

## **PLAN PROVOĐENJA LABORATORIJSKIH VJEŽBI IZ MEHANIKE TEKUĆINA**

### **UVOD**

U ovim materijalima daje se detaljan plan provođenja laboratorijskih vježbi, koje za razliku od auditornih vježbi, nisu obavezne već se studenti dobrovoljno prijavljuju za njihovo provođenje.

Svrha laboratorijskih vježbi je primjena teoretskih i praktičkih metoda i postupaka te upoznavanje opreme hidrotehničkog laboratorija, na razini gradiva kolegija *Mehanika tekućina* koje se predaje na Građevinskom fakultetu u Zagrebu u 3. semestru preddiplomskog studija.

Laboratorijske vježbe sastoje se od samostalne pripreme studenata prema dobivenim uputama, provođenja laboratorijskih mjerenja te prikaza izmjerenih podataka u formi sažetog izvješća. Vježbe se realiziraju u jednom posjetu hidrotehničkom laboratoriju u trajanju od jednog nastavnog sata, u 15. tjednu nastave, a prema rasporedu koji će biti pravovremeno definiran. Laboratorijske vježbe obavljaju se u timovima sastavljenim od dva studenta, te se očekuje ravnopravna podjela zadataka unutar tima koju studenti samostalno dogovaraju (priprema za provođenje vježbe, proces mjerenja, izrada izvješća o mjerenju). Svi članovi tima obavezni su prisustvovati predviđenim laboratorijskim vježbama.

Laboratorijske vježbe studenti će moći obaviti tek nakon odslušanog gradiva na predavanjima i vježbama, tj. u 15. tjednu nastave.

### **STUDENTSKI TIMOVI**

Za provođenje vježbi studenti su podijeljeni u grupe od dva člana. Međusobnim dogovorom studenti raspoređuju zadatke na provedbi laboratorijske vježbe.

Nakon provedenih mjerenja na laboratorijskim modelima, potrebno je izraditi kratko izvješće o provedenim mjerenjima.

### **UPUTE ZA IZRADU IZVJEŠĆA O PROVEDENIM LABORATORIJSKIM MJERENJIMA**

Rezultate laboratorijskih vježbi potrebno je prezentirati u obliku koji prikazuje opis problema, opis metode mjerenja i prikaz te komentar dobivenih rezultata. Sažeto izvješće potrebno je napisati na najviše 3 lista A4 formata (prema dobivenom predlošku).

Sadržaj izvješća (detaljnije u prilogu):

- autori (imena i prezimena, JMBAG studenata),
- naslov teme (vježbe),
- datum i vrijeme provođenja mjerenja te dodijeljena grupa,
- svrha mjerenja (2-3 rečenice),
- teoretski prikaz problema (nekoliko rečenica),
- opis modela (vlastito izrađenom fotografijom ili grafičkim prikazom),
- opis mjerenja,
- prikaz dobivenih rezultata mjerenja komentar,
- kratak zaključak.

### **PREDAJA IZVJEŠĆA**

Izvješće o provedenim laboratorijskim mjerenjima predaje se najkasnije tri radna dana nakon obavljenih laboratorijskih mjerenja. Za jedan tim (tj. za oba studenta) predaje se samo jedno izvješće, te im se evidentira predano izvješće kao dodatna aktivnost.

Predano izvješće se kontrolira i boduje s 10 bodova, a dobiveni bodovi se pribrajaju bodovima ostvarenim na kolokvijima.

**PLAN PROVEDBE LABORATORIJSKIH VJEŽBI (NA BAZI GRUPE OD 24 STUDENATA):**

STUDENT R.B.	TEMA LABORATORIJSKE VJEŽBE
1	LINIJSKI I LOKALNI GUBICI – STACIONARNO TEČENJE U SUSTAVU POD TLAKOM
2	
3	PRELIJEVANJE PREKO ŠIROKOG PRAGA
4	
5	PRELIJEVANJE PREKO PRELJEVA PRAKTIČNOG PROFILA
6	
7	ISTJECANJE KROZ MALI I VELIKI OTVOR
8	
9	ISTJECANJE ISPOD USTAVE I FORMIRANJE VODNOG SKOKA
10	
11	PROCJEĐIVANJE KROZ POROZNU SREDINU
12	

**OPSEG POJEDINE VJEŽBE (DETALJNIJE U OPISU SVAKE VJEŽBE)**

VJEŽBA	TEMA VJEŽBI	ZADATAK
VJEŽBA 1	LINIJSKI I LOKALNI GUBICI – STACIONARNO TEČENJE U SUSTAVU POD TLAKOM	Mjerenje tlaka prije otvaranja zasuna; mjerenje izlazne brzine pomoću Pitotove cjevčice kod potpuno otvorenog zasuna te izračun brzine istjecanja; mjerenje tlakova u pojedinim piezometrima s izračunom tlakova. Nacrtati piezometarsku i energetska liniju u odabranom mjerilu za potpuno otvoren zasun. Obratiti pozornost na tlakove u karakterističnim točkama cjevovoda. Usporediti izmjerenu piezometarsku liniju s teoretski pretpostavljenom.
VJEŽBA 2	PRELIJEVANJE PREKO ŠIROKOG PRAGA	Regulacijom zapornice uspostaviti normalan vodni skok i izmjeriti dubinu vode na pragu, prvu i drugu spregnutu dubinu. Usporediti izmjerenu $h_{kr}$ nad širokim pragom s rezultatima prema teoretskoj formuli. Izračunati protok pomoću Thomsonovog preljeva.
VJEŽBA 3	PRELIJEVANJE PREKO PRELJEVA PRAKTIČNOG PROFILA	Regulacijom zapornice uspostaviti normalan vodni skok te izračunati protok preko preljeva (usvojiti $m=0,429$ ), izmjeriti prvu i drugu spregnutu dubinu. Izračunati protok pomoću Thomsonovog preljeva.
VJEŽBA 4	ISTJECANJE KROZ MALI I VELIKI OTVOR	Na manjem otvoru modela odrediti brzinu istjecanja, odrediti koeficijent brzine, koeficijent kontrakcije i koeficijent protoka, te izračunati protok pomoću Thomsonovog preljeva.
VJEŽBA 5	ISTJECANJE ISPOD USTAVE I FORMIRANJE VODNOG SKOKA	Mjerenje brzinske visine pomoću Pitotove cjevčice, za odabrani stupanj otvorenosti ustave, formirati normalni, odbačeni i potopljeni vodnog skok. Izračunati protok pomoću dvije metode po slobodnom izboru.
VJEŽBA 6	PROCJEĐIVANJE KROZ POROZNU SREDINU	Mjerenje tlakova na tri različita položaja piezometara (12 piezometara), crtanje piezometarske linije za odabrani položaj piezometra. Uočiti razlike razina vode u piezometrima i gornje, te donje vode.

# **PRILOG 1: PRIMJER IZVJEŠĆA O PROVEDENIM MJERENJIMA**

# RADIJALNO STRUJANJE PREMA ZDENCU

AUTORI: Ana Anić (JMBAG: 0123456789), Ivo Ivić (JMBAG: 0012345678)

Datum i vrijeme provođenja vježbe: 15.01.2016. od 13.15 do 14.00 sati  
Broj dodijeljene grupe laboratorijske vježbe: B-2-7

## 1. SVRHA MJERENJA

Mjerenjem na fizikalnom modelu zdenca određuje se oblik vodnog lica te raspored tlakova po dnu zdenca. Pokusom se također određuje koeficijent vodopropusnosti filtracijskog materijala  $k$ , a regulacijom protoka prema zdencu uočava se pojava *vrelne plohe*.

## 2. TEORETSKI PRIKAZ PROBLEMA

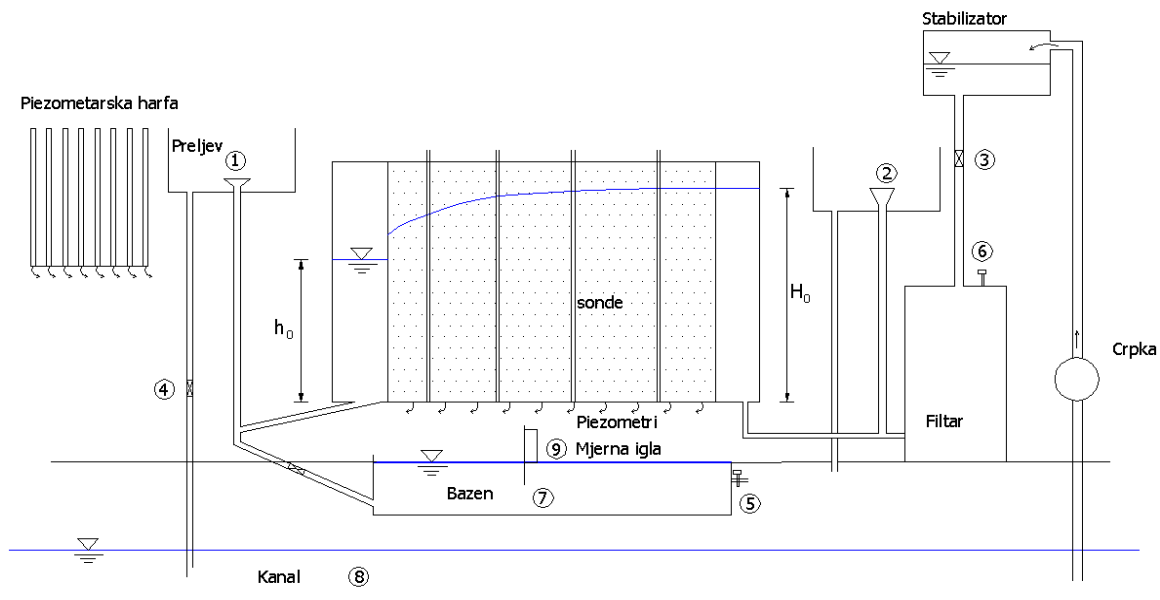
Za potrebe određivanja koeficijenta propusnosti geološke sredine u okolini zdenca mogu se provesti stacionarna ili nestacionarna pokusna crpljenja. U slučaju stacionarnog pokusa koji će se provesti u okviru ovih vježbi crpi se konstantna i izmjerena količina vode. Pri crpljenju dolazi do smanjenja razina vodnog lica u okolini zdenca što se prati na piezometrima postavljenim u okolini zdenca. Za geološki profil kroz koji voda radijalno pristrujava prema zdencu usvajaju se pretpostavke o horizontalnosti toka (Dupuitova pretpostavka) i o homogenosti koeficijenta filtracije  $k$ . Prihvatljivost pretpostavke o horizontalnosti toka narušava se s približavanjem položaju crpljenja (zdenca).

## 3. OPIS MODELA

Na slici 1 prikazan je model zdenca koji se nalazi u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Modelom je tlocrtno obuhvaćena 1/12 kruga oko zdenca (segment  $\alpha=30^\circ$ ). Raspored sonde i piezometara je shematski prikazan na hidrauličkoj shemi modela na slici 2.



Slika 1. Model zdenca



Slika 2. Hidraulička shema modela

#### 4. OPIS PROVEDENOG MJERENJA NA FIZIKALNOM MODELU

Prije izvođenja pokusa, očitaju se razine u piezometrima pri horizontalnoj razini vode (tzv. nulta očitavanja). Nakon ove pripreme, simulira se crpljenje iz zdenca pomoću nizvodnog zasuna (oznaka 4 na slici 2.). Na temelju vrijednosti dobivenih pokusom određuje se protok, piezometarska linija na dno modela i linija vodnog lica, te koeficijent vodopropusnosti. Mjerenje protoka  $Q$  se vrši volumetrijski, gdje se kao kontrolni volumen koristi bazen (oznaka 7 na slici 2.), tlocrtne površine  $A=5.10 \text{ m}^2$ .

#### 5. PRIKAZ DOBIVENIH REZULTATA

U tablici 1. prikazane su izmjerene vrijednosti piezometarskih kota tlačnih visina na dno modela, a na slici 3. je grafički prikaz dobivene piezometarske linije.

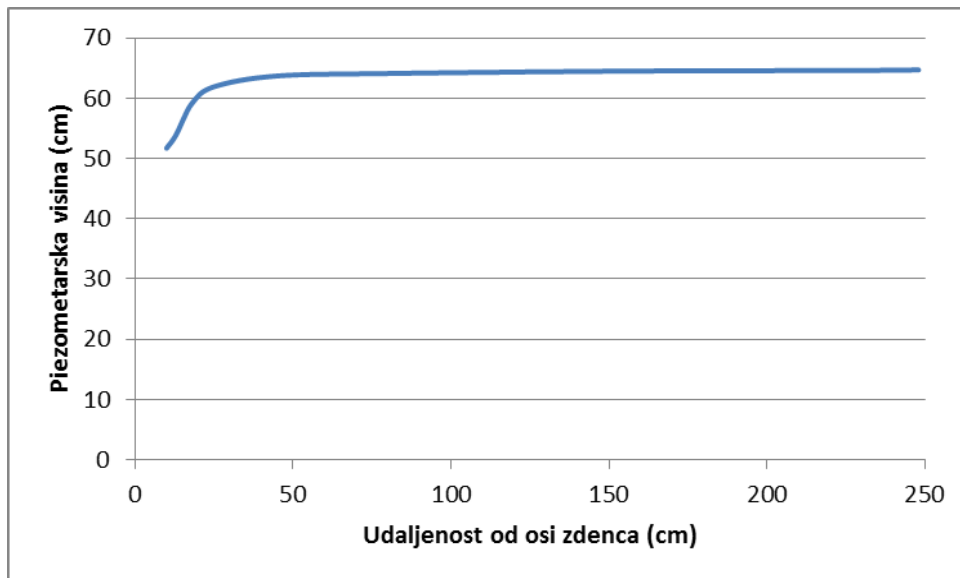
Tablica 1. Izmjerene vrijednosti piezometarskih kota na dno modela (primjer)

$r_i$ (cm)	10	13	18	25	45	80	155	225	248
$h_i$ (cm)	51,7	53,9	59,1	61,9	63,7	64,1	64,5	64,6	64,7

Jednadžba za računanje stacionarnog protoka prema zdencau se može napisati u obliku:

$$Q = 12A \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

pri čemu je:  $Q$ .....protok prema zdencau za priljev punog kruga ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $A$ .....površina mjernog bazena ( $A=5,10 \text{ m}^2$ )  
 $\Delta h$ ...porast razine vode u bazenu za vrijeme  $\Delta t$  (m)  
 $\Delta t$ ...trajanje volumetrijskog mjerenja protoka (s)



Slika 3. Grafički prikaz dobivene piezometarske linije

Koeficijent vodopropusnosti  $k$  se može izraziti kao:

$$k = \frac{Q \cdot \ln(R/r_0)}{\pi \cdot (H_0^2 - h_0^2)} \quad (2)$$

pri čemu je:  $Q$ .....protok prema zdencu ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $R$ .....udaljenost od osi zdenca do piezometra (m)  
 $r_0$ .....radijus zdenca (m)  
 $H_0$ .... visina piezometarske linije na udaljenosti  $R$  od osi zdenca (m)  
 $h_0$ .... visina vode u zdencu (m)

Količina vode koja dotječe u zdenac pri stacionarnom režimu, na osnovu volumetrijske metode, određena je prema jednadžbi (1), te iznosi  $0,0081 \text{ m}^3/\text{s}$ . Koeficijent filtracije pijeska koji je izračunat prema jednadžbi (2) iznosi  $k=0,017 \text{ m/s}$ .

## ZAKLJUČAK

U blizini zdenca, pri većim sniženjima, nije ispunjena Dupuitova hipoteza vertikalnih piezometarskih ekvipotencijala, stoga se u tom području pripadno rješenje za vodno lice - tzv. *Dupuitova parabola* ne podudara sa stvarnim položajem vodnog lica, sve do stanovite udaljenosti od osi zdenca. Dupuitova parabola se nalazi ispod vodnog lica, i predstavlja ustvari piezometarsku liniju tlačnih visina na dno modela (nepropusna podina).

## **PRILOG 2: OPIS LABORATORIJSKIH VJEŽBI**

## VJEŽBA 1- LINIJSKI I LOKALNI GUBICI – STACIONARNO TEČENJE U SUSTAVU POD TLAKOM



Na modelu koji se sastoji od spremnika iz kojeg voda utječe u cijev promjenjivog poprečnog presjeka s nizom koljena i zasunom te slobodnim istjecanjem na kraju mjeri se promjena piezometarske linije duž strujne cijevi.

Na osnovu mjerenja tlaka u pojedinim protjecajnim profilima i brzine izmjerene pomoću Pitotove cijevi na izlazu iz promatrane dionice mogu se nacrtati piezometarska i energetska linija.

### POSTUPAK MJERENJA:

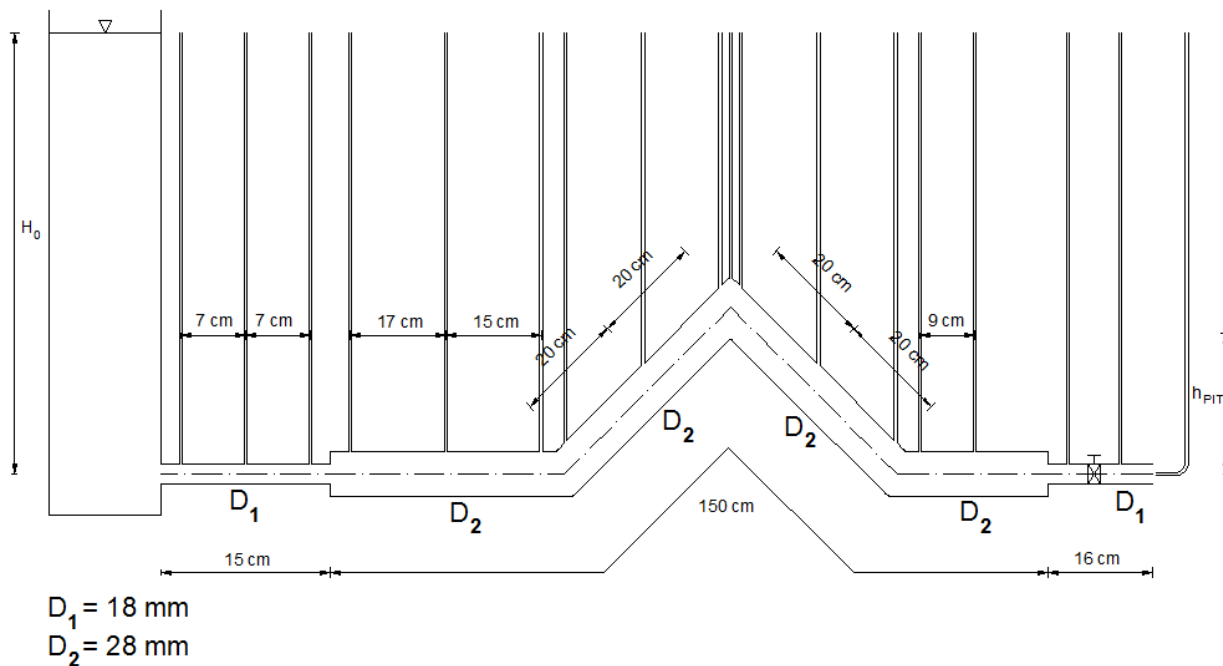
1. Uključi se pumpa na modelu koju će napuniti spremnik i cijevi vodom. Zasun je na kraju cjevovoda još uvijek zatvoren. Potrebno je za situaciju sa zatvorenim zasunom izmjeriti tlak u cjevovodu te ga zabilježiti.
2. Otvara se zasun do potpune otvorenosti i čeka se uspostava stacionarnog režima tečenja kroz cijevni sustav.
3. Na kraju cjevovoda pomoću ugrađene Pitotove cijevi izmjeri se brzinska visina  $h_{PIT}$  pomoću koje se izračuna izlazna brzina koristeći izraz:

$$v_1 = \sqrt{2gh_{PIT}}$$

4. Protok kroz cijev se izračuna na osnovu jednadžbe:  $Q = v_1 \cdot \frac{D_1^2 \pi}{4}$
5. Na temelju poznatog protoka i promjera cijevi manjeg ( $D_1=18$  mm) i većeg ( $D_2=28$  mm) profila, izračunaju se brzine u tim cijevima.
6. Na svih 17 piezometara očitava se vrijednost tlaka na temelju kojih se nacrtava piezometarska linija.
7. Prema poznatim brzinama u cijevima izračunaju se vrijednosti kinetičke energije te se crta energetska linija.



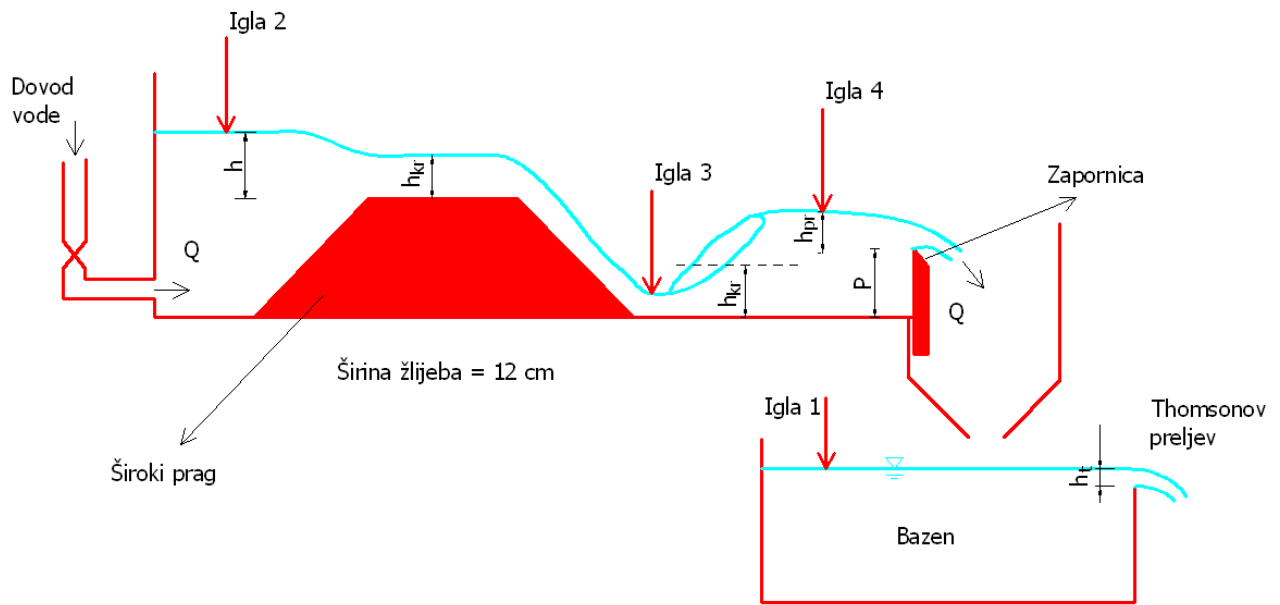
**Shematski prikaz modela (podloga za crtanje piezometarske i energetske linije):**



NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V06-Linijski i lokalni gubici, a također i snimljen pokus u folderu STUDENTSKI POKUSI → [STACIONARNO TEČENJE U SUSTAVU POD TLAKOM](#) uz napomenu da je za potrebe izvođenja ovog pokusa potrebno znatno manje informacija od ponuđenih.

## VJEŽBA 2 - PRELIJEVANJE PREKO ŠIROKOG PRAGA

### Shematski prikaz modela:



### Fotografija modela:



Prije početka provedbe pokusa, potrebno je odrediti nulta očitavanja mjernih igala na:

- a) Thomsonovom preljevu treba izmjeriti kotu dna preljeva tj. kotu pri kojoj počinje prelijevanje (pomoću igle 1),
- b) kotu dna kanala ispred širokog praga da bi se tijekom pokusa mogla izmjeriti dubina vode u mirnom režimu ispred praga (pomoću igle 2),
- c) kotu dna kanala iza preljeva (pomoću igle 3) i
- d) kotu dna kanala na mjestu druge spregnute dubine (pomoću igle 4).

### POSTUPAK MJERENJA:

1. Regulacijom zapornice uspostaviti normalan vodni skok i izmjeriti dubinu vode na pragu, zatim prvu i drugu spregnutu dubinu i to pomoću očitavanja na mjernim iglama – igla 3 i igla 4 (*h*, *prva i druga spregnuta dubina*), te ravnalom  $h_{kr}$  – sve prema shematskom prikazu modela. Napomena: iglu 4 postaviti na mjesto druge spregnute dubine, a ne ispred zapornice.
2. Izračunati protok  $Q$  mjerenjem  $h_t$  na Thomsonovom preljevu i računajući po jednadžbi:

$$Q = 1,4 \cdot h_i^{2,5}$$

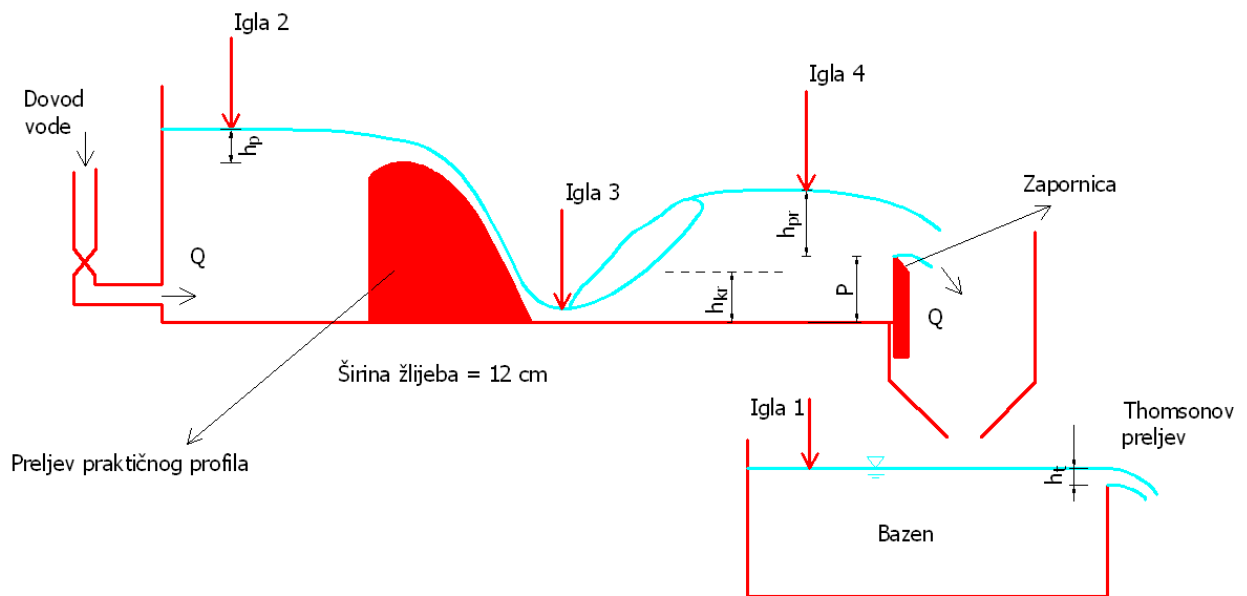
3. U danim uvjetima tečenja, nad širokim pragom se javlja kritična dubina. Potrebno je usporediti izmjerenu vrijednosti kritične dubine s modela i vrijednosti prema teoretskoj formuli:

$$h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{(Q/B)^2}{g}}$$

NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V03-Preljevanje, a također i snimljen pokus u folderu STUDENTSKI POKUSI → [PRELIJEVANJE PREKO ŠIROKOG PRAGA](#) uz napomenu da je za potrebe izvođenja ovog pokusa potrebno znatno manje informacija od ponuđenih.

## VJEŽBA 3 - PRELIJEVANJE PREKO PRELEVA PRAKTIČNOG PROFILA

### Shematski prikaz modela:



### Fotografija modela:



Prije početka provedbe pokusa, potrebno je odrediti nulta očitavanja mjernih igala na:

- Thomsonovom preljevu treba izmjeriti kotu dna preljeva tj. kotu pri kojoj počinje prelijevanje (pomoću igle 1),
- kotu dna kanala ispred širokog praga da bi se tijekom pokusa mogla izmjeriti dubina vode u mirnom režimu ispred praga (pomoću igle 2),

- c) kotu dna kanala iza preljeva (pomoću igle 3) i  
d) kotu dna kanala na mjestu druge spregnute dubine (pomoću igle 4).

POSTUPAK MJERENJA:

1. Regulacijom zapornice uspostaviti normalan vodni skok i izmjeriti preljevnu visinu  $h_p$ , te prvu i drugu spregnutu dubinu pomoću očitavanja na mjernim iglama. Napomena: iglu 4 postaviti na mjesto druge spregnute dubine, a ne ispred zapornice.
2. Izračunati protok  $Q$  preko preljeva praktičnog profila po jednadžbi:

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot h_p^{3/2},$$

a za koeficijent prelijevanja koristiti  $m=0,429$ .

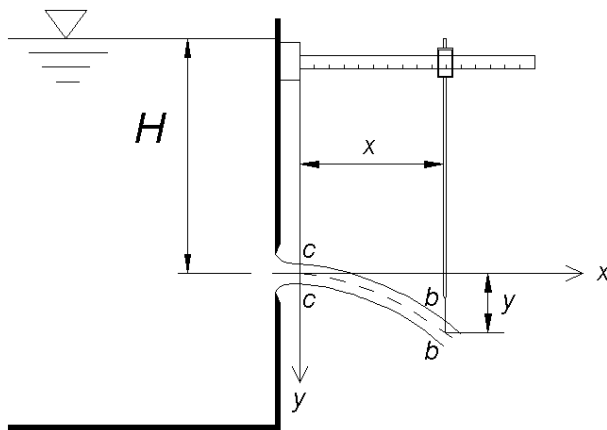
3. Usporediti rezultate mjerenja protoka preko preljeva praktičnog profila s mjerenjima na Thomsonovom preljevu po jednadžbi:

$$Q = 1,4 \cdot h_t^{2,5}$$

NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V03-Preljevanje, a također i snimljen pokus u folderu STUDENTSKI POKUSI → [PRELIJEVANJE PREKO PRELJEVA PRAKTIČNOG PROFILA](#) uz napomenu da je za potrebe izvođenja ovog pokusa potrebno znatno manje informacija od ponuđenih.

## VJEŽBA 4 - ISTJECANJE KROZ MALI I VELIKI OTVOR

Shematski prikaz modela:



Fotografija modela:



**POSTUPAK MJERENJA:**

1. Nakon uključivanja modela i punjenja spremnika vodom, otvara se manji od dva otvora ( $d=1$  cm). U stacionarnom režimu istjecanja se izmjere koordinate  $x$  i  $y$  za tri odabrane točke mlaza (vidi shematski prikaz modela), te visina vodnog stupca  $H$  iznad osi otvora.
2. Na temelju izmjerenih koordinata na mlazu, računa se prema kinematičkoj jednadžbi horizontalnog mlaza vode (horizontalni hitac), brzina u bilo kojem presjeku koja je definirana izrazom:

$$\bar{v}_c = x \sqrt{\frac{g}{2y}}$$

Kako bi se čim više anulirao utjecaj greške mjerenja, iz tri para vrijednosti  $x, y$  odredi se srednja vrijednost brzine u kontrahiranom presjeku  $v_c$  kao aritmetička sredina triju vrijednosti za  $v_c$ .

3. Računa se koeficijent brzine koji je određen izrazom:

$$\varphi = \frac{\bar{v}_c}{\sqrt{2gH}}$$

4. S obzirom da je strujanje stacionarno, protok kroz model (a time i protok mlaza) se računa pomoću preljevne visine  $H_T$  izmjerene na Thomsonovom preljevu na osnovu jednadžbe:

$$Q = 1,4 \cdot h_T^{2,5}$$

gdje je  $Q$  ( $m^3/s$ ), ako je  $H_T$  ( $m$ ).

5. Koeficijent kontrakcije, na osnovu poznatog protoka i brzine u kontrahiranom presjeku, izračunava se prema jednadžbi:

$$c_c = \frac{A_c}{A} = \frac{Q}{v_c A}$$

pri čemu je  $A$  površina danog otvora.

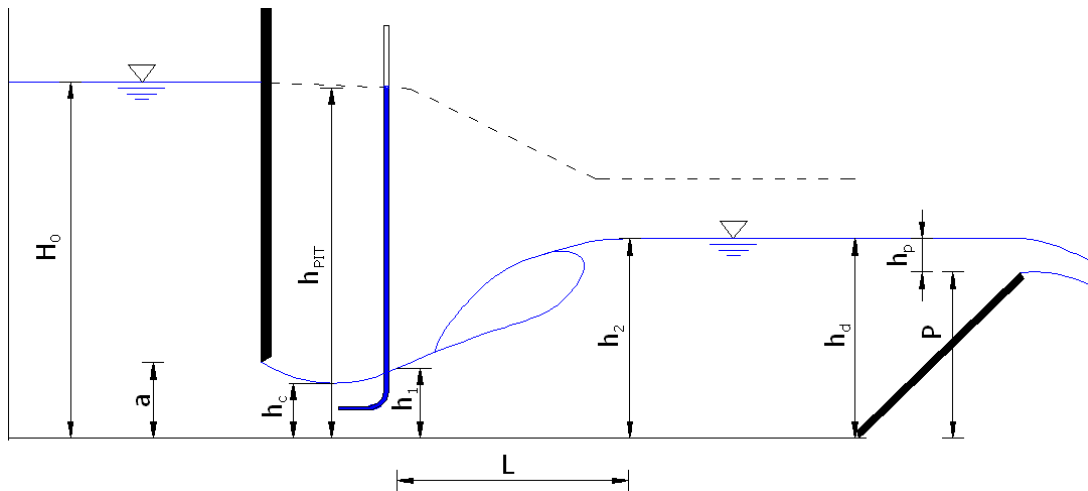
6. Koeficijent protoka za ispitivani otvor definiran je izrazom:

$$\mu = \varphi c_c$$

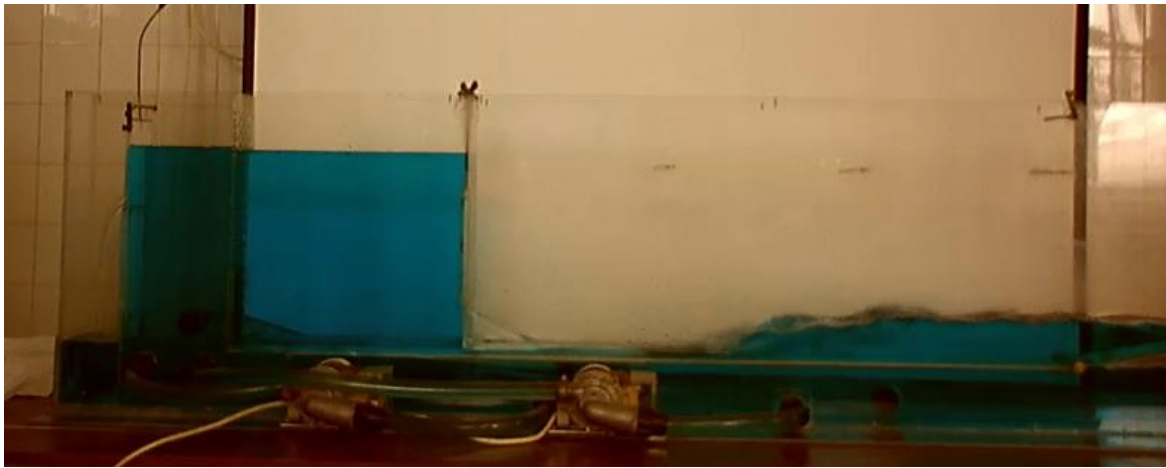
NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V04-Istjecanje, a također se može dobiti na uvid snimljen pokus.

# VJEŽBA 5 - ISTJECANJE ISPOD USTAVE I FORMIRANJE VODNOG SKOKA

Shematski prikaz modela:



Fotografija modela:



POSTUPAK MJERENJA:

1. Prije uključivanja pumpe vertikalna ustava se otvori za  $a = 0,7$  do  $1,0$  cm, formira se slobodno istjecanje ispod ustave, s prijelazom na mirni tok u vidu normalnog vodnog skoka iza ustave.
2. Mjere sljedeće veličine (prema shematskom prikazu modela):  $a$ ,  $H_0$ ,  $h_{PIT}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $L$ ,  $h_d$ ,  $P$ ,  $B$  (širina žlijeba).
3. Izračunava se protok prema slobodno odabranoj metodi.
4. Izmjerenu vrijednost druge spregnute dubine vodnog skoka  $h_2$  usporediti s analitičkim rješenjem:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8 Fr_1^2} \right)$$

gdje je  $h_1$  izmjerena prva spregnuta dubina, a

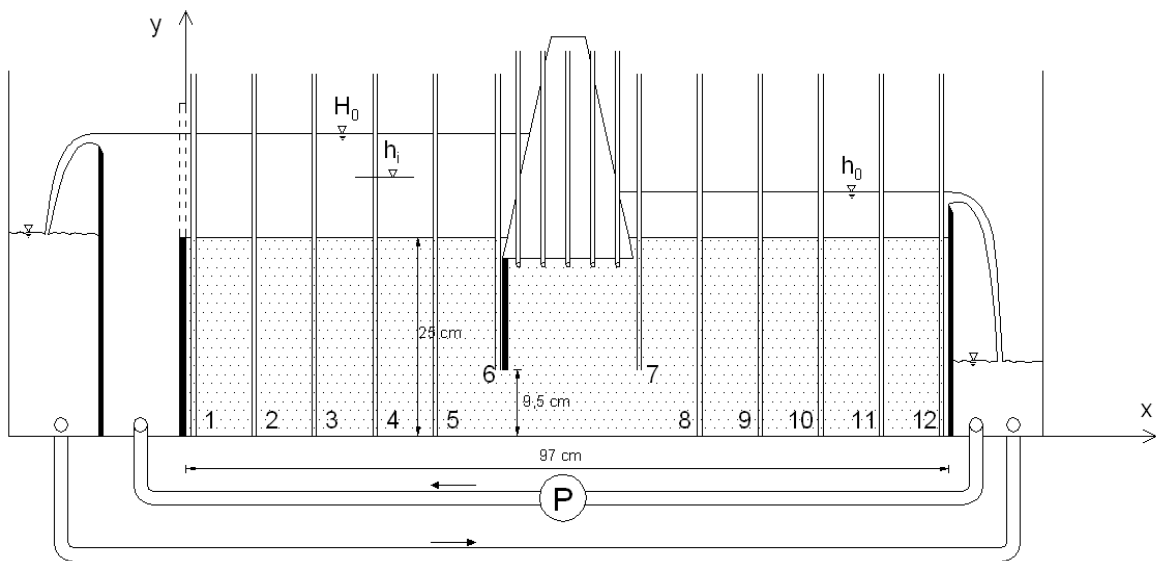
$$Fr_1^2 = \frac{v_1^2}{gh_1} \quad v_1 = \frac{Q}{h_1 B}$$

NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V05-Vodni skok, uz napomenu da je za potrebe izvođenja ovog pokusa potrebno znatno manje informacija od ponuđenih, a također se može dobiti na uvid snimljen pokus.

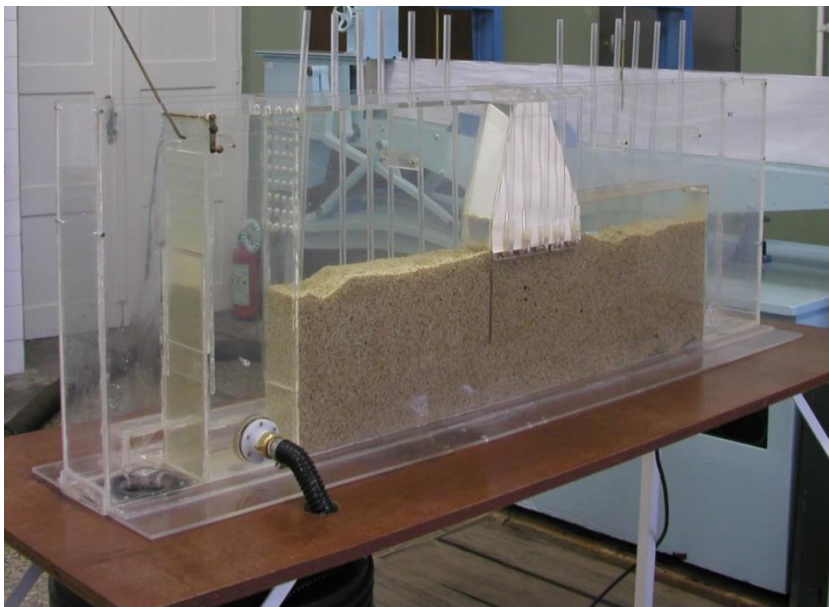


## VJEŽBA 6 - PROCJEDIVANJE KROZ POROZNU SREDINU

### Shematski prikaz modela:



### Fotografija modela:



### POSTUPAK MJERENJA:

1. Uključivanje pumpe i uspostava stacionarnog strujanja.
2. Na modelu se za tri različita položaja piezometara (dno, sredina i prvi vrhu poroznog materijala) u svih 12 piezometara mjere vrijednosti tlakova.
3. Za po želji odabran položaj piezometra (dno, sredina ili vrh poroznog materijala) crta se piezometarska linija.
4. Obratiti pozornost na razine vode u piezometrima ispred i nakon brane, te pokušati objasniti pojavu.

NAPOMENA: kao dodatni materijal za pomoć pri izradi ove vježbe može se koristiti praktikum iz kolegija Hidraulika 1 na web stranici kolegija: [www.grad.hr](http://www.grad.hr) → zavod za hidrotehniku → predmeti → hidraulika 1 → praktikumi (17) → V11-Procjedivanje ispod brane, a također i snimljen pokus u folderu STUDENTSKI POKUSI → [PROCJEDIVANJE ISPOD BRANE](#) uz napomenu da je za potrebe izvođenja ovog pokusa potrebno znatno manje informacija od ponuđenih.