2. Fizikalni modeli

2.1 Definicija fizikalnog modela

U stručnoj literaturi se često koriste pojmovi fizikalni i hidraulički model. Pojam fizikalni model je širi jer obuhvaća i druge modele (geotehničke, ekološke, ...). Jedna od definicija fizikalnog modela je:

Pod pojmom *fizikalni model* podrazumijevamo proces kojim se eksperimentalno proučava neka pojava (u vremenu i prostoru), a dobiveni rezultati se mogu prenijeti na svaki sličan proces, tj. takav proces čije su geometrijske, kinematičke i dinamičke veličine u prirodi na određeni način proporcionalne sa odgovarajućim veličinama na modelu.

Fizikalni model je maketa stvarnog sustava izrađena tako da se dominantne sile koje djeluju na sistem reproduciraju na modelu u odgovarajućem odnosu (u odnosu na stvarni sustav).

Fizikalni model je pomagalo koje služi da bi se predvidjelo (sagledalo) ponašanje nekog fizikalnog procesa. Model se može smatrati da je odgovarajući jedino ako je ispravno projektiran. Ako projekt nije korektan, tada je model u principu neispravan, i u tom slučaju, korištenje i najsofisticiranije opreme i metode mjerenja mogu poslužiti samo za povećanje točnosti krivog zaključka.

a) Ciljevi fizikalnog modela

Osnovni ciljevi fizikalnih modela su:
- definiranje kvantitavnih odnosa među pojedinim fizikalnim veličinama u strujanju fluida (npr. Darcyev, Chezyev,.. zakon)
- provođenje mjerenja kako bi se potvrdili ili opovrgli teoretski dobiveni rezultati
- provedba mjerenja za strujanja koja su previše složena da se mogla opisati teoretskim jednadžbama (npr. stabilnost lukobrana)

b) Prednosti fizikalnih modela

Osnovne prednosti fizikalnih modela su:
- u fizikalnom modelu se odvijaju isti procesi kao i u prirodi te ih nije potrebno zapisivati u matematičkoj notaciji te tako zapisane jednadžbe rješavati analitičkim ili numeričkim putem.
- mjerilo modela (mala veličina modela) omogućuje jednostavno i relativno jeftino prikupljanje podataka (fizikalnih veličina) u odnosu na prikupljanje u prirodi
- na fizikalnim modelima je moguće ponavljati pokuse i kontrolirani uvjeti
- prikladni su za prikupljanje eksperimentalnih podataka za kalibraciju i verifikaciju numeričkih modela.
- mogućnost obuhvaćanja složenih procesa koji se ne mogu istraživati ostalim metodama

c) Mane fizikalnih modela

- efekat mjerila (eng: scale effects) se javlja kod modela koji su manji od prototipa ako nije moguće simulirati sve relevantne procese (sile) u ispravnom odnosu jednu prema drugoj. Kao primjer se može navesti npr. kod modela priobalja u kojima su viskozne sile na modelu relativno veće nego na prototipu.

- efekat laboratorija nastaje kad se u laboratorijskim uvjetima ne može na odgovarajući način simulirati strujanje u prirodi (na prototipu). To može biti nemogućnost odgovarajućeg zadavanja rubnih uvjeta, nemogućnost nametanja svih dominantnih sila,...

2.2. Osnove fizikalnog modeliranja

Prilikom izrade fizikalnog modela potrebno je voditi računa o uvjetima sličnosti koje je potrebno zadovoljiti.

Hidraulički model je dakle fizikalni model na kojem se simulira strujanje vode. Fizikalni modeli u kojima se simulira opstrujavanje zraka se nazivaju aerodinamički modeli.

