

Neke mogućnosti laboratorijske nastave u oblasti rečne hidraulike

M. Jovanović
Gradjevinski fakultet - Beograd
mjovanov@eunet.yu

APSTRAKT. U ovom radu se govori o sadržaju laboratorijskih vežbi koje se izvode u okviru predmeta Regulacija reka na Odseku za hidrotehniku Gradjevinskog fakulteta u Beogradu. Ove vežbe imaju za cilj da se fizika kretanja rečnog nanosa što očiglednije približi studentima, kao dopuna teorijskih saznanja koja im se predočavaju u okviru pomenutog predmeta. U radu su prikazani detalji pojedinih laboratorijskih eksperimenata, komentarisana je njihova pedagoška svrsishodnost i data je ocena iskustva koje je stečeno u više generacija koje su prošle kroz opisani program laboratorijskih vežbanja. Ključne reči: rečni nanos, laboratorijska merenja, uslovi pokretnja nanosa, nanosne formacije, lokalna erozija.

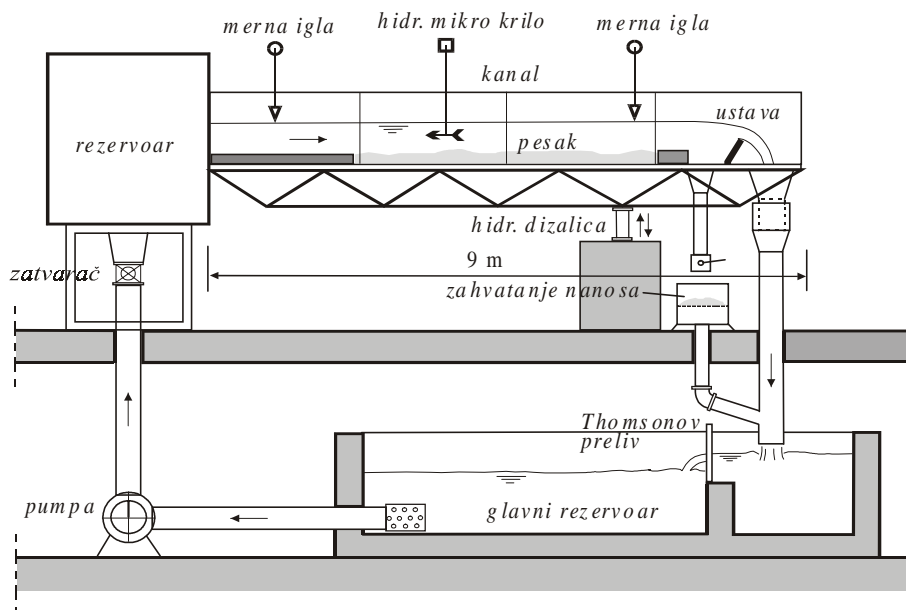
ABSTRACT. This paper describes the contents of laboratory exercises within the programme of the subject River training, at the Department of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering in Belgrade. The objective of these laboratory exercises is to help the students to grasp the physics of the sediment transport, and to complement in this way their theoretical knowledge of the subject. Details of laboratory experiments are presented, and the pedagogic relevance of these experiments is evaluated. Finally, a brief comment of experiences gained over a number of generations that have undergone the described experimental programme, is given. Key words: river sediments, laboratory measurements, incipient sediment motion, bed forms, local erosion.

1 Uvod

Na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu se velika pažnja posvećuje laboratorijskim vežbama studenata ne samo u okviru fundamentalnih predmeta kakvi su Mehanika fluida i Hidraulika, već i pojedinih stručnih predmeta, kakav je na primer predmet Regulacija reka, koja u svom programu sadrži osnove teorije rečnog nanosa. Polazeći od činjenice da se radi o veoma složenoj materiji, pre desetak godina je nastavni proces obogaćen laboratorijskim vežbama koje su uglavnom demonstracionog karaktera i imaju za cilj upoznavanje studenata sa složenom interakcijom rečnog toka i nanosa. Pored toga, smisao uvodjenja laboratorijskih vežbi je i da kroz elementarne metode merenja, studente zainteresuje za ekperimentalni rad i da ih usmeri ka istraživanjima u ovoj oblasti.

Podelom generacije na dve grupe od po desetak studenata, dobrom prethodnom pripremom i organizacijom, pokazalo se da je čak i u skromnom fondu vremena koje je rezervisano za laboratorijska vežbanja, moguće „pokriti” značajan deo materije koja se predaje iz oblasti rečnog nanosa [3].

Eksperimentalan rad studenata se obavlja koristeći laboratorijski kanal dužine oko 9 m, širine 0.25 m (Slika 1). Radna sekcija, dužine oko 6 m, ima stakleni bočni zid, a na dnu se postavlja sloj peska uniformne krupnoće od 1 mm. Protok, kao i piježometarski nagib, kontrolišu se zatvaračem na uzvodnom rezervoaru i regulacionom ustavom na nizvodnom kraju kanala. Vrednost protoka se određuje pomoću Tomsonovog oštroivičnog preлива na glavnom rezervoaru. Merni instrumentarijum nije zahtevan i sastoji se od igala za merenje nivoa, hidrometrijskog mikro krila i štoperice. Kanal je snabdeven i uređajima za određivanje odnete količine nanosa u neravnotežnim uslovima (erozija dna).



Slika 1: Kanal u Hidrauličkoj laboratoriji Gradjevinskog fakulteta u Beogradu

U nastavku se opisuje sadržaj eksperimenata koje studenti obavljaju kao deo obaveznih vežbi iz predmeta Regulacija reka.

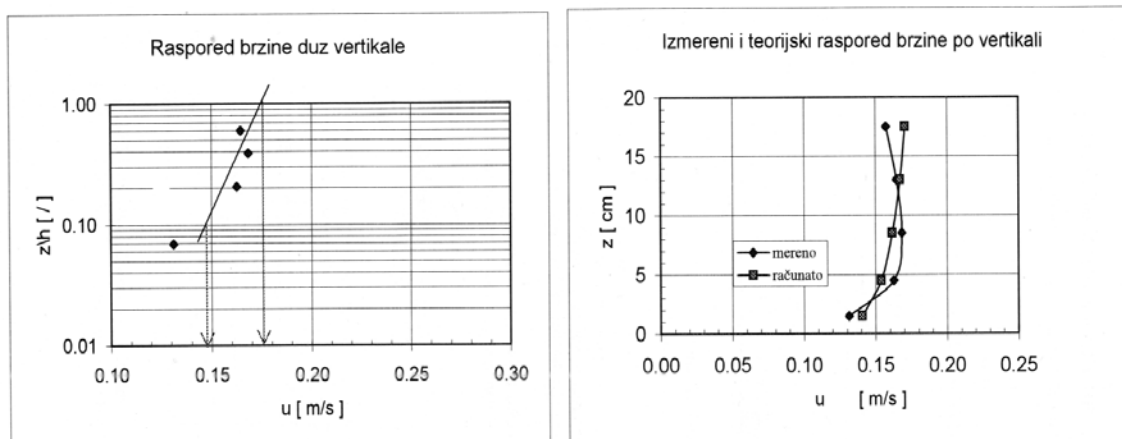
2 Raspored brzine po dubini toka

Teorijski izrazi za raspored brzine po dubini (logaritamski i stepeni) imaju važnu ulogu u rečnoj hidraulici, posebno u teoriji rečnog nanosa. Od studenata se traži da pomoću mikro krila izmere lokalne brzine u nekoliko tačaka jedne vertikale, ponavljajući merenja više puta. Izmereni raspored brzine se zatim koristi za određivanje parametara nekog teorijskog rasporeda. Na primer, opšti logaritamski zakon [3]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right), \quad (1)$$

može se shvatiti kao dvoparametarski računski model, u kome se vrednosti parametara – referentnog odstojanja z_o i smičuće brzine u_* , određuju na osnovu podataka merenja. Postupak se zasniva na činjenici da data logaritamska zavisnost, napisana u obliku:

$$u = 5.75 \cdot u_* \cdot \log \left(\frac{z}{h} \right) + 5.75 \cdot u_* \cdot \log \left(\frac{h}{z_o} \right) \quad (2)$$



Slika 2: Profili brzina

predstavlja pravu na dijagramu u logaritamskoj podeli (Slika 2). Težišna prava se povlači kroz sistem mernih tačaka do odstojanja $z/h < 0.2$, jer je logaritamska zavisnost u toj oblasti „najjača”. Pomoću ove prave se očitavaju vrednosti dve karakteristične brzine:

$$u_1 = u(z/h = 1.0) = 0 + 5.75 \cdot u_* \cdot \log(h/z_o) \quad (3)$$

$$u_2 = u(z/h = 0.1) = -5.75 \cdot u_* + 5.75 \cdot u_* \cdot \log(h/z_o), \quad (4)$$

pa se, oduzimanjem druge jednačine od prve, najpre računa vrednost parametra $u_* = (u_1 - u_2)/5.75$, a zatim, iz izraza:

$$u_1 = 5.75 \cdot u_* \cdot \log\left(\frac{h}{z_o}\right) \rightarrow z_o = h \cdot 10^{-\frac{u_1}{5.75 u_*}}, \quad (5)$$

vrednost parametra z_o . Sa utvrdjenim vrednostima navedenih parametara računa se teorijski raspored brzine i upoređuje sa izmerenim rasporedom, kao što je prikazano na Slici 2. Obavlja se takodje i osrednjavanje brzine po dubini.

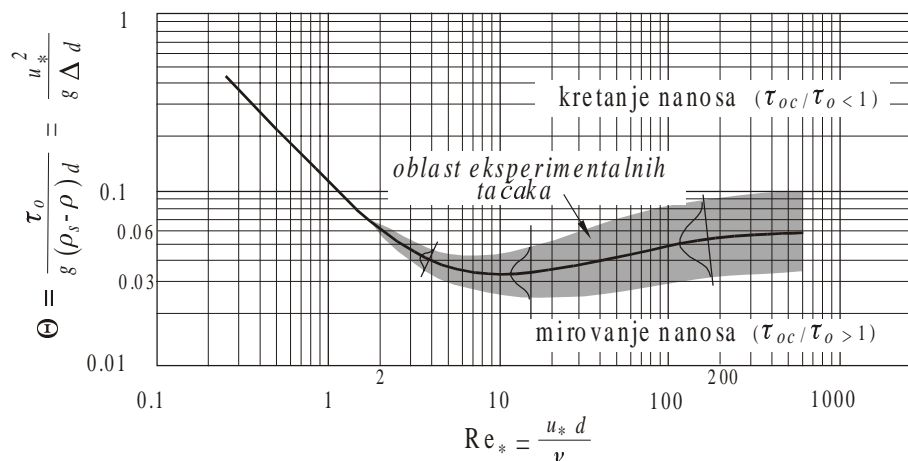
Studentima se predočava da se na osnovu teorijskog rasporeda brzine mogu proceniti lokalne vrednosti niza veličina koje se teško mere, kao što su na primer nagib linije energije ($I_e = u_*^2/(gh)$) i tangencijalni napon ($\tau_o = \rho u_*^2$). Mereći raspored brzine, studenti se podsećaju i na značaj tog rasporeda u proračunu pronosa suspendovanog nanosa [1, 2, 3].

3 Uslovi pokretanja nanosa

Razumevanje koncepta kritičnog tangencijalnog napona kao kriterijuma za pokretanje zrna, nije moguće bez jasne predstave o fizici same pojave. Laboratorijski eksperiment je tu od velike pomoći.

Najpre se razmatra slučaj kada sva zrna miruju. Mereći hidrauličke parametre toka (dubinu i pijezometarski nagib) i računajući vrednosti bezdimenzionih brojeva Re_* i Θ , studenti se pomoću Šildsovog dijagrama (Slika 3) uveravaju da se zrna date krupnoće zaista nalaze u stanju mirovanja.

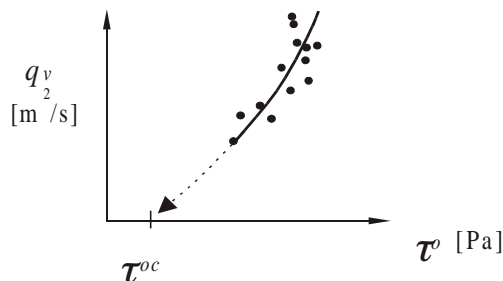
Manevrom ustave zatim se postepeno povećava pijezometarski pad u kanalu (odnosno tangencijalni napon), tako da se može uočiti porast broja pokrenutih zrna,



Slika 3: Šildsov dijagram. [3]

sve dok kretanje ne primi masovni karakter. Opet se mere hidraulički parametri toka, da bi se na Šildsovom dijagramu konstatovalo da eksperimentalna tačka pada u oblast kretanja.

Ovaj eksperiment je od izvanredne koristi, jer ne samo da omogućava da se u praksi proveriti teorija, već i da se iskustveno spozna da granična stanja ravnoteže zrna nije lako definisati i da je kritični tangencijalni napon, kao jedan od indikatora tog graničnog stanja, ustvari računaska kategorija. U tom kontekstu, laboratorijska instalacija daje mogućnost merenja pronosa nanosa (q_v) i određivanja kritične vrednosti tangencijalnog napona ekstrapolacijom eksperimentalne zavisnosti koja je prikazana na Slici 4.



Slika 4: Određivanje kritičnog tangencijalnog napona.

4 Nanosne formacije i aluvijalna rapavost

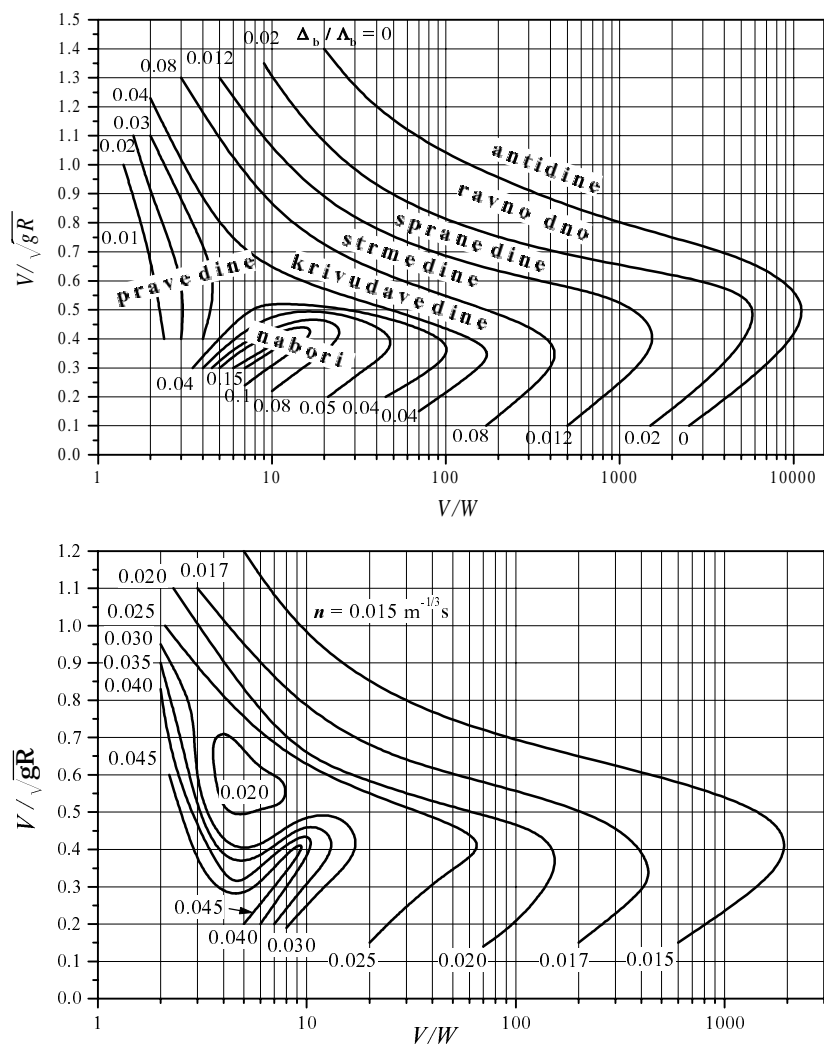
Podešavanjem hidrauličkih uslova u kanalu, moguće je formiranje pešćanih talasa (nabora i dina) na dnu. Studenti dobijaju mogućnost da vide kako se stvaraju i kreću nanosne formacije. Proračunom bezdimenzionih veličina V/\sqrt{gR} i V/W (pri čemu se za određivanje brzine tonjenja zrna W koriste empirijski izrazi iz literature [3]), na dijagramima Znamenskaje (Slika 5) određuje se tip nanosne formacije i očitava vrednost Maningovog koeficijenta aluvijalnog otpora. Sa tom vrednošću se pomoću Maningove jednačine:

$$\frac{V}{V_*} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad (6)$$

mogou sračunati vrednosti smičuće brzine V_* i bezdimenzionog tangencijalnog napona Θ , pa uneti eksperimentalnu tačku na Šildsov dijagram. Upoređenjem položaja

te tačke i tačke koja odgovara slučaju kada nije bilo nanosnih formacija, može se kvalitativno analizirati uticaj nanosnih formacija na režim kretanja i pronosa vučenog nanosa.

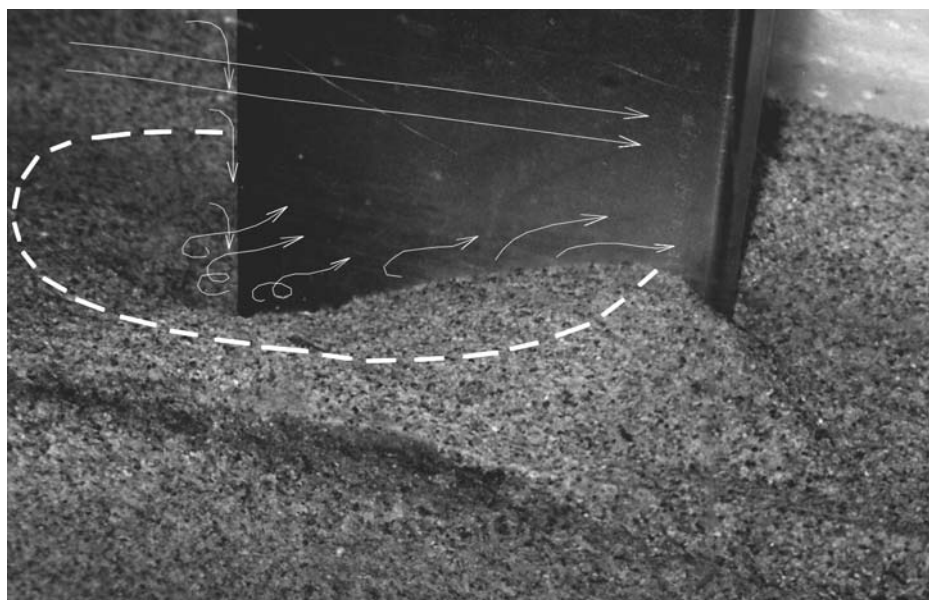
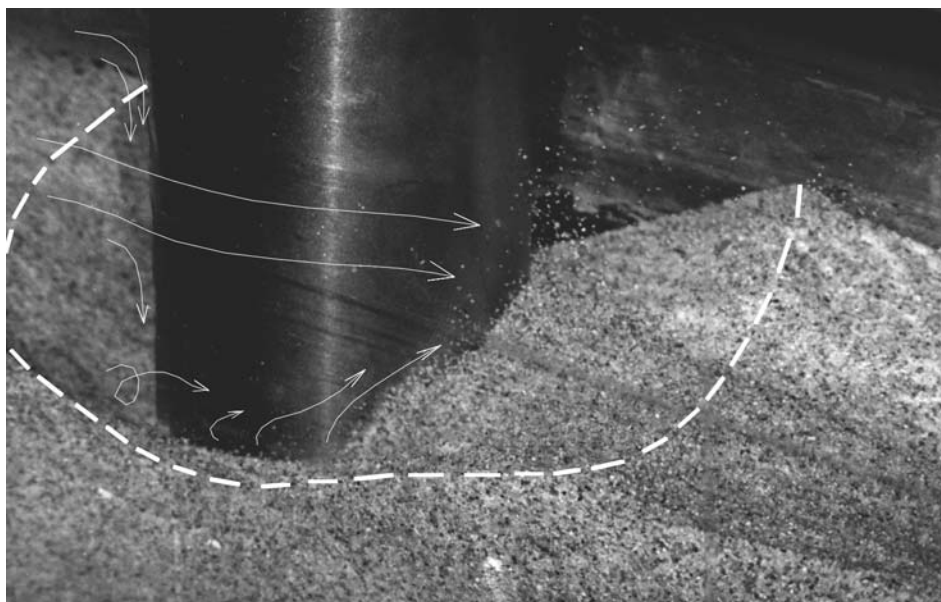
Pored toga, merenjem brzine pomeranja pešćanih talasa, a pretpostavljajući da se tokom pomeranja oblik tih talasa bitno ne menja, moguće je sračunati jedinični pronos vučenog nanosa primenjujući postupak koji je izložen u literaturi [3].



Slika 5: Empirijski dijagrami Znamenskaje (1964) za procenu vrste nanosnih formacija, njihovih dimenzija i veličine aluvijalnih otpora [3]; karakteristike nanosa su definisane „faktorom pokretljivosti” – odnosom V/W , gde je V – srednja profilska brzina, a W – brzina tonjenja zrna, dok su karakteristike toka definisane vrednošću Frudovog broja $V/\sqrt{g \cdot R}$; dimenzije nabora, dina i antidina su određene odnosom visine Δ_b i dužine Λ_b ; Maningov koeficijent obuhvata otpor trenja i otpor oblika pešćanih talasa (aluvijalni otpor).

5 Lokalna erozija oko mostovskog stuba

Fenomeni lokalne erozije oko objekata u rečnom koritu mogu se demonstrirati čak i u laboratorijskim kanalima relativno malih dimenzija. Naravno, eksperimenti u takvim uslovima su kvalitativnog karaktera i imaju za cilj objašnjenje fizike pojave. U kanalu se mogu postaviti modeli mostovskih stubova različitih oblika i posmatrati kako se odvijaju erozioni procesi oko tih stubova (Slika 6).



Slika 6: Lokalna erozija oko modela cilindričnog i paralelopipednog stuba (Hidraulička laboratorija Građevinskog fakulteta u Beogradu)

Način formiranja erozione jame i njena evolucija tokom vremena najbolje se uočavaju ako se eksperiment odvija u uslovima "čiste vode", kada je pokretanje zrna ograničeno na oblast oko stuba, a van te oblasti nema kretanja nanosa. Za sticanje osnovnih saznanja o razmatranoj pojavi, dovoljno je da studenati skiciraju oblik

eroziona jame i da zabeleže promenu njene dubine tokom vremena. Eksperimenti se ponavljaju da bi se utvrdio uticaj oblika stuba koji može biti cilindrični i paralelo-pipedni. U ovom drugom slučaju razmatra se i uticaj položaja stuba u odnosu na pravac toka.

6 Zaključak

Čak i u uslovima skromne laboratorijske opreme i ograničenog fonda vremena namenjenog vežbanjima, veoma je korisno da se studenti zainteresuju za eksperimentalni rad i da kroz relativno jednostavna merenja, steknu uvid u složenu interakciju vode i nanosa. Iskustva stečena kroz više generacija koje su prošle kroz opisani program laboratorijskih vežbi, pokazuju da ovaj vid očigledne nastave: (a) nailazi na veoma dobar prijem kod samih studenata, (b) podstiče radoznalost i razvija kod studenata sklonost ka eksperimentalnom radu, (c) značajno olakšava predavanja i pomaže savladjivanju složene teorije i (d) ima pozitivan efekat na polaganje ispita.

Literatura

- [1] Garde, R.J., Ranga Raju, K.G., *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, Wiley Eastern, New Delhi, 1977.
- [2] Hug, M. (ed.), *Mécanique des fluides appliquée*, Eyrolles, Paris, 1975.
- [3] Jovanović M., *Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija*, Gradjevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [4] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Hydraulic Laboratory Techniques*, A Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado, 1986.