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z \\ \dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y \\ \dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z \\ \dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x / m \\ F_y / m \\ F_z / m \end{bmatrix}$$

# A rotorlapát csapkodó mozgása

Transzformáció a „FORGÓ" és a „LAPÁT" rendszer között:

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

$$\underline{r}^L = \underline{\underline{A}}_{L,F}\,\underline{r}^F$$




A $\beta_L$ lefelé pozitív!

A relatív perdület megmaradás alapján felírható, nem inercia rendszerben is érvényes egyenlet:

$$\boxed{\underline{\underline{\Theta}}^L \dot{\underline{\omega}}^L + \underline{\omega}^L \times \left(\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\omega}^L\right) = \underline{M}^L - \underline{r}^L_{SP} \times \left(\underline{a}^L_{LT} m_{lapát}\right)}$$

Legyen a lapát tehetetlenségi tenzorának mátrixa diagonális:

$$\underline{\underline{\Theta}}^L \cong \left\langle \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z \right\rangle$$

A lapát szögsebessége:

$$\underline{\omega}^L = \underline{\underline{A}}_{L,F} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\beta}_L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Omega s\beta_L \\ \dot{\beta}_L \\ \Omega c\beta_L \end{bmatrix}$$

és a szöggyorsulás:

$$\dot{\underline{\omega}}^L = \begin{bmatrix} -\Omega\dot{\beta}_L c\beta_L \\ \ddot{\beta}_L \\ -\Omega\dot{\beta}_L s\beta_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Omega^2\beta_L' c\beta_L \\ \Omega^2\beta_L'' \\ -\Omega^2\beta_L' s\beta_L \end{bmatrix}$$

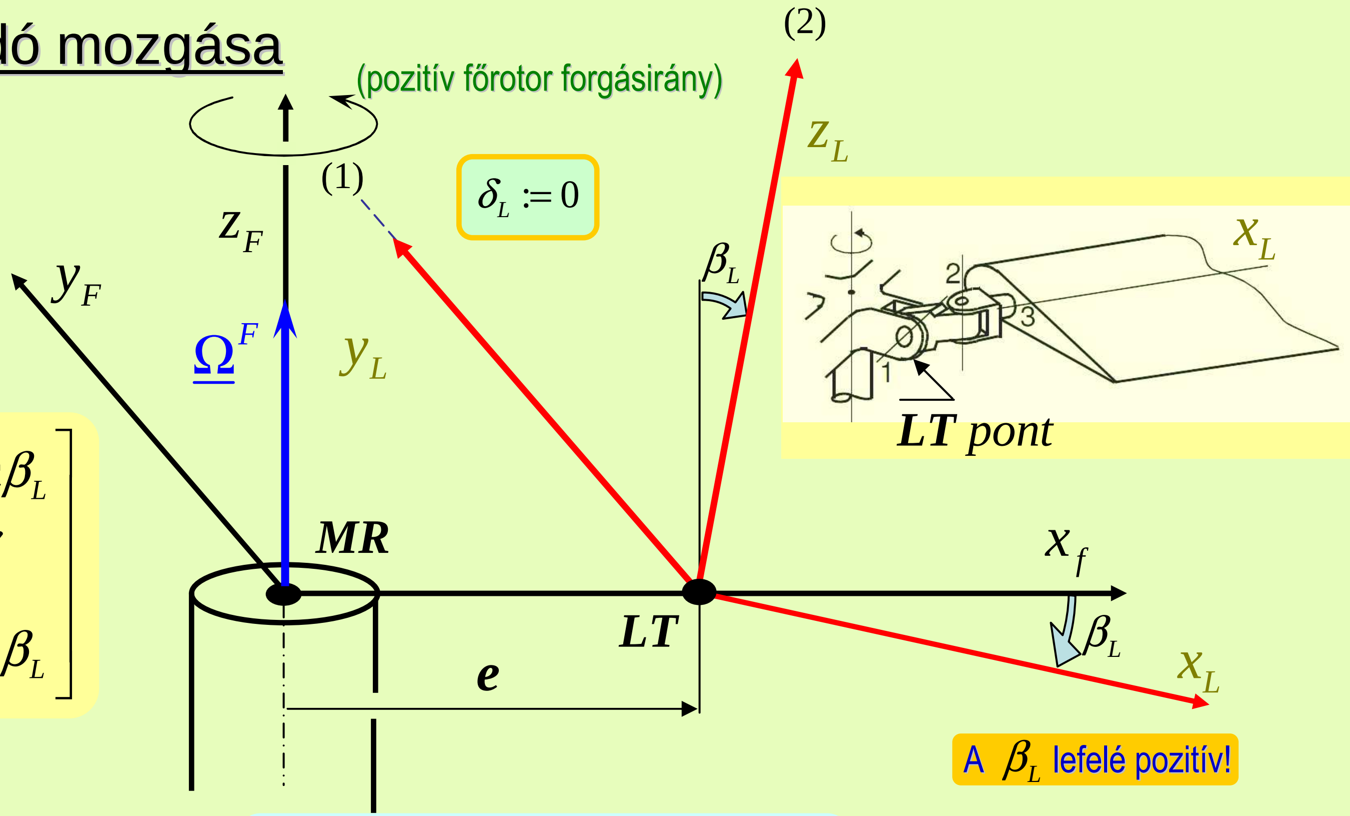
(Feltesszük, hogy: $\Omega = áll.$)