2.2.1 Uvjeti sličnosti

Postoje tri uvjeta sličnosti: geometrijski, kinematski i dinamički.

a) geometrijska sličnost

Geometrijska sličnost označava sličnost oblika. Dva toka su *geometrijski slična* ako za sve duljine na modelu i u prirodi vrijedi odnos:

$$L_R = \frac{L_p}{L_m} = \lambda$$

pri čemu je:

L_R	mjerilo dužina
L_p	vrijednost dužine u prirodi
L_m	vrijednost dužine na modelu

Slijedi da su sličnosti površina (A) i volumena (V) definirana sa mjerilima površina i volumena:

$$A_R = \frac{A_p}{A_m} = \frac{L_p^2}{L_m^2} = L_R^2 = \lambda^2$$

$$V_R = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p^3}{L_m^3} = L_R^3 = \lambda^3$$

U praksi je uobičajeno da se hidrotehnička oprema (npr. zapornice, preljevi, ...) ispituje u mjerilu 1: 5 – 1:30, modeli opstrujavanja oko pojedinih građevinskih objekata (npr. lukobrana, burobrana, ...) u mjerilu 1:30 – 1:100 a za modeliranje utjecaja pojedinih građevinskih objekata na okolinu (npr. modeliranje pronosa efluenta ispuštenih kroz podmorski ispust, širenja poplavnog vala uslijed loma brane,..) modeli u mjerilu 1:100 – 1:1000.

Prilikom zadovoljavanja geometrijske sličnosti često nije dovoljno da postoji sličnost oblika, već i hrapavost površina treba biti u odgovarajućem mjerilu. Za modele koji su umanjeni u odnosu na prototip, hrapavost se često ne može smanjiti u mjerilu modela osim ako se površina modela može izraditi puno glađa od prototipa. U tom slučaju se često pribjegava izradi distorziranih modela na kojima mjerilo za dužine (horizontalne dimenzije) nije jednako mjerilu za visine (vertikalne dimenzije). Strogo gledano, u takvim uvjetima nije zadovoljena geometrijska niti kinematička sličnost ali takovi modeli imaju određene prednosti pri modeliranju toka u otvorenim koritima.

b) Kinematička sličnost

Kinematska sličnost je sličnost kretanja. Pored geometrijske sličnosti svaki model na kojem se modelira strujanje fluida mora biti i kinematički sličan, odnosno svaka čestica fluida mora se nalaziti u odgovarajuće vrijeme u odgovarajućim točkama modela i prototipa. To će biti zadovoljeno ako postoji jedno mjerilo za vrijeme pri čemu vrijeme na modelu i na prototipu ne mora prolaziti istim tempom.

Odnos vremena u prirodi (T_p) i na modelu (T_m) definira mjerilo vremena

$$T_R = \frac{T_p}{T_m}$$

Model je dakle kinematički sličan sa prototipom ako postoji jedno mjerilo za vrijeme. Posljedica ovog uvjeta je da će strujne linije na modelu biti slične strujnim linijama na prototipu u odgovarajućim trenucima vremena, odnosno strujanje se odvija sinkronizirano.

Dva su toka kinematski slična ako je zadovoljen omjer brzina

$$v_R = \frac{v_p}{v_m} = \frac{L_p / T_p}{L_m / T_m} = \frac{L_p}{L_m}\frac{T_m}{T_p} = \frac{L_R}{T_R}$$

Mjerila za ubrzanje i protok glase

$$a_R = \frac{a_p}{a_m} = \frac{v_p / T_p}{v_m / T_m} = \frac{v_p}{v_m}\frac{T_m}{T_p} = \frac{L_R}{T_R^2}$$

$$Q_R = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{v_p \cdot A_p}{v_m \cdot A_m} = \frac{L_R}{T_R} L_R^2 = \frac{L_R^3}{T_R}$$

c) Dinamička sličnost

Dinamička sličnost podrazumijeva sličnost sila odnosno postojanje odgovarajućeg mjerila (omjera) sila:

$$\frac{F_M}{F_P} = F_R$$

Kako je sila definirana $F = m\ a = \rho\ V\ a$ može se zaključiti da ako pored geometrijske i kinematičke sličnosti postoji i sličnost gustoće fluida u svim točkama prostora, odnosno ako je u svakoj odgovarajućoj točki modela i prototipa zadovoljeno:

$$\frac{\rho_M}{\rho_P} = \rho_R$$

tada postoji i dinamička sličnost između modela i prirode. *Hidrodinamička sličnost* je dakle sličnost u kojoj su zadovoljena geometrijska, kinematička i dinamička sličnost.

Uvrštavajući usvojene omjere u Newton-ov zakon dobiva se opći zakon mehaničke sličnosti čime se osigurava dinamička sličnost modela i prototipa

$$F_R = m_R \cdot a_R$$

koji za stacionarno strujanje, gdje postoji samo konvektivna komponenta ubrzanja može pisati $a_R = L_R / T^2_R$ pa vrijedi

$$F_R = m_R \cdot \frac{v_R^2}{L_R} = \rho_R \cdot L_R^2 \cdot v_R^2$$

pri čemu indeks *R* označava odgovarajuće mjerilo. Odnos mjerila

$$\frac{F_R}{\rho_R \cdot L_R^2 \cdot v_R^2} = 1$$

odnosno

$$\frac{F_M}{\rho_M \cdot L_M^2 \cdot v_M^2} = \frac{F_P}{\rho_P \cdot L_P^2 \cdot v_P^2} = Ne$$

se zove Newton-ov kriterij dinamičke sličnosti i predstavlja osnovu za fizikalno modeliranje strujanja fluida.

Po Newton-ovom kriteriju u dinamički sličnim sistemima mora, među bilo kojim dvjema odgovarajućim silama postojati konstantan odnos $Ne_P = Ne_M$.

Na jednu česticu fluida djeluju u većini slučajeva više od dvije nezavisne sile pa nakon izbora mjerila za dužine i mjerila za gustoće, ostaje još da se izabere mjerilo za vrijeme tako da se zadovolji Newtonov kriterij samo za jedan par nezavisnih sila što znači da se fizikalnim modeliranjem mogu predstaviti strujanja fluida ako na gibanje čestica fluida djeluju dominantno dvije ili najviše tri sile. Ako na gibanje čestica fluida ravnomjerno djeluje više sila potrebno je dijeliti model na više dijelova u kojima su pojedine od tih sila dominantne i parcijalno modelirati strujanje.

Od važnijih dominantnih sila valja napomenuti:

Sile trenja

$$F_T = \tau \cdot A = \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial l} \cdot L^2 = \mu \cdot v \cdot L$$

Sile od promjene tlaka

$F_P = \Delta p \cdot A = \Delta p \cdot L^2$

Sile gravitacije

$F_G = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g$

Sile inercije za stacionarno strujanje (inercijalne sile uslijed konvektivnog ubrzanja)

$$F_K = m \cdot v \frac{\partial v}{\partial x} = \rho \cdot L^3 \cdot \frac{v^2}{L} = \rho \cdot L^2 \cdot v^2$$

d) Bezdimenzionalni brojevi

Bezdimenzionalni parametri označavaju odnose dominantnih sila i koriste se (u ovom slučaju) za definiranje mjerila, pri čemu bezdimenzionalni parametar treba biti isti na modelu i na prototipu.

Analizirajući odnose među pojedinim silama može se definirati 57 odnosa (Novak,1984) a u literaturi se spominje čak 180 bez dimenzionalnih Π-brojeva. U ovom materijalu će biti spomenuti samo neki važniji.

Strujanje na modelu i prototipu će biti dinamički slično ako je odnos dominantnih sila na modelu i prototipu isti u odgovarajućim točkama. Mogu se formirati slijedeći odnosi sila:

$$\frac{SILA\ \ INERCIJE}{SILA\ \ TRENJA} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{\mu \cdot v \cdot L} = \frac{v \cdot L}{\nu} = \mathrm{Re} \qquad \mathrm{Re}\ \textit{ynoldsov broj}$$

Reynoldsova sličnost se koristi kad promjena tlaka zavisi od sile trenja. Što je veća vrijednost Reynoldsovog broja to će biti manji utjecaj viskoznosti na strujnice, te će slučaj kad $Re \to \infty$ odgovarati strujanju u kojem viskoznost ne utječe na (koeficijente) otpora oblika. S druge strane, što je Reynoldsov broj manji, to je veći utjecaj viskoznosti te slučaj kad $Re \to 0$ odgovara strujanju u kojem su inercijalni efekti zanemarivi u usporedbi sa viskoznošću.

$$\frac{SILA\ \ INERCIJE}{SILA\ \ GRAVITACIJ\ E} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{v^2}{g \cdot L} = Fr \qquad \textit{Froudov broj}$$

Froude-ov kriterij sličnosti se koristi u slučajevima kad su dominantne sile gravitacije i sile inercije - to odgovara strujanju sa slobodnom površinom (istjecanje, preljevanje) u zonama malih gubitaka energije uslijed trenja.

$$\frac{SILA\ \ INERCIJE}{SILA\ \ TLAKA} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{p \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot v^2}{p} = \frac{1}{Eu} \qquad \textit{Eulerov broj}$$

Eulerova sličnost se koristi kad promjena tlaka nastaje pod djelovanjem inercijalnih sila - slučajevi lokalnih gubitaka energije ili izrazito turbulentnog strujanja u hidrodinamički hrapavim koritima. (U slučaju da ne dolazi do pojave kavitacije, Eulerov broj se može zanemariti odnosno ne treba voditi brigu o njemu).

$$\frac{SILA\ GRAVITACIJE}{SILA\ TRENJA} = \frac{\rho \cdot L^3 \cdot g}{\mu \cdot v \cdot L} = \frac{\rho \cdot g \cdot L^2}{\mu \cdot v} = St \qquad Stokesov\ broj$$

U slučajevima kada su inercijalne sile zanemarljive a sile viskoziteta i sile gravitacije dominantne tada Štoksov broj na modelu i na prototipu treba biti isti da bi postojala dinamička sličnost. (Primjer je taloženje sitnih čestica u fluidu-taložnice).

$$\frac{INERCIJALNE\ \ SILE}{POVRŠINSKI\ \ NAPONI} = \frac{v}{\sqrt{\sigma / \rho L}} = W \qquad Weberov\ broj$$

Kad prevladavaju utjecaji površinskih napona i inercijalnih sila, Weberov broj na modelu i prototipu treba biti isti. Uvjet da bi se javili površinski naponi je postojanje slobodnog vodnog lica pa je Weberov broj važan kod npr. modeliranja kapilarnog kretanja u tlu i kapilarnih valova. Što je vrijednost Weberovog broja manja, to je relativni utjecaj površinskih naprezanja veći obrnuto.

$$\frac{SILA\ TLAKA}{SILA\ TRENJA} = \frac{p \cdot L^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{p}{\rho \cdot g \cdot L} = I \qquad Hidraulicki\ pad$$

Struhalov broj je definiran kao:

$$St = \frac{fl}{v}$$

pri čemu je sa *f* označena frekvencija.

Cauchy-ev broj

$$C = \frac{\rho v^2}{E}$$

Froudov broj gustoće (eng: densimetric Froude number)

$$Fr_d = \frac{v}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g l}}$$

odnos inercije i uzgona (u problemima širenje oblaka efluenta kod podmorskih ispusta)

Mosonyi-evb broj

$$Mo = \frac{\nu v}{gl^2}$$

koji predstavlja odnos viskoznih i gravitacionih sila

Mach –ov

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{E/\rho}}$$

definira odnos inercijalnih i sila elastičnosti

Schields-ov –parametar

$$Sh = \frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho)gd}$$

koji opisuje pokretljivost nanosa.

Osim navedenih brojeva još se cijeli niz brojeva javlja u posebnim područjima modeliranja:
Bingham-ov – polagano tečenje viskoplastičnih materijala
Ekman-ov – meteorologija
Hedstrom – brzo tečenje viskoplastičnih materijala
Pecletov – pronos tvari uslijed difuzije
Rossby-ev kretanje atmosfere i oceana u velikim razmjerima
Schmidt-ov – tok sa pronosom količine gibanja i mase tvari
Scherwood-ov – pronos tvari usljed konvekcije

Efekat mjerila

Efekat mjerila je posljedica činjenice da nije moguće uvijek zadovoljiti sve bezdimenzionalne brojeve prilikom simuliranja strujanja na prototipu i na modelu. To je ujedno posljedica što se modeli formiraju na osnovu zadovoljavanja dominantnih sila, a druge se zanemaruju odnosno njihov odnos nije u odgovarajućem mjerilu.

Gornja definicija pokušava objasniti razliku između *savršenog* i *realnog* modela, gdje (često) gustoća i viskoznost nisu korektno umanjeni u odnosu na prototip i zbog toga neki bezdimenzionalni brojevi nisu isti na modelu i prototipu. To ima za posljedicu grešku koja nastaje zbog toga što neke manje važne sile nisu odgovarajuće reprezentirane na modelu.

