

XV vježba

Sila otpora oblika tijela u struji fluida

Tijelo koje se nade u struji fluida je izloženo djelovanju sila koje su posljedica neravnomjernog rasporeda tlakova kao i posmičnih naprezanja nastalih uslijed viskoznosti fluida i hrapavosti tijela. Uglavnom se spominju hidrodinamičke sile ako se tijelo nalazi u struji vode ili aerodinamičke sile ako se tijelo nalazi u struji zraka. U okviru ove vježbe će se ispitivati djelovanje vjetra na tijelo pa će se govoriti o aerodinamičnoj sili.

Za potrebe određivanja aerodinamičke sile je osim brzine i gustoće fluida potrebno poznavati površinu tijela okomito na vektor brzine fluida i koeficijente otpora oblika i trenja. U ovoj vježbi se na osnovu mjerenja u vjetrovnom tunelu određuje koeficijent otpora oblika.

Koeficijent otpora oblika za tijelo oblika kugle će biti određen eksperimentalno. Obzirom da koeficijent otpora ovisi o Reynoldsovom broju, mjerenjima će biti obuhvaćene tri kugle različitih dimenzija a svaka će biti ispitana za dvije različite brzine strujanja zraka.

Optjecanje fluida oko tijela

Strujna slika ovisi o brzini fluida odnosno o Reynoldsovom broju. Na slici 15.1 je prikazano optjecanje fluida oko valjka za različite brzine optjecanja, odnosno za različite Reynoldsove brojeve. Reynoldsov broj je definiran jednadžbom:

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad \dots(15.1)$$

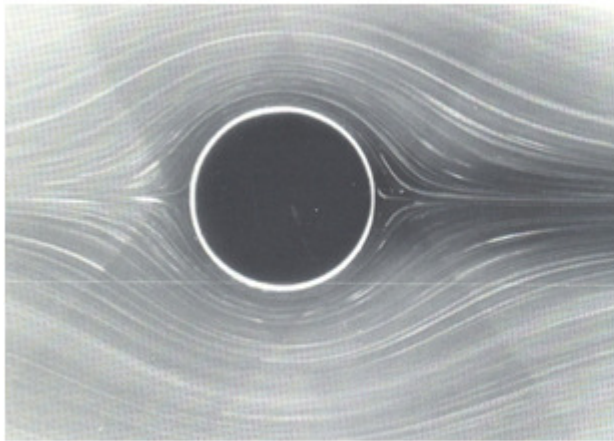
pri čemu je:

v - brzina strujanja fluida oko nepomične prepreke

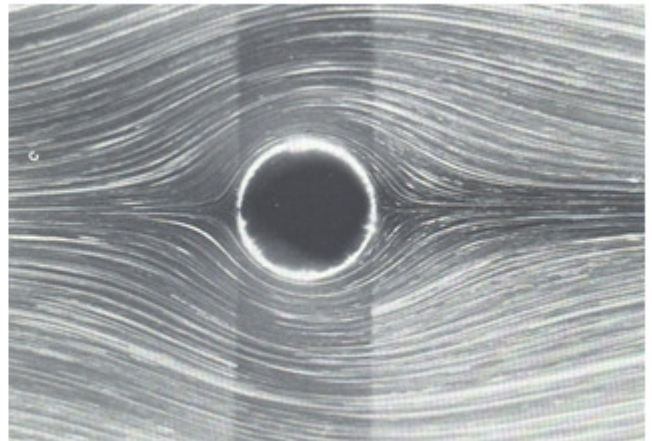
L - karakteristična dimenzija

ν - kinematički koeficijent viskoznosti

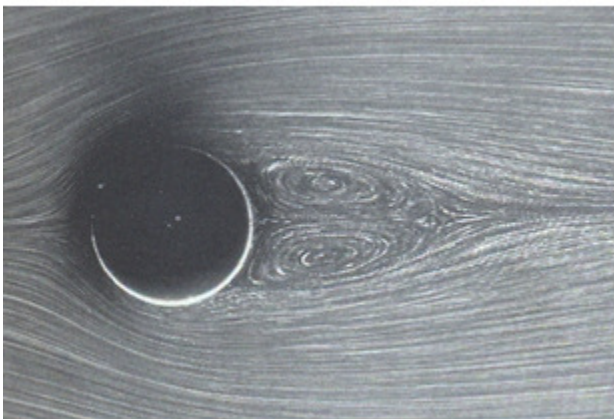
Kod malih brzina je strujanje laminarno te nema pojave vrtloga za zavjetrinske strane tijela, strujna slika ispred i iza valjka je gotovo simetrična (Slika 15.1). Povećavanjem brzine optjecanja uočava se narušavanje simetričnosti strujne slike ispred i iza valjka (Slika 15.2). Daljnjim povećanjem brzine optjecanja uočava se odvajanje graničnog sloja u tzv. točkama odvajanja i pojavljuju se vrtlozi iza valjka (Slika 15.3). Kod razmjerno velikih brzina vrtlozi u odvojenom graničnom sloju gube simetriju, a kinematička slika iza valjka postaje poremećena u jako dugom području (Slika 15.4). Sa povećanjem brzine optjecanja odnosno Reynoldsovog broja strujna slika se i dalje mijenja što će za posljedicu imati različit raspored tlakova po oplošju tijela a time i vrijednosti koeficijenta otpora oblika. Drugim riječima rečeno, koeficijent otpora oblika će biti u funkciji Reynoldsovog broja, osim za potpuno razvijenu turbulenciju u strujanjima iznad kritičnog Reynoldsovog broja.



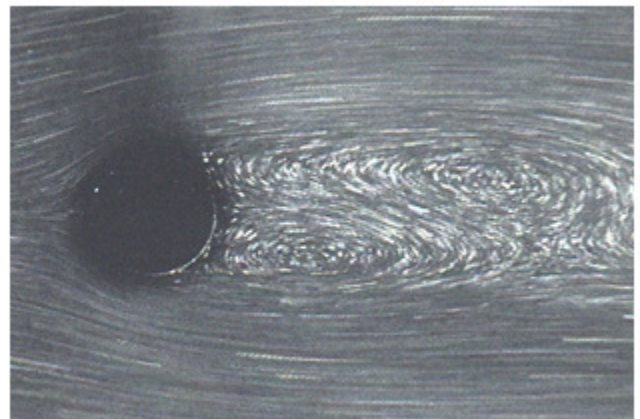
Slika 15.1 $Re = 0.038$, glicerin, $v = 0.15$ cm/s
promjer valjka 1 cm



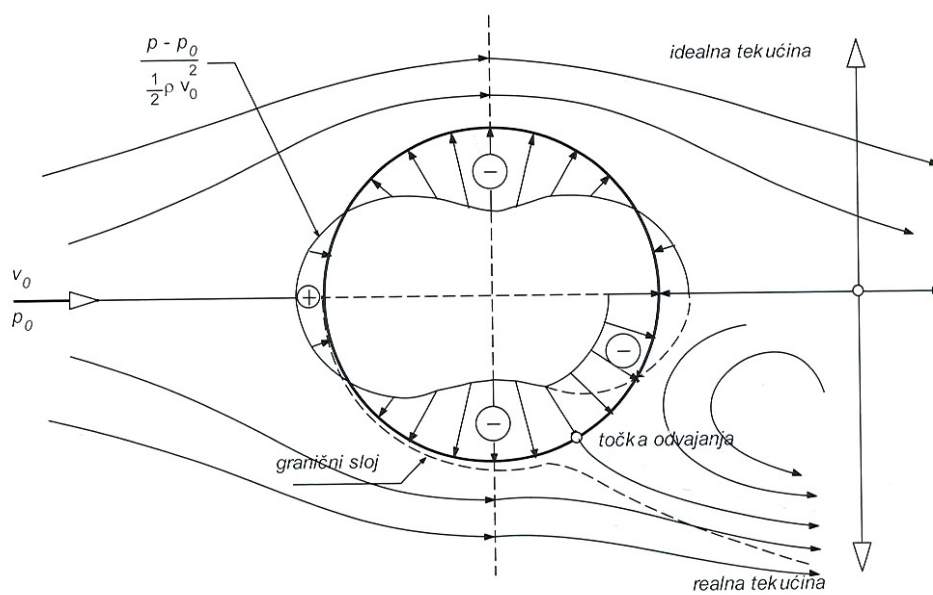
Slika 15.2 $Re = 1.1$, glicerin-voda, $v = 0.2$ cm/s
promjer valjka 1 cm



