

Belebegési derivatívumok meghatározása szélcsatorna kísérlettel

Hunyadi Mátyás
tanársegéd

Témavezető:
Dr. Hegedűs István
egyetemi tanár

2009.05.05.

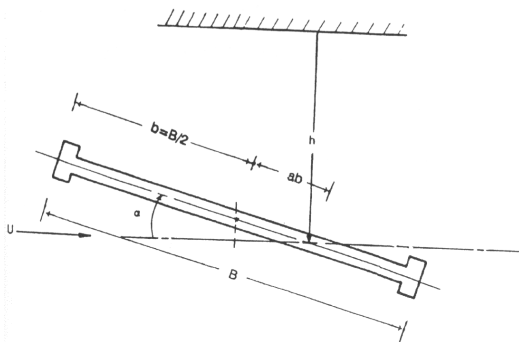
Célkitűzés

- Mérés bemutatása
- Következtetések analizálása
- Új mérés konfiguráció megtervezése

Szélhatások

- Kvázi-statikusan állapot
→ erőtenyező
- Dinamikus vizsgálata
→ átviteli függvény
- aeroelasztikus hatások
(öngerjesztett erők)
→ derivatívumok

A belebegés, flutter



Jelenség közelítése:

- Egy keresztmetszet
- Merev keresztmetszet
- Két szabadságfok
 - h : függőleges mozgás
 - α : csavarási elfordulás

$$m\ddot{h} + c_h\dot{h} + k_h h = L_h$$

$$S\ddot{\alpha} + c_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M_\alpha$$

L_h : függőleges aeroelasztikus erő

M_α : csavarási aeroelasztikus nyomaték

Instabilitás bekövetkeztekor:

- ω_{crit} mozgásfrekvencia $h = h_0 e^{i\omega_{crit}t}$

$$\alpha = \alpha_0 e^{i\omega_{crit}t}$$

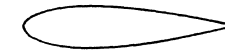
- U_{crit} kritikus szélesebség

Aeroelasztikus erők

Theodorsen: linearitás, additivitás, vékony sík lemezre

Scanlan: alkalmazható egyéb geometriára is

H_1^*, \dots, A_1^* : aeroelasztikus derivatívumok szélcsatorna vizsgálattal
(Scanlan derivatívumok)



Egyszerűsítés: $h = h_0 e^{i\omega t}$
 $\alpha = \alpha_0 e^{i\omega t}$

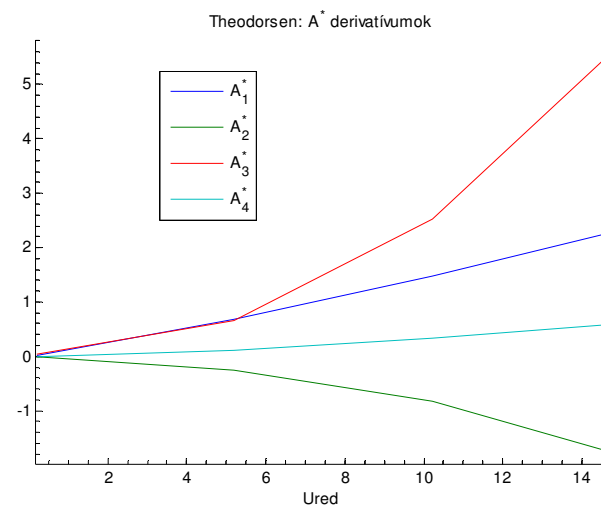
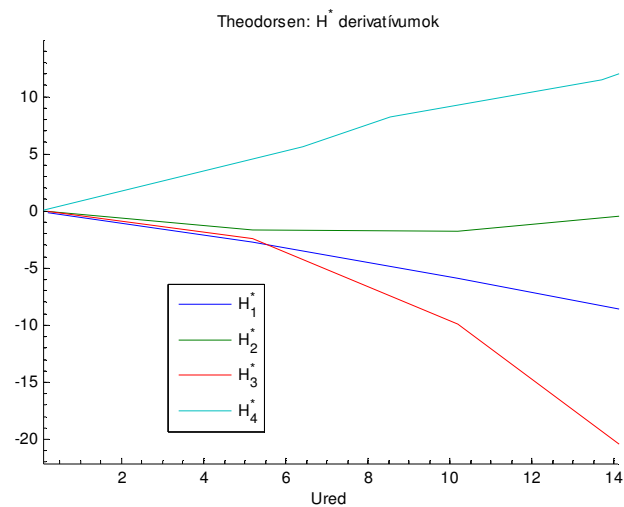
$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left(KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right)$$

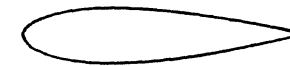
aerodinamikus
csillapítás

aerodinamikus
merevség

Scanlan derivatívumok, Theodorsen megoldása

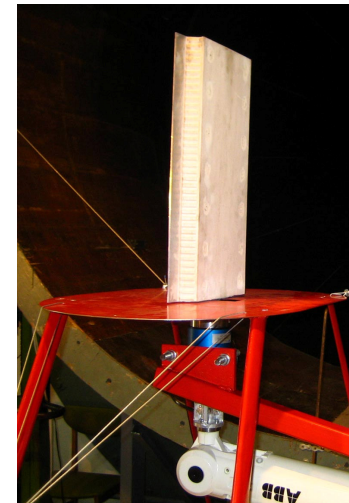
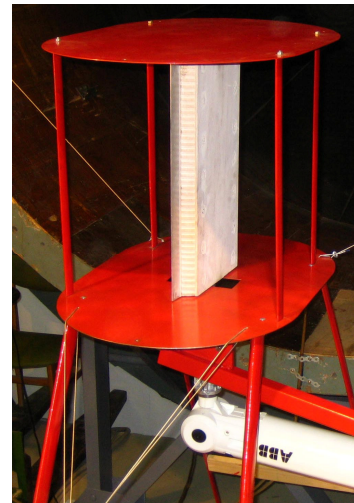
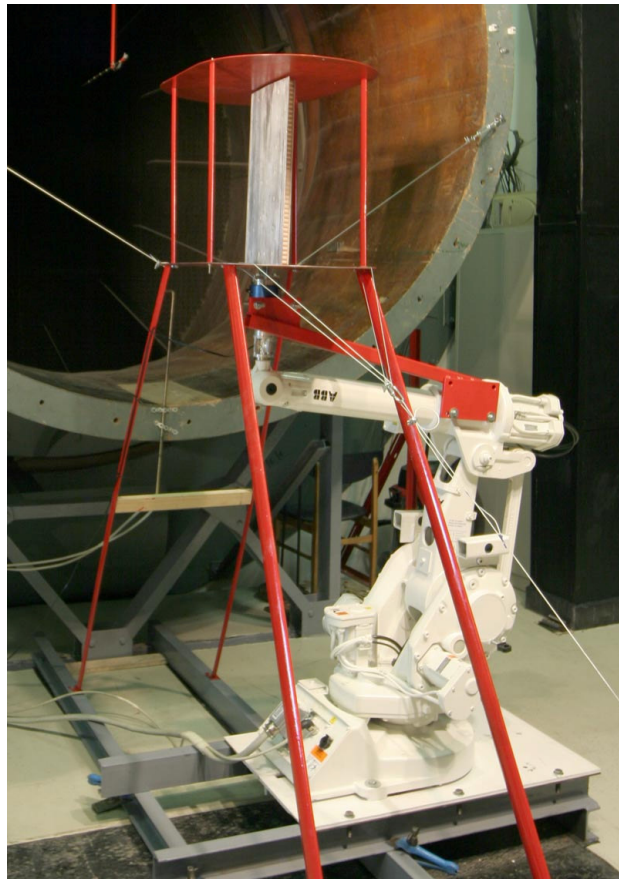


Theodorsen: elméleti megoldás vékony,
sima lemezre



Más esetben: szélcsatorna vizsgálat

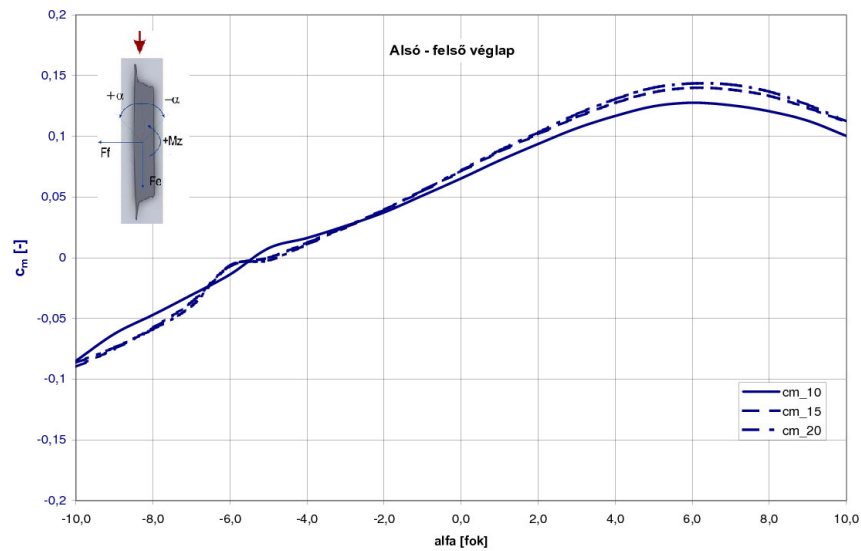
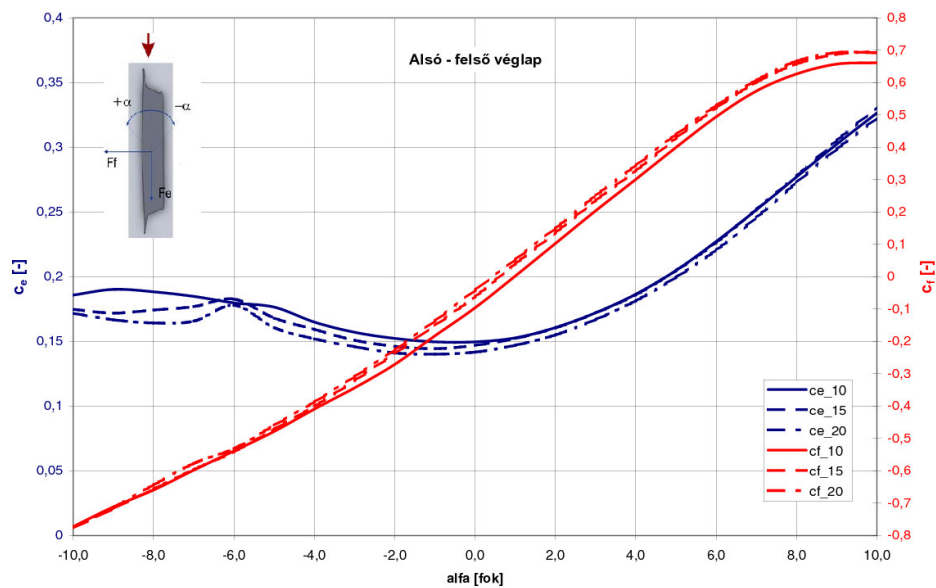
Szélcsatorna vizsgálat