# A rotorlapát csapkodó mozgása

A szögsebesség és a szöggyorsulás:

$$\underline{\omega}^L = \Omega \begin{bmatrix} -\mathrm{s}\beta_L \\ \beta_L' \\ \mathrm{c}\beta_L \end{bmatrix}$$

$$\underline{\dot{\omega}}^L = \Omega^2 \begin{bmatrix} -\beta_L'\mathrm{c}\beta_L \\ \beta_L'' \\ -\beta_L'\mathrm{s}\beta_L \end{bmatrix}$$




A lapát súlypontja:

$$\underline{r}_{SP}^L = \begin{bmatrix} x_{SP}^L & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

és az „LT" gyorsulása:

$$\underline{a}_{LT}^F = \begin{bmatrix} -e\Omega^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \underline{a}_{LT}^L = \begin{bmatrix} -e\Omega^2\mathrm{c}\beta_L \\ 0 \\ -e\Omega^2\mathrm{s}\beta_L \end{bmatrix}$$

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

A baloldal első és második tagja:

$$\left.\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\dot{\omega}}^L\right|_{y_L} = \theta_y \Omega^2 \beta_L''$$

$$\left.\left[\underline{\omega}^L \times \left(\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\omega}^L\right)\right]\right|_{y_L} = \left(\theta_x - \theta_z\right)\left(-\Omega^2 \mathrm{c}\beta_L \mathrm{s}\beta_L\right)$$

$$\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\dot{\omega}}^L + \underline{\omega}^L \times \left(\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\omega}^L\right) = \underline{M}^L - \underline{r}_{SP}^L \times \left(\underline{a}_{LT}^L m_{lapát}\right)$$

# A rotorlapát csapkodó mozgása

$$\underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\dot{\omega}}^L + \underline{\omega}^L \times \left( \underline{\underline{\Theta}}^L \underline{\omega}^L \right) = \underline{M}^L - \underline{r}_{SP}^L \times \left( \underline{a}_{LT}^L m_{lapát} \right)$$

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

(~ a jobboldal első tagja)

A jobboldal második tagja: $-\underline{r}_{SP}^L \times \left( \underline{a}_{LT}^L m_{lapát} \right) \Big|_{y_L} = -\left[ -x_{SP} \left( -e\Omega^2 \mathrm{s}\beta_L \right) m_{lapát} \right]$

Egyszerűsítés: $\theta_x - \theta_z \approx -\theta_y$

A teljes csapkodási egyenlet: $\Omega^2 \theta_y \beta_L'' + \Omega^2 \theta_y \mathrm{c}\beta_L \mathrm{s}\beta_L = M_{AE,y}^L - x_{SP} e \Omega^2 \mathrm{s}\beta_L m_{lapát}$

Átrendezve: $\Omega^2 \theta_y \beta_L'' + \Omega^2 \theta_y \mathrm{c}\beta_L \mathrm{s}\beta_L + x_{SP} e \Omega^2 \mathrm{s}\beta_L m_{lapát} = M_{AE,y}^L$

A fizikai jelentés:

$\Omega^2 \theta_y \beta_L''$ ~ a szöggyorsulásból származó „klasszikus" tag;

$\Omega^2 \theta_y \mathrm{c}\beta_L \mathrm{s}\beta_L$ $\quad legyen\ \beta_L\ kicsi,\ akkor\ \sim \left( \Omega^2 m x_L \right) x_L \mathrm{s}\beta_L$ ~ kb. a centrifugális erő nyomatéka;

$x_{SP}^2 e \Omega^2 \mathrm{s}\beta_L m_{lapát}$ ~ kb. a centrifugális erő nyomatékának kiegészítése „e" miatt.

Az általánosan használatos alak: $\beta_L'' + \beta_L \left( 1 + \frac{x_{SP} e\, m_{lapát}}{\Omega^2 \theta_y} \right) = \frac{M_{AE,y}^L}{\Omega^2 \theta_y}$ $\quad \left( hacsak\ \beta_L\ elegendően\ kicsi! \right)$

$$\boxed{\beta_L'' + \beta_L \left( 1 + \varepsilon \right) = \frac{M_{AE,y}^L}{\Omega^2 \theta_y}, \quad ahol : \varepsilon = \frac{x_{SP} e\, m_{lapát}}{\Omega^2 \theta_y}}$$

Egyszerű közelítés: $\varepsilon \cong \frac{3e}{2(1-e)}$ (sok esetben: $e \cong 0.04$ akkor: $\varepsilon \cong 0.06$ )

(Rezonancia probléma: a csapkodó mozgás körfrekvenciája a forgás szögsebességével egyenlő és az aerodinamikai nyomaték is hasonló körfrekvenciával változik!)

