

## MERODAVNI PROTOCI ZA PRELIVE NA BRANAMA

Živodar ERČIĆ  
Energoprojekt, Beograd

### REZIME

U radu se preporučuje korišćenje protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane, protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива i odgovarajućih nivoa vode u akumulaciji. Prikazane su metode i kriterijumi za određivanje ovih protoka i nivoa i ukratko izložene njihove prednosti i nedostaci. Predloženo je uputstvo za određivanje merodavnih protoka i nivoa koje se oslanja na proces upravljanja rizikom (primarna metoda) i klasifikaciju brana prema priraštaju hazarda (sekundarna metoda).

**Ključne reči:** merodavni protok, merodavni nivo, hidrološka sigurnost brane, hazard, rizik, upravljanje rizikom

### 1. UVOD

Uzroci proloma brana mogu da budu hidrološkog, hidrauličkog, konstruktivnog, geotehničkog i seizmičkog porekla kao i greške u pogonu, neodgovarajuće održavanje, ratna dejstva, sabotaze i kombinacije napred nabrojanih uzroka od kojih je, ipak, najvažniji onaj hidrološkog porekla.

Naime, bazirajući se na brojnim studijama i statističkim podacima utvrđeno je da je hidrološki aspekt najčešći uzrok rušenja brane. Tako je, na primer, u Biltenu N<sup>o</sup>99 Međunarodne komisije za visoke brane (ICOLD) iz 1995. god. [1] između ostalog izneto:

- da je prelivanje vode preko krune najčešći uzrok proloma brane (36% od svih porušenih brana),
- da je ovaj uzrok proloma najčešći kod nasutih brana (87% od svih porušenih nasutih brana) i
- da procenat proloma betonskih brana zbog preliivanja preko krune iznosi oko 24% od svih porušenih betonskih brana.

S obzirom da posledice rušenja brane mogu da budu katastrofalne u mnogim zemljama doneta su uputstva a u nekim i zakoni u vezi sa određivanjem protoka merodavnog za sigurnost brane i/ili dimenzionisanje preлива. U našoj zemlji takva regulativa ne postoji.

Glavna tema ovog rada je predlog uputstva za određivanje merodavnih protoka i nivoa vode u akumulaciji. U radu se ne predlažu jednostavne formule za određivanje merodavnih protoka, ne utvrđuje se detaljna procedura koju bi mogli da koriste i projektanti bez odgovarajućeg iskustva u projektovanju preлива niti se određuje jedna kruta procedura koja bi omogućavala vlasniku brane da izbegne donošenje odluke. Cilj rada je da istakne potrebu da se, na osnovu preporučenih metoda i kriterijuma, izradi tehnička podloga kako bi ovlašćeni organ ili lice moglo da donese odgovarajuću odluku što je korak koji se još uvek ne može izbeći pri izboru merodavnih protoka.

Predlaže se da se određuju i koriste dva protoka, jedan koji je merodavan za sigurnost brane i drugi koji je merodavan za dimenzionisanje preлива. Takođe je potrebno da se za svaki od ovih protoka odrede odgovarajući nivoi vode u akumulaciji pri kojima će oni isticati iz nje.

Terminom "protok merodavan za sigurnost brane" naziva se vrh hidrograma poplavnog talasa koji ulazi u akumulaciju, prolazi kroz nju deformišući se znatno ili neznatno i otiče nizvodnoproko preлива ili i preko krune brane, pri nivou vode u akumulaciji merodavnom za sigurnost brane. Ovaj nivo je i najviši dozvoljeni nivo vode u akumulaciji. Po definiciji, merodavni protok je maksimalni ulazni protok pri kome brani još uvek ne pretili opasnost od rušenja ukoliko su ona i njeni prateći organi korektno projektovani. Svaki protok veći od merodavnog za sigurnost mogao bi da bude uzrok rušenja brane.

Terminom "protok merodavan za dimenzionisanje preliva" naziva se vrh ulaznog hidrograma poplavnog talasa koji prolazi kroz akumulaciju transformišući se u njoj i otiče nizvodno isključivo preko preliva, pri nivou vode u akumulaciji merodavnom za dimenzionisanje preliva. Ovaj nivo je niži od nivoa vode merodavnog za sigurnost brane.

Iz prethodnog proizlazi da je zadatak ekipe koja projektuje branu (ili se bavi analizom sigurnosti postojeće brane) da, između ostalog, odredi:

- a) ulazni hidrogram i nivo koji je merodavan za sigurnost brane;
- b) ulazni hidrogram i nivo koji je merodavan za dimenzionisanje preliva.

## 2. OSVRT NA METODE I KRITERIJUME ZA ODREĐIVANJE MERODAVNIH PROTOKA

Najpoznatije metode koje se i danas koriste u većem ili manjem obimu su empirijske formule, anvelope maksimalnih protoka, probabilističke metode, hidrometeorološke metode, klasifikacija brana prema priraštaju hazarda, analiza ekonomski optimalnog rizika i proces upravljanja rizikom.

Razvijene su tri generacije kriterijuma za određivanje merodavnih protoka. Prva generacija kriterijuma zasniva se na empirijskim razmatranjima (protok veoma male verovatnoće pojave) i primenjivala se na sve brane bez obzira na nizvodni hazard. Druga generacija kriterijuma zasniva se na klasifikaciji brana prema nizvodnom hazardu i kriterijumu optimalnog rizika. Kriterijumi ove generacije primenjivani su na sve brane iz jedne klase hazarda. Treća generacija kriterijuma ima za osnovu pojam prihvatljivog rizika i primenjuje se isključivo na svaku branu pojedinačno.

### 2.1. METODE I KRITERIJUMI PRVE GENERACIJE

#### 2.1.1. Empirijske formule i anvelope

Ovo su prve metode koje su se zasnivale na većem broju registrovanih maksimalnih protoka u nekom regionu. Pošto danas postoje mnogo preciznije metode za proračun merodavnih protoka, korišćenje empirijskih formula i anvelopa ograničeno je samo na regione sa vrlo malo hidroloških i meteoroloških podataka.

#### 2.1.2. Probabilističke metode

Osnovni princip ove metode je da se neka poznata teoretska raspodela verovatnoće prilagodi registrovanom uzorku nekog događaja tako što će parametri koji karakterišu funkciju raspodele biti izračunati na osnovu registrovanih vrednosti događaja (na primer protoka).

Funkcija raspodele verovatnoće koje se koriste u hidrologiji ima mnogo a njihov broj i dalje raste. Sve su one neograničene sa gornje strane ali se poslednjih godina počinju koristiti i raspodele kao što je klasična log-normalna raspodela u koju je uneto ograničenje sa gornje strane pomoću transformacije promenljive. Pri primeni ove raspodele vrednost gornje granice mora biti unapred poznata [2].

Na raspolagju je i više matematičkih testova pomoću kojih se može verifikovati da li je neka raspodela dobro prilagodava nekom uzorku, ali ne postoji efikasan metod na osnovu kojeg se, između svih raspodela koje se mogu prilagoditi, može odrediti ona koja se najbolje prilagodava registrovanom uzorku. Praktično nema ni jednog ozbiljnog razloga da se da prednost jednom zakonu više nego nekom drugom jer se ni jedan ne oslanja na fizičko tumačenje događaja dok ekstrapolovane vrednosti mogu značajno da zavise od izabranog zakona. Naime, sve funkcije raspodele daju približno iste rezultate za verovatnoće prevazilaženja koje se nalaze unutar perioda registrovanja podataka, ali, razlika u rezultatima može biti značajna za verovatnoće koje se nalaze izvan perioda registrovanja i povećava se sa smanjenjem verovatnoće prevazilaženja.

U praksi projektovanja brana uobičajeno je da se retki događaji (kiše, protoci i dr.) specificiraju terminom "povratni period". Ovaj izraz nije potpuno korektan a može dovesti i do nerazumevanja kod lica kojima nije bliska ova materija. Na primer, za protok 10.000 godišnjeg povratnog perioda bolje je reći da ima "1 u 10.000 šansi da će se protok ove veličine ili veći desiti svake godine". U ovom Uputstvu se uglavnom koristi izraz "Verovatnoća Godišnjeg Prevazilaženja" (VGP) za protok o kome je reč. Tako 10.000 godišnjem povratnom periodu odgovara  $VGP=0.0001$ .

U radu se ne navode matematički izrazi i detalji u vezi sa primenom ovih funkcija u statističkoj analizi hidroloških fenomena. Umesto toga naglašeni su nedostaci ovih metoda koji ograničavaju korišćenje

funkcija raspodele pri analizi i izboru protoka merodavnih za sigurnost brane.

#### (a) Statistička analiza protoka

Registrovani podaci koji se koriste u ovim analizama su ili registrovani maksimalni protoci u godini ili svi protoci koji su veći od nekog unapred izabranog protoka  $Q_0$ .

Jedno vreme se smatralo da se problem određivanja merodavnih protoka može rešiti ako se raspolaže dovoljno dugim nizom registrovanih godišnjih protoka i adekvatno izabranom funkcijom raspodele verovatnoće. Međutim, pojava protoka koji su znatno prevazilazili merodavne protoke koji su bili procenjeni pomoću analize verovatnoće prevazilaženja, smanjili su ugled ove analize kao pouzdanog sredstva za procenu protoka merodavnih za sigurnost brane. U literaturi se može naći mnogo ovakvih primera od kojih se ovde navodi slučaj sa merodavnim protokom za branu Rincon de Bonet, Rio Negro (Urugvaj), veličine  $9200 \text{ m}^3/\text{s}$ , određenog na bazi statističke analize 37 godišnjeg niza godišnjih maksimalnih protoka i koji je imao  $VGP=0.001$ . Ali, 24 godine po izgradnji brane registrovan je protok od  $17.100 \text{ m}^3/\text{s}$  koji je bio skoro dva puta veći od usvojenog merodavnog protoka.

Za napred opisani slučaj moglo bi se primetiti da podatak koji po veličini tako ekstremno odstupa od drugih ne treba uvesti u statističku analizu ali tada bi utvrđivanje parametara koji određuju raspodelu bilo veoma subjektivno.

Ima mišljenja da se uočeni problem može rešiti uvođenjem u analizu intervala poverenja čija gornja i donja granica obuhvataju izvestan broj linija raspodele verovatnoće svih mogućih uzoraka iz populacije. Ipak, ovim postupkom se ne rešava napred istaknuti problem s obzirom da se i interval poverenja izračunava na bazi registrovanog uzorka koji može sadržati i nedoumicu da li, pri utvrđivanju statističkih parametara, treba izostaviti jedan ili dva najveća registrovana protoka.