- 1:100 lépték
- Erőltetett 2 szf-ú mozgás
- Végtelen és félvégtelen kialakítás (közbenső km, konzolvég)
- -6° , 0° , $+6^\circ$ megfújás
- Közel lamináris áramlás ($T_u \leq 0,5\%$)
- Tehetetlenségi erők – szélerők szétválasztása



Erőtenyező



Derivatívumok mérése

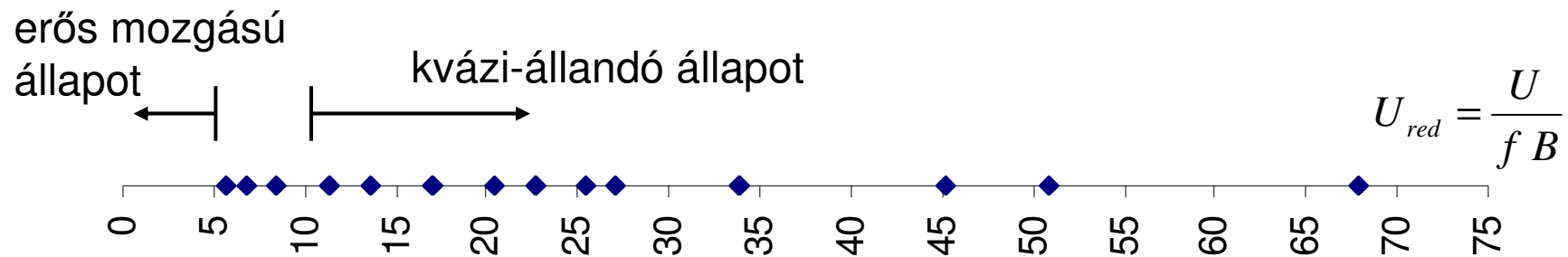
- erőltetett mozgás, 2 szf szerint szétválasztva
- erőmérők, nyomatékmérők
- mozgásmérők
- mintavételezés 100 Hz

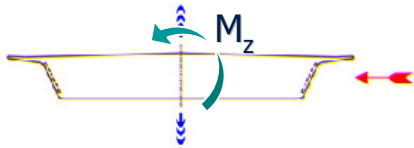
$$h = h_0 e^{i\alpha}$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{i\omega t}$$

Szélcsatorna vizsgálat

- oszcilláló mozgás frekvenciája
 - $f = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$ Hz
- szélesség
 - $U = 5; 10; 15; 20$ m/s
- modell alaprajzi szélessége: $B = 295$ mm (1:100 modell)





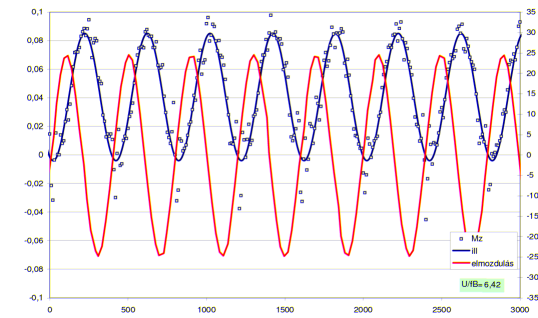
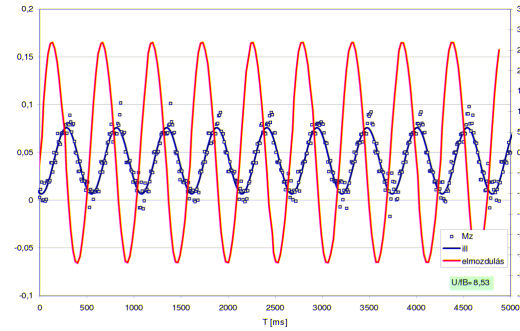
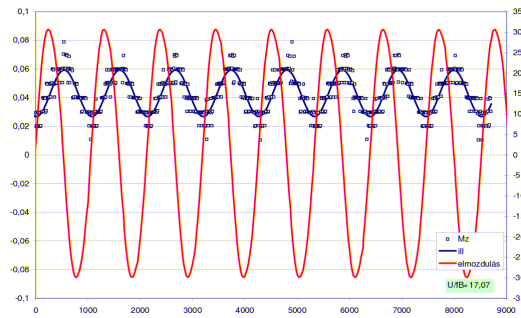
$\alpha=0$

$f=1$ Hz

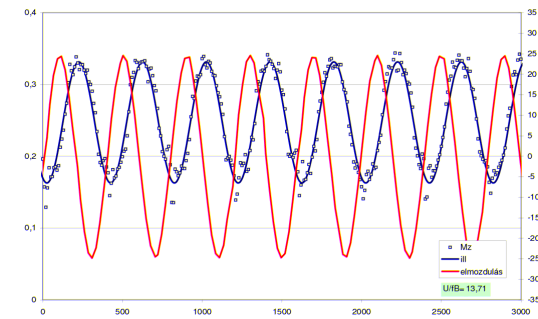
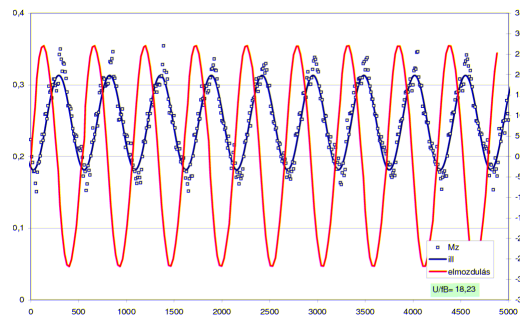
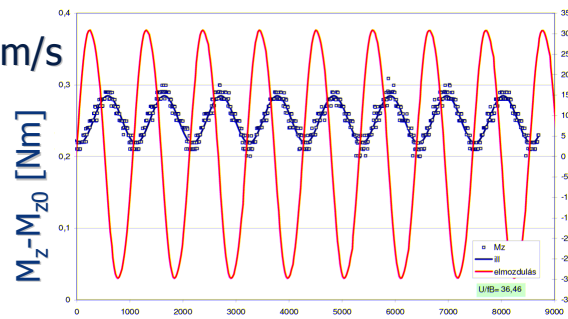
$f=2,0$ Hz

$f=2,5$ Hz

$U=5$ m/s

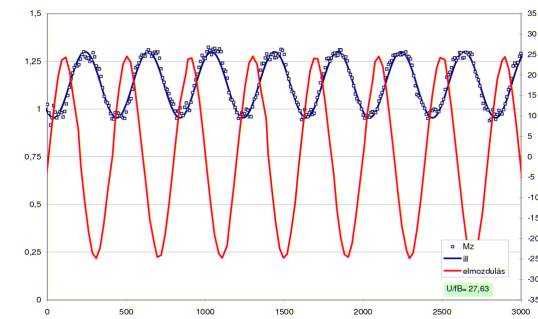
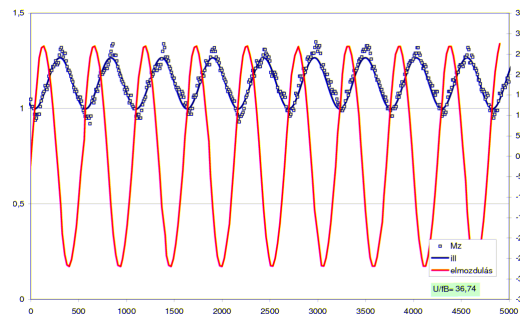
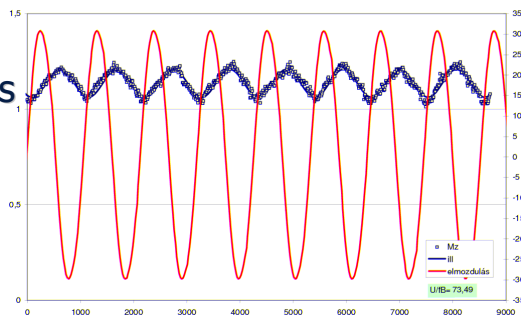


$U=10$ m/s



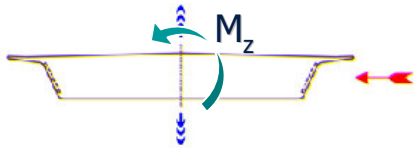
elmozdulás [mm]

$U=20$ m/s



t [ms]

t [ms]