Efekat laboratorija

Efekt laboratorija nastaje iz razloga što se prilikom formiranja fizikalnih modela moraju neki fizikalni procesi koji se odvijaju u prirodi na modelu zanemariti.

2.2.2 Uvjeti modeliranja toka u otvorenim koritima

Sile koje djeluju kod tečenja u otvorenim vodotocima su gravitacija, viskoznost i površinska napetost. Obzirom da je u promatranom slučaju strujanja dominantna gravitaciona sila, da bi model bio hidrodinamički sličan sa objektom koji će se izgraditi u prirodi, potrebno je zadovoljiti Froude-ov uvjet sličnosti. Froude-ov broj je bezdimenzionalni parametar koji predstavlja odnos sila inercije i gravitacionih sila, a dan je izrazom:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

pri čemu je :

v	brzina toka
g	ubrzanje gravitacije
L	geometrijska karakteristika toka

Ako se pretpostavi da su pri tečenju sa slobodnim vodnim licem dva toka (u prirodi i na modelu) geometrijski i kinematički slična, tražena parcijalna hidrodinamička sličnost će biti ispunjena ako su Froude-ovi brojevi za tok u prirodi (Fr_p) i Froude-ov broj na modelu (Fr_m) u svim odgovarajućim točkama identični. Ovaj uvjet se može pisati u obliku:

$$Fr_p = Fr_m$$

odnosno

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} \equiv \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}}$$

što daje omjer Froude-ovih brojeva

$$\frac{Fr_p}{Fr_m} = 1$$

iz čega proizlazi da je

$$\frac{\dfrac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}}}{\dfrac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}}} = \frac{v_p}{v_m} \sqrt{\frac{g_m}{g_p}} \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = 1$$

Usvajajući prije definirane odnose za duljine i brzine proizlazi

$$\frac{L_r}{T_r} \cdot 1 \cdot L_r^{-1/2} = 1$$

odnosno

$$L_r^{1/2} = T_r$$

Time je dobivena relacija mjerila dužina i vremena za modeliranje sa parcijalnom sličnošću po Froude-u.

Za strujanja koja su pod dominantnim utjecajem sila gravitacije (npr. tečenje sa slobodnim vodnim licem) zahtijeva se ispunjenje uvjeta geometrijske sličnosti i jednakost Froud-ovog broja na modelu i prototipu.

Posljedica usvojenog uvjeta je odnos brzina (uz pretpostavku da je ubrzanje gravitacije na modelu i u prirodi jednako) definiran slijedećim izrazom:

$$v_r = (g_r L_r)^{1/2} = L_r^{1/2}$$

što znači da je odnos brzina na fizikalnom modelu uz zadovoljavanje uvjeta Froud-ove sličnosti jednak drugom korijenu mjerila duljina. Na osnovu ove relacije se mogu izračunati ostali omjeri (vidi npr. Kobus 1980, Novak,1981. i tablica 2.1).

U hidraulici se često koriste fizikalni modeli tečenja sa slobodnim vodnim licem, u kojima značajnu ulogu imaju viskoznost, relativna hrapavost, Reynoldsov i Froud-ov broj.

Ovisnost koeficijenta linijskih gubitaka λ, o Reynoldsovom broju i o relativnoj hrapavosti je definirana Nikuradse-Moodyevim dijagramom. Ovaj odnos je valjan i za model i za prototip. Osim toga, modeli toka moraju zadovoljavati i sličnost po Froude-ovom kriteriju.

Ako se na modelu i prototipu koristi isti fluid (npr. voda), obično nije moguće istovremeno zadovoljiti kriterije i Froudove i Reynoldsove sličnosti.

	Kinematski / dinamički uvjeti	Nedistordirani model $n = 1$	Distordirani model $n > 1$
Brzine		$v_r = \sqrt{L_r}$	$v_r = \sqrt{\frac{L_r}{n}}$
Vrijeme	$t = \frac{L}{v}$	$t_r = L_r^{1/2}$	$t_r = L_r \cdot n^{1/2}$
Ubrzanja	$a = \frac{v}{t}$	$a_r = 1$	$a_r = \frac{1}{n}$
Nagibi	$I = \frac{h}{L}$	$I_r = 1$	$I_r = \frac{1}{n}$
Reynoldsov broj	$\mathrm{Re} = \frac{vh}{\nu}$	$\mathrm{Re}_r = L_r^{3/2}$	$\mathrm{Re}_r = \left(\frac{L_r}{n}\right)^{3/2}$
Sile	$F = m \cdot a$	$F_r = L_r^3$	$F_r = \frac{L_r^3}{n^2}$
Tlakovi	$p = \frac{F}{A}$	$p_r = L_r$	$p_r = \frac{L_r}{n}$
Protok	$Q = A \cdot v$	$Q_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = \frac{L_r^{5/2}}{n^{5/2}}$
Specifični protok	$q = v \cdot h$	$q_r = L_r$	$q_r = \left(\frac{L_r}{n}\right)^{1/2}$

Tablica 2.1 Odnosi pojedinih fizikalnih veličina na distordiranom i nedistordiranom modelelu i u prirodi.

U tokovima sa slobodnim vodnim licem, Froudova sličnost treba zadovoljavati geometrijsku sličnost vodnog lica. To za modele u kojima se koristi voda znači da je Reynoldsov broj na modelu uvijek manji nego na prototipu. Iz uvjeta Froudove sličnosti

$$v_r = L_r^{1/2}$$

proizlazi odnos Reynoldsovih brojeva

$$\mathrm{Re}_r = L_r^{3/2}$$

U modelima zasnovanim na Froudovoj sličnosti viskozne sile uvijek imaju relativno veće značenje nego u prirodi.

Ovo zapažanje nema većeg značaja sve dok je tečenje u prirodi i na modelu u turbulentno hrapavom režimu, tako da promjene vrijednosti Reynoldsovog broja ne uzrokuju promjenu vrijednost koeficijenta linijskih gubitaka. U slučaju širenja poplavnog vala Reynoldsov broj prirodnog toka se obično usvaja da je u hidraulički hrapavom području (Kobus, 1980).

Razmatranje o uvjetu zadovoljavanja Reynoldsovog broja možemo zaključiti konstatacijom da se u slučaju modeliranja širenja poplavnog vala i model i prototip nalaze u hidraulički hrapavom režimu, tako da iako Reynoldsov broj na modelu i prototipu nije isti, koeficijent linijskih gubitaka ima približno jednake vrijednosti.

Jedno od ograničenja prilikom korištenja fizikalnih modela je utjecaj površinskih napona. U većini hidrauličkih modela kratkih objekata je Weberov broj (odnos sila inercije i sila nastalih uslijed površinskih napona) dovoljno velik tako da se utjecaj površinskih naprezanja može zanemariti.

Gore navedeni razlozi često zahtijevaju manje mjerilo vertikalnih duljina nego mjerilo horizontalnih duljina. tj. izradu vertikalno distordiranog modela. U takvom slučaju dobiva se za odabranu horizontalnu površinu modela, proticajni presjek sa većom dubinom i većim gradientom, što ima prednosti kod mjerenja parametara toka. U isto vrijeme su i naprezanja koja se javljaju na stijenama a time i transportna sposobnost toka veća, što je često neophodno kod istraživanja pronosa vučenog nanosa. Valja imati na umu da distorzirani model uvijek znači i odstupanje od geometrijske sličnosti, tako da se zakoni sličnosti samo približno zadovoljavaju u distordiranom modelu. Distorzija može biti kompenzirana povećanjem hrapavosti modela tako da se vodne razine i protoci korektno simuliraju.

Na osnovu zakona kojim se određuje koeficijent otpora trenja u otvorenom koritu se može odrediti mjerilo koeficijenata linijskih gubitaka kao ($\lambda_r = I_r / Fr_r^2$), i uz usvajanje vrijednosti mjerila nagiba (I_r=1/n) i identičnosti Froudovih brojeva (Fr_r =1) dobiva se omjer koeficijenata linijskih gubitaka (λ_r= 1/n).

2.2.3 Distorzija

Pod pojmom distorzija se podrazumijeva svjesno napuštanje (zanemarivanje) nekih uvjeta sličnosti, često zbog složenosti (nemogućnosti) zadovoljavanja svih uvjeta sličnosti na modelu i na prototipu. Najčešće se koristi za pojam geometrijska distorzija, pri čemu su mjerila za vertikalne i horizontalne duljine različita.

