

JEDAN POGLED NA REGULACIJU NAŠIH REKA U SADAŠNJOSTI I BUDUĆNOSTI

Dr Miodrag B. JOVANOVIĆ
mjovanov@grf.bg.ac.rs
mjovanov@sbb.rs

REZIME

U ovom radu se razmatraju problemi regulacije reka, kao važne hidrotehničke grane. Dat je opšti osvrt na probleme koji se javljaju u projektovanju i pri rešavanju praktičnih problema. Posebno se ukazuje na kompleksnost zaštite od poplava u kontekstu klimatskih promena i strateških zahteva za upravljanjem rizikom od poplava. Dotaknuta su i pitanja edukacije hidroinženjera i njihovog položaja u društvu.

Ključne reči: regulacija reka, regulacioni objekti, zaštita od poplava, edukacija hidroinženjera

1. UVOD

Složenost bavljenja regulacijom reka kao važnom hidrotehničkom granom ogleda se u problemima projektovanja, izvođenja objekata u praksi, kao i samog poziva hidroinženjera - njihove edukacije i statusa u društvu.

Projektovanje regulacionih radova i objekata povezano je sa velikim brojem neizvesnosti, od spoznaje fluvijalnih procesa, preko pouzdanosti podloga i računskih postupaka, do projektnih rešenja koja u današnje vreme moraju biti usklađena sa integralnim konceptom uređenja vodotoka, ekološkim zahtevima i održivošću u uslovima klimatskih promena.

U rešavanju praktičnih zadataka javljaju se takođe brojni problemi. Pomenuće se samo neki: nedovoljna saradnja hidroinženjera sa stručnjacima drugih struka (regulacija reka je interdisciplinarna delatnost), hronično neodrža-

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 12.2.2023.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 27.2.2023.

Kontakt: mjovanov@grf.bg.ac.rs

vanje objekata, nedovoljno korišćenje savremenih nekonstruktivnih mera za efikasnu zaštitu od poplava (karte rizika, planovi upravljanja poplavama, sistemi za rano upozorenje, osiguranje itd.).

Status hidroinženjera koji se bave regulacijom reka nije zadovoljavajući. Uređenjem vodotoka se kod nas bave i inženjeri drugih profila, manje stručni za ovu oblast od hidroinženjera. Mišljenje hidroinženjera se često ignoriše pri donošenju političkih odluka. Edukacija studenata koji će se baviti regulacijom reka je pred velikim izazovima, koji se danas i ne mogu u potpunosti sagledati, a vezani su za tehnološki razvoj i klimatske promene.

Ovaj pogled na regulaciju reka je opšteg karaktera i ne odnosi se na pojedine naše vodotoke [1]. Proizašao je iz autorovog dugogodišnjeg bavljenja ovom oblašću, što je rezultiralo dvema knjigama [5, 6]. Neki tematski sadržaji iz ovih knjiga delimično su sadržani u ovom tekstu.

2. PROBLEMI PROJEKTOVANJA

2.1 Neizvesnosti u podlogama

Uvek je prisutno pitanje u kojoj meri je reprezentativnost, obim i kvalitet podloga (hidroloških, psamoloških i drugih) u stanju da omogući dovoljno pouzdano projektovanje regulisanih vodotoka.

Pođimo od topografskih podloga. Prikupljanje ovih podloga dramatično je unapređeno (LiDAR, dronovi, aerofotogrametrija, podaci sa interneta). Ipak, same podloge nisu dovoljne, već je u projektovanju neophodna njihova kritička ocena i određivanje načina na koji će se najbolje iskoristiti.

Na osnovu topografskih podloga proističu regulacioni elementi. Za opisivanje oblika rečnog korita mogu se primeniti jednostavne statističke metode, ali i složene

morfodinamičke analize [5]. Statistički pristup se sastoji u korelisanju geometrijskih parametara korita (srednje dubine, širine, poluprečnika krivine itd.) da bi se sagledali trendovi u razvoju korita i identifikovale nestabilne deonice. Međutim, često se previđa da statistički pristup nema svrhu ako je rečno korito prethodnim radovima (npr. prosecanjem krivina) već izmenjeno, ili ako je prirodni režim vodotoka (hidraulički i psamološki), bitno izmenjen kanalisanjem (pregrađivanjem) vodotoka. U tom slučaju se u projektovanju za ocenu morfološkog ponašanja reka moraju koristiti računski i fizički modeli.

Najveći stepen neizvesnosti je sadržan u psamološkim podlogama. Ne samo da su merenja nanosa u prirodi veoma skupa i dugotrajna i da zahtevaju specifičnu opremu i obučeni kadar (koji kod nas nedostaje), već ih je nemoguće obaviti u periodima velikih voda, kada je pronos nanosa najveći. Ovo je veliki problem, jer ekstrapolacija pronosa nanosa do velikih voda nije pouzdana i predstavlja izvor velikih grešaka. Kako na proračun pronosa nanosa utiče i mnoštvo drugih faktora (neprizmatičnost korita, sekundarna strujanja itd.), jasno je da se režim nanosa može uglavnom kvalitativno definisati.

Jedan broj neizvesnosti u projektima regulacije reka potiče i od teško predvidljivih socijalno-ekonomskih odnosa. Praktična rešenja su uslovljena nekim zahtevanim stepenom sigurnosti, a prirodni i društveni procesi su toliko složeni da je čak teško i proceniti koji je stepen sigurnosti prihvatljiv i neophodan da kompenzuje neizvesnosti ili manjkavost podloga koje se koriste. U takvim okolnostima se javlja dilema da li je dovoljno izdvojiti i razmotriti samo dominantne uticaje i koristiti jednostavnije računске postupke sa raspoloživim, kakvim-takvim podlogama, ili koristiti složene računске modele, a da pri tome obim i kvalitet podloga ne garantuju pouzdanost rezultata?

Pored toga, u regulaciji reka kao interdisciplinarnoj delatnosti, koristi se mnoštvo raznorodnih podloga, pa se s pravom može postaviti pitanje gde je prihvatljiva mera usloznavanja problema sa stanovišta realizacije projektnog rešenja?

Objasnimo ovo na primeru zaštite od poplava. Kada se uređenje vodotoka tehnički koncipira isključivo na hidrološkim informacijama (povratni period, mero-davna velika voda), domet projekta je relativno ograničen i unapred poznat. Kada se analiza proširi i na eroziju korita usled poplava, neophodni su dodatni podaci o karakteristikama i pronosu nanosa, nanosnim

formacijama, aluvijalnim otporima itd. Ako se nivo projekta dodatno usmeri i u pravcu socioekonomskih posledica poplava, onda se moraju uzeti u obzir i štete od poplava, odnosno mora se uvesti mnoštvo dodatnih ulaznih podataka, kao što su: namena površina, cena useva, cena sanacije stambenih i infrastrukturnih objekata itd. Još viši nivo analize obuhvata ekološke uticaje, kao i druge faktore, kao što su: planiranje urbanog i ruralnog razvoja, očuvanje ambijentalnih vrednosti itd. Sve to nije jednostavno, jer se mnogi uticajni faktori teško mogu kvantifikovati.

Izloženo pokazuje da se inicijalno relativno jednostavan projekat odbrane od poplava, zasnovan na izboru mero-davnog povratnog perioda i na projektovanju sistema zaštite (nasipa, retenzija itd.), može postepeno širiti u mnogim pravcima životne realnosti, sa bezbroj neizvesnosti. Stoga je u težnji za što sveobuhvatnijem uređenju vodotoka, treba iznaći pravu meru racionalnosti, kako se ne bi otišlo u situaciju da, usled prevelikih neizvesnosti, nijedno projektno rešenje ne bude dovoljno pouzdano.

2.2 Teorijska ograničenja rečne hidraulike

Sadašnji, a pogotovo budući hidroinženjeri moraju biti dobro upućeni u teorijske postavke rečne hidraulike da bi bili svesni ograničenja metoda koje primenjuju. Opasno je kada korisnik široko dostupnog komercijalnog softvera naivno poveruje da taj softver garantuje apsolutno vernu numeričku reprodukciju kretanja vode i nanosa. To nije moguće, jer primenjene računске metode sadrže na teorijskom nivou niz kontroverznih pitanja koja se reflektuju na rezultate proračuna. Za upućene, evo nekih primera.

(1) Uticaj suspendovanog nanosa na hidrauličke otpore nije do kraja razjašnjen. Autori se spore da li prisustvo suspendovanog nanosa u rečnom toku smanjuje (kao što pokazuju neka eksperimentalna istraživanja) ili povećava hidrauličke otpore i u kojoj meri to zavisi od koncentracije nanosa.

(2) U većini numeričkih modela je razdvojen proračun transporta vučenog i suspendovanog nanosa. (Već ova podela je uslovna, jer se, u zavisnosti od trenutnih hidrauličkih uslova, ista čestica može naći u jednoj, ili drugoj kategoriji.) Pri tome je pouzdanost proračuna kod vučenog nanosa znatno manja od one kod suspendovanog nanosa, jer je teorija vučenog nanosa poluemprijskog karaktera, dok je teorija suspendovanog nanosa to u manjoj meri i više počiva na opštim zakonitostima mehanike fluida. Za

računske modele je i veliki problem obuhvatanje interakcije “vučenog” i “suspendovanog” nanosa pri dnu.

(3) U proračunima vučenog nanosa prisutna je podela na konceptualnom nivou. Neki autori (Velikanov i Ajnštajn na primer), smatraju da je mehanizam kretanja vučenog nanosa prekidan – da periode skokovitog kretanja zrna prate periodi mirovanja. Ovaj koncept odgovara maloj i umerenoj koncentraciji nanosa i omogućava *stohastički* pristup u modeliranju [5]. Drugi autori (npr. Bagnold), smatraju da je trajektorija zrna uslovljena vektorskim slaganjem početnog impulsa zrna, brzine njegovog tonjenja i brzine toka [5]. Ovaj *deterministički* koncept podrazumeva neprekidno, intenzivno kretanje nanosa i prikladan je krupnim zrnima (čija inercija nije zanemarljiva) i značajnim koncentracijama nanosa.

(3) Većina obrazaca za pronos vučenog nanosa zasnovana je na tangencijalnom naponu pri dnu toka, tj. na proizvodu dubine toka i nagiba dna. Međutim, usled turbulencije toka, pronos vučenog nanosa *nije jednoznačno određen* vrednošću tangencijalnog napona. Sa računске tačke gledišta, za pokretanje nanosa je svejedno da li nastaje pri maloj dubini i velikom nagibu dna, ili pri velikoj dubini i malom nagibu dna, a evidentno je da turbulentne karakteristike toka u ta dva slučaja nisu iste. Pri tome, u obrascima za vučeni nanos uticaj trubulencije je *implicitno* obuhvaćen pomoću empirijskih koeficijenata, čije vrednosti nemaju univerzalni karakter. Da sve bude još komplikovanije, teškoće unose i uticaji sekundarnih strujanja u krivinama, nanosnih formacija na rečnom dnu, kao i inercije koja dovodi do „kašnjenja” pronosa nanosa u odnosu na promenu protoka vode [5].

(4) Empirijski obrasci za pronos nanosa definišu “transportni kapacitet”, pri kome nema deformacije (erozije ili zasipanja) rečnog korita. Retki su matematički modeli koji dopuštaju mogućnost “neravnotežnog” stanja i uzimaju u obzir stvarnu raspoloživost nanosa (višak ili manjak u odnosu na transportni kapacitet).

(5) Teorija turbulentne difuzije [5] ima ključnu ulogu u analizi kretanja nanosa. Difuzioni prenos čestica pod uticajem fluktuacionih komponenti brzine toka je stohastički proces koji utiče, kako na taloženje suspendovanih čestica, tako i do vraćanja istaloženih čestica u stanje „resuspenzije”.

Problem modeliranja turbulentne difuzije kod rečnih tokova je u tome što se mora uspostaviti veza između parametara matematičkog modela i fluktuacionih kretanja mešavine tečne i čvrste faze, što nimalo nije lako.

2.3 Ograničenja raspoloživih alata

Raspoloživi alati u projektovanju regulisanih vodotoka su numerički i fizički modeli. Obe vrste modela imaju svoja ograničenja. Ovde se razmatraju problemi njihove kalibracije, koja je obavezna ukoliko se žele pouzdani rezultati.

Numerički modeli. Kalibracija modela predstavlja proces određivanja vrednosti parametara modela na osnovu rezultata merenja sprovedenih na terenu ili u laboratoriji. Za ilustraciju problema kalibracije ovde će poslužiti najjednostavniji slučaj - određivanje vrednosti Maningovog koeficijenta hidrauličkih otpora. Ovaj postupak (koji je sastavni deo svakog projekta regulacije reka), svodi se na primenu iterativne metode “pokušaja i greške”, sve dok se računска linija nivoa približno ne poklopi sa linijom nivoa koja je snimljena u prirodi. Čak i ovaj, naizgled jednostavan vid kalibracije nije bez teškoća.

- Kalibracija je moguća samo u domenu malih i srednjih voda, kada se mogu snimiti linije nivoa u glavnom koritu. Snimanja nisu moguća pri velikim vodama, zbog velikih brzina toka. Naročito je problematično snimanje u inundacijama, zbog njihove velike površine i nepristupačnosti. Često se koriste jedino pojedini tragovi nivoa registrovani u prošlosti.

Sve to čini da je u praksi kalibracija po pravilu nekompletna, jer je broj snimljenih linija nivoa nedovoljan. Nedostajući opseg protoka/nivoa se nadoknađuje interpolacijom ili ekstrapolacijom. Nedostajući koeficijenti otpora za inunacije se rekonstruišu putem satelitskih snimaka, podataka o nameni površina sa interneta i podataka iz literature [5, 6].

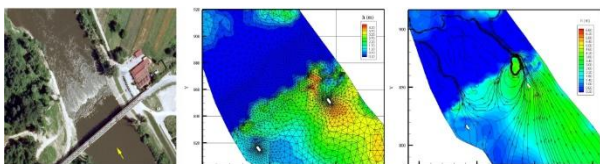
- Ponekad se poklapanje računskih i snimljenih linija nivoa može ostvariti samo sa nerealnim vrednostima Maningovog koeficijenta (npr. sa vrednostima koje odgovaraju hidraulički glatkom režimu). Tada se mora pribeći novim geodetskim snimanjima na terenu ili novoj diskretizaciji računске oblasti, što produžava i poskupljuje izradu projekta [2].

- Postoje i slučajevi kada kalibracija u prirodi nije moguća. Na primer, u slučaju talasa nastalih oštećenjem ili rušenjem brana (one na jalovištima i pepelištima su najrizičnije), kalibracija računskog modela je moguća isključivo pomoću fizičkog modela, jer u prirodi takvi talasi imaju vršne protoke koji su bar za jedan red veličine veći od velikih voda razmatranog vodotoka.

▪ Značenje Manningovog koeficijenta povezano je i sa vrstom računskog modela koji se koristi. U linijskim (1D) modelima reč je o globalnom parametru svih hidrauličkih otpora na jednoj *deonici*, tako da su ovim koeficijentom obuhvaćeni uticaji rapavosti, neprizmatičnosti i zakrivljenosti korita, nanosnih formacija, vegetacije i objekata. Vrednost ovog parametra “neutrališe” i grešku snimljenih poprečnih profila.

U prostornim (2D i 3D) modelima (Slika 1), Manningov koeficijent ima *lokalni* karakter i odražava uticaj turbulencije toka u vertikalnoj ravni. Uticaj turbulencije u horizontalnoj ravni uslovljen je vrednostima parametara nekog drugog modela turbulencije.

Kalibrisane vrednosti Manningovog koeficijenta iz linijskog modela, koje važe u nizu poprečnih profila, ne moraju biti merodavne za prostorni model u celom strujnom polju i preuzimanje ovih vrednosti iz linijskog modela može biti problematično.



Slika 1. Primer primene računskih 2D i 3D modela: prag na Velikoj Moravi kod Svilajнца, računska mreža sa rasporedom dubine i raspored strujnica pri velikoj vodi [7].

Ako se imaju u vidu navedena ograničenja, jasno je da računski modeli ne mogu garantovati apsolutnu tačnost rezultata. Srećom, u regulaciji reka se ne insistira na apsolutno tačnim rezultatima, već se rezultati proračuna koriste u relativnom smislu, da bi se uporedili režimi vode i nanosa pre i posle regulacionih radova.

Fizički modeli. Ovi modeli su u prošlosti bili jedino sredstvo modeliranja u rečnoj hidraulici. Vremenom su numerički modeli postali dominantni, ali to ne znači da fizički modeli više nisu potrebni. Naprotiv. Fizički i numerički modeli su komplementarni, a kombinovanje ovih modela daje mogućnost njihove međusobne kalibracije i provere rezultata, što samo može da doprinese većoj pouzdanosti projektnih rešenja.

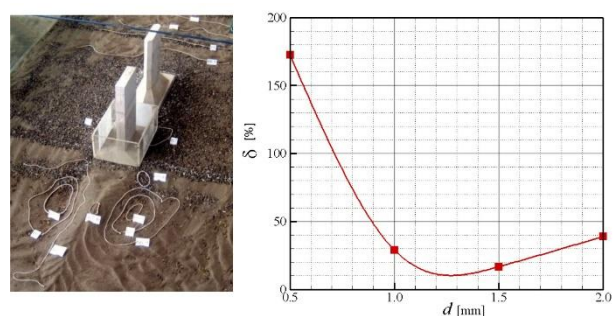
Poznato je da se zbog dužine, rečni fizički modeli grade sa pokretnim dnom, u distrovanom razmeri (razmera za visinu je krupnija od ramere za dužinu) i da za ove modele treba da važe dve sličnosti sa prirodom: hidrauličke - Frudove (Froude) i psamološke - Šildsove (Shields) [5, 6].

Prva treba da obezbedi da geometrijske i hidrauličke veličine na modelu i u prirodi budu u određenom odnosu, a druga, da osigura isti stepen pokretljivosti nanosa na modelu i u prirodi. Istovremeno obezbeđenje obe sličnosti na istom modelu nije moguće. Zbog toga se mora, shodno prirodi problema, svesno donekle “žrtvovati” jedna sličnost, pod uslovom da to bitno ne utiče na pouzdanost modelskih ispitivanja.

Odstupanje od pune Frudove sličnosti (“kvazi Frudova sličnost”) primenjuje se u slučaju velikih aluvijalnih vodotoka sa peščanim dnom, kada se ispituju opšta ili lokalna deformacija korita. Tu je važno zadovoljenje pune psamološke (Šildsove) sličnosti za pokretljivost nanosa. Dopušta se da se vrednosti Frudovog broja na modelu i u prirodi malo razlikuju, jer su kod velikih reka te vrednosti ionako male.

S druge strane, odstupanje od pune psamološke sličnosti (“kvazi Šildsova sličnost”) primenjuje se u slučaju bujičnih vodotoka sa veoma krupnim nanosom, u burnom ili mešovitom režimu tečenja. Tu se ne sme odstupiti od pune Frudove sličnosti, jer su hidrauličke promene veoma izražene i nagle, pa je važno da (visoke) vrednosti Frudovog broja na modelu i u prirodi budu jednake.

U oba slučaja se javlja problem definisanja materijala sa kojim će se vršiti opiti na fizičkom modelu. Kada se radi sa punom psamološkom, a kvazi hidrauličkom sličnošću, krupnoća peščanog materijala se bira tako da odstupanje od pune Frudove sličnosti bude najmanja (Slika 2). Tako određena srednja krupnoća peščanog materijala na modelu se razlikuje od srednje krupnoće peska iz rečnog korita, koji nije pogodan kao radni materijal u laboratoriji.



Slika 2. Ispitivanja lokalne erozije na fizičkom modelu; levo: model stuba mosta na Dunavu kod Beške u razmeri 1:40; desno: zavisnost odstupanja od Frudove sličnosti (relativne razlike vrednosti Frudovih brojeva na modelu i u prirodi) od srednje krupnoće zrna peščanog materijala na modelu (optimalna vrednost $d = 1,2 - 1,3$ mm) [2, 5].

2.4 Greške u projektovanju

Regulacija reka (kao i svaka druga inženjerska oblast), inherentno sadrži dva pitanja: „kako” i „zašto”. Kako projektovati ili izvesti neke radove? Zašto se javio problem koga treba rešiti? Obrazovanje inženjera uglavnom daje iscrpne odgovore na prvo pitanje, dok ono drugo najčešće ostaje bez odgovora, ili dobija polovičan odgovor. Osnovni razlog je u tome što je na pitanje „zašto” teže odgovoriti nego na pitanje „kako”, jer se radi o nedovoljnom poznavanju fizičkih procesa. I u našoj praksi, razmatranje materijalne realizacije projekta („kako”) prednjači u odnosu na razmatranje konceptijske opravdanosti („zašto”). To za sobom povlači greške, koje kompromituju struku i dovodi do nepotrebnih troškova. Evo nekih primera.

(1) Kod nas se tradicionalno razlikuje „gradski” (urbani) i „poljski” (ruralni) tip regulacije reka. Prvi podrazumeva konstantan uzdužni nagib dna i geometrijski pravilan oblik poprečnog preseka regulisanog korita (najčešće dvogubo trapezno korito sa kamenom obloženim kosinama).

Drugi, „poljski” tip regulacije podrazumeva manja ulaganja, tako što se obaloutvrdama štite konkavne obale samo pojedinih, erozijom najugroženijih krivina. Problem nastaje kada se po inerciji, shodno praksi „prenosjenja” tipskih rešenja, za regulaciju u vangradskim uslovima primene elementi gradske regulacije - pravilni oblik poprečnih profila i konstantni uzdužni nagib dna. Može se ispostaviti da takvo rešenje bude neodrživo bez potpunog oblaganja korita, jer morfološke promene korita vremenom mogu potpuno promeniti projektnu propusnu moć regulisane deonice.

(2) Greši se i kada se u okviru poljske regulacije vodotoka, odbrambeni nasipi olako projektuju (a potom i izgrade) u neposrednoj blizini glavnog korita, u želji da se uveća branjeno područje. U uslovima uskog proticajnog profila za velike vode i velike brzine toka, vremenom dolazi do erozije obala i kosina nasipa, pa se prividne koristi na jednoj strani potiru štetom na drugoj strani.

(3) Jedan od primera grešaka u projektovanju odnosi se na obaloutvrde i zabludu da je obloga od kamena zalivenog u cementu uvek bolja od obloge od kamenog nabačaja. Činjenica jeste da obloge od zalivenog kamena vizuelno deluju kompaktnije i čvršće. Međutim, takve obloge su krute i osetljive na deformacije korita i ispiranje filterske podloge, pa ih ne treba po svaku cenu favorizovati, pogoto-

vo ne na bujičnim vodotocima u vangradskim područjima, o čemu svedoči primer na Slici 3.



Slika 3. Obaloutvrde na reci Ribnici; na deonici sa fleksibilnim kamenim nabačajem (levo), obaloutvrda je u toku poplave 2014. god. pretrpela male deformacije; na susednoj deonici, kruta obloga od zalivenog kamena (desno) propala je usled oštećenja nožice i ispiranja filterskog sloja.

(4) Kod nas se ponekad javlja sklonost da se „gotova” projektna rešenja rutinski kopiraju sa jednog rečnog lokaliteta na drugi, pa čak i sa jednog vodotoka na drugi! Naravno da je kopiranje projektnih rešenja nedopustivo, jer je svaka reka jedinstveno „živo biće”. Nepromišljeno, ili nedovoljno prostudirano nametanje regulacionih elemenata (trase, uzdužnih i poprečnih profila, građevina), može samo izazvati neočekivane neželjene efekte i velike materijalne štete.

(5) Parcijalna regulacija vodotoka (samo kritičnih deonica), po pravilu se opravdava nedostatkom sredstava za uređenje vodotoka u celini. Projektuju se regulacioni radovi na kratkim deonicama, po principu fazne izgradnje. To u načelu nije pogrešno, ali često može biti pogubno, jer dugo odlaganje radova za finansijski bolja vremena može dovesti do toga da u međuvremenu morfološke promene korita u potpunosti obezvrede polazno projektno rešenje.

3. REGULACIJA REKA U PRAKSI

3.1 Integralno gazdovanje vodnih resursima

Tradicionalni pristup je tretirao regulaciju neke rečne deonice kao izolovanu hidrotehničku aktivnost za račun lokalnog investitora. Savremeni pristup nalaže *integralno* uređenje vodotoka, sa rešenjem koje treba istovremeno da zadovolji potrebe više vodoprivrednih korisnika na širem slivnom području, uz ispunjenje ekoloških i socioloških zahteva. To nužno nalaže i uključivanje stručnjaka neinženjerskih profila (biologa, ekologa, sociologa i dr.), što regulaciji reka daje interdisciplinarni karakter.

U tehničkom smislu, integralno uređenje vodotoka garantuje da su na optimalan način pomireni interesi svih

potencijalnih korisnika, a u ekonomskom, da se troškovi izgradnje mogu raspodeliti na pojedine učesnike u skladu sa njihovim investicionim potencijalom i očekivanom dobiti od korišćenja regulisanog vodotoka.

Očuvanje ekološkog diverziteta je postalo veoma važan element integralnog uređenja vodotoka. Na duži rok, ekološka zaštita je pitanje opstanka u globalnim razmerama. To nameće nove ciljeve na planu zaštite voda i upravljanja vodnim režimom, pa se inženjerska rešenja sada obavezno valorizuju i sa stanovišta uticaja na životnu sredinu.

3.2 Zaštita životne sredine

Ekološki merodavni protok. Regulacija reka se tradicionalno oslanjala prvenstveno na protok osrednjen u višegodišnjem periodu, a u izvesnoj meri i na sezonsku raspodelu protoka pri rešavanju problema snabdevanja vodom u sušnom periodu, odnosno odbrane od popava u periodu velikih voda.

Kako se regulacija reka sada sve više suočava sa novim zahtevima u pogledu zaštite životne sredine, javila se potreba za dodatnim hidrološkim podlogama, pre svega za određivanjem najmanjeg protoka koji obezbeđuje opstanak rečnih biocenoza.

Za ekološko upravljanje vodnim režimom koristi se tzv. „Garantovani Ekološki Protok” (GEP) koji „kvantitativno i kvalitativno obezbeđuje opstanak i razvoj akvatičnog ekosistema, posebno u kriznim periodima malih voda” [3].

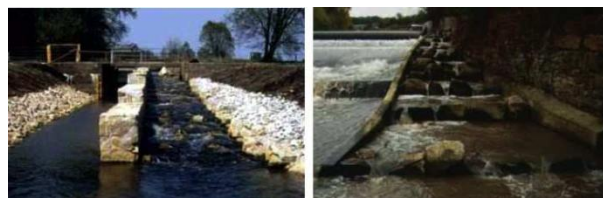
Za njegovo određivanje koriste se hidrološki statistički podaci, hidraulički parametri, kriterijumi očuvanja prirodnih staništa i heurističke metode koje objedinjuju prethodne pristupe. Od hidroloških podataka bitan je protok mesečne male vode verovatnoće 95% (uvećane za 20÷50 %).

Garantovani ekološki protok (GEP) je zasnovan na prosečnom višegodišnjem protoku i sezonskim varijacijama malih voda, tako da se obuhvate topli i hladni periodi godine, sa obezbeđenošću mesečnih malih voda od 80%, odnosno 95 % [3].

U određivanju GEP uključeni su i hidraulički parametri malih voda (brzina toka, dubina i okvašeni obim). Naime, GEP se vezuje za prelomnu tačku na početku krive zavisnosti okvašenog obima od protoka, jer se ova tačka smatra donjom granicom protoka za opstanak vodnog ekosistema. Od posebnog interesa su plitke deonice, koje su kritične za opstanak riblje populacije.

Naturalno uređenje malih vodotoka. Zahtevi zaštite flore i faune u sklopu očuvanja prirodnog ambijenta usmeravaju klasičnu regulaciju *malih vodotoka* u pravcu „naturalnog uređenja” [6]. Naturalno uređenje se uklapa u širi kontekst „prirodno zasnovanih rešenja“ (engl. „Nature-Based Solutions“ NBS [9]).

Ukratko, realizacija naturalno regulisanog vodotoka zasniva se na nekoliko opštih principa: (i) očuvanju krivolinijske trase regulisanog korita; (ii) napuštanju tradicionalnih trapezних poprečnih profila i materijala kao što su beton i čelik; (iii) korišćenju prirodnih materijala (kamena, drveta) za izgradnju regulacionih građevina (Slika 3); (iv) dopuštanju kontrolisanog periodičnog plavljenja inundacija u cilju očuvanja dragocenih biljnih i životinjskih staništa.



Slika 3. Riblje staze (rampe) na rekama Doln (Dölln) i Fils (Fils) u Nemačkoj [6].

Eksploatacija peska i šljunka. Rečni pesak i šljunka su iscrpljiv nacionalni resurs, čija eksploatacija mora biti strogo ograničena, a ilegalna, ili prekomerna eksploatacija, najstrože zabranjena. Dok se u razvijenom svetu korišćenje rečnog peska i šljunka samo izuzetno dozvoljava u proizvodnji visokokvalitetnog betona, kod nas velika potražnja ovog materijala (i zarada od njegove prodaje) ima višestruke devastirajuće efekte po reke i pripadajuće ekosisteme. Vađenje peska i šljunka remeti delikatnu ravnotežu između protoka vode i pronosa nanosa, pa nedostajući nanos reka sama nadoknađuje spontanom produbljenjem korita. To je poznati proces *regresivne erozije*, koji se prostire uzvodno od mesta vađenja peska i šljunka. Rezultujuće produbljenje korita dovodi do sniženja nivoa podzemne vode u priobalju, presušivanja bunara, sušenja šuma i narušavanja staništa.

Jedan primer. Neumerena eksploatacija peska i šljunka u donjem toku Velike Morave dovela je do spuštanja talvega kod Markovačkog mosta (oko 90 km uzvodno od ušća) za čitavih 6 m u proteklih tridesetak godina [7], sa svim navedenim negativnim posledicama. Stvarna količina izbagerovanog materijala nije poznata, ali se veruje da je mnogo veća od dozvoljene. Dodatna negativna posledica ovakvog stanja je da je bilansiranje nanosa u đerdapskoj akumulaciji sada nepouzđano, a predviđanje njenog zasipanja otežano.

3.3 Održivost objekata

Najvažniji uzrok narušavanja održivosti regulacionih objekata kod nas je odsustvo tekućeg održavanja. Predmer i predračun regulacionih radova i objekata su sastavni deo projektne dokumentacije, ali se predračunom najčešće ne obuhvataju finansijska sredstva potrebna za *tekuće održavanje* objekata na godišnjem nivou. Imajući u vidu da su rečne regulacione građevine (obaloutvrde, naperi, pragovi i dr.) većinom od kamena i da su svake godine podložne oštećenjima u periodu velikih voda, jasno je da funkcionalnost ovih građevina zavisi od relativno čestih sanacionih radova koje treba finansirati iz sredstava tekućeg održavanja. Naša praksa da se sanacije finansiraju tek kada objekat potpuno propadne ili u znatnoj meri izgubi svoju funkcionalnu vrednost, stručno i ekonomski je potpuno neprihvatljiva.

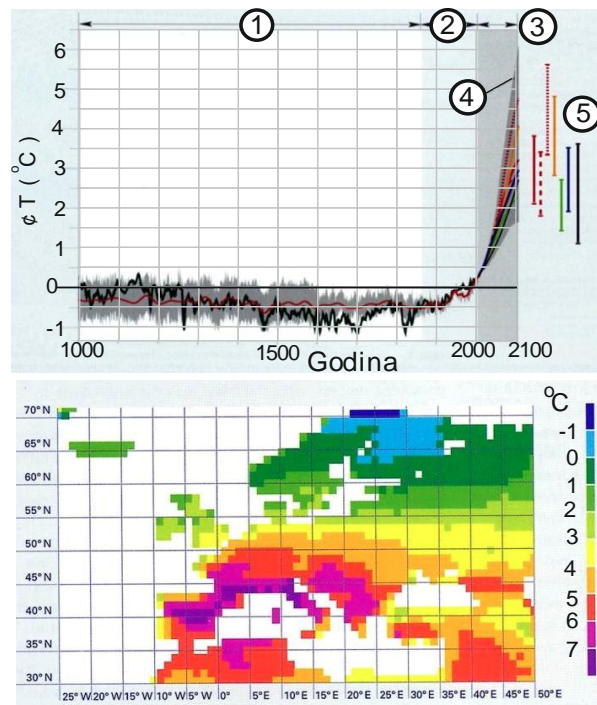
4. ZAŠTITA OD POPLAVA

4.1 Uticaj klimatskih promena

Klima se na Zemlji oduvek menjala, ali se termin „klimatske promene“ koristi za promene od početka dvadesetog veka, kada se namenska hidrološka merenja sistematski sprovode na globalnom nivou. Prema Evropskoj agenciji za životnu sredinu (EEA), obim i brzina klimatskih promena će u relativno bliskoj budućnosti prevazići klimatske varijacije koje su zabeležene u prethodnom milenijumu [10]. Klimatskim promenama doprinose ljudske aktivnosti kroz sagorevanje fosilnih goriva i emisiju gasova sa efektom „staklene bašte“. Zbog tendencije globalnog povećanja srednje godišnje temperature (Slika 4), uveden je termin „globalno zagrevanje“ (engl. „global warming“).

Mogu se očekivati razne nepovoljne posledice globalnog zagrevanja. Za regulaciju reka je od velike važnosti procena uticaja klimatskih promena na režim velikih i malih voda.

Objavljeni izveštaji međunarodnih institucija (kao što su IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change i WMO – The World Meteorological Organization) ukazuju na to da će se srednje godišnje padavine u severnoj i centralnoj Evropi povećati, a u jugoistočnoj Evropi smanjiti. Učestalost intenzivnih padavina će rasti. Zimske padavine će biti pretežno u obliku kiše (a ne snega), sa povećanjem površinskog oticaja i rizika od poplava. Razlika između zimskih i letnjih protoka će rasti. Sve to dovešće do uvećanja potencijalnih šteta od poplava.



Slika 4. Predviđanje porasta srednje godišnje temperature ΔT (°C) do 2100. godine (u odnosu na proseku u periodu 1961-1999); gore: podaci za severnu hemisferu: 1 – rekonstrukcija; 2 – podaci merenja; 3 – projekcije; 4 – anvelopa projekcija koje daju razni prognostički modeli; 5– opsezi projekcija; dole: raspored povećanja srednje godišnje temperature u Evropi [6, 10].

4.2 Strategija za smanjenje šteta od poplava

Iako izolovani ekstremni događaji (kao što je kod nas bila poplava 2014. godine), nisu apsolutni dokaz globalnog zagrevanja, postoji dovoljno indicija da je ovaj proces u toku i da će se možda ubrzati u bliskoj budućnosti. Ako je tako, projektni kriterijumi se moraju preispitati; npr. 100-godišnje velike vode će biti veće u budućnosti (o čemu se u mnogim evropskim zemljama već sada vodi računa). Država, hitne službe, stanovništvo i industrija osiguranja moraju se pomiriti sa činjenicom da će biti sve češćih i katastrofalnijih događaja, sa sve većim štetama.

Suočavanje sa poplavama podrazumeva realizaciju raznih investicionih (konstruktivnih) i neinvesticionih (nekonstruktivnih) mera [6]. Strategija za smanjenje šteta od poplava obuhvata mnoštvo takvih mera, od kojih se ovde ukratko razmatraju dve, iz kategorije neinvesticionih mera. U njihovoj realizaciji će neminovno morati da uzmu učešće buduće generacije hidroiženjera.

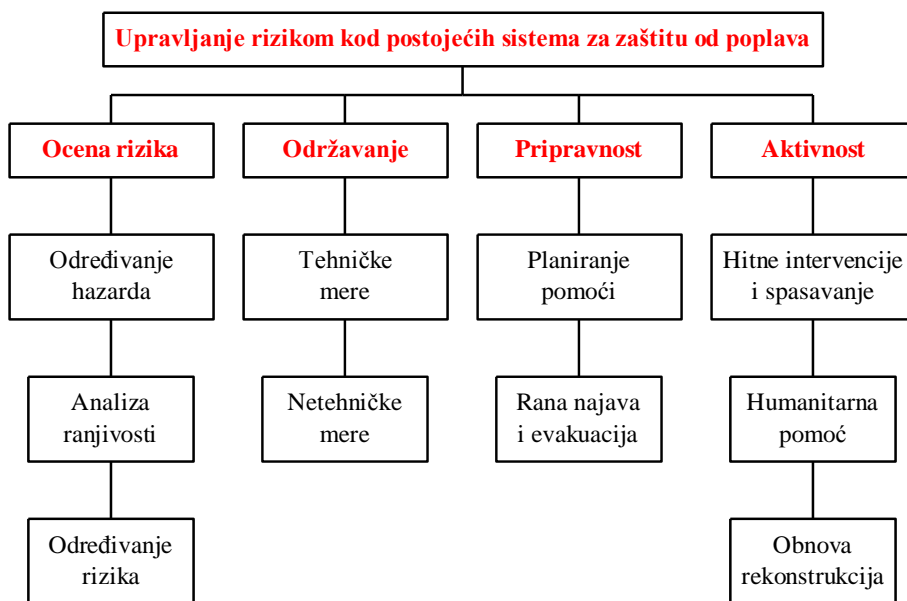
Upravljanje rizikom. Pojam rizika od poplava je izveden iz kombinacije verovatnoće pojave velike vode određenog povratnog perioda (“hazarda”) i štete koju ta poplava izaziva [6]. Ako se izuzmu prirodni uticaji na povećanu učestalost plavnih događaja, povećanje rizika od poplava proizilazi iz povećanja šteta. Taj porast je posledica brojnih faktora, od kojih su tri najočiglednija: (i) porast urbanizacije, sa povećanjem površinskog oticaja i sa većim naseljavanjem priobalja; (ii) promena namene površina, sa zaposedanjem poljoprivrednog zemljišta, isključenjem inundacija i krčenjem šuma i (iii) nedostatak svesti o veličini potencijalnog rizika, naročito o tzv. “zaostalom riziku” koji se odnosi na otkaz postojećih sistema zaštite od poplava.

Termin „upravljanje rizikom od poplava” obuhvata tri vrste aktivnosti neophodnih za: (1) efikasnu eksploataciju postojećih odbrambenih sistema; (2) planiranje novih, ili rekonstrukciju postojećih sistema i (3) pro-

jektovanje optimalnih tehničkih rešenja. Do sada, inženjeri su se uglavnom bavili tehničkim problemima (3), koji se svode na izbor merodavnog projektnog protoka i konstruktivnog rešenja koje će najbolje prihvatiti taj protok i amortizovati njegove posledice.

Upravljanje rizikom kod postojećih odbrambenih sistema sastoji se od aktivnosti koje treba da nepovoljne posledice plavljenja svedu na prihvatljivu meru, prema shemi koja je prikazana na Slici 5.

- *Ocena rizika.* Funkcionalnost postojećeg sistema iziskuje stalno preispitivanje rizika zasnovano na ažuriranim hidrološkim podacima, podacima o nameni površina i teorijskim saznanjima. To podrazumeva inovaciju karti ugroženosti i šteta, na osnovu kojih se identifikuju slabe tačke odbrambenog sistema i definišu novi projektantski i izvođački zadaci.



Slika 5. Upravljačka struktura kod postojećih sistema za zaštitu od poplava [6]

- *Održavanje.* Podrazumeva se da je sistematsko održavanje odbrambenog sistema preduslov njegove funkcionalnosti. Unapređenje može zahtevati lokalne izmene u održavanju postojećeg sistema.
- *Pripravnost.* Radi se aktivnostima koje treba da pomognu u donošenju odluka u vanrednim situacijama. Nijedan sistem nije apsolutno siguran, niti je projektovan za sve verovatnoće plavnih događaja.

- Uvek postoji već pomenuti „zaostali rizik”, kao što je na primer, rizik od proboja postojećih nasipa. Zbog toga se projektuju i grade sistemi za rano upozorenje.
- *Aktivnosti.* Ova komponenta upravljačkog sistema obuhvata sve neophodne mere na pružanju pomoći stradalim od poplave, kao i mere za obnovu oštećenih stambenih i infrastrukturnih objekata.

Osiguranje. Osiguranje je jedna od najvažnijih neinvesticionih mera zaštite od poplava. Tržište osiguranja ima presudnu ulogu u saniranju šteta od poplava u privatnom i korporativnom sektoru. Važna uloga osiguranja je i podsticanje građanstva i privrede da, zahvaljujući povoljnim premijama, unaprede mere sopstvene zaštite. Međutim, uloga osiguranja seže daleko izvan pružanja finansijske nadoknade po zahtevu. Osiguranje treba sistematski da prati i analizira štete pomoću statističkih modela i odgovarajućih baza podataka i da sačini *sopstvene funkcije šteta*. Konačno, tu je prisutna i edukaciona misija da se putem publikacija, seminara i predavanja u javnosti (a naročito kod donosilaca odluka) raširi svest o neminovnosti „življenja sa poplavama”.

Klimatske promene su uticale da se promeni paradigma osiguranja u mnogim zemljama, jer se pokazalo da dosadašnji sistem osiguranja postaje neodrživ. Iskomplikovala se obrada zahteva za obeštećenje, jer je postalo nužno uvesti trijažu prioriteta raznih vodoprivrednih zahteva. Osiguravajuće kompanije sada sve više teže da premije vežu za *kvalitet lokalnih odbrambenih sistema*. Pri tome, standardne polise se nude samo za odbrambene sisteme koji štite od poplava povratnog perioda do 75 godina. (Izuzetak može da bude osiguranje imovine postojećih klijenata do izvesne sume, ali ne i nove imovine.)

Novi konceptualni pristup osiguranju može se opisati i na sledeći način. U početku, kompanije su primenjivale *neaktivni* pristup, odgovarajući na zahteve kada ovi pristignu, ne ispitujući detaljno uzrok zahteva i specifičnosti lokacije. Sa porastom šteta, prešlo se na *reaktivan* pristup, sa prikupljanjem mnoštva informacija u vezi sa konkretnim zahtevom, komunicirajući sa drugim interesnim grupama, kao što su zakonodavci, prostorni planeri, lokalne vlasti i dr. U novije vreme je prisutan *proaktivan* pristup, koji podrazumeva da se rizik od poplava uvede u plansku dokumentaciju i standarde izgradnje objekata. Reč je o interdisciplinarnoj aktivnosti u kojoj osiguranje treba da utiče na donošenje odluka tamo gde se finansijski interesi prepliću sa zahtevima javne sigurnosti, privrednog razvoja i kvaliteta života. Veće učešće hidroiženjera u svemu ovome postaće neminovno.

5. HIDROINŽENJERSKI POZIV

5.1 Obrazovanje hidroiženjera

Imajući u vidu mogućnosti sticanja znanja putem interneta, kao i dostupnost profesionalnog softvera, postavlja

se pitanje kakvu ulogu treba da ima univerzitetsko obrazovanje? Da li hidroiženjer treba da bude znalac ili „potrošač znanja“? Šta čeka hidroiženjere u budućnosti?

Univerzitet mora i dalje da zadrži ključnu ulogu u formiranju inženjera, jer (formalno) ima autonomiju i može da se odupre zakonima tržišta i drugih spoljašnjih uticaja. Fakulteti su pravo mesto za sticanje fundamentalnih i stručnih znanja, u životnom dobu studenata kada se ta znanja najlakše i najbrže osvajaju.

Solidan fond teorijskog obrazovanja, kao i visok nivo opšte kulture (poznavanje jezika, informatička pismenost) daju, po potrebi, inženjerima mogućnost promene specijalnosti i preusmeravanja karijere u nekom drugom pravcu.

Za inženjere koji se bave regulacijom reka važno je da u prvom redu poseduju dovoljno teorijskih znanja (hidraulika, hidrologija), da bi bili u stanju da *upravljaju* informatičkim alatima i da *kontrolišu* rezultate koje dobijaju od tih alata. Računsko modeliranje hidrauličkih pojava (uz sva, prethodno navedena ograničenja), omogućava prilično pouzdano predviđanje fluvijalnih procesa. Uveliko se etablirala oblast “hidroinformatike”, koja, uspostavljajući vezu između eksperata i donosilaca odluka u domenu voda, ima za cilj da pobudi odgovornost društva i pojedinaca za racionalno gazdovanje vodama. To znači da hidroinformatički pristup u rešavanju problema uređenja vodotoka obuhvata hidrauličke, ekonomske, ekološke, pravne i socijalne aspekte tog problema.

U tom kontekstu, treba razmatrati obrazovanje sadašnjih i budućih inženjera koji se bave regulacijom reka. Oni su već sada upućeni na komercijalni softver. (Samo neznatan broj njih će možda baviti programiranjem, ali na amaterskom nivou.) Koristeći gotove hidroinformatičke alate i komercijalni softver, a nemajući uvid u to kako zapravo taj softver “radi”, inženjer-korisnik može da proveriti valjanost rezultata jedino razumevanjem fizičkih procesa i proverom fizičke realnosti dobijenih rezultata. A za to je potrebno solidno poznavanje teorijske rečne hidraulike. Na tom poznavanju se zasniva i rad na terenu (merenja, izgradnja objekata), koji doprinosi sticanju iskustva i razvoju inženjerske intuicije.

S druge strane, rešavanje nelinearnih problema rečne hidraulike, zahteva od inženjera-korisnika komercijalnog softvera i poznavanje (u određenoj meri) numeričkih metoda, njihovih polaznih hipoteza i uslova stabilnosti.

Bez tog poznavanja, proračuni se ne mogu “pokrenuti” i uspešno realizovati.

Iz navedenog proizilazi da univerzitetsko obrazovanje u sferi regulacije reka treba da bude prvenstveno usmereno ka numeričkoj rečnoj hidraulici i pratećim laboratorijskim i terenskim merenjima.

Ova razmišljanja dosežu dokle mogu sadašnja znanja i iskustvo. Ali, već sada se nazire sve veći upliv veštačke inteligencije (AI), sa nezamislivim civilizacijskim preobražajem. Kako će nova paradigma mašinskog učenja uticati na inženjersku struku, možemo samo nagađati. Ipak, kao što medicina već sada postaje sve više „personalizovana“ (umesto generičkih lekova, zahvaljujući DNK analizi, uvodiće se, prema pacijentu „skrojena“, paritkularna terapija), tako se naslućuje da buduća projektna rešenja u regulaciji reka neće biti generička (univerzalni obrasci za nanos, morfološke preporuke za oblikovanje korita, koeficijenati sigurnosti itd.), već će biti partikularizovana na nivou *konkretne rečne deonice*, a zatim, optimizovana na nivou sliva, kako bi se izbegli lokalni optimumi.

Kako AI može uticati na projektovanje u regulaciji reka? Projektovanje je suočeno ne samo sa teorijskim ograničenjima i nepotpunim i neizvesnim podlogama, već i kognitivnim ograničenjima samih projekatata. Tu je prisutno i mnoštvo raznorodnih zahteva, a moguća je i usputna promenljivost ciljnih zadataka. U takvoj situaciji, rešenje pruža jedino timski rad (pre svega inženjera iste ispecijalnosti), kao i računom asistirano (AI) projektovanje. Timskim radom i pretragom baza podataka koje sadrže prethodna iskustva (mašinsko učenje) može se smanjiti subjektivizam u procesu projektovanja i sprovesti čoveku teško ostvariva višekriterijumska optimizacija.

Trenutno, primena AI u građevinskoj praksi je tek u začetku. Kao alternativa klasičnim metodama numeričke rečne hidraulike [2], razvija se koncept „neuronskih mreža podržanih fizičkih zakonima“ - pristup nadgledanog dubokog učenja uz poštovanje zakona fizike, opisanih nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačinama [8]. Za sada ova metodologija pokriva jednostavne slučajeve tečenja podzemnih i površinskih voda, ali nema sumnje da će se na ovom polju već u bliskoj budućnosti ostvariti značajan napredak. Inovativni računski postupci dramatično će uticati na proces projektovanja. Može se zamisliti da scenario budućeg načina projektovanja, zasnovan na AI, ima ovakav redosled: (1) na osnovu stečenih iskustava i definisanih težinskih faktora, generišu se zamenski

vektori (mutacije); (2) nakon ukrštanja, inicijalni projekat daje novu generaciju projektnog rešenja; (3) koristeći zadate kriterijume, selekcijom se dolazi do globalno optimalnog rešenja.

Ovakav pristup projektovanju zahtevaće od inženjera i odgovarajuća znanja koja se do sada nisu sticala na građevinskim fakultetima. Hidroinženjeri „novog kova“, oslobođeni u dobroj meri principa klasičnog projektovanja, biće neminovno usmereni ka praćenju tehnoloških inovacija i posvećeni njihovom uvođenju u praksu.

5.2 Društveni položaj hidroinženjera

Društveni položaj inženjera koji se bave regulacijom reka u suštini nije različit od položaja inženjera drugih hidrotehničkih disciplina. Kod nas je osnovni problem nedostatak svesti u državnoj upravi koliko je za gazdovanje vodama (u najširem smislu) nezamenljiv visoko kvalifikovan, hidrotehnički kadar. S druge strane, prisutna je i pasivnost samih hidroinženjera da se izbere za bolji status u društvu. (Primer ovakvog stanja je da se tokom odbrane od poplava, kod nas javnosti sa meteorološkim i tehničkim podacima obraća policija (“sektor za vanredne situacije”), umesto za to nadležne hidrotehničke institucije!)

Drugi problem za regulaciju naših reka je odstupstvo interdisciplinarnosti. Kao što se hidroinženjeri ne mogu kvalifikovano baviti biologijom i hemijom ekosistema, šumarstvom i poljoprivredom, tako ni inženjeri šumarstva i poljoprivrede nisu dovoljno obrazovani za rešavanje složenih hidrauličkih problema i problema rečne morfodinamike. Borba za opstanak na tržištu dovela je do situacije u kojoj “svi-rade-sve”, umesto da zajednički saraduju. Cena su neodrživa rešenja i nenadoknadive štete.

6. ZAKLJUČAK

Regulacija reka, kao kompleksna hidrotehnička delatnost, suočava se sa velikim prirodnim i društvenim izazovima. Ovi izazovi stavljaju inženjere koji se bave regulacijom reka, pred veliku odgovornost, koja će vremenom biti sve veća, jer se radi o vodi - najdragocenijem resursu budućnosti. Dominantni zadaci regulacije reka biće zaštita od poplava i zaštita životne sredine. Oba zadatka zahtevaju od inženjera solidno teorijsko i stručno obrazovanje. Poplave nisu samo slučajne pojave, već su i rezultat interakcije između prirodnih, tehničkih, političkih, finansijskih i društvenih okolnosti. Neophodne zaštitne mere su ostvarive, ali nikada neće pružiti potpunu zaštitu. Zato je jedna od

važnih uloga inženjera koji se bave regulacijom reka da probude svest ljudi da se u prirodi uvek mogu javiti događaji koji se, uprkos svim merama, ne mogu kontrolisati. Kao što je Aristotel (384-322 p.n.e.) govorio: „Verovatno je da će se desiti neverovatno“ [10].

LITERATURA

- [1] Babić Mladenović, M., Kolarov, V., Smernice za unapređenje zaštite od poplava u Srbiji, VODOPRIVREDA 0350-0519, Vol. 47 (2015) No. 276-278 p. 235-242.
- [2] Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A., Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman, 1980.
- [3] Đorđević, B., Dašić, T., EKOLOGIJA VODOPRIVREDNIH SISTEMA, Građevinski fakultet Beograd i AINS, Beograd, 2019.
- [4] Ivanović, M., Neuronske mreže podržane fizičkim zakonima - praktikum, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, 2023.
- [5] Jovanović, M., REGULACIJA REKA - rečna hidraulika i morfologija (treće izdanje), Građevinski fakultet, Beograd 2023, <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2809>
- [6] Jovanović, M., REGULACIJA REKA - radovi i građevine, Građevinski fakultet, Beograd 2023, <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2810>
- [7] Jovanović, M., „Jedan primer korišćenja savremenih numeričkih alata u projektovanju i održavanju rečnih regulacionih građevina“, VODOPRIVREDA 0350-0519, Vol. 48 (2016) No. 279-281 p. 45-52.
- [8] Jovanović, M., Ocena rizika od erozije rečnog korita oko mostovskih stubova, Vodoprivreda 0350-0519, 38(2006), 2006.
- [9] Vojnović, Z., Nature-Based Solutions - Introduction and policy frameworks, First RECONNECT webinar, IHE Delft, 2023.
- [10] Weather catastrophes and climate change, Münchener Rück, München Re Group, 2005.

ONE VIEW OF OUR RIVER ENGINEERING IN THE PRESENT AND FUTURE

by

Miodrag B. JOVANOVIĆ
mjovanov@grf.bg.ac.rs
mjovanov@sbb.rs

Summary

This paper discusses the problems of river regulation, as an important hydrotechnical branch. A general overview of the problems that arise in designing and solving practical problems is given. In particular, the complexity of flood protection in the context of climate change and strategic requirements for flood risk

management is pointed out. The issues of education of hydraulic engineers and their position in society were also discussed.

Keywords: river engineering, river training works, flood management, education of hydraulic engineers