

## Predgovor prvom izdanju

Rečni tokovi su među najzagonetnijim tokovima koji se izučavaju u hidrotehnici. Složenost problema kojima se bave rečna hidraulika i morfologija proizilazi iz činjenice da je ponašanje prirodnih vodotoka slično ponašanju živih bića i da svaku prirodnu ili nasilnu promenu graničnih uslova prati reakcija vodotoka u pravcu uspostavljanja ravnoteže između protoka vode, pronosa nanosa i geometrijskog oblika korita. Tu reakciju vodotoka je često teško predvideti.

Ako se ima u vidu značaj koji reke imaju u životu ljudi, nije čudno da su predmet izučavanja od davnina. Naučna istraživanja u oblasti rečne hidraulike i morfologije, obavljena u drugoj polovini dvadesetog veka, prevazilaze po obimu istraživanja u svim drugim hidrauličkim disciplinama. Međutim, čini se da postignuti rezultati ne odgovaraju u potpunosti uložnim naporima. Procesi koji se odvijaju u prirodnim vodotocima su tako složeni da opšta teorijska rešenja nisu moguća. Objašnjenje za to daje poznati naučnik Leopold (Leopold, 1960) kratkom konstatacijom: „Rečni tokovi su arhitekta sopstvene geometrije” [107].

Složenost procesa kojima se bavi rečna hidraulika najbolje je opisao Kenedy (Kennedy, 1983) na sledeći način [92]. Ako se pretpostavi da je strujanje vode pod pritiskom u pravoj cevi kružnog poprečnog preseka najjednostavniji vid turbulentnog strujanja, tečenje sa slobodnom površinom u prizmatičnom koritu pripada sledećoj kategoriji tokova po analitičkoj složenosti, jer položaj slobodne površine nije unapred poznat i zavisi od geometrijskih i konturnih uslova. Problem dodatno komplikuju fenomeni kao što su hidraulički skok, razne vrste translatorskih talasa i dr. Kod prirodnih tokova je situacija još složenija, jer su im *sve granice pokretne*. Čak i pod pretpostavkom da obale nisu podložne eroziji, problem je dovoljno složen samom činjenicom da se površina vode i površina rečnog dna kontinualno menjaju u prostoru i vremenu.

U pokušaju kvantitativnih analiza prirodnih tokova inženjeri su suočeni sa brojnim neizvesnostima. Hidraulička rapavost, koja zavisi od krupnoće nanosa i dimenzija nanosnih formacija, nije unapred poznata, jer zavisi od brzine toka. Pored toga, prirodni vodotoci su *dvofazni tokovi*, čija čvrsta faza – rečni nanos, svojom koncentracijom utiče na fizičke karakteristike fluida, veličinu otpora i raspored brzine. Takva sprega različitih uticaja nameće potrebu raznih uprošćenja u fazi konceptualnog razvoja analitičkih modela, a iterativnih numeričkih postupaka u fazi njihove primene.

I pored svega, u oblasti rečne hidraulike i morfologije je učinjen značajan napredak razvojem računarskih tehnologija, numeričkih metoda i eksperimentalne opreme. Posebno je značajno što širenjem personalnih računara i Internet tehnologija, rezultati naučnih istraživanja i nove metode proračuna postaju dostupni širem krugu inženjera – korisnika, što ubrzava unapredjenje hidrotehničke struke. U tom kontekstu, autorova je želja da ovom knjigom bar donekle umanjí nedostatak literature na našem jeziku iz oblasti rečne hidraulike i morfologije. Odabrani sadržaji čine teorijsku podlogu Regulacije reka kao inženjerske discipline. Posebna knjiga biće posvećena regulacionim radovima i objektima.

Ova knjiga je prvenstveno namenjena studentima Odsjeka za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu. Njom su obuhvaćeni i određeni sadržaji koji su interesantni za studente poslediplomske nastave na pomenutom fakultetu. Podrazumeva se da čitaoci poseduju solidno predznanje iz mehanike fluida i hidraulike. U knjigu je uvršćen veći broj računskih primera u cilju lakšeg razumevanja materije. Ovi primeri mogu korisno poslužiti i inženjerima u praksi.

Autor je čitaocima stavio na raspolaganje izvestan broj originalnih kompjuterskih programa čiji se spisak nalazi u Dodatku A, a koji se mogu bez nadokande preuzeti sa sajta: <http://www.grf.bg.ac.yu/mjovanovic/>.

Autor je zahvalan recenzentima - profesorima Stevanu Bruku i Dragutinu Muškatiroviću, kao i kolegama - Dejani Djordjević, Ljubodragu Saviću i Slobodanu Djordjeviću, na pažljivom čitanju teksta i korisnim sugestijama. Izdavanje ove knjige su finansijski pomogli: Energoprojekt-Hidroinženjering, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ i JVP „Srbijavode“ iz Beograda.

Beograd, mart 2002.

*Autor*

## Predgovor drugom izdanju

Prvo izdanje knjige, štampano u tiražu od 250 primeraka, koristile su četiri generacije studenata Građevinskog fakulteta u Beogradu, a nadam se, i mnogi inženjeri u praksi. Manji broj primeraka stigao je i do drugih građevinskih fakulteta u zemlji, kao i do susednih zemalja bliskog govornog područja.

U drugom izdanju su unete sledeće izmene i dopune:

- poglavlja 2 (elementi teorije graničnog sloja) i 3 (linijski otpori u koritu sa nepokrenim dnom) dopunjena su boljim definisanjem veze empirijskih koeficijenata trenja i relativne rapavosti;
- poglavlje 5 (neustaljeno tečenje u prirodnim vodotocima) dopunjeno je primerima numeričke simulacije ravanskih tokova, sa namerom da se ukaže na velike mogućnosti savremenih višedimenzionih računskih modela i na njihovu sve veću primenu u praksi;
- poglavlje 9 (pokretanje nanosa) je prošireno detaljnijim objašnjenjem koncepta kritične brzine i tumačenjem veze između kritične brzine i kritičnog tangencijalnog napona;
- u poglavljima 10 (vučeni nanos) i 11 (suspendovani i ukupni nanos) prošireni su delovi teksta koji se odnose na terenska merenja, prikazom savremenih mernih uređaja i tehnologija;
- poglavlje 13 (fizički modeli) je u celini preradjeno, sa težištem na rečnim fizičkim modelima u potpunoj i nepotpunoj sličnosti;
- izvršena je ponovna redakcija celokupnog teksta, uz otklanjanje uočenih štamparskih i drugih grešaka. Poboľšan je izgled većeg broja crteža i dijagrama. Na jednom broju dijagrama decimalni znak je tačka, što je posledica korišćenja komercijalnog grafičkog softvera.

I pored uložnog truda na pripremi, tehničkoj obradi i redakciji teksta, autor je svestan da ni ovo drugo izdanje neće biti bez nedorečenosti i štamparskih grešaka. Zato će biti zahvalan čitaocima ako mu na njih ukažu.

Nadam se da će ova knjiga i dalje koristiti studentima za lakše savladavanje nastavnog programa, a inženjerima za uspešno rešavanje složenih zadataka u praksi.

Beograd, februar 2008.

*Autor*

# Sadržaj

## Spisak oznaka

<b>1 Geomorfološke karakteristike prirodnih vodotoka</b>	<b>1</b>
1.1 Uvodna razmatranja . . . . .	1
1.1.1 Nastanak prirodnih vodotoka i njihova podela . . . . .	2
1.1.2 Slivno područje . . . . .	3
1.1.3 Rečna dolina i rečni tok . . . . .	3
1.1.4 Topologija hidrografske mreže . . . . .	5
1.2 Geomorfološke promjenjive . . . . .	5
1.3 Hidraulička geometrija rečnog korita . . . . .	9
1.3.1 Oblici u horizontalnoj projekciji . . . . .	9
1.3.2 Uzdužni profil . . . . .	11
1.3.3 Poprečni profili . . . . .	14
1.3.4 Konfiguracija rečnog dna . . . . .	14
1.4 Meandrirajući aluvijalni vodotoci . . . . .	14
1.4.1 Mehanizam formiranja meandrirajućih vodotoka . . . . .	14
1.4.2 Klasifikacija meandrirajućih vodotoka . . . . .	15
1.4.3 Veza između oblika korita u planu i u poprečnom profilu . . . . .	16
1.5 Rečna ušća . . . . .	21
1.6 Dinamika aluvijalnih vodotoka . . . . .	23
1.6.1 Reka kao adaptivni dinamički sistem . . . . .	23
1.6.2 Granična geomorfološka stanja . . . . .	24

1.6.3	Stabilno korito aluvijalnog vodotoka . . . . .	26
1.7	Završne napomene . . . . .	27
<b>2</b>	<b>Elementi teorije graničnog sloja</b>	<b>29</b>
2.1	Pojam graničnog sloja . . . . .	29
2.2	Turbulentne karakteristike razvijenog graničnog sloja . . . . .	30
2.3	Raspored tangencijalnog napona po dubini otvorenog toka . . . . .	32
2.4	Komponente tangencijalnog napona . . . . .	34
2.5	Modeliranje turbulentnih napona . . . . .	35
2.6	Raspored brzine po dubini toka . . . . .	37
2.7	Opšti logaritamski raspored brzine . . . . .	42
2.8	Ajnštajnova varijanta logaritamskog zakona . . . . .	45
2.9	Osrednjavanje brzine po dubini . . . . .	46
2.10	Prošireni logaritamski zakon . . . . .	47
2.11	Teorijski raspored u obliku stepene funkcije . . . . .	49
2.12	Raspored koeficijenta turbulentne viskoznosti po dubini toka . . . . .	50
2.13	Raspored tangencijalnog napona po poprečnom preseku . . . . .	52
2.14	Raspored brzine po poprečnom preseku . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Linijski otpori u koritu sa nepokretnim dnom</b>	<b>57</b>
3.1	Empirijski izrazi za otpore trenja . . . . .	57
3.2	Ocena vrednosti koeficijenata trenja . . . . .	58
3.3	Linijski otpori usled vegetacije . . . . .	63
3.4	Neuniformni raspored rapavosti po poprečnom preseku . . . . .	69
3.5	Koeficijent otpora deonice . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Nanosne formacije i aluvijalni otpori</b>	<b>75</b>
4.1	Tipovi nanosnih formacija . . . . .	75
4.2	Pojam aluvijalnog otpora . . . . .	78

4.3	Procena vrste nanosnih formacija . . . . .	80
4.4	Procena dimenzija nanosnih formacija . . . . .	85
4.5	Procena veličine aluvijalnog otpora . . . . .	86
4.6	Odredjivanje krive protoka na osnovu aluvijalnog otpora . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Neustaljeno tečenje u prirodnim vodotocima</b>	<b>93</b>
5.1	Podela neustaljenih tokova . . . . .	93
5.2	Jednačine linijskog neustaljenog tečenja . . . . .	95
5.3	Konturni uslovi . . . . .	102
5.4	Numeričko rešavanje osnovnih jednačina . . . . .	103
5.4.1	Metoda karakteristika . . . . .	104
5.4.2	Metoda konačnih razlika . . . . .	108
5.5	Uprošćene metode . . . . .	123
5.5.1	Kriva protoka . . . . .	124
5.5.2	Model kinematičkog talasa . . . . .	126
5.5.3	Model difuzionog talasa . . . . .	128
5.5.4	Metode zasnovane na funkciji zapremine korita . . . . .	129
5.6	Ravanski tokovi . . . . .	143
<b>6</b>	<b>Ustaljeno tečenje u prirodnim vodotocima</b>	<b>149</b>
6.1	Podela ustaljenih tokova . . . . .	149
6.2	Jednačine linijskog ustaljenog tečenja . . . . .	152
6.3	Geometrijski elementi poprečnog preseka . . . . .	155
6.4	Hidraulički parametri složenog preseka . . . . .	156
6.5	Normalna i kritična dubina u koritu složenog preseka . . . . .	158
6.6	Proračun linije nivoa . . . . .	162
6.6.1	Miran i buran režim tečenja . . . . .	162
6.6.2	Mešoviti režim tečenja . . . . .	163

6.7	Odredjivanje vrednosti koeficijenta otpora . . . . .	166
6.8	Rečna ušća . . . . .	170
6.9	Mostovska suženja . . . . .	172
6.9.1	Karakter tečenja u mostovskim suženjima . . . . .	172
6.9.2	Proračun uspora usled mostovskog suženja . . . . .	173
6.10	Mreže otvorenih tokova . . . . .	186
<b>7</b>	<b>Sekundarna strujanja</b>	<b>193</b>
7.1	Strujanje u krivini . . . . .	193
7.1.1	Osnovne jednačine . . . . .	194
7.1.2	Raspored radijalne brzine po dubini . . . . .	198
7.1.3	Poprečni nagib linije nivoa . . . . .	199
7.1.4	Raspored radijalne brzine po širini korita . . . . .	202
7.1.5	Helikoidno strujanje . . . . .	203
7.1.6	Raspored radijalnog napona . . . . .	204
7.1.7	Energetski gubici u krivini . . . . .	205
7.1.8	Neke praktične posledice strujanja u krivini . . . . .	206
7.2	Sekundarno strujanje u zoni mostovskih stubova . . . . .	207
7.3	Ostali vidovi sekundarnih strujanja . . . . .	209
<b>8</b>	<b>Poreklo i fizička svojstva rečnog nanosa</b>	<b>213</b>
8.1	Nastanak i podela rečnog nanosa . . . . .	213
8.2	Fizička svojstva rečnog nanosa . . . . .	214
8.2.1	Fizička svojstva pojedinačnog zrna . . . . .	214
8.2.2	Fizička svojstva mešavine nanosa . . . . .	221
<b>9</b>	<b>Pokretanje rečnog nanosa</b>	<b>233</b>
9.1	Dimenziona analiza . . . . .	233
9.2	Vučeni nanos. Determinističke metode . . . . .	237

9.2.1	Kritična brzina . . . . .	237
9.2.2	Kritični tangencijalni napon. Šildsov dijagram . . . . .	239
9.2.3	Uslov pokretanja izveden iz ravnoteže sila koje deluju na pojedinačno zrno . . . . .	243
9.2.4	Veza kritične brzine i kritičnog napona . . . . .	248
9.2.5	Korekcije kritičnog tangencijalnog napona . . . . .	249
9.3	Stohastički model pokretanja nanosa . . . . .	252
9.4	Početak formiranja suspenzije . . . . .	257
<b>10</b>	<b>Vučeni nanos</b>	<b>259</b>
10.1	Mehanizam kretanja vučenog nanosa . . . . .	259
10.2	Transportni kapacitet vodotoka . . . . .	260
10.3	Metode proračuna pronosa vučenog nanosa . . . . .	261
10.3.1	Pristup zasnovan na kritičnoj brzini . . . . .	263
10.3.2	Pristup zasnovan na kritičnom naponu . . . . .	265
10.3.3	Pristup zasnovan na koncentraciji nanosa . . . . .	271
10.3.4	Energetski pristup . . . . .	273
10.3.5	Stohastički pristup . . . . .	275
10.4	Problemi izučavanja vučenog nanosa . . . . .	283
10.5	Hidrografska merenja . . . . .	287
10.5.1	Merenje geometrije rečnog korita („batimetrija”) . . . . .	287
10.5.2	Merenje polja brzine . . . . .	291
10.5.3	Merenje pronosa vučenog nanosa . . . . .	293
<b>11</b>	<b>Suspendovani i ukupni nanos</b>	<b>305</b>
11.1	Pronos suspendovanih čestica turbulentnom difuzijom . . . . .	306
11.1.1	Turbulentna struktura rečnih tokova . . . . .	306
11.1.2	Osnovne pretpostavke u teoriji turbulentne difuzije . . . . .	306
11.1.3	Koncentracija nanosa . . . . .	307



11.1.4	Rejnoldsova analogija . . . . .	308
11.1.5	Raspored difuzionog koeficijenta za nanos . . . . .	309
11.2	Jednačina održanja mase suspendovanog nanosa . . . . .	309
11.3	Raspored koncentracije u stabilnoj suspenziji . . . . .	311
11.4	Referentno odstojanje i referentna koncentracija . . . . .	320
11.5	Proračun pronosa suspendovanog nanosa . . . . .	321
11.5.1	Integracija izmerenih profila brzine i koncentracije . . . . .	321
11.5.2	Ajnštajnova metoda i njoj srodne metode . . . . .	322
11.5.3	Metode kod kojih se referentna koncentracija definiše korela- cionim zavisnostima . . . . .	328
11.6	Tokovi sa visokom koncentracijom nanosa . . . . .	335
11.7	Energetski pristup u analizi suspendovanog nanosa . . . . .	338
11.8	Kretanje suspendovanog nanosa u neravnotežnim uslovima . . . . .	343
11.9	Metode proračuna ukupnog (totalnog) pronosa . . . . .	344
11.10	Merenje pronosa suspendovanog nanosa . . . . .	348
11.10.1	Način merenja i merni uredjaji . . . . .	349
11.10.2	Problemi zahvatanja uzoraka i tačnost merenja . . . . .	352
11.10.3	Obrada rezultata merenja . . . . .	352
<b>12</b>	<b>Deformacija rečnog korita</b>	<b>357</b>
12.1	Jednačina kontinuiteta za nanos . . . . .	357
12.2	Opšta deformacija rečnog korita . . . . .	361
12.2.1	Matematički modeli opšte deformacije . . . . .	362
12.2.2	Opšta erozija rečnog korita . . . . .	370
12.3	Lokalna deformacija rečnog korita . . . . .	377
12.3.1	Erozija oko mostovskih stubova . . . . .	378
12.3.2	Erozija u zoni poprečnih gradjevina . . . . .	386
12.3.3	Erozija nizvodno od prelivnih objekata . . . . .	389

12.4	Primeri uticaja regulacionih radova na deformaciju korita . . . . .	391
<b>13</b>	<b>Fizički modeli</b>	<b>397</b>
13.1	Uvodne napomene . . . . .	397
13.2	Razmere i zakoni sličnosti . . . . .	398
13.3	Rečni fizički modeli sa nepokretnim dnom . . . . .	399
13.4	Rečni fizički modeli sa pokretnim dnom . . . . .	404
13.4.1	Rečni modeli u potpunoj sličnosti . . . . .	404
13.4.2	Rečni modeli u nepotpunoj sličnosti . . . . .	409
13.5	Efekti razmere . . . . .	413
<b>14</b>	<b>Morfološke analize prirodnih vodotoka</b>	<b>415</b>
14.1	Teorija režima . . . . .	416
14.2	Racionalni pristup u određivanju stabilnog korita . . . . .	420
14.2.1	Hipoteze ekstremnih uslova . . . . .	421
14.2.2	Računski model . . . . .	422
14.3	Statistička analiza morfoloških podataka . . . . .	424
14.3.1	Prikupljanje podloga . . . . .	425
14.3.2	Obrada podataka . . . . .	425
14.4	Morfološke analize u sklopu uredjenja aluvijalnih vodotoka . . . . .	432
14.4.1	Određivanje prosečnog pronosa vučenog nanosa . . . . .	433
14.4.2	Izbor regulacionih elemenata . . . . .	436
14.4.3	Analiza efekata regulacionih radova . . . . .	438
	<b>Literatura</b> . . . . .	<b>439</b>
	<b>Dodaci</b> . . . . .	<b>451</b>
	<b>Registar autora</b> . . . . .	<b>461</b>
	<b>Registar pojmova</b> . . . . .	<b>463</b>