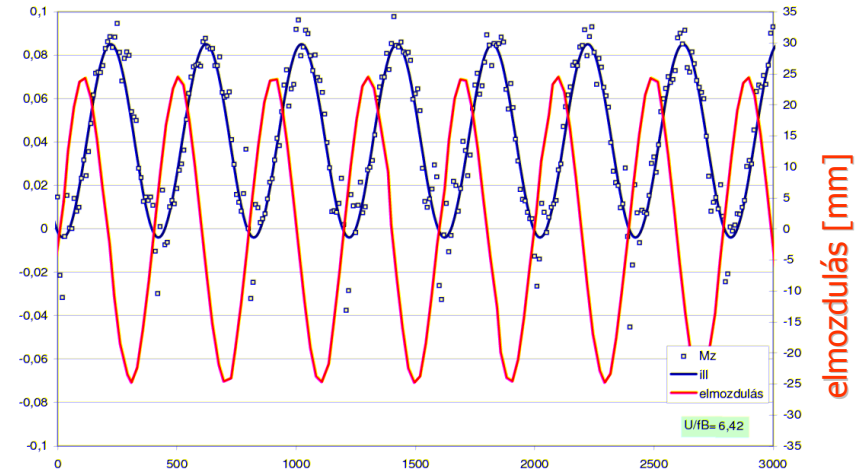
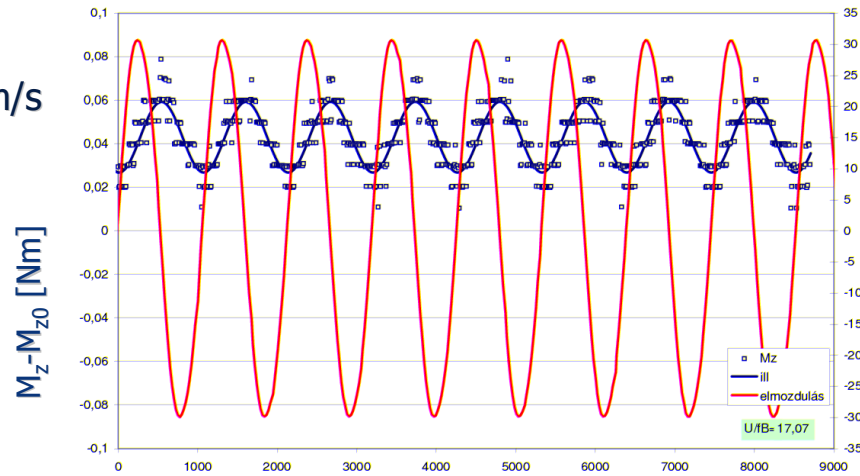


$$\alpha = 0$$

$f = 1 \text{ Hz}$

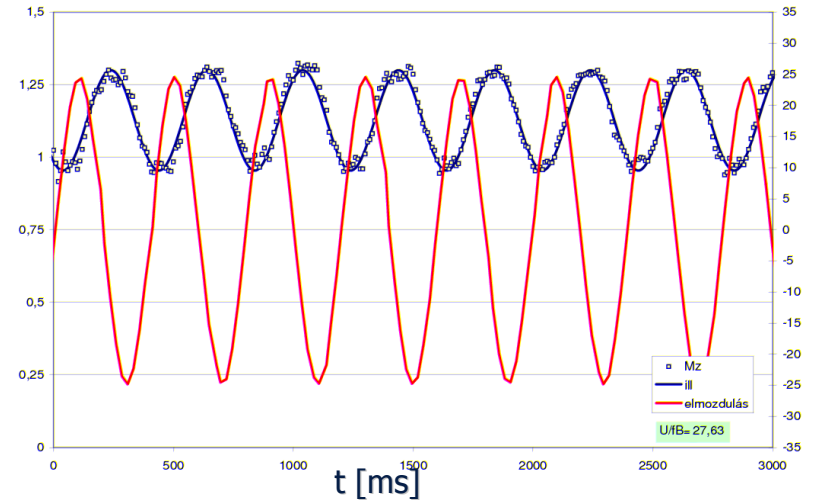
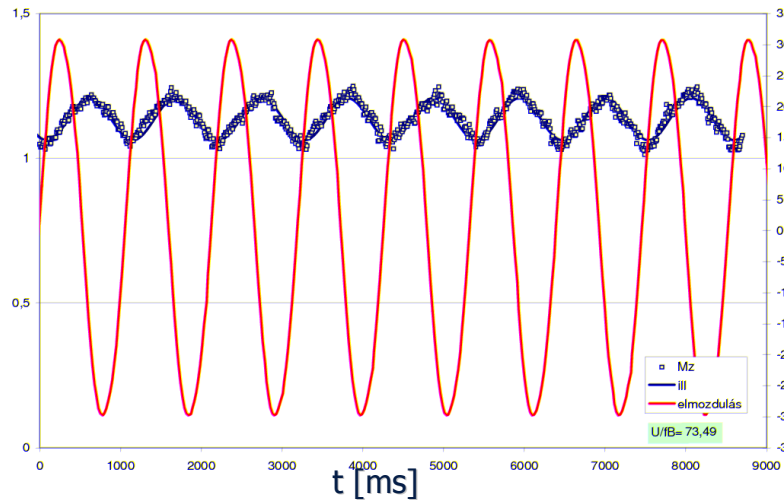
$f = 2,5 \text{ Hz}$

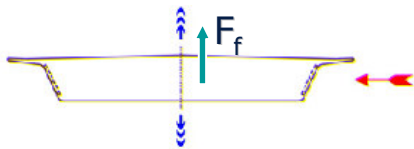
$U = 5 \text{ m/s}$



elmozdulás [mm]

$U = 20 \text{ m/s}$



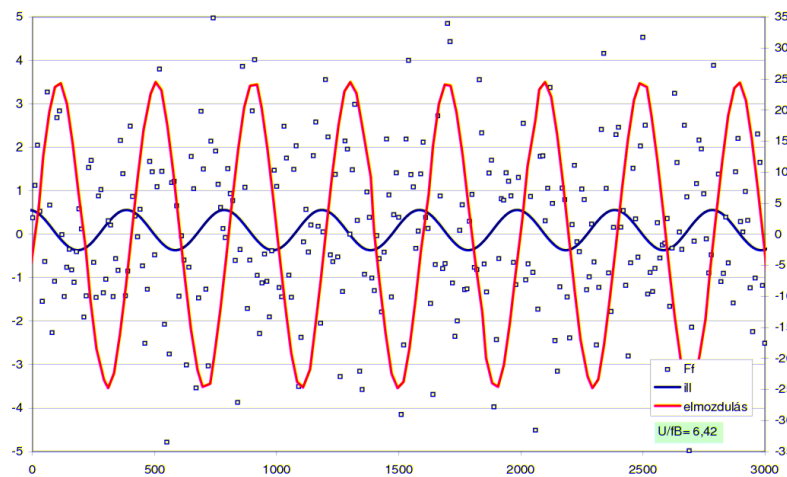
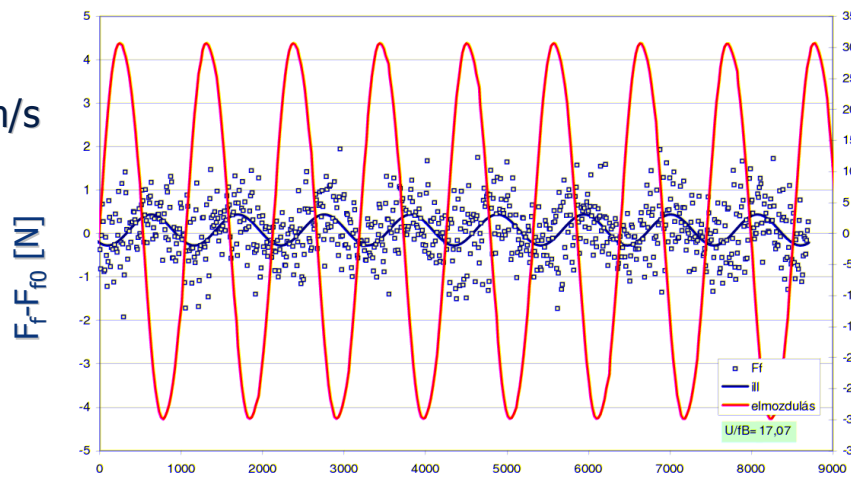


$$\alpha = 0$$

$f = 1 \text{ Hz}$

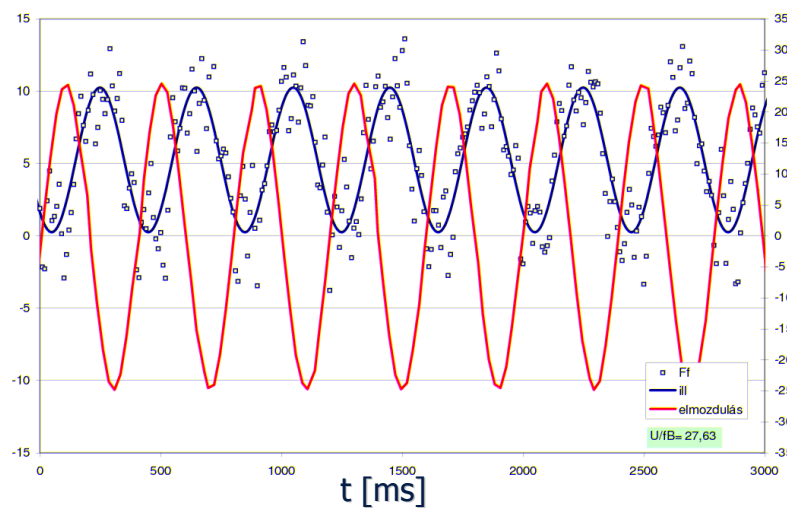
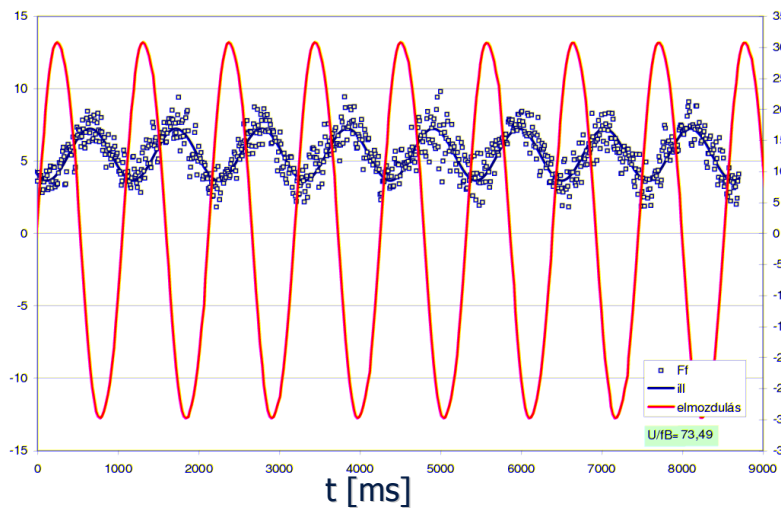
$f = 2,5 \text{ Hz}$