# Az impulzus és lapelem elmélet összekapcsolása

Lapelem elmélet:

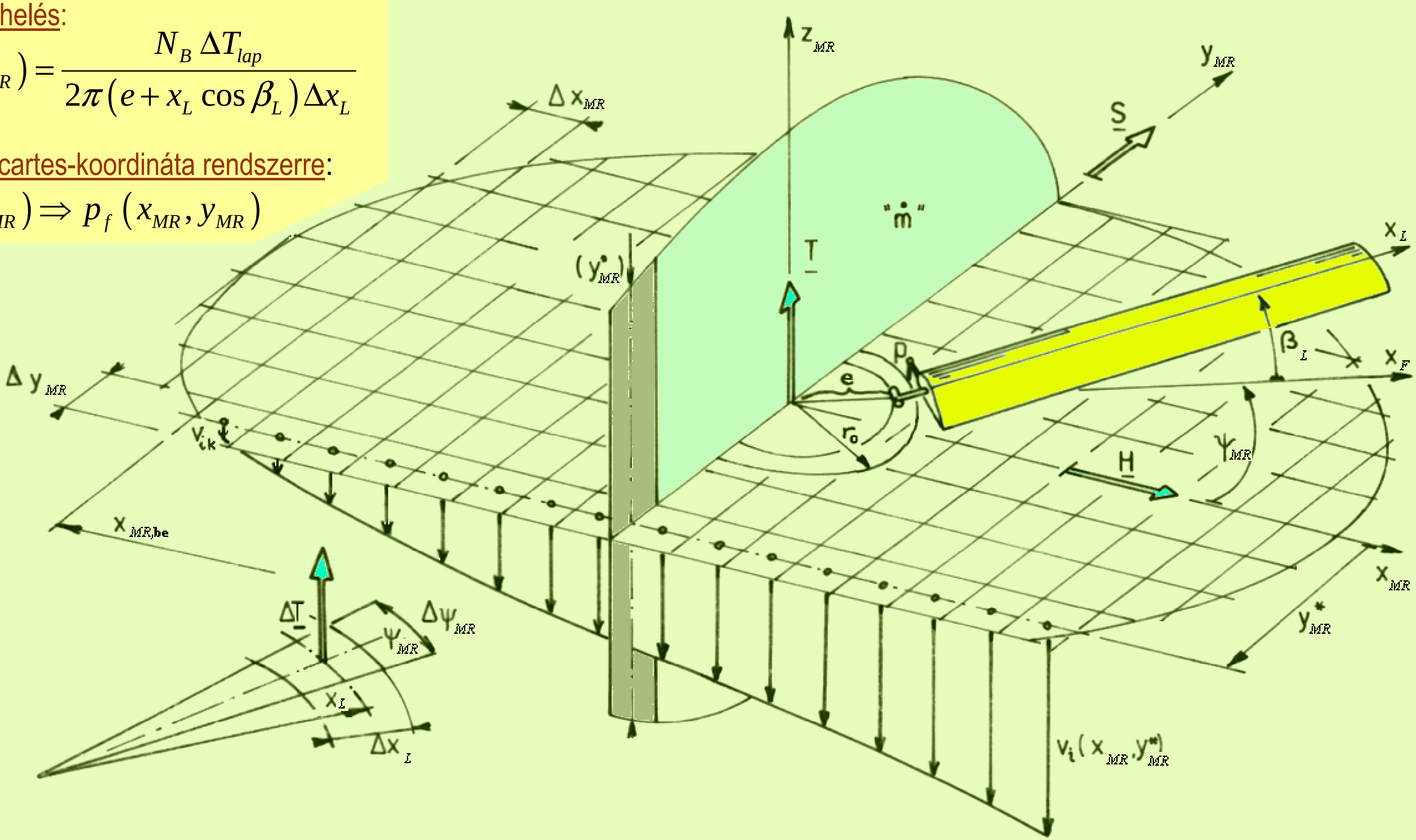
$$\Delta T_{lap}\left(x_L,\psi_{MR}\right)\cong\frac{\rho}{2}W^2\left(c_L\cos\varphi-c_D\sin\varphi\right)h\,\Delta x_L$$

A felületi terhelés:

$$p_f\left(x_L,\psi_{MR}\right)=\frac{N_B\,\Delta T_{lap}}{2\pi\left(e+x_L\cos\beta_L\right)\Delta x_L}$$

Áttérés Descartes-koordináta rendszerre:

$$p_f\left(x_L,\psi_{MR}\right)\Rightarrow p_f\left(x_{MR},y_{MR}\right)$$



# Az impulzus és lapelem elmélet összekapcsolása

A tömegáram:

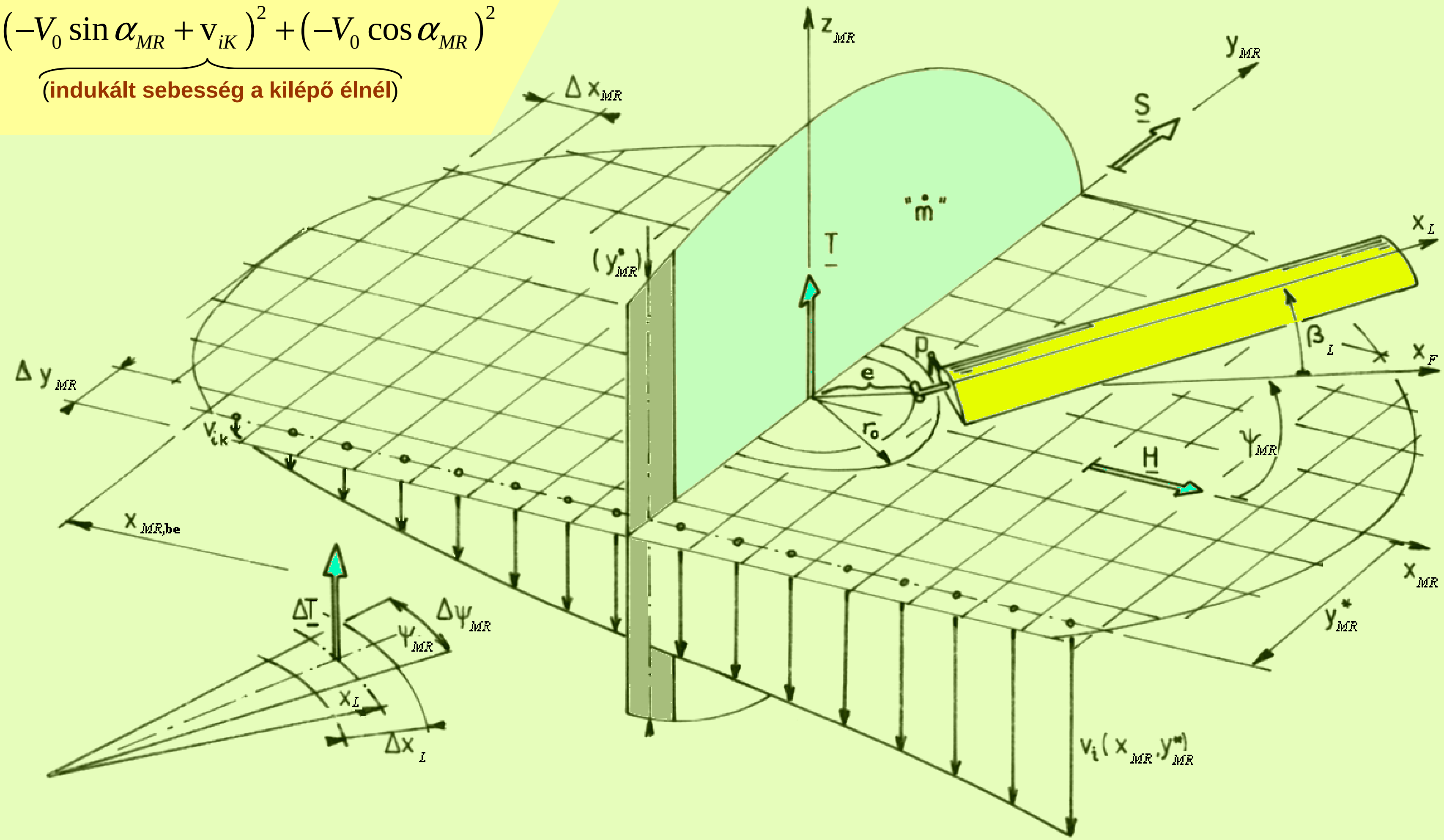
$$\Delta\dot{m}_{SZELET}\left(y^*_{MR},\Delta y_{MR}\right)=\rho V_R\,\Delta y_{MR}\,2\cdot z^*_{MR}\left(y^*_{MR}\right)$$

ahol:

$$V_R^2\left(y_r^*\right)=\left(-V_0\sin\alpha_{MR}+\underbrace{v_{iK}}_{\text{(indukált sebesség a kilépő élnél)}}\right)^2+\left(-V_0\cos\alpha_{MR}\right)^2$$

Az impulzus tétel:

$$\Delta T_{IMP}\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)=\Delta\dot{m}_{SZELET}\left(y^*_{MR},\Delta y_{MR}\right)\cdot 2\Delta v_i\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)$$





# Az impulzus és lapelem elmélet összekapcsolása

Lapelem elmélet:

$$\Delta T_{lap}\left(x_L,\psi_{MR}\right)\cong\frac{\rho}{2}W^2\left(c_L\cos\varphi-c_D\sin\varphi\right)h\,\Delta x_L$$

A felületi terhelés (megoszló terhelés):

$$p_f\left(x_L,\psi_{MR}\right)=\frac{N_B\,\Delta T_{lap}}{2\pi\left(e+x_L\cos\beta_L\right)\Delta x_L}$$

Áttérés Descartes-koordináta rendszerre:

$$p_f\left(x_L,\psi_{MR}\right)\Rightarrow p_f\left(x_{MR},y_{MR}\right)$$

A tömegáram:

$$\Delta\dot{m}_{SZELET}\left(y^*_{MR},\Delta y_{MR}\right)=\rho V_R\,\Delta y_{MR}\,2\cdot z^*_{MR}\left(y^*_{MR}\right)$$

ahol:

$$V_R^2\left(y^*_{MR}\right)=\underbrace{\left(-V_0\sin\alpha_{MR}+\mathrm{v}_{iK}\right)^2}_{\text{(indukált sebesség a kilépő élnél)}}+\left(-V_0\cos\alpha_{MR}\right)^2$$

Az impulzus tétel:

$$\Delta T_{IMP}\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)=\Delta\dot{m}_{SZELET}\left(y^*_{MR},\Delta y_{MR}\right)\cdot 2\Delta\mathrm{v}_i\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)$$

A megoszló terhelés az impulzus tétel oldaláról:

$$p_f\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)=\Delta T_{IMP}\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)\Big/\Delta\xi_{MR}\,\Delta y_{MR}$$

