

# ENERGETSKI STROJI

Uvod

Pregled teoretičnih osnov

Hidrostatika

Dinamika tekočin

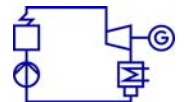
Termodinamika

**Podobnostni zakoni**

**Volumetrični stroji**

**Turbinski stroji**

**Energetske naprave**



## Podobnostni zakoni

### Kriteriji podobnosti

Dinamična podobnost

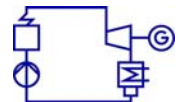
Termična podobnost

Snovna podobnost

Dimenzijska analiza – Buckinghamov  $\Pi$  teorem

Diferencialna podobnost

Integralna podobnost

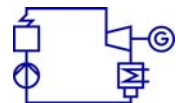
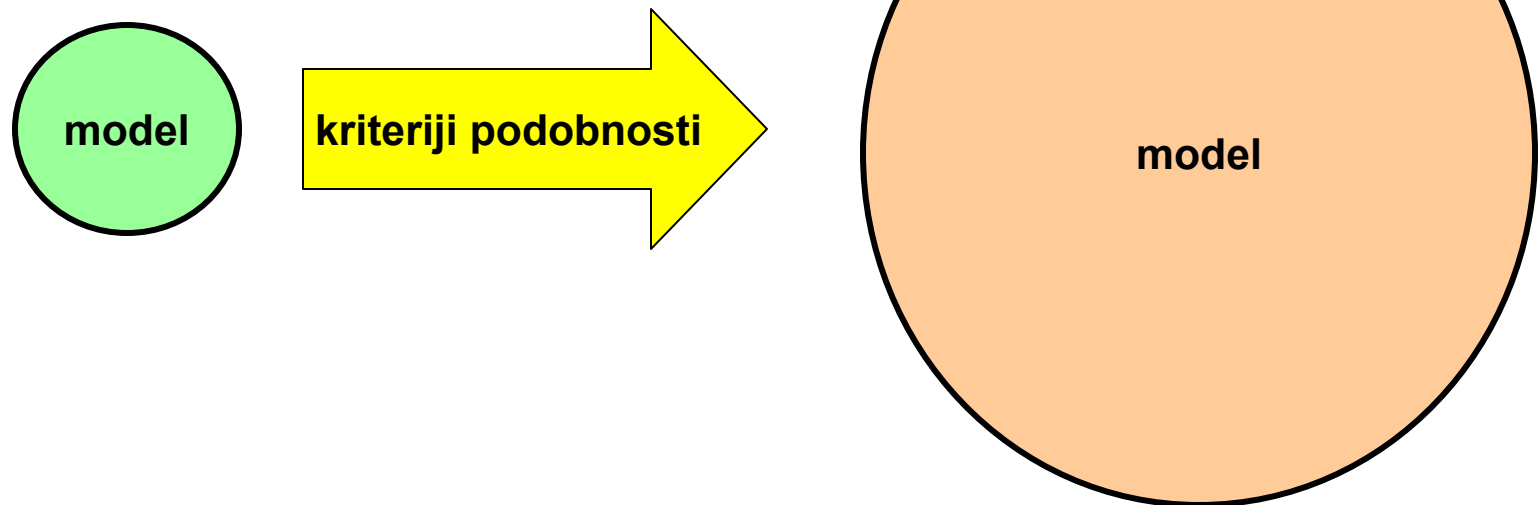


## Podobnostni zakoni

Delovanje strojev in naprav določajo masni in energijski tokovi.

Značilnost tokov: turbulenca → Eksperimentalno delo

Podobnost pojavov na modelu in izvedbi:



## Geometrijska podobnost

Ohranitev razmerij dolžin in kotov

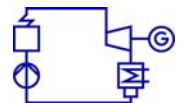
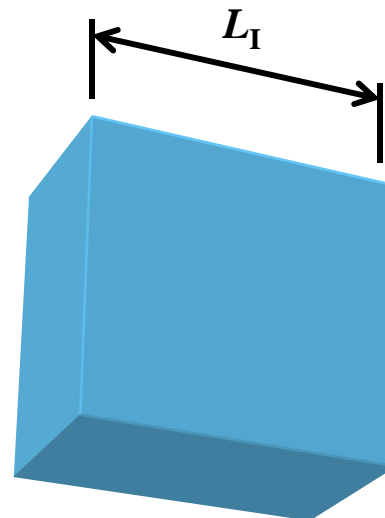
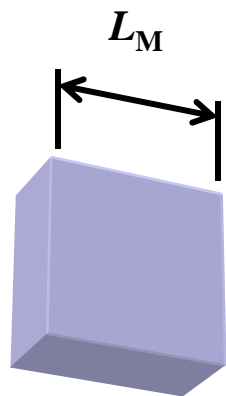
$$\frac{L_M}{L_I} = konst.$$