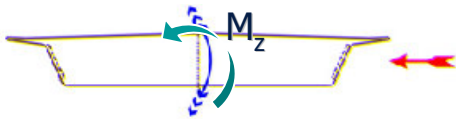
$U = 5 \text{ m/s}$



elmozdulás [mm]

$U = 20 \text{ m/s}$



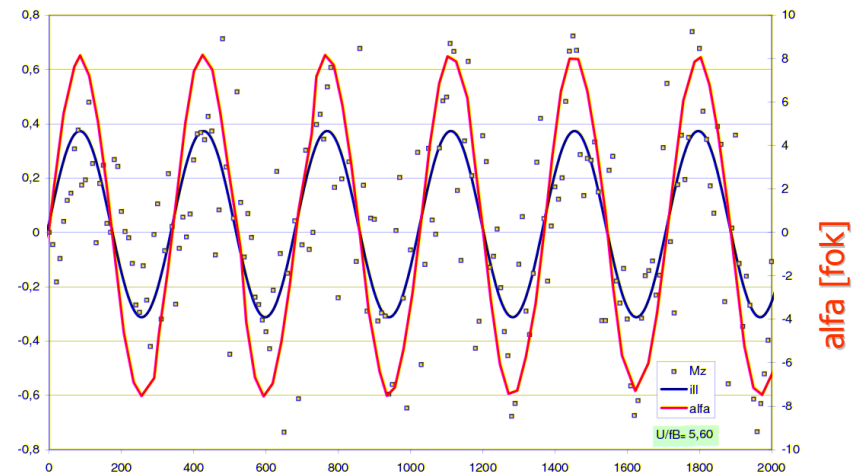
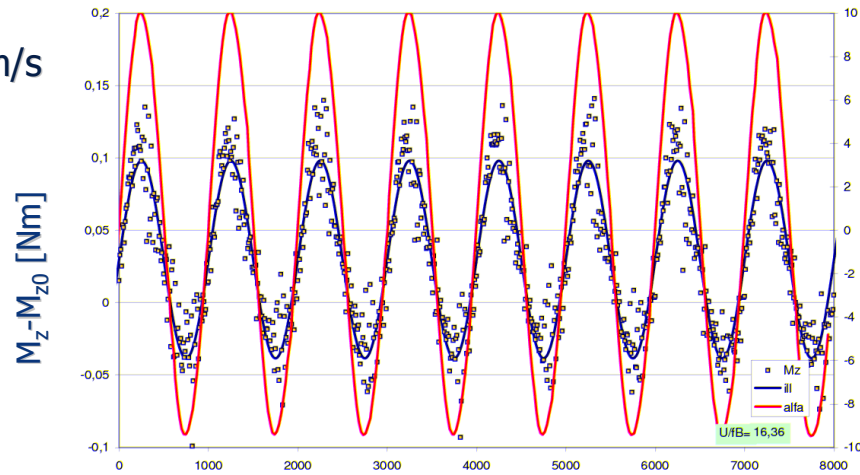


$\alpha=0$

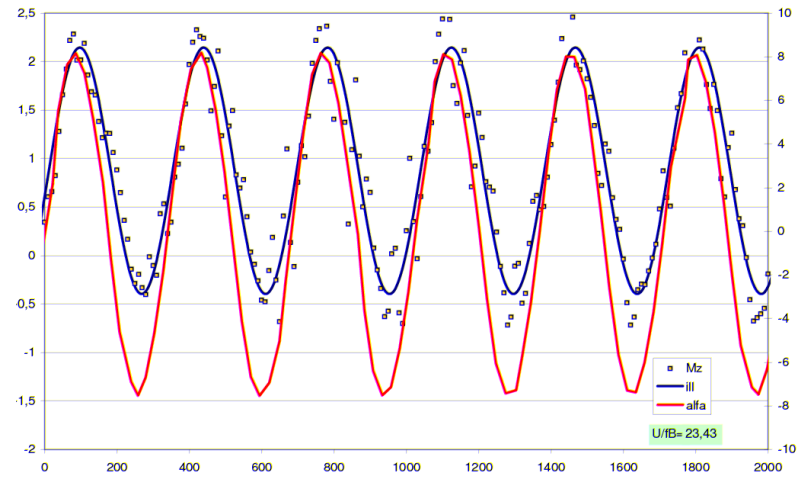
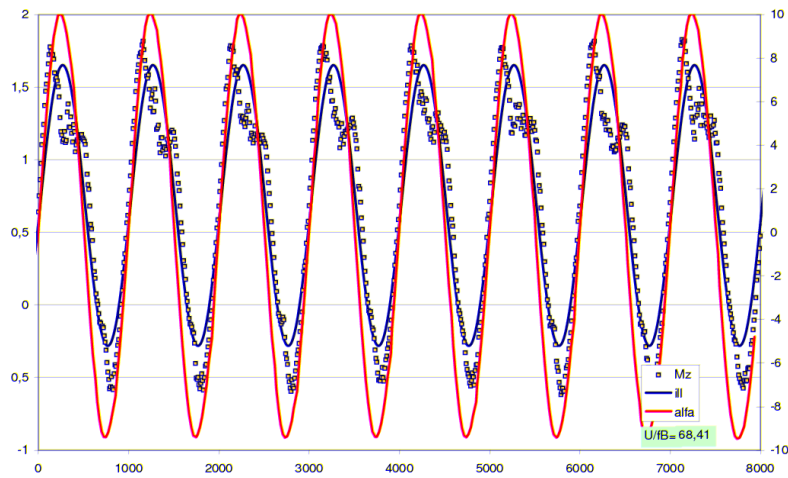
$f=1$ Hz

$f=3$ Hz

$U=5$ m/s

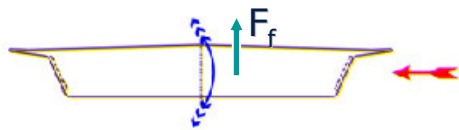


$U=20$ m/s



t [ms]

t [ms]

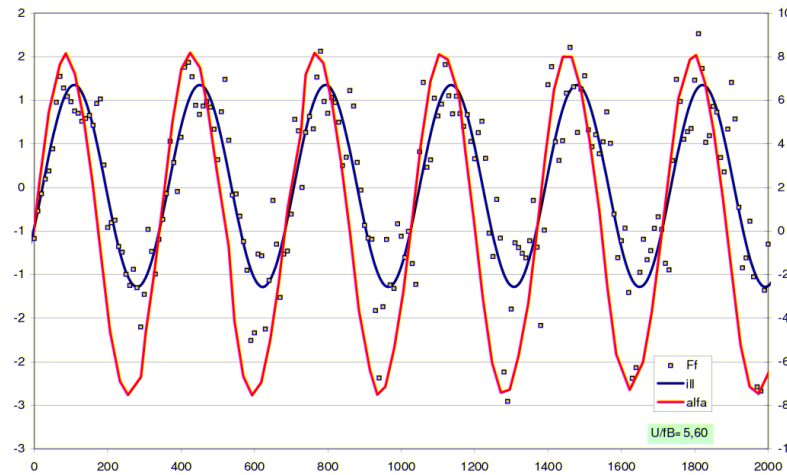
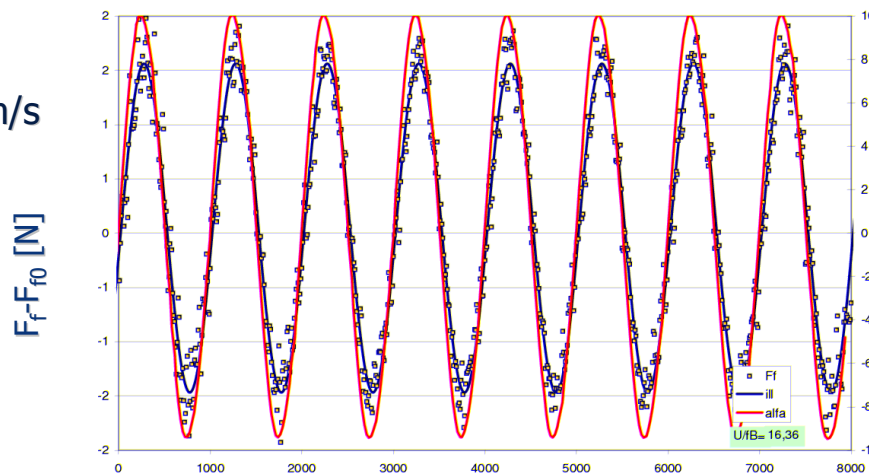