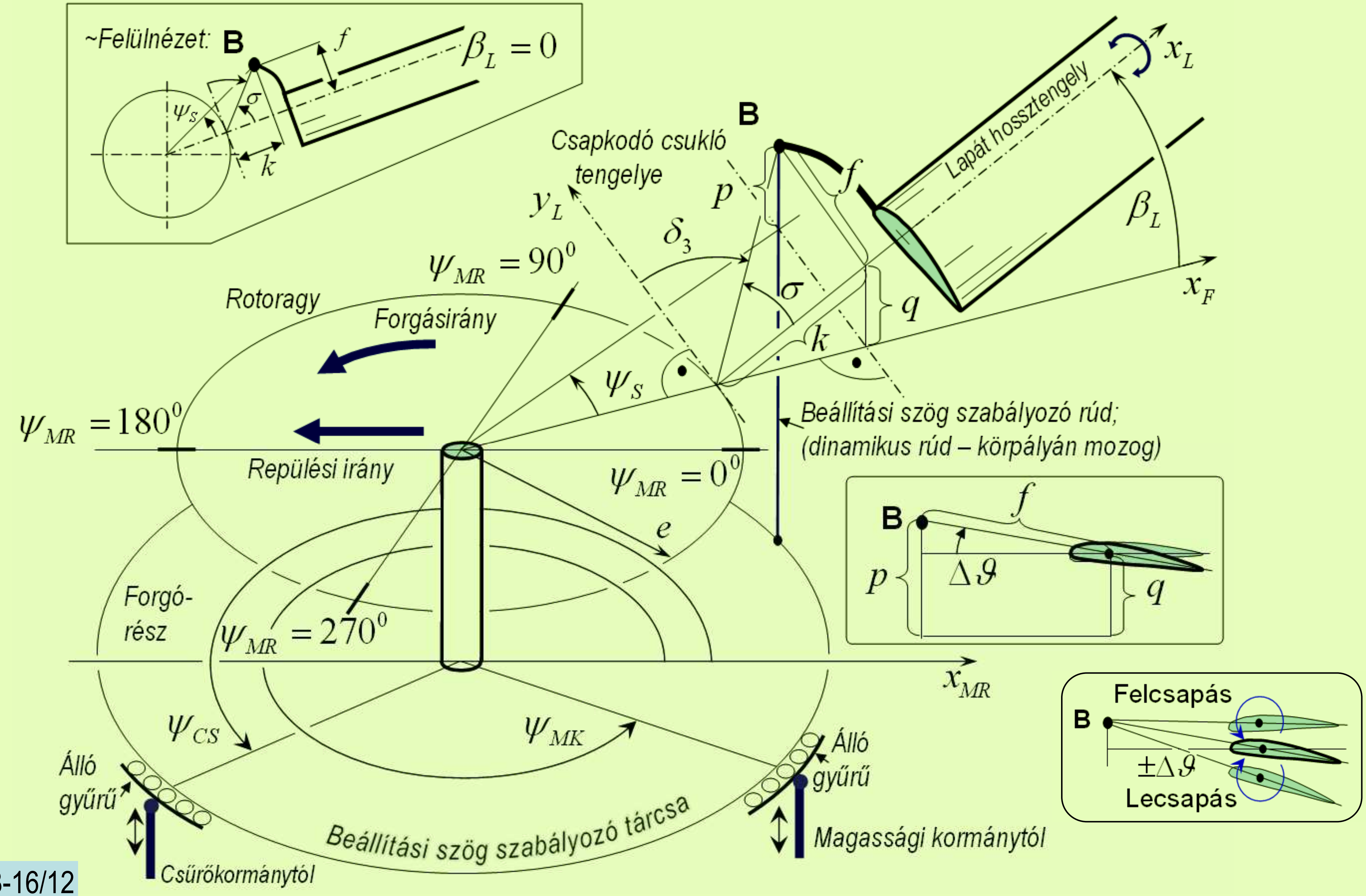
A kapcsolati egyenlet:

$$p_f\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)\Delta\xi_{MR}\,\Delta y_{MR}=\rho V_R\,\Delta y_{MR}\,2\cdot z^*_{MR}\left(y^*_{MR}\right)\cdot 2\,\Delta\mathrm{v}_i\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)$$

Az indukált sebesség eloszlás:

$$\Delta\mathrm{v}_i\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)=\frac{p_f\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)\Delta y_{MR}}{4\rho V_R\,\Delta y_{MR}\,z^*_{MR}\left(y^*_{MR}\right)}\Delta\xi_{MR}\quad\Rightarrow\quad\mathrm{v}_i\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)=\int_{x_B}^{\xi_T}\frac{p_f\left(\xi_{MR},y^*_{MR}\right)}{4\rho V_R\,z^*_{MR}\left(y^*_{MR}\right)}d\xi_{MR}$$

# A rotorlapátok kormányzása

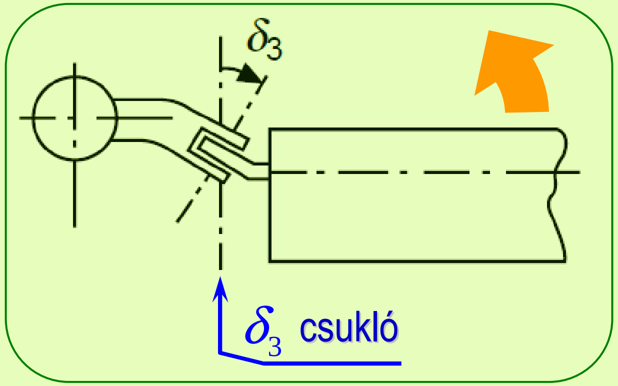


# A rotorlapátok kormányzása

A pilóta beavatkozását leíró függvény:

$$p(\psi_{MR}) = p_0 + p_1 \frac{1+\cos(\psi_{MR}-\psi_{MK}+\psi_S)}{2} + p_2 \frac{1+\cos(\psi_{MR}-\psi_{CS}+\psi_S)}{2}$$