$$\frac{L_M^2}{L_I^2} = konst.$$

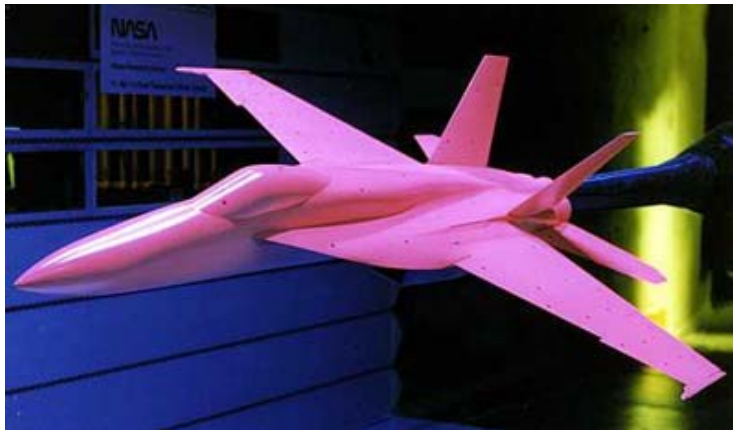


$$\frac{L_M^3}{L_I^3} = konst.$$

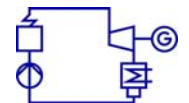


## Geometrijska podobnost

**Model**



**Izvedba**



## Geometrijska podobnost

Primer: rotor Francisove turbine

Izvedba

$D = 3,85 \text{ m}$



Izvedba

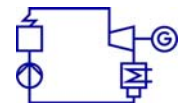
$D = 8,60 \text{ m}$



Model



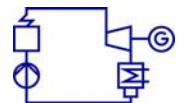
$D = 250 \text{ mm}$



## Kinematična podobnost

Ohranitev razmerij vektorjev hitrosti in pospeškov: velikost in smer

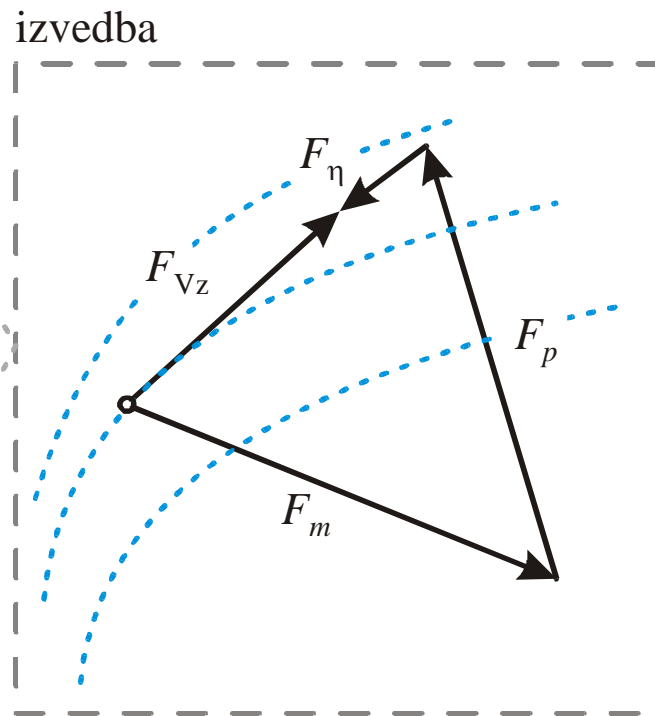
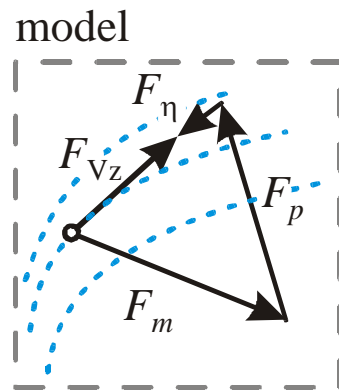
Kinematični podobnosti je avtomatično zadoščeno z *dinamično podobnostjo!*



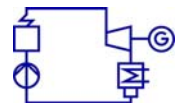
## Dinamična podobnost

Ohranitev razmerij vektorjev sil, ki določajo opazovani pojav

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \cdot \vec{f}_m - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \underline{\tau}$$
$$F_{Vz} = F_m + F_p + F_\eta$$



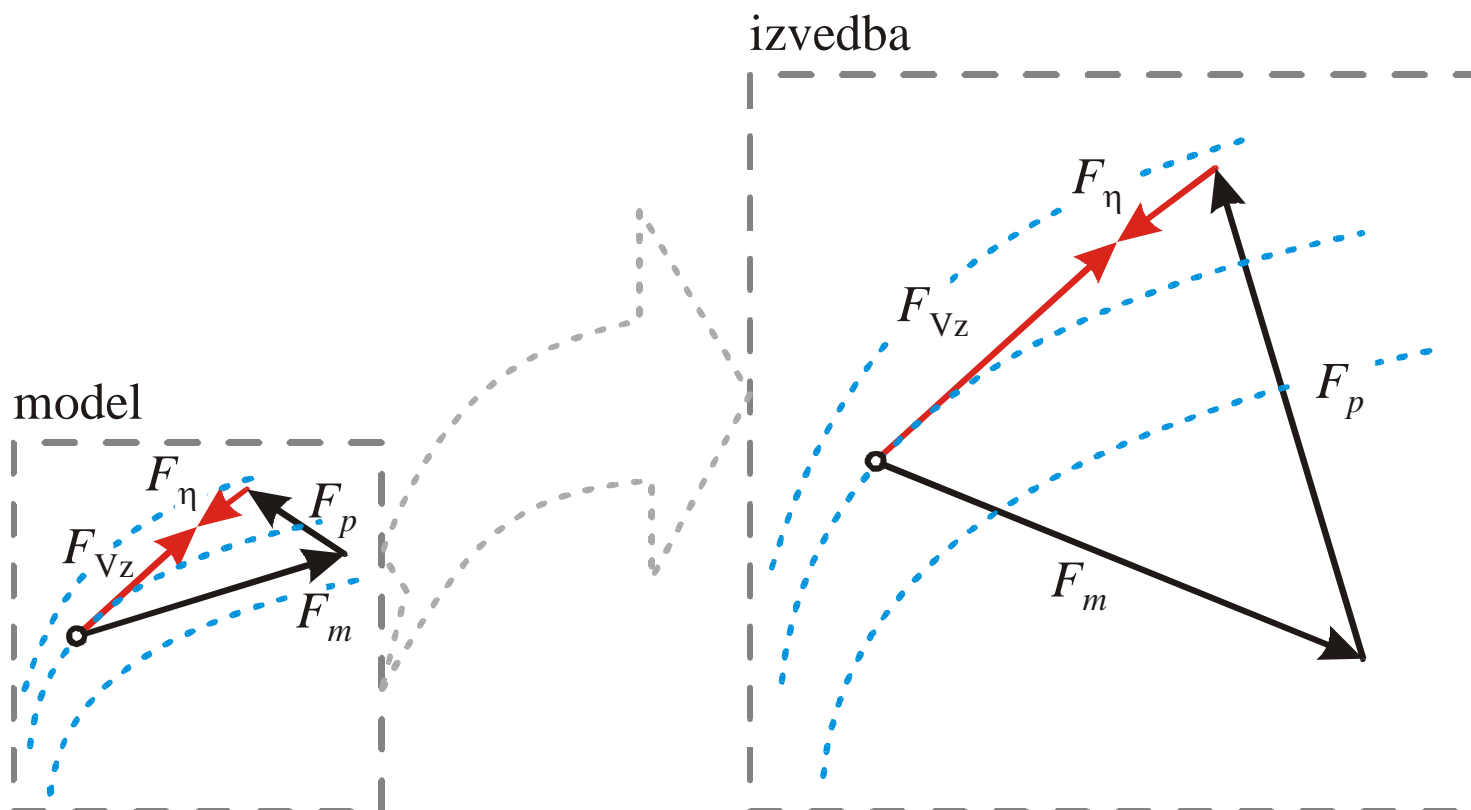
Popolna dinamična podobnost





## Delna dinamična podobnost

Ohranitev razmerij najpomembnejših vektorjev sil, ki določajo opazovani pojav



## Dimenzijska analiza posameznih sil

Sile v tokovni enačbi:

Masna sila: - teža

$$F_m = m \cdot g \quad \square \quad \rho \cdot g \cdot L^3$$

Masna sila: - vzgon

$$F_m = \rho_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot V \quad \square \quad \rho \cdot g \cdot \beta \cdot T \cdot L^3$$

Tlačna sila:

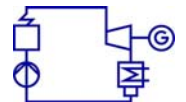
$$F_p = p \cdot A \quad \square \quad p \cdot L^2$$

Viskozna sila:

$$F_\eta = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy} \cdot A \quad \square \quad \eta \cdot v \cdot L$$

Vztrajnostna sila:

$$F_{vz} = m \cdot a = \rho \cdot V \cdot \frac{dv}{dt} \quad \square \quad \rho \cdot L^3 \cdot \frac{v}{l/v} = \rho \cdot L^2 \cdot v^2$$

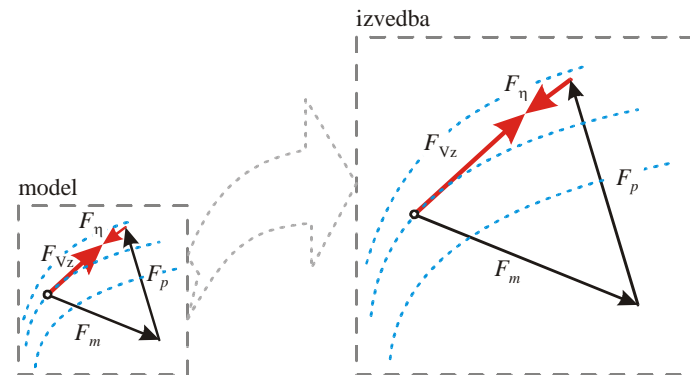


## Kriteriji delne podobnosti

### Sorazmerje vztrajnostne in viskozne sile

#### Reynoldsovo število

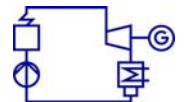
$$\frac{F_{Vz}}{F_{\eta}} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\eta \cdot v \cdot L} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta} = \frac{v \cdot L}{\nu} = Re$$



$$Re_M = Re_I$$

Uporaba: Tokovi, kjer imajo viskozne sile prevladujoč vpliv na tokovno polje

Primer: tok tekočine v cevi  
obtekanje teles



## Primer uporabe

Študij toka hladilne vode v hladilnem sistemu termoelektrarne:  
srednja hitrost vode: 3 m/s  
notranji premer cevovoda: 2 m

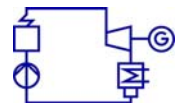
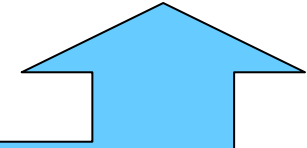
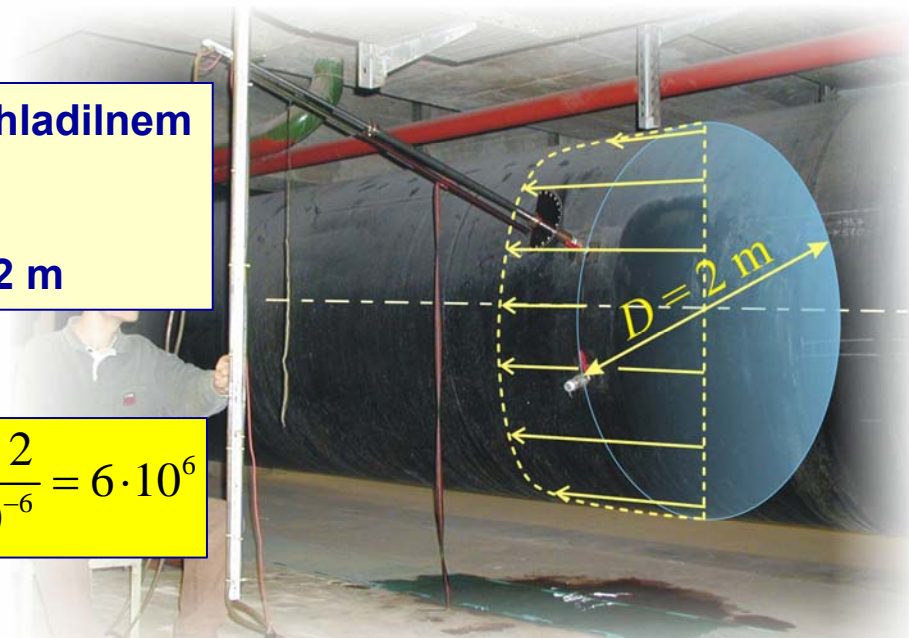
$$Re_I = \frac{v_I \cdot D_I}{\nu_I} = \frac{3 \cdot 2}{10^{-6}} = 6 \cdot 10^6$$

Določi kakšna mora biti **hitrost zraka** v cevi **premera 5 m** tako, da bodo tokovne razmere identične tistim na izvedbi!

**Velja kriterij podobnosti:  $Re_I = Re_M$**

$$\frac{v_I \cdot D_I}{\nu_I} = \frac{v_M \cdot D_M}{\nu_M} \Rightarrow v_M = v_I \frac{D_I \cdot \nu_M}{D_M \cdot \nu_I} = 3 \cdot \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-6}} = 13,2 \text{ m/s}$$

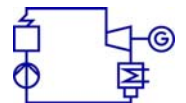
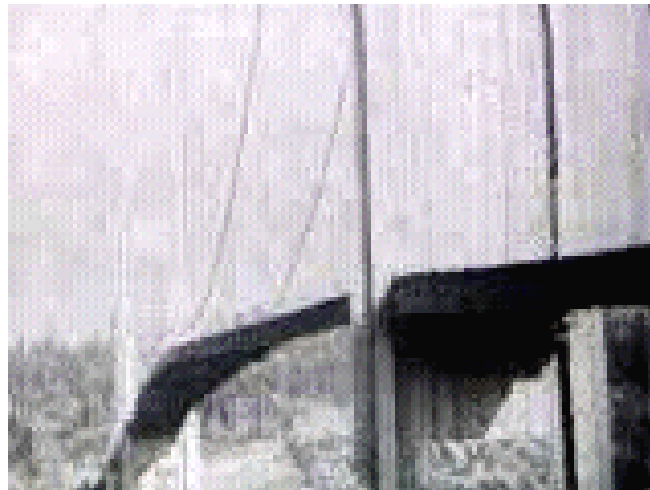
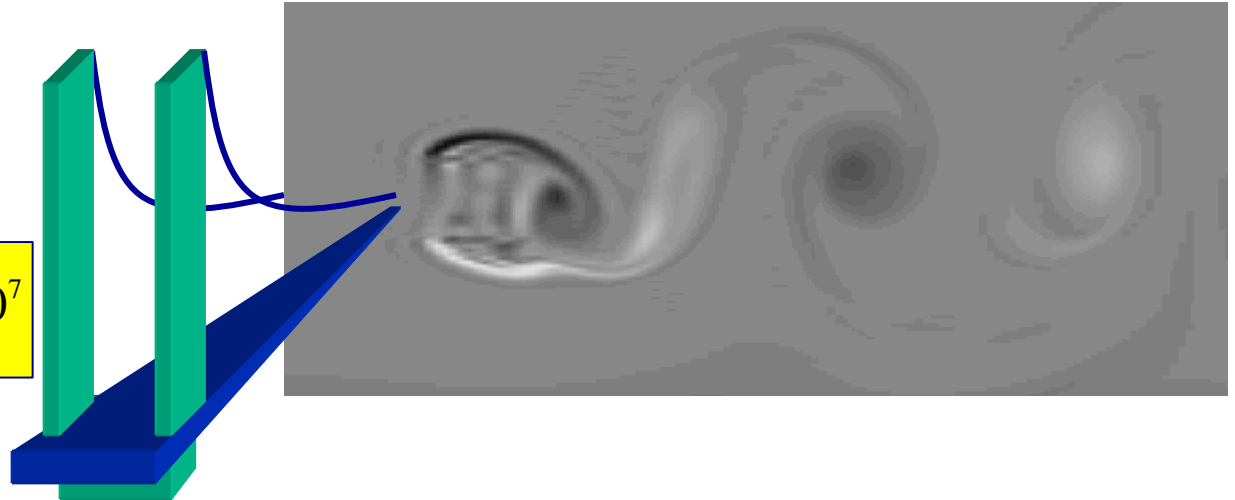
Tok v dimniku TET



## Primer uporabe

Aerodinamsko  
vzbujena nihanja mostov

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu} \approx \frac{30 \cdot 10}{1,1 \cdot 10^{-5}} = 2,73 \cdot 10^7$$



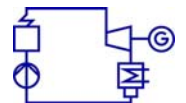
## Primer uporabe

Simulacija obtekanja mostne konstrukcije

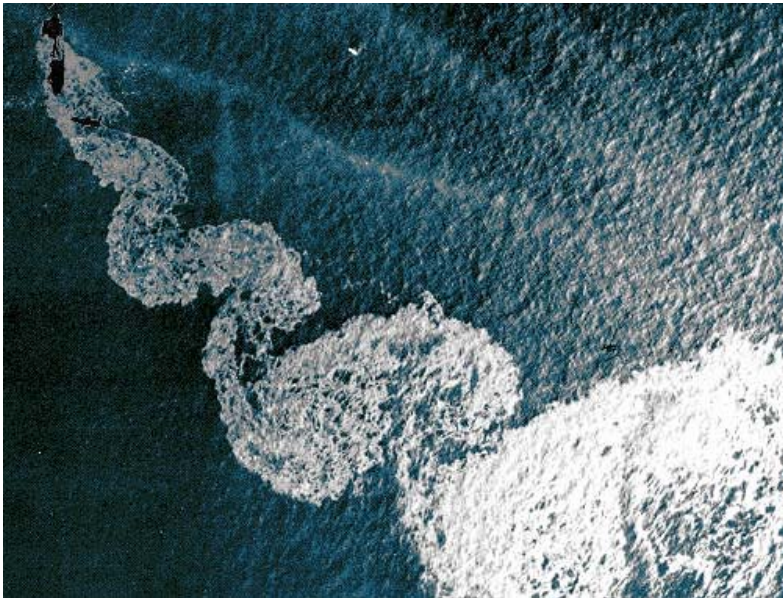
Model v vetrovniku



Izvedba v naravi

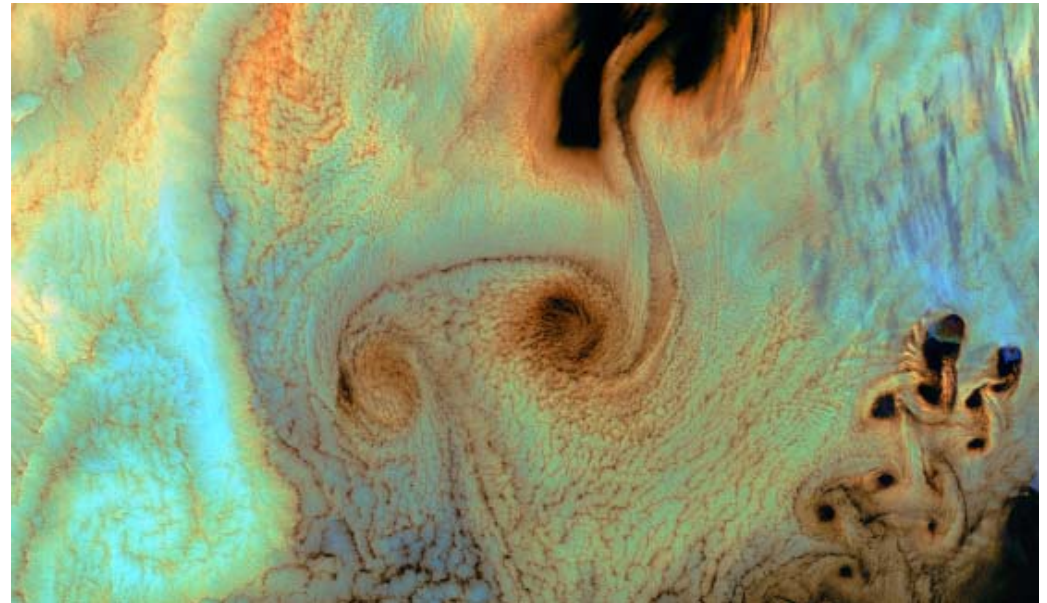


## Primeri podobnih tokov v naravi



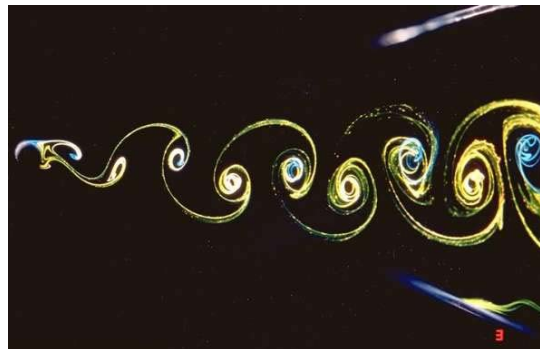
turbulentni tok

$$Re \approx 4 \cdot 10^8$$



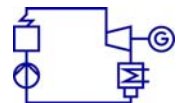
turbulentni tok

$$Re \approx 4 \cdot 10^8$$



laminarni tok

$$Re \approx 165$$

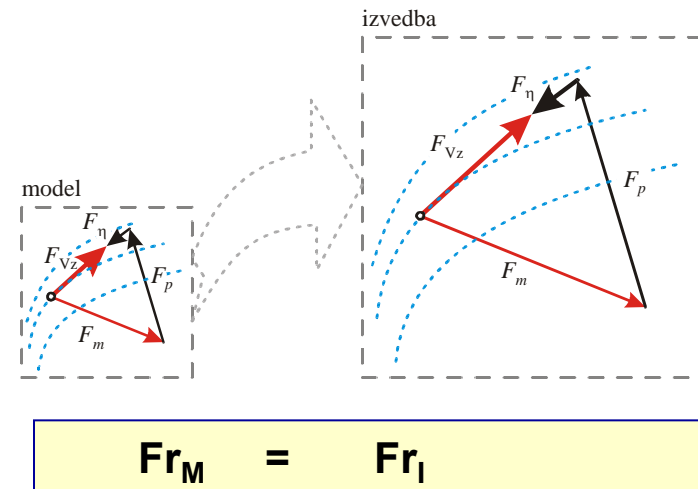


## Kriteriji delne podobnosti

### Sorazmerje vztrajnostne in masne sile teže

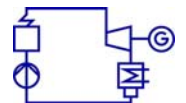
#### Froudovo število

$$\frac{F_{Vz}}{F_m} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{\rho \cdot g \cdot L^3} = \frac{v^2}{g \cdot L} = Fr$$



Uporaba: Tokovi, kjer imajo masne sile teže pomemben vpliv na opazovani pojav

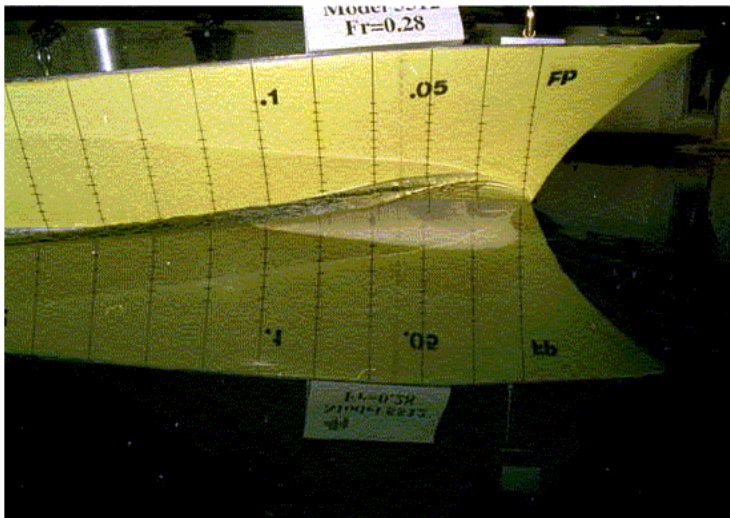
Primer: valovanje proste površine kapljevine  
določevanje sile upora por gibanju plavajočih teles:  $F_u = F_u(Re, Fr)$