$\alpha=0$

$f=1$ Hz

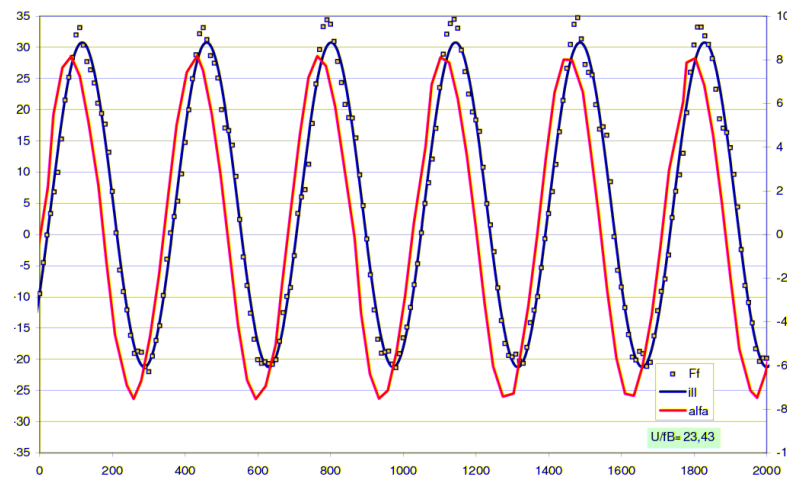
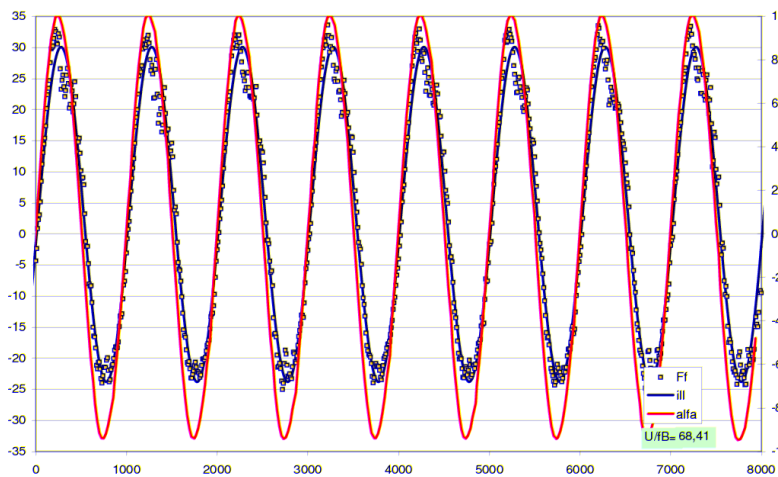
$f=3$ Hz

$U=5$ m/s



alfa [fok]

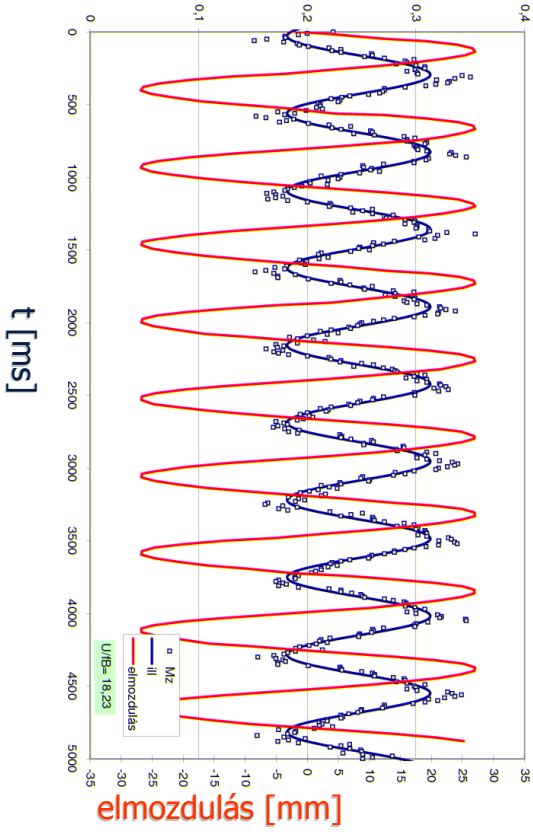
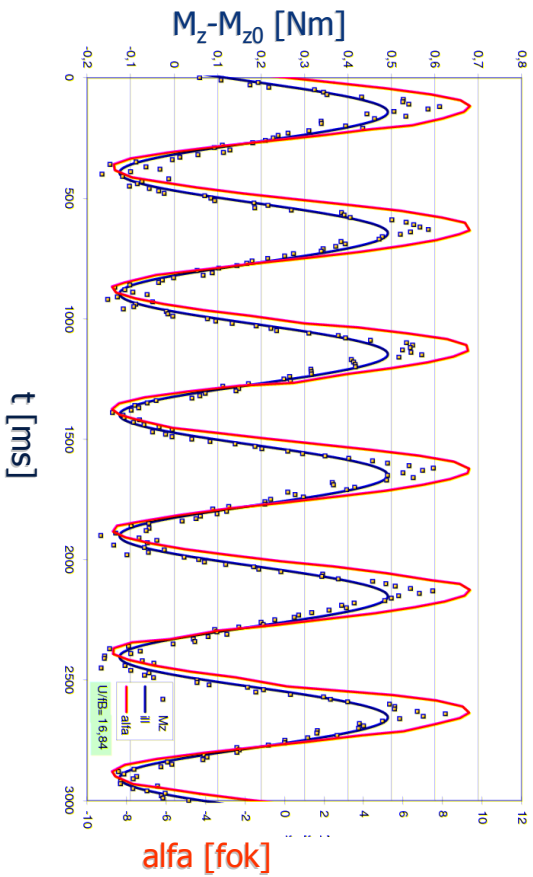
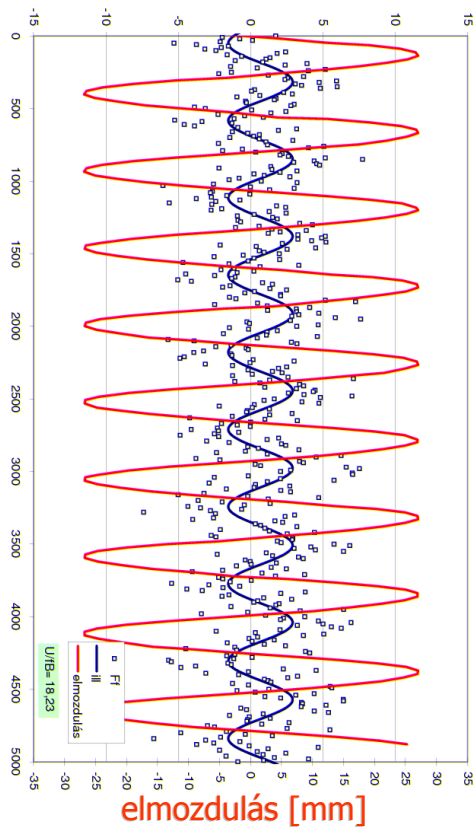
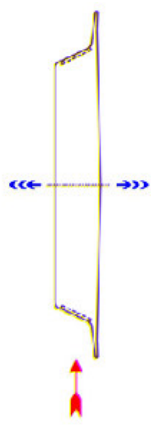
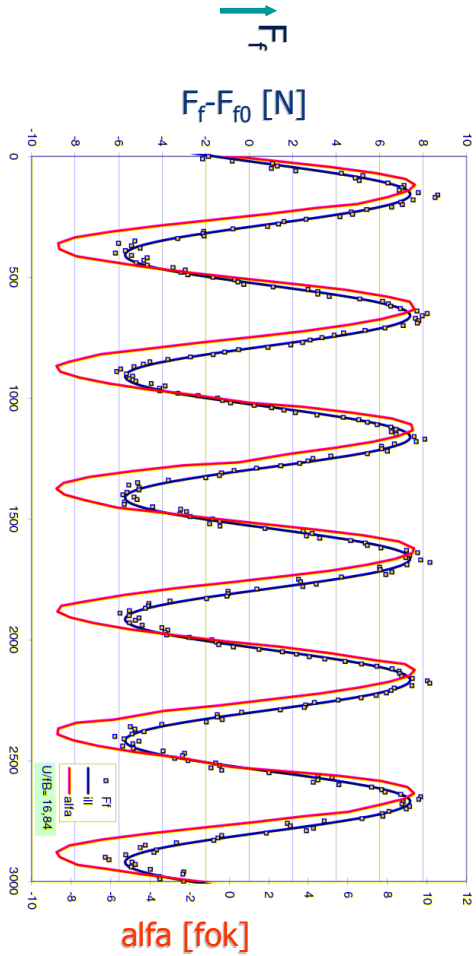
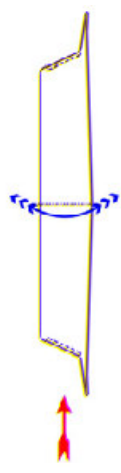
$U=20$ m/s



t [ms]

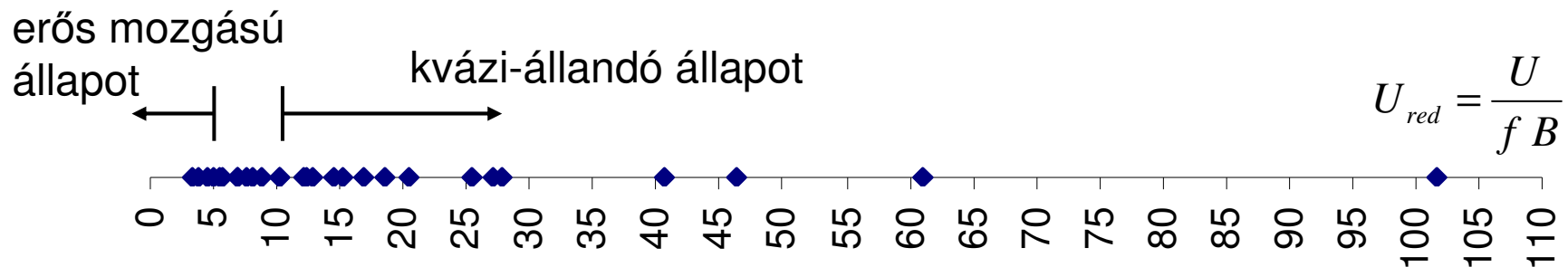
t [ms]

$\alpha=0$ $f=2$ Hz $U=10$ m/s



Szélcsatorna vizsgálat javaslat

- Több mérés az értékeesebb tartományban
- oszcilláló mozgás frekvenciája
 - $f = 0,5; 1,1; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0$ Hz
- szélesebbesség
 - $U = 4; 6; 9; 15$ m/s
- modell alaprajzi szélessége: 1:100-nál nagyobb
(korlát: méret, tömeg/merevség)



Hiba lehetőségek

- Tervezési hiba
 - szélesség, frekvencia, lépték, tömeg, merevség
- Mérési hiba
 - jel / zaj arány (tehetetlenség, din. nyomás)
 - mechanikai, elektronikai zaj
 - megfogás kialakítása
- Feldolgozási hiba
 - fáziskésés
(időben állandó – terheltségtől függően változó)
 - erők értelmezése
 - mért erők – inerciális erők
 - mért erők – szélcsendben mért erők

Hiba hatása

Közelítő ellenőrzések 1 szf-ú rendszeren.

- $\alpha=0$, csak függőleges eltolódás

$$m\ddot{h} + c_h\dot{h} + k_h h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(\underbrace{KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U}}_{\text{aerodinamikus csillapítás}} + \underbrace{KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B}}_{\text{aerodinamikus merevség}} \right)$$

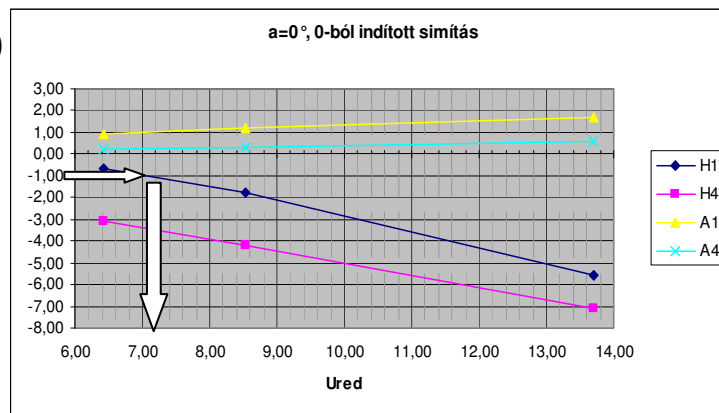
instabilitás =
látszólagos
csillapítás eltűnése

aerodinamikus
csillapítás

aerodinamikus
merevség

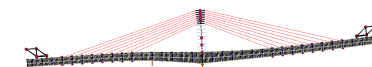
$$-\frac{\delta_s}{2\pi} \frac{4m}{\rho B^2} = H_1^*(U_{red}) = -1,0$$

~10%



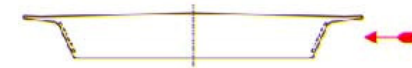
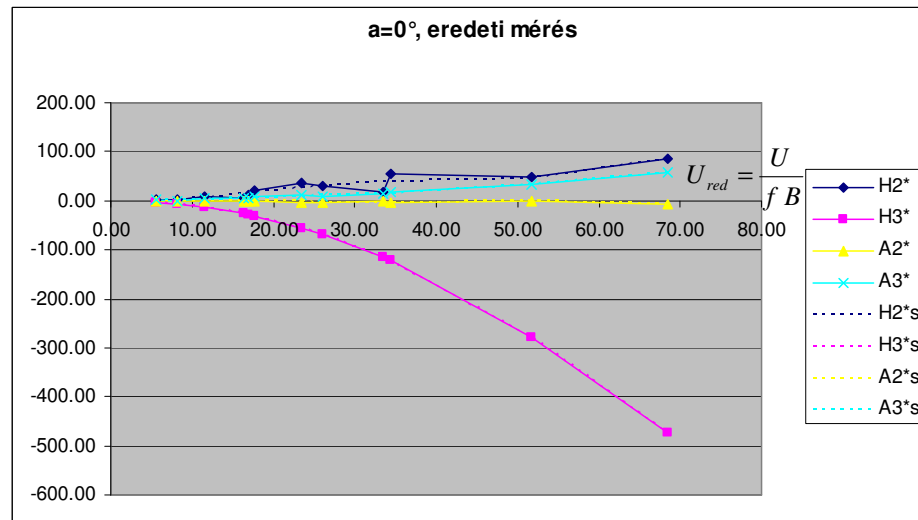
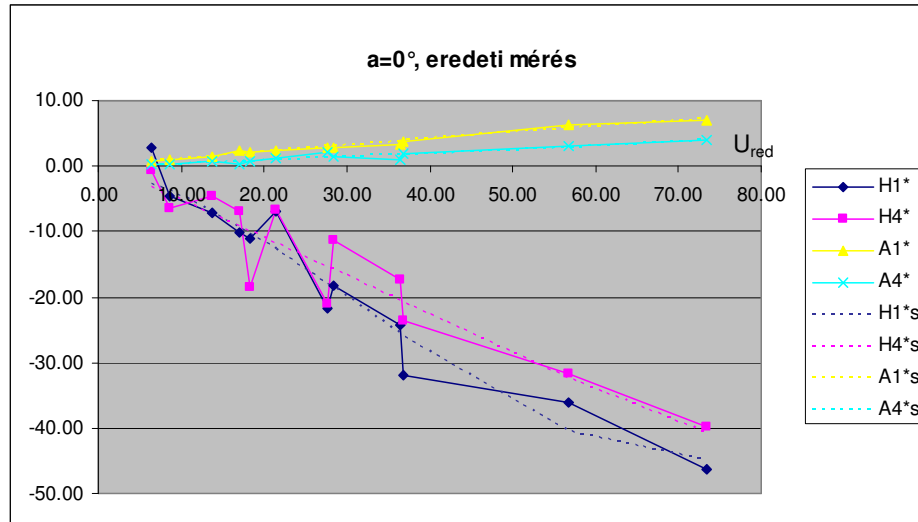
~20%

$$U_{red} = 7,07 \rightarrow U_{crit} = U_{red} fB = 115 \frac{m}{s}$$



$f_1 = 0,55 \text{ Hz}$

Derivatívumok



3. fokú polinomos közelítés

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right)$$

$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left(KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right)$$

$$U_{red} = \frac{U}{fB} \quad K = \frac{2\pi f B}{U} = \frac{2\pi}{U_{red}}$$

4. fokú polinomos közelítés

Összefüggések

- Összefüggések derivatívumok között
 - ellenőrizhetőség
 - mérési sorozat csökkentésének lehetősége
 - szerzőnként változó összefüggések

$$H_1^* = KH_3^* - \frac{c_D}{K}$$

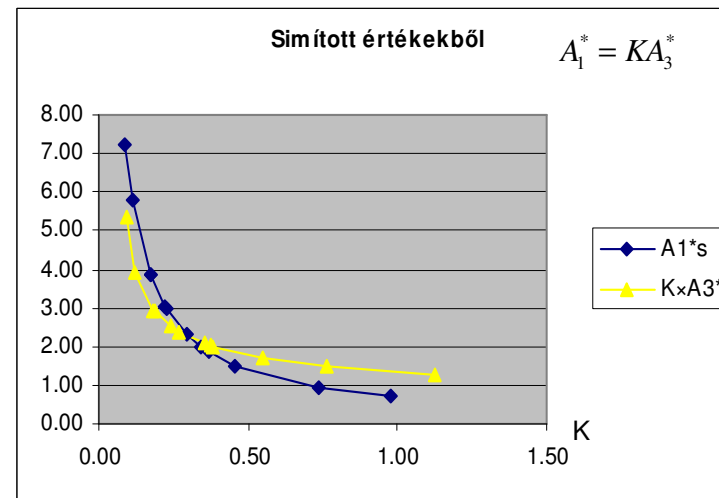
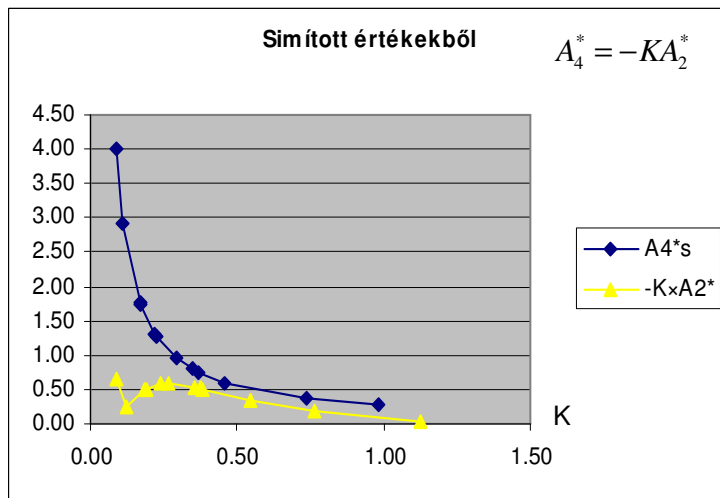
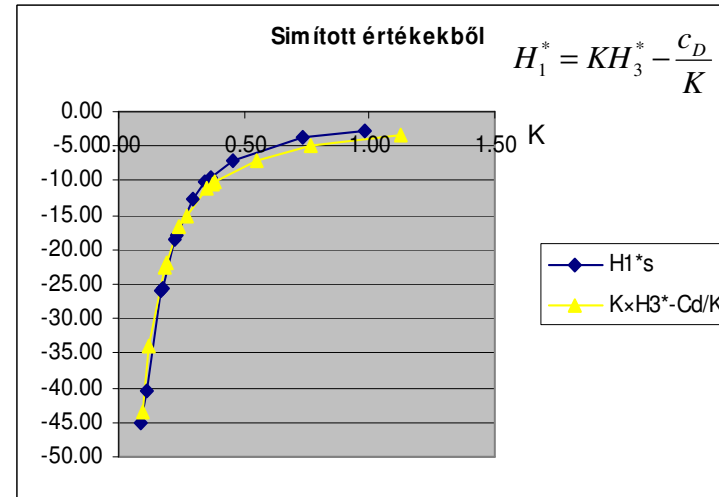
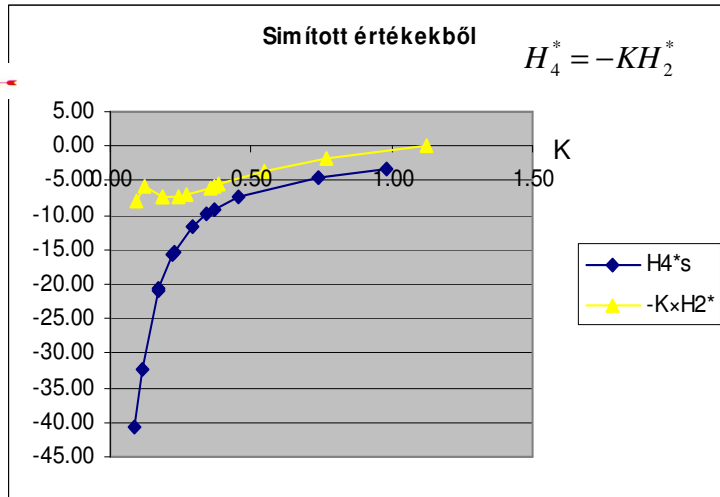
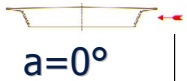
$$H_4^* = -KH_2^*$$