Slika 15.3 $Re = 26$, voda, $v = 0.25$ cm/s
promjer valjka 1 cm



Slika 15.4 $Re = 55$, voda, $v = 0.55$ cm/s
promjer valjka 1 cm



Slika 15.5 Slika strujanja fluida oko valjka (Jović, 2006)

Prilikom optjecanja fluida oko valjka dolazi do neravnomjerne raspodjele hidrodinamičkih tlakova po njegovom plaštu. Na gornjem dijelu slike 15.5 prikazane su strujnice i raspodjela tlaka po plaštu valjka za optjecanje u idealnoj tekućini, a na donjoj polovici slike shematski je prikazano optjecanje u realnoj tekućini na kojoj je prikazano odvajanje graničnog sloja, strujna slika i raspodjela tlaka po valjku.

Duž svake strujnice mora biti zadovoljena Bernoullieva jednadžba:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = const \quad \dots (15.2)$$

Prilikom opstrujavanja fluida oko kugle brzine duž strujnice u neposrednoj blizini tijela dolazi do promjena brzina a time i tlakova. U bilo kojoj točki na plaštu valjka se tlak može izraziti u bezdimenzionalnom obliku:

$$f_p = \frac{p - p_p}{\frac{1}{2}\rho v_o^2} \quad \dots (15.3)$$

pri čemu je:

- f_p – bezdimenzionalna tlačna funkcija (relativni tlak)
- p – tlak u promatranoj točki na plaštu tijela
- p_p – tlak neporemećenog strujanja tj. ambijentalni tlak
- v_o – brzina neporemećenog strujanja tj. dolazna brzina

Integracijom tlaka preko površine tijela dobije se ukupna sila koja se može razdijeliti na komponentu u smjeru toka i okomito na njega. Obzirom da je promatrano tijelo (kugla) osnosimetrično, komponente okomito na smjer strujanja se poništavaju pa je rezultanta jednaka nuli. Sila otpora oblika F_D se može definirati:

$$F_D = \int_A (p - p_p) dA$$

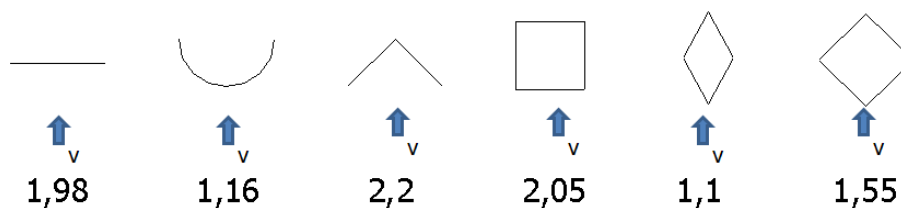
Koeficijent otpora oblika se može izraziti pomoću jednadžbe:

$$C_D = \frac{F_D}{\rho A \frac{v^2}{2}} \quad \dots (15.4)$$

pri čemu je:

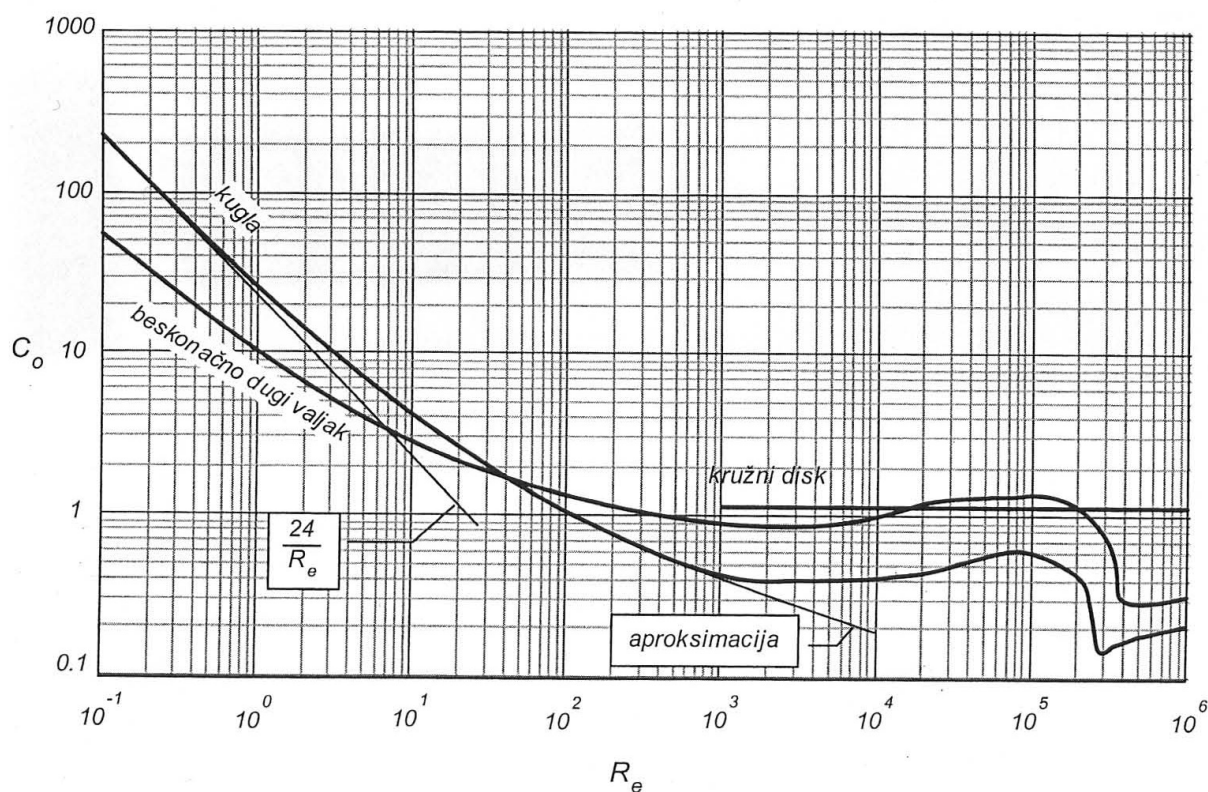
- C_D - koeficijent otpora oblika [1]
- ρ - specifična gustoća fluida [kg/m³]
- A - površina tijela okomito na smjer strujanja [m²] (Za kuglu je $r^2\pi$).

Orijentacione vrijednosti koeficijenta otpora oblika za neke poprečne presjeke u području potpuno razvijene turbulencije su prikazane na slici 15.6.



Slika 15.6: Dvodomenzionalne vrijednosti C_D -a za poprečne presjeka sa stabilnim točkama odvajanja [Smith and Bertin](pod pojmom dvodimenzionalne vrijednosti se podrazumijeva da je profil beskonačno dugačak)

Osim o obliku poprečnog presjeka koeficijent otpora oblika ovisi i o Reynoldsovom broju (slika 15.7)

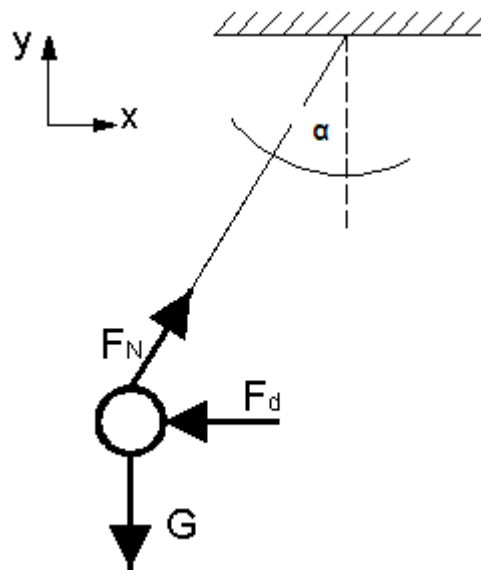


Slika 15.7: Ovisnost koeficijenta otpora oblika o Reynoldsovom broju za disk i kuglu – 3D modeli

Tijek mjerenja

U okviru ove vježbe će se koeficijent otpora oblika kugle određivati mjerenjem u vjetrovnom tunelu. Tijelo oblika kugle je obješeno na strop vjetrovnog tunela s mogućnošću mjerenja nagiba obješene kugle.