Za opis vertikalno distorziranih modela će se koristiti slijedeće oznake

L_{rh} mjerilo za horizontalne dimenzije (duljina)

L_{rv} mjerilo vertikalnih dimenzija (visina)

Faktor distorzije je definiran izrazom:

$$n = \frac{L_{rh}}{L_{rv}}$$

Faktor distorzije n opisuje odnos horizontalnog i vertikalnog umanjenja, pri čemu je geometrija (oblik) korita u prirodi transformirana u geometriju modela.

Vrijednost n >1 odgovara vertikalno distordiranom modelu, dok nedistordirani model ima vrijednost n = 1. Zbog jednostavnosti zapisa mogu se usvojiti slijedeće oznake:

$$L_{rh} \equiv L_r \qquad i \qquad L_{rv} = \frac{1}{n} L_r$$

U literaturi se često geometrija modela opisuje mjerilom duljina L_r i faktorom distorzije n.

Kod distordiranih modela nema geometrijske pa tako neće biti niti kinematičke ni dinamičke sličnosti ali se može pokazati da se može postići sličnost između srednjih brzina, protoka i padova vodnog lica te se takova sličnost naziva *hidraulička sličnost*.

U vertikalno distordiranom modelu je odnos horizontalnih komponenti brzine v_r različit od odnosa vertikalnih komponenti brzine w_r:

$$\frac{v_p}{v_m} \equiv v_r \neq w_r \equiv \frac{w_p}{w_m}$$

Gornja jednadžba pokazuje da je korištenje distordiranih modela prihvatljivo (samo) kad je vertikalna komponenta brzine zanemarivo mala ($w \approx 0$).

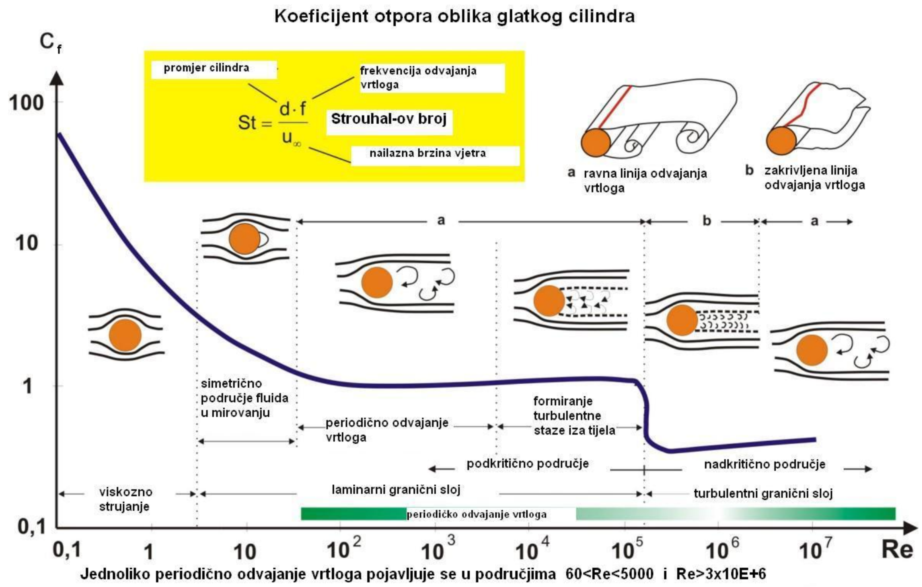
Neki ugledni autori poput Kobus-a i Novak- a daju generalnu smjernicu da distorzija na hidrauličkim fizikalnim modelima ne bi trebala biti veća od 5. Novak je ponovio istraživanja pronosa efluenta u Dee Estuary, nastalog kao posljedica rada podmorskog ispusta, prvobitno modeliranog od Ackers, Jaffrey (1975) na fizikalnom modelu sa mjerilom duljina L_r = 1500 i distorzijom n = 15, na fizikalnom modelu istih mjerila duljina i distorzijom 5. Budući da je u vrijeme ponovljenih istraživanja od Novaka ispust već bio izgrađen, pokazalo se da rezultati na njegovom modelu sa distorzijom 5 vrlo dobro odgovaraju mjerenju u naravi a što nije bio slučaj sa rezultatima prethodne analize na fizikalnom modelu sa distorzijom 15.