$$A_1^* = KA_3^*$$

$$A_4^* = -KA_2^*$$

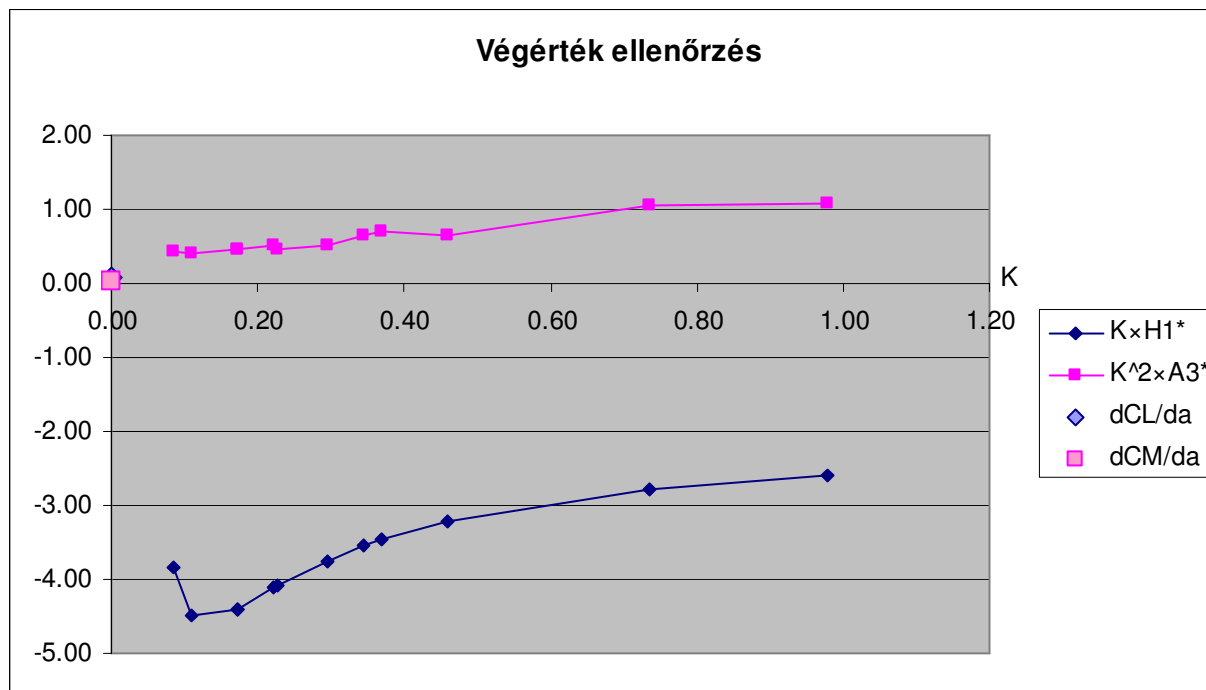
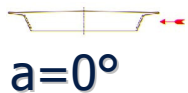
$$K = \frac{2\pi}{U_{red}} = \frac{2\pi f B}{U}$$

Összefüggések



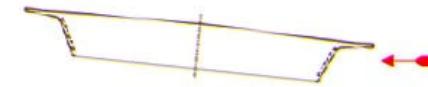
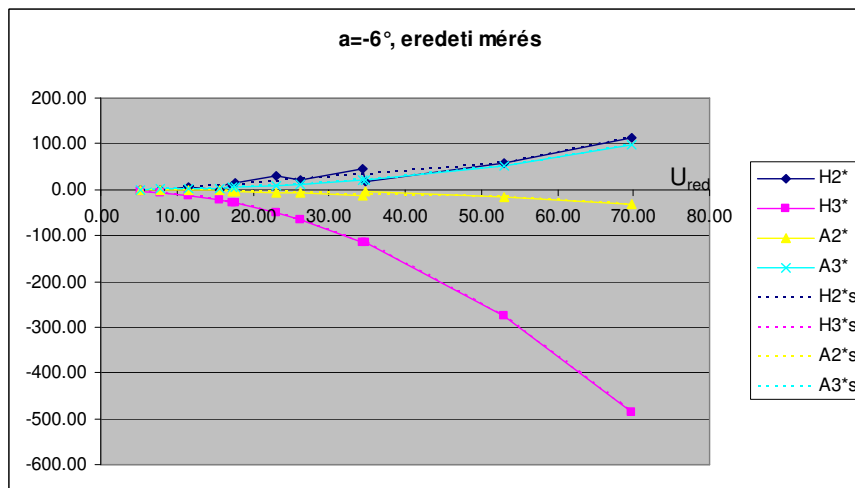
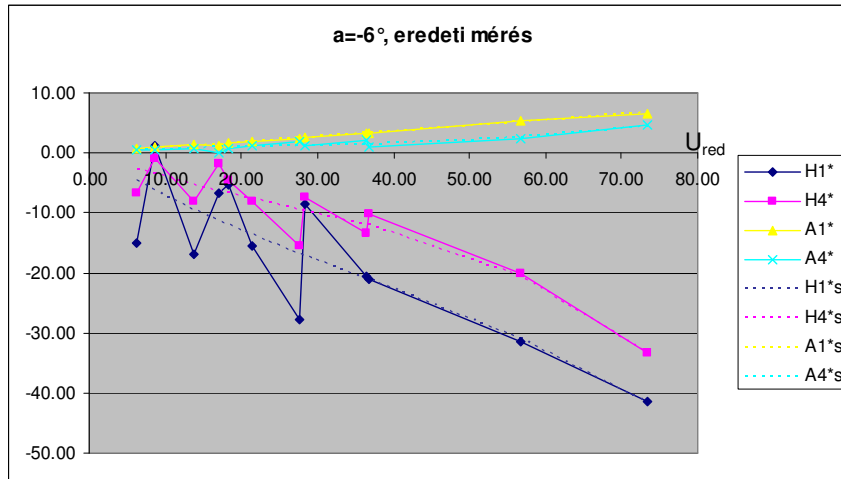
$$K = \frac{2\pi}{U_{red}}$$

Erőtenyező - derivatívum



$$KH_1^* \xrightarrow{K \rightarrow 0} \frac{dc_L}{d\alpha}$$
$$K^2 A_3^* \xrightarrow{K \rightarrow 0} \frac{dc_M}{d\alpha}$$

Derivatívumok



3. fokú polinomos közelítés

$$L_n = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right)$$

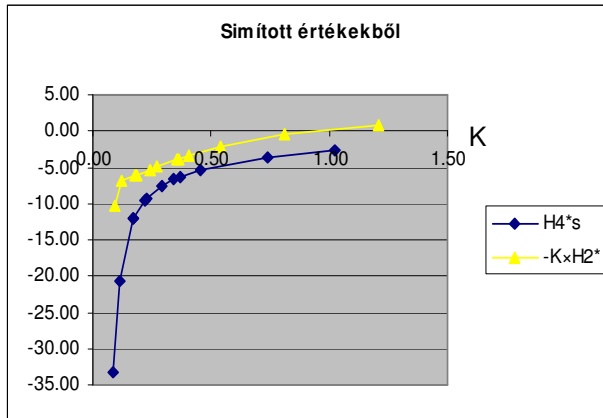
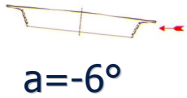
$$M_\alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left(KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right)$$

$$U_{red} = \frac{U}{f B}$$

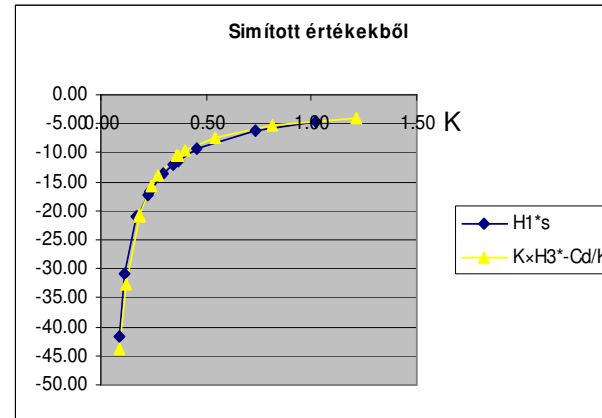
$$K = \frac{2\pi f B}{U} = \frac{2\pi}{U_{red}}$$