Kollektív kormány — Magassági kormány — Csűrőkormány




A laptok beállítási szögének változása:

$$\vartheta(\psi_{MR}, r) \cong \vartheta_0(r) + \frac{p-q}{f}$$

$$\vartheta(\psi_{MR}, r) = \vartheta_0(r) + \frac{p}{f} + \frac{k}{f}\beta_L$$

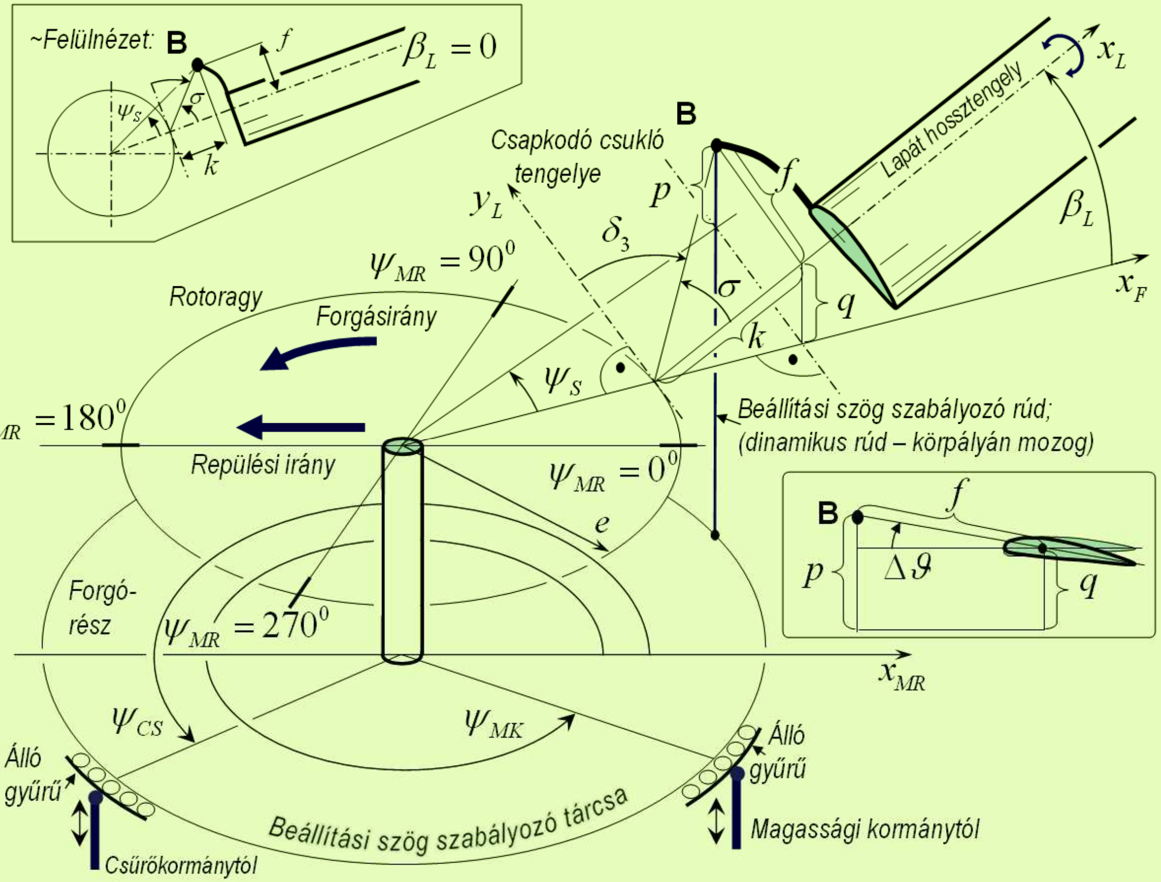
$$(mert\ q \cong -k\beta_L)$$

A laptok beállítási szögének változása:

$$\vartheta(\psi_{MR}, r) = \vartheta_0(r) + \frac{p}{f} + \mathrm{ctg}(\sigma)\beta_L$$

$$\frac{k}{f} = ctg(\sigma)$$

Alap-elcsavarás — Kormányzás — Csapkodás csillapítás




Numerikus szimuláció bemutatása....

# A rotorlapátok kormányzása – bemutató példa

$$p(\psi_{MR}) = p_0 + p_1 \frac{1+\cos(\psi_{MR} - \psi_{MK} + \psi_S)}{2} + p_2 \frac{1+\cos(\psi_{MR} - \psi_{CS} + \psi_S)}{2}$$

Bemutató példa:

$\psi_{MK} = 6\ rad \cong 343.8^0$

$\psi_{CS} = 3.2\ rad \cong 183.4^0$

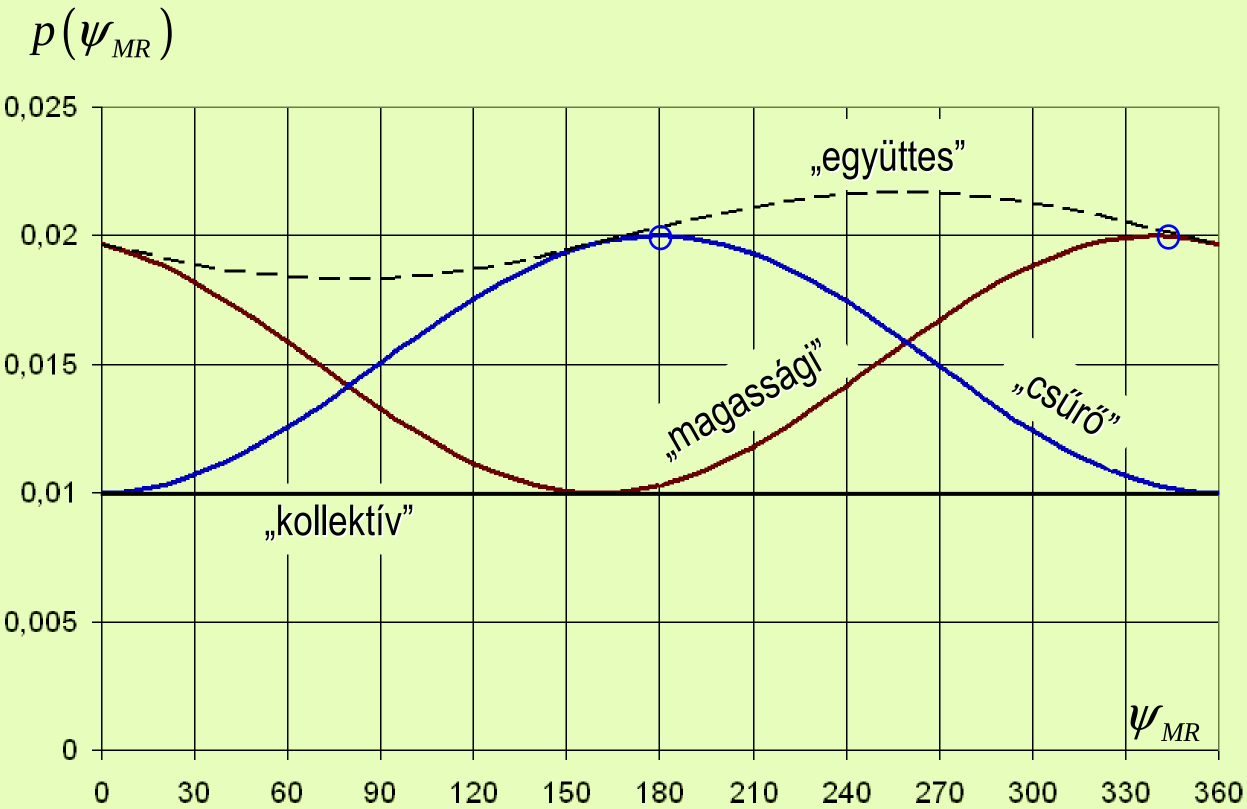
$\psi_S = 0.07\ rad \cong 4^0$

A kormány-kitérítések:

$p_0 := 0.01[m]$ (kollektív)

$p_1 := 0.01[m]$ (magassági)

$p_2 := 0.01[m]$ (csűrő)

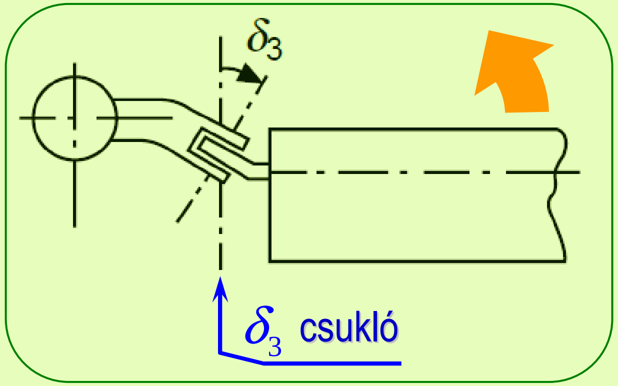


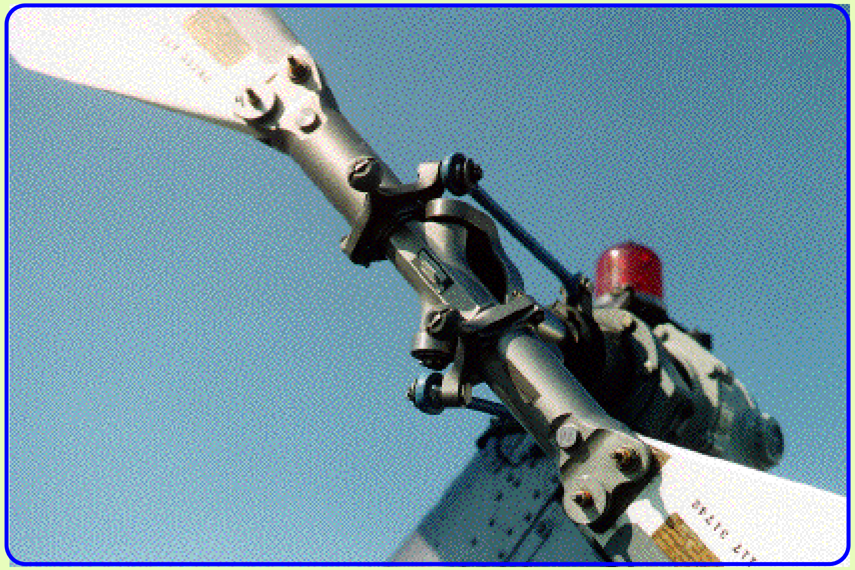
# A farokrotor (a „delta-3” csukló)

A farokrotoron csak kollektív beállítási szög szabályozás van – ezt működteti a pilóta a pedálokkal.

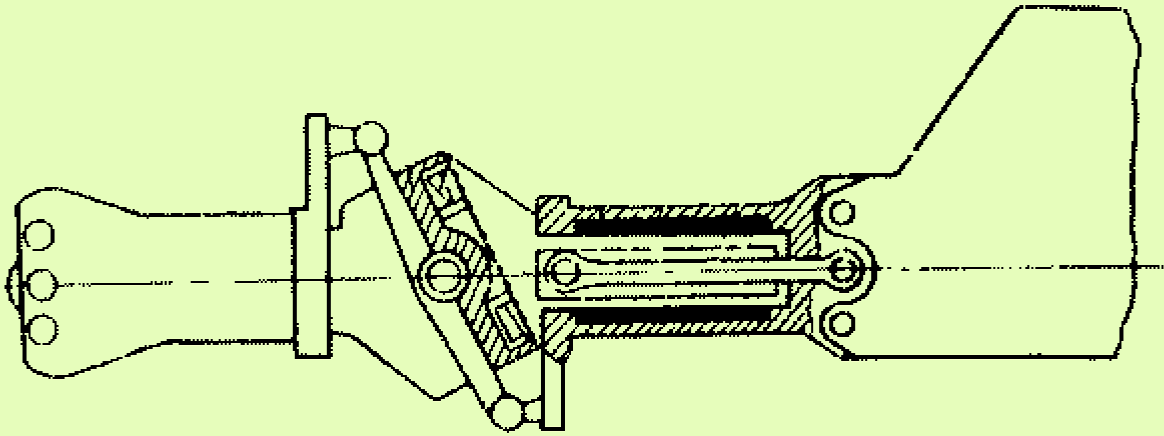
Jól látható, hogy a farokrotor lapátjai egy, „delta-3” csukló körül billennek.

Látható, hogy a beállítási szög szabályozó rudak csatlakozási pontjai éppen a „delta-3” csukló tengelyén helyezkednek el.



Kétlapátos farokrotor



Farokrotor szerkezeti vázlata

# Numerikus szimuláció

**Aërodinamikai blokk:**
- impulzus elmélet;
- lapelem elmélet;

← csapkodás jellemzői

indukált sebesség
csapkodási nyomaték →

**Dinamikai blokk:**
- csapkodó mozgás;
- a teljes rotorra ható erők;
- a forgatáshoz szükséges teljesítmény;

**HELIKOPTER ROTOR AERODINAMIKAI-DINAMIKAI SZÁMÍ...**

Adatok bevitele és továbblépés a számításokhoz | Kilépés

F I G Y E L E M !
Konkrét számoláskor először az adatbeadást kell elvégezni csak ezután szabad a számolásra tovább lépni enélkül a program a változókat nem olvassa be vagyis nulla értékekkel próbál számolni.

**HELIKOPTER ROTOR SZÁMITO PROGRAM - SZAMITÁSI EREDMÉNYEK**

Eredmények mentése fájlba vagy nyomtatása

Az ablakban a választott helikopter egy repülési állapotának adatai jelennek meg.

| A számítás eredménye: | Számértékek: | Megjegyzések: |
|---|---|---|
| A helikopter repüléséhez szükséges 'T' erő - ' Terp [N] ' | 12238.0 | A helikopter repüléséhez szükséges erő, ez külső adat -- ezzel kell egyenlő legyen az impulzus tétel és a lapelem elmélet szerint számított erő, illetve ez utóbbi két erőnek közelítőleg egymással is egyenlőnek kell lennie. |
| A 'T' erő az impulzus tétel alapján - ' Teri [N] ' | 10909.6 | |
| A 'T' erő a lapelem elmélet alapján - ' Tero [N] ' | 10857.1 | |
| A repüléshez szükséges 'H' erő - ' Hkell [N] ' | 120.00 | A helikopter repüléséhez szükséges 'vízszintes' erő, ez külső adat, ezzel közelítőleg egyenlő kell legyen a programból számítással kapott 'H' vízszintes erő. |
| A rotoron keletkező 'H' erő - ' Hori [N] ' | 141.83 | |
| Bal orsózó nyomaték - ' Orbal [Nm] ' | -10763.60 | A helikopter repüléséhez szükséges, hogy a rotor jobb és bal oldalán keletkező orsozó nyomatékok egyensúlyban legyenek vagyis az előjeles összegük közel nulla legyen! |
| Jobb orsózó nyomaték - ' Orjobb [Nm] ' | 9528.29 | |
| A repüléshez szükséges teljesítmény - ' Pkell [kW] ' | 157.09 | |

Az alábbiakban a kormányzási jellemzők bevitelére nyílik lehetőség

| | | |
|---|---|---|
| A kollektív kormány helyzete - ' p-null [m] ' | 0.00120 | A kolektív kormánnyal (p-null) a rotoron keletkező 'T' erőket, változtathatjuk, a 'vízszintes erő - H' változtatására a magassági kormány (p-egy) szolgál. A kormányzást meghatározó paraméterek óvatosan állítandók, adott esetben miliméteres elmozdulás is elegendő lehet a kívánt egyensúlyi helyzet eléréséhez. |
| A magassági kormány helyzete - ' p-egy [m] ' | 0.00800 | |
| A csűrő kormány helyzete - ' p-kettő [m] ' | 0.00000 | |


A megtett fordulatok száma: 1

Továbbszámolás - következő rotor fordulat | A számolásnak VÉGE!!

# Köszönöm a figyelmet!