## Primer uporabe

Model v bazenu



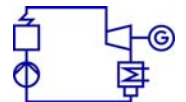
$$Fr = 0,28$$

Izvedba v naravi



$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot L} \approx \frac{12^2}{9,81 \cdot 60} = 0,28$$

Model in izvedba sta si podobna glede upora zaradi valovanja.  
Pozor! Ni podobnosti upora zaradi viskoznih sil:  $Re_M = 1,67 \cdot 10^6$ ;  $Re_l = 7,2 \cdot 10^8$   
Rešitev: Ponovitev preizkusa v bazenu pri enakih  $Re$ .

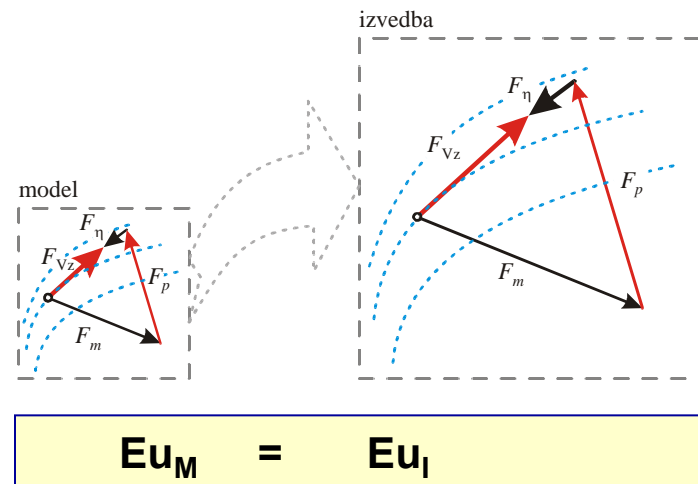


## Kriteriji delne podobnosti

### Sorazmerje vztrajnostne in tlačne sile

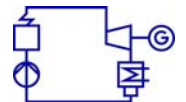
### Eulerjevo število “pressure coefficient”

$$\frac{F_{Vz}}{F_p} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{p \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot v^2}{p} = Eu$$



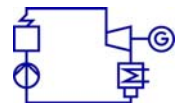
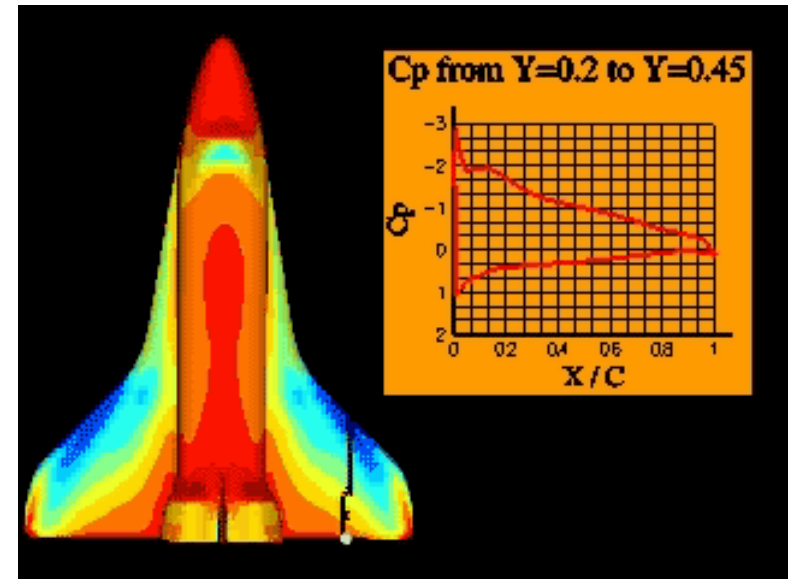
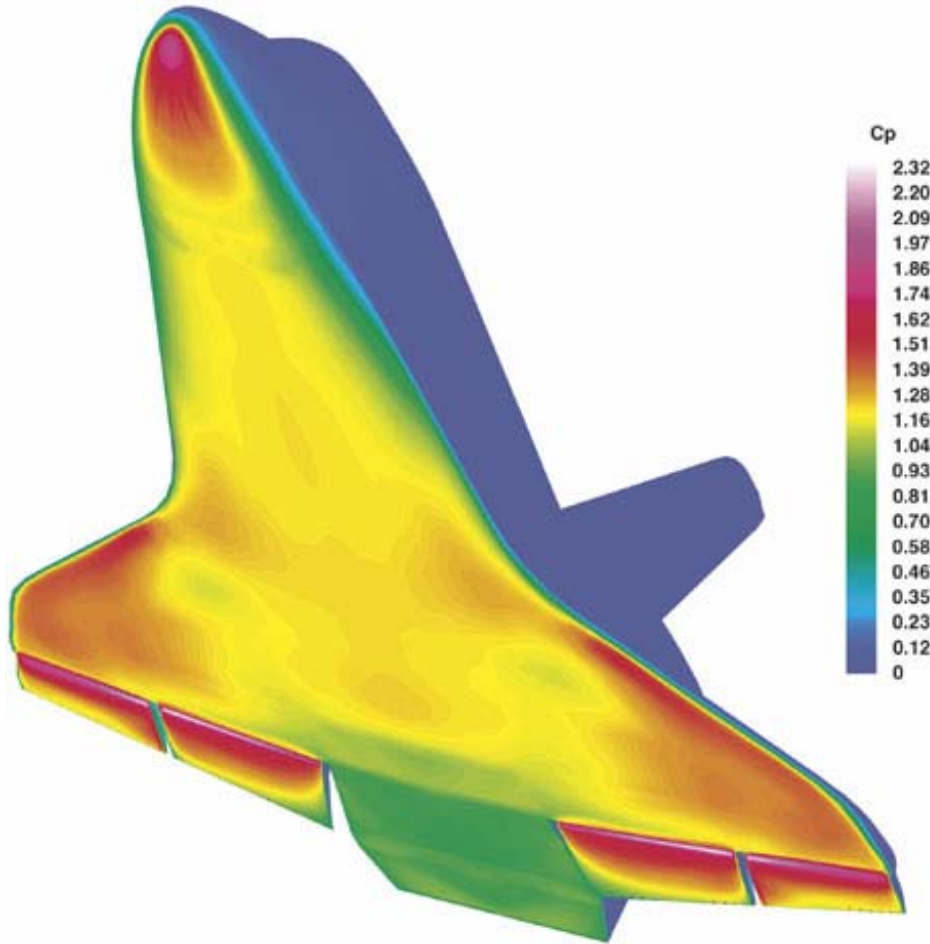
Uporaba: Tokovi, kjer imajo vztrajnostne in tlačne sile pomemben vpliv na opazovani pojav

Primer: Tok skozi kanale, šobe...  
Obtekanje profilov



## Primer uporabe

Določevanje aerodinamičnega vzgona in upora

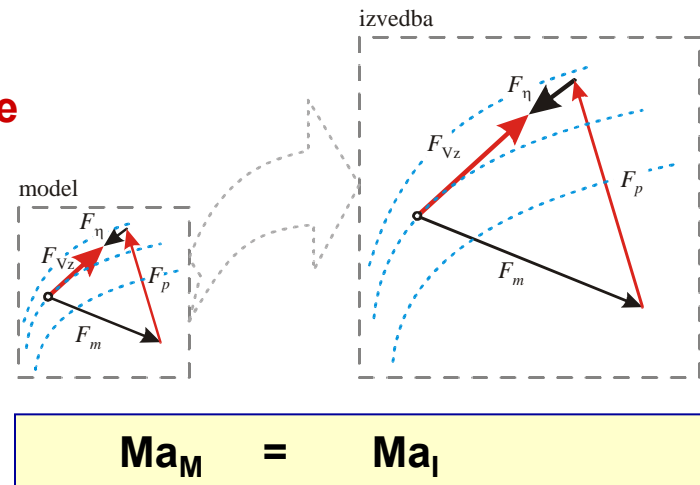


## Kriteriji delne podobnosti

### Sorazmerje vztrajnostne in tlačne (elastične) sile

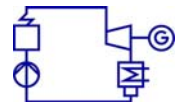
#### Machovo število

$$\frac{F_{Vz}}{F_p} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L^2}{E \cdot L^2} = \frac{v^2}{E/\rho} = \frac{v^2}{v_{kr}^2} = Ma$$

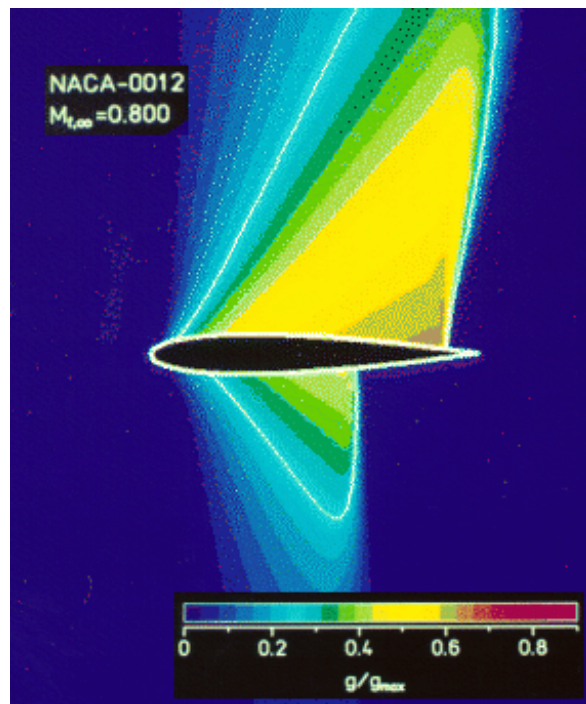


Uporaba: Tokovi stisljivih tekočin velikih hitrosti  $Ma > 0,5$

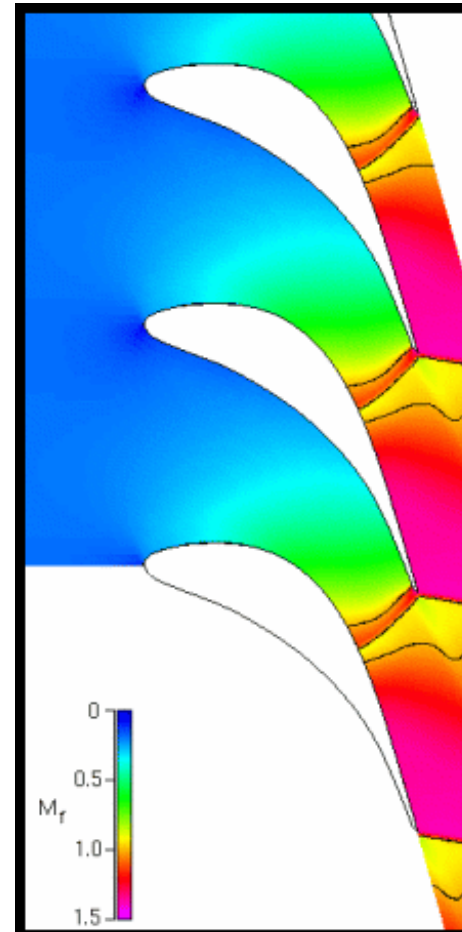
Primer: Obtekanje teles, tok skozi kanale, šobe...



## Primer uporabe



Obtekanje osamljenih profilov



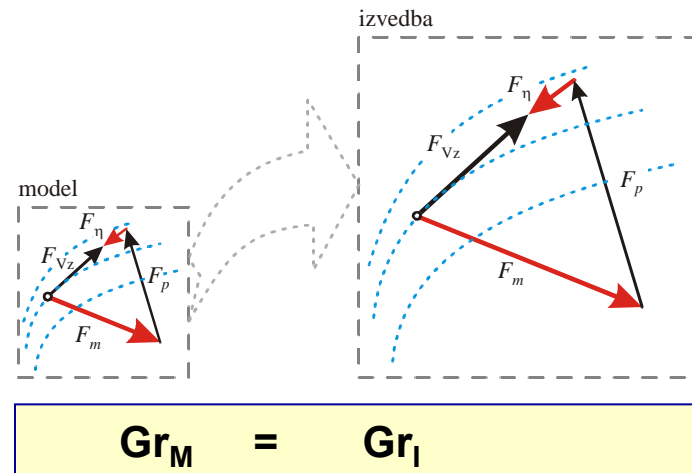
Tok skozi turbinsko kaskado

## Kriteriji delne podobnosti

### Sorazmerje masne sile vzgona in viskozne sile

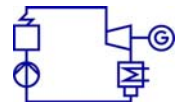
#### Grashofovo število

$$\frac{F_m}{F_\eta} = \frac{\rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot L^3}{\eta \cdot v \cdot L} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{v^2} \cdot \frac{v}{v \cdot L} = \frac{Gr}{Re}$$



Uporaba: Tokovi, kjer imajo masne sile vzgona in viskozne sile odločilen vpliv na opazovani pojav

Primer: konvektivno gibanje tekočine pri naravni konvekciji

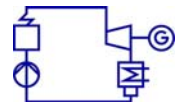


## Termična podobnost

Pogoj: Dinamična podobnost!

Ohranitev razmerij med posameznimi mehanizmi prenosa toplote:

- prevod
- konvekcija
- konvektivni prestop
- sevanje



## Dimenzijska analiza modelov prenosa toplote

**Prevod toplote:**

$$\dot{Q}_\lambda = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T \quad \square \quad \lambda \cdot T \cdot L$$

**Konvekcija:**

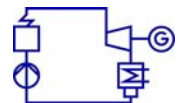
$$\dot{Q}_K = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \square \quad \rho \cdot v \cdot A \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \square \quad \rho \cdot v \cdot L^2 \cdot c_p \cdot T$$

**Konvektivni prestop:**

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad \square \quad \alpha \cdot L^2 \cdot T$$

**Sevanje:**

$$\dot{Q}_\sigma = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T^4 \quad \square \quad \varepsilon \cdot \sigma \cdot L^2 \cdot T^4$$





## Kriteriji termične podobnosti

Sorazmerje med konvektivnim prestopom in prevodom

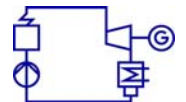
Nußeltovo število

$$\frac{\dot{Q}_\alpha}{\dot{Q}_\lambda} = \frac{\alpha \cdot L^2 \cdot T}{\lambda \cdot L \cdot T} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = \text{Nu}$$

$$\text{Nu}_M = \text{Nu}_I$$

Uporaba: Pri konvektivnem prestopu toplote s trdne stene na tekočino (in nasprotno).

Primer: konvektivno hlajenje, gretje s prisilno konvekcijo



## Kriteriji termične podobnosti

### Sorazmerje med konvekcijo in prevodom

#### Pecletovo število

$$\frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_\lambda} = \frac{\rho \cdot v \cdot L^2 \cdot c_p \cdot T}{\lambda \cdot L \cdot T} = \frac{\rho \cdot v \cdot L \cdot c_p}{\lambda} = Pe$$

$$Pe_M = Pe_l$$

Uporaba: v primerih imata na porazdelitev temperature poglavitni vpliv konvekcija in prevod (analogno Re)

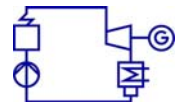
Primer: prenos toplote v toku tekočine

#### Prandtlovo število

$$Pr = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_\lambda} \cdot \frac{F_\eta}{F_m} = \frac{\rho \cdot v \cdot L \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{\eta}{v \cdot L \cdot \rho} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{Pe}{Re}$$

Pr-število je snovna lastnost!

Informacija o razmerju med hidravlično in termično mejno plastjo.



## Kriteriji termične podobnosti

Sorazmerje med konvektivnim prestopom in konvekcijo

Stantonovo število

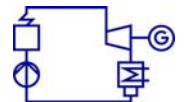
$$\frac{\dot{Q}_\alpha}{\dot{Q}_K} = \frac{\alpha \cdot L^2 \cdot T}{v \cdot \rho \cdot c_p \cdot L^2 \cdot T} = \frac{\alpha}{v \cdot \rho \cdot c_p} = St$$

$$St_M = St_I$$

Uporaba: Pri konvektivnem prestopu toplote s trdne stene na tekočino (in nasprotno).

$$St = \frac{Nu}{Pe} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$$

Linearna kombinacija kriterijev podobnosti



## Kriteriji termične podobnosti

### Sorazmerje med sevanjem in prevodom toplote

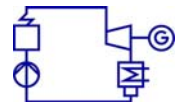
#### Stefanovo število

$$\frac{\dot{Q}_\sigma}{\dot{Q}_\lambda} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot L^2 \cdot T^4}{\lambda \cdot L \cdot T} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot L \cdot T^3}{\lambda} = Sf$$

$$Sf_M = Sf_I$$

Uporaba: kadar sevanje pomembno vpliva na prenos toplote

Primer: sevalni prenos toplote v uparjalnikih parnih kotlov



## Primer uporabe

Sevalni prenos toplote  
v uparjalnikih parnih kotlov