4. fokú polinomos közelítés

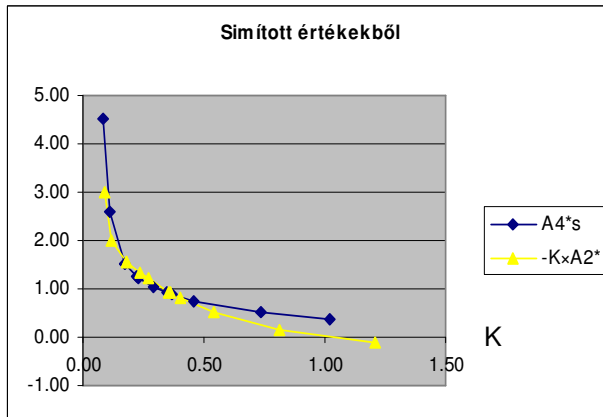
Összefüggések



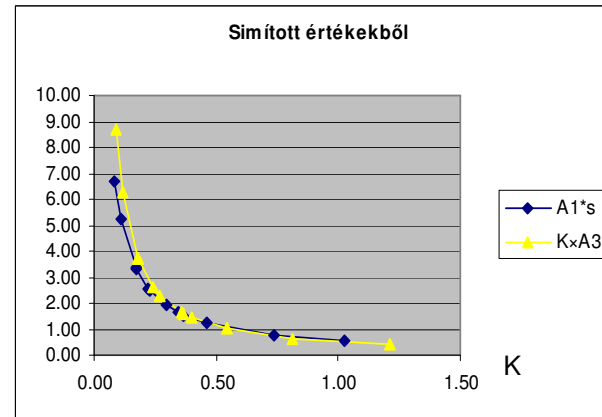
$$H_4^* = -KH_2^*$$



$$H_1^* = KH_3^* - \frac{C_D}{K}$$



$$A_4^* = -KA_2^*$$



$$A_1^* = KA_3^*$$

$$K = \frac{2\pi}{U_{red}}$$

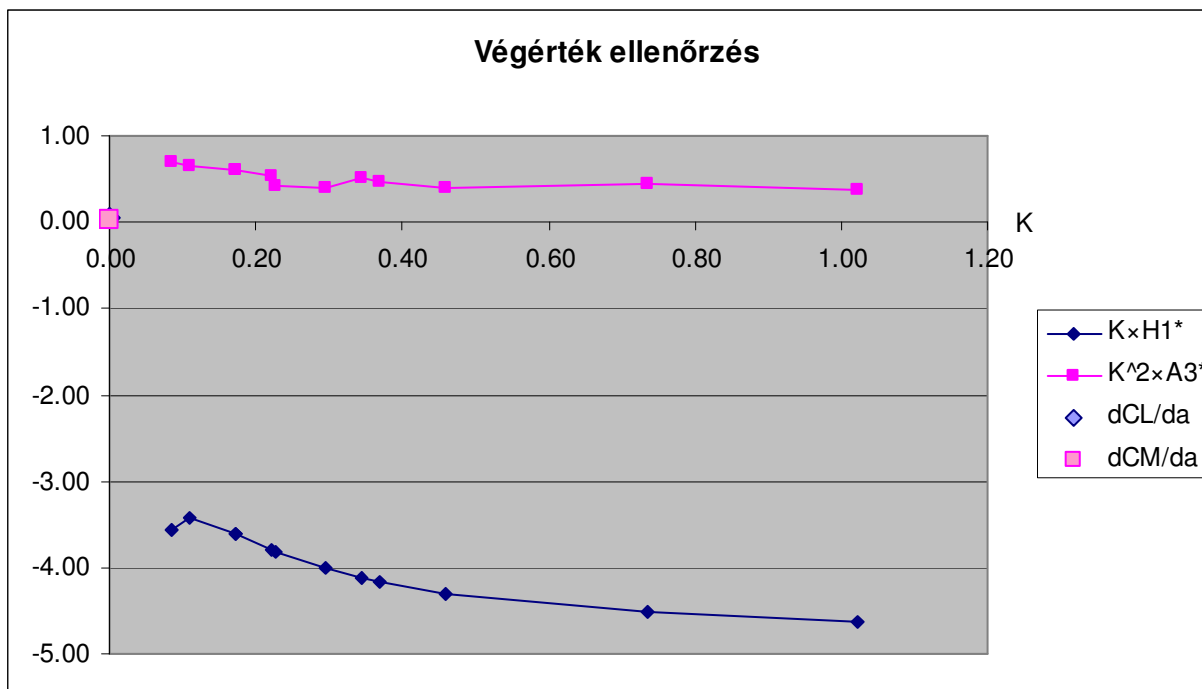
Eltérések lehetséges oka:

nemlineáris kapcsolat a szerkezet mozgása és az aeroelasztikus erők között

Erőtenyező - derivatívum



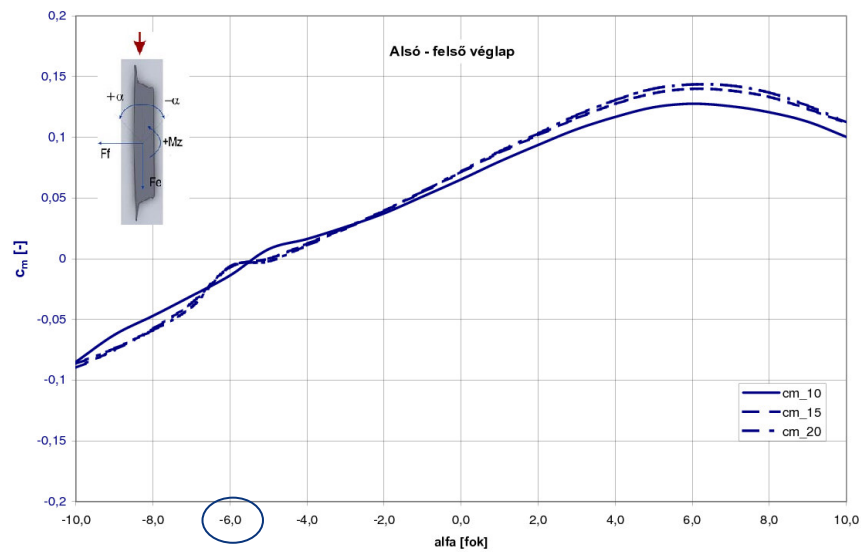
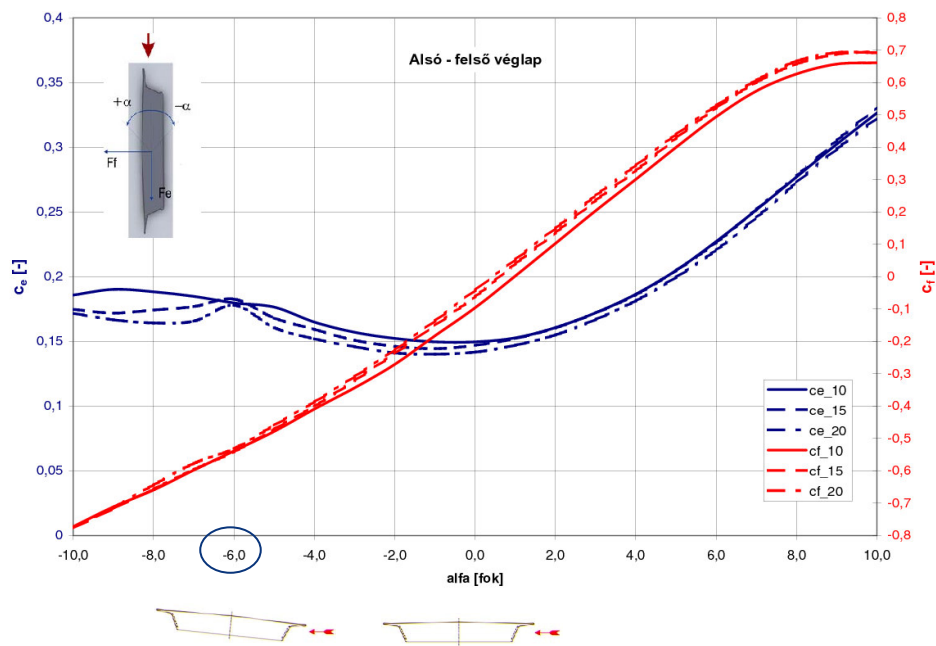
$\alpha = -6^\circ$



$$KH_1^* \xrightarrow{K \rightarrow 0} \frac{dc_L}{d\alpha}$$

$$K^2 A_3^* \xrightarrow{K \rightarrow 0} \frac{dc_M}{d\alpha}$$

Erőtenyezők



Összefoglaló

- Értékes, új mérési tartomány kijelölése
- Mérési hiba minimalizálása (méréstechnika)
- Feldolgozási hiba csökkentése
- Linearitás, additivitás ellenőrzése többlet-kísérlettel
- Eredmények összevetése meglévő összefüggésekkel (esetleg: mérések számának csökkentése)
- Modell megfogási/mozgatási helyeinek „széthúzása”