Sa druge strane Fischer i Imberger mišljenja su da distorzija može biti i 10 ukoliko se dovoljno pažnje pokloni dodatnim mjerama poput dodatne hrapavosti za stimulaciju dinamičkog miješanja. Njihova istraživanja dinamičkog miješanja polja temperature i saliniteta u priobalnim područjima (Grey's Harbor-Washington, Hudson Estuary, Delawere, San Francisco Bay) te polja mase upuštenog iz modelskih podmorskih ispusta (San Onofre, South Bay of Oakland Airport, Galveston Bay, Houston Ship Canal) na fizikalnim modelima sa mjerilima duljina u rasponu 800-1500 i distorzijama 4-10 pokazala su visoki stupanj sličnosti sa kasnije izmjerenim podacima u prirodi.

2.2.4 O zadovoljavanju Reynolsdovog uvjeta hidrodinamičke sličnosti

Kod izrade niza fizikalnih modela, vrlo često nije moguće zadovoljiti uvjete sličnosti po Froudu i po Reynoldsu, iako bi za vjerodostojnost rezultata to trebalo. U takovim modelima se često modelira na osnovu zadovoljavanja uvjeta Froudove sličnosti, dok se Reynoldsov broj postavlja uvjet da je iznad neke usvojene kritične vrijednosti.

Analizirajući opstrujavanje fluida oko nekog tijela se može uočiti da oblik strujnica bitno ovisi o brzini strujanja odnosno o Reynolsovom broju. Na doljnjoj slici je prikazan koeficijent otpora oblika za optjecanje oko valjka. Pri malim brzinama (malim Reynoldsovim brojevima) je opstrujavanje oko cilindra laminarno te nema pojave vrtloženja, dominantne su viskozne sile a koeficijent otpora oblika se smanjuje sa povećanjem brzine. Povećanjem brzine strujanja tako da Reynoldsov broj poprimi vrijednost 2-25 se počinje javljati vrtloženje iza valjaka. Daljnjim povećanjem Reynoldovog broja (Re = 60 do 5000) se ulazi u područje u kojem je periodično odvajanje vrtloga te je koeficijent otpora oblika konstantan. Daljnjim povećanjem brzine se formira turbulentna staza iza tijela a nakon $Re > 3 \cdot 10^6$ se ulazi u natkritično područje sa turbulentnim graničnim slojem u kojem je za sve vrijednosti Re strujna slika jednaka, a koeficijent otpora oblika ne mijenja vrijednosti.



Slika 2.1::1 Odnos koeficijenta otpora o Reynoldsovom broju

Svojstvo da se strujna slika ne mijenja nakon prelaska granične vrijednosti Reynoldsovog broja nam omogućava da modeliramo strujanje na način da se zadovolji Froudov uvjet hidrodinamičke sličnosti s time da je Reynoldsov broj iznad neke zadane kritične vrijednosti. Na taj način se mogu zadovoljiti spomenuta dva uvjeta hidrodinamičke sličnosti.

2.3 Zaključno o fizikalnim modelima

Na kraju priče o fizikalnim modelima, valja se podsjetiti da su modeli projektirani tako da daju dragocjene odgovore na pitanja postavljena pred inženjere projektante. Moramo biti svjesni činjenice da ne postoji potpuna sličnosti između modela i prototipa koja proizlazi iz činjenice da svi pripadni bezdimenzionalni brojevi nisu jednaki na modelu i na prototipu, odnosno da je model rađen na osnovu principa zadovoljavanja dominantnih uvjeta sličnosti dok se manje važni zanemaruju.

U slučaju da ne možemo kvantificirati spomenu grešku, što je i najčešći slučaj, tada moramo biti svjesni u kojem smjeru djeluje i biti sposobni odgovoriti na pitanje: da li smo na strani sigurnosti ili nam navedeno zanemarenje smanjuje faktor sigurnosti. Samo tada ćemo moći zaključiti da se modeli mogu **koristiti**, ponekad **isporučiti** ali uvijek ih treba **razumijeti**.

Literatura:

Novak P., Scaling Factors and Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Symposium on scale effects in modelling Hydraulic structures, IAHR, Technische Akademie Esslingen, September, 1984

Lončar; Disertacija