Na slici 15.8 shematski je prikazana obješena kugla oko koje opstrujava zrak brzinom v . Prilikom opstrujavanja zraka, pojavljuje se sila na tijelo koja uzrokuje otklon niti (na kojoj je tijelo obješeno) od vertikale. Zbog simetrije tijela usvojit će se da ne postoje aerodinamičke sile okomito na smjer djelovanja vjetra. Sile trenja će se zanemariti. Uz silu otpora oblika na tijelo djeluje i sila napetosti niti (F_N), te gravitacija (G).



Slika 15.8 Shematski prikaz obješene kugle u vjetrovnom tunelu

F_N – sila napetosti niti (sila kojom uže djeluje na kuglu)

G – sila teža u središtu kugle

F_d – sila kojom vjetar djeluje na kuglu

α – kut otklona kugle

U nastavku rada se uvodi indeks d za konkretne vrijednosti u okviru laboratorijske vježbe (C_d je koeficijent otpora oblika dobiven na modelu) i D za vrijednosti koje su objavljene u literaturi (C_D je koeficijent otpora oblika objavljen u literaturi).

Sila otpora oblika jednaka je:

$$F_d = C_d \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \dots (15.5)$$

pri čemu je:

F_d - sila otpora na modelu [N]

C_d - koeficijent otpora [1]

ρ - specifična gustoća fluida [kg/m^3]

A - površina tijela [m^2]

v - konstantna brzina fluida [m/s], u ovom eksperimentu kreće se od 0,1 do 15 m/s

Rastavljajući komponente sila na x i y komponente dobiva se izraz za koeficijent otpora oblika::

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad F_N \sin \alpha - F_d = 0 \quad \dots (15.6)$$

$$\sum F_y = 0 \quad \rightarrow \quad F_N \cos \alpha - m \cdot g = 0 \quad \rightarrow \quad F_N = \frac{m \cdot g}{\cos \alpha} \quad \dots (15.7)$$

$$F_d = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} = m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad \dots (15.8)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot m \cdot g} \quad \dots (15.9)$$

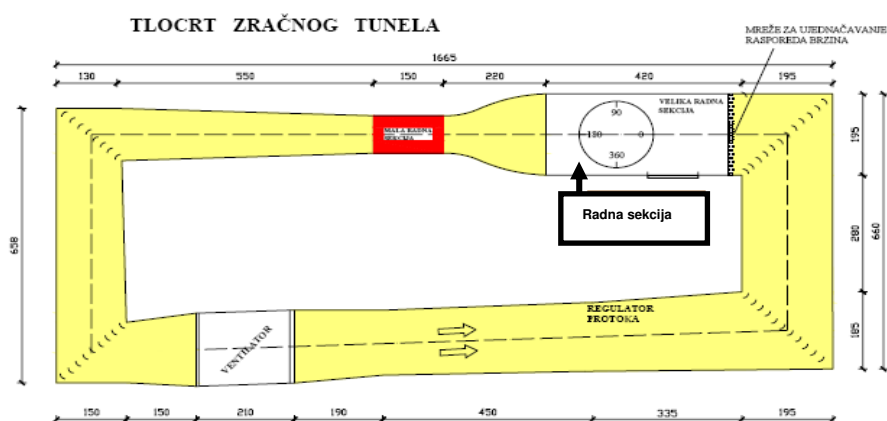
$$C_d = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot 2 \cdot m \cdot g}{A \cdot \rho \cdot v^2} \quad \dots (15.10)$$

Temperatura zraka u vjetrovnom tunelu se mijenja ovisno o vanjskoj temperaturi kao i o uvjetima rada u tunelu (tijekom rada se zrak u tunelu zagrijava do ravnotežnog stanja). S promjenom temperature se mijenjaju i karakteristike zraka (Tablica 15.1).

Tablica 15.1 Promjena nekih svojstava zraka s temperaturom kod atmosferskog tlaka

T	Gustoća ρ	Dinamička viskoznost: μ	Kinematička viskoznost: ν
°C	kg/m ³	kg/m·s	m ² /s
-40	1.52	14,94 x 10 ⁻⁶	9,83 x 10 ⁻⁶
-20	1.40	15,92x 10 ⁻⁶	11,37 x 10 ⁻⁶
0	1.29	17,05 x 10 ⁻⁶	13,22 x 10 ⁻⁶
20	1.20	18,15 x 10 ⁻⁶	15,13 x 10 ⁻⁶
40	1.12	19,05 x 10 ⁻⁶	17,01 x 10 ⁻⁶
60	1.06	19,82x 10 ⁻⁶	18,7 x 10 ⁻⁶
80	0.99	20,65 x 10 ⁻⁶	20,86 x 10 ⁻⁶
100	0.94	21,85 x 10 ⁻⁶	23,24 x 10 ⁻⁶
120	0.90	23,20 x 10 ⁻⁶	25,78 x 10 ⁻⁶

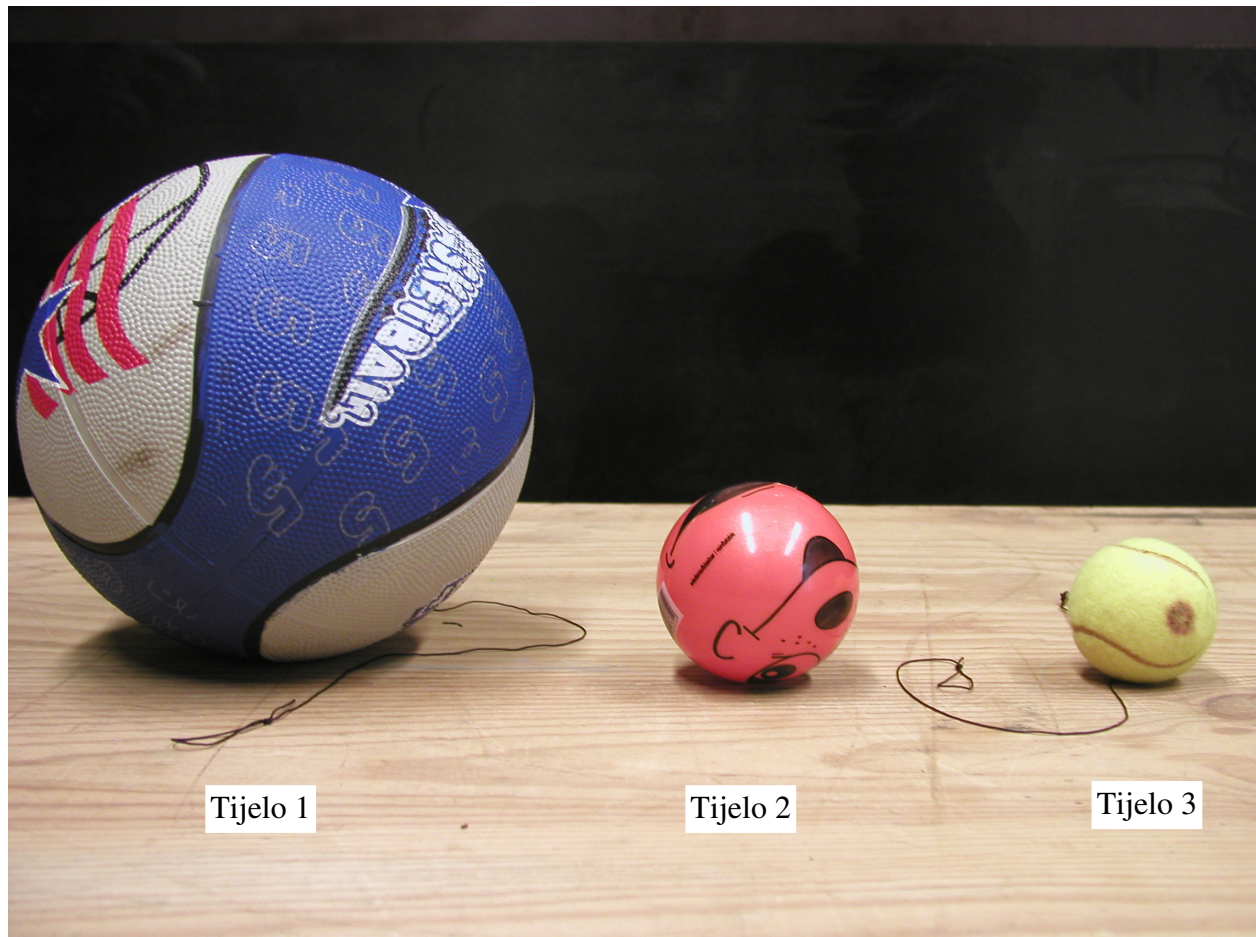
Na osnovu očitane vrijednosti kinematskog koeficijenta viskoznosti, poznatog promjera i usvojene brzine vjetra se može pomoću jednadžbe 15.1 izračunati Reynoldsov broj. Za izračunati Reynoldsov broj se iz tablice na slici 15.7 može očitati koeficijent otpora oblika.



Slika 15.9 Tlocrt vjetrovnog tunela Građevinskog fakulteta u Zagrebu

Da bi se koeficijent otpora odredio na osnovu mjerenja u vjetrovnom tunelu (Slika 15.9) potrebno je objesiti ispitivanu kuglu (na raspolaganju su tri različite kugle) na za to predviđeni mehanizam, zatvoriti vrata tunela i pustiti tunel u pogon te namjestiti željenu brzinu vjetra (treba

mjeriti pri dvije brzine cca. 6 m/s i 12 m/s). Nakon uspostavljanja stacionarnog strujanja, očita se kut otklona kugli. Postupak se ponavlja za različite brzine strujanja zraka. Vaganjem i mjerenjem promjera pomoću pomične mjerke dobit će se svi parametri s kojima se može izračunati koeficijent otpora oblika (jednadžba 15.10).



Slika 15.10 Kugle na koje se mjeri koeficijent otpora oblika

Za lakšu obradu rezultata se može koristiti tablica 15.2.

Tablica 15.2 Tablica za unos očitanih vrijednosti

	v	d	A	m	ν	Re	ρ zraka	g	α	Izračunato	Dijagram
	[m/s]	[m]	[m ²]	[kg]	[m ² /s]	[1]	[kg/m ³]	[m/s ²]	[°]	C_d	C_D
Tijelo 1		0.238		0.575	0.00001513		1.2	9,81			
Tijelo 2		0.093		0.056	0.00001513		1.2	9,81			
Tijelo 3		0.066		0.062	0.00001513		1.2	9,81			

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Diplomski studij

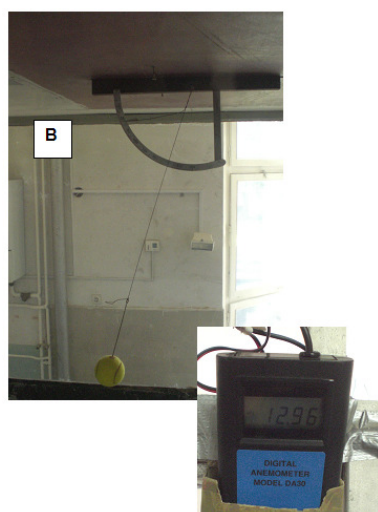
Ak.god.

Predmet: HIDRAULIKA

Student :

Mat.broj :

Zadatak 15: Sila otpora oblika tijela u struji fluida



Kutomjer

Nit užeta

Kugla

Zadani su parametri ispitivanih tijela

Tijelo br.	Promjer (mm)	Masa (kg)
1	238	0.575
2	93	0.056
3	66	0.062

Izračunajte koeficijente otpora oblika za dvije različite brzine strujanja i usporedite s podacima objavljenim u literaturi.

Zadano:

Pregledao:

Rok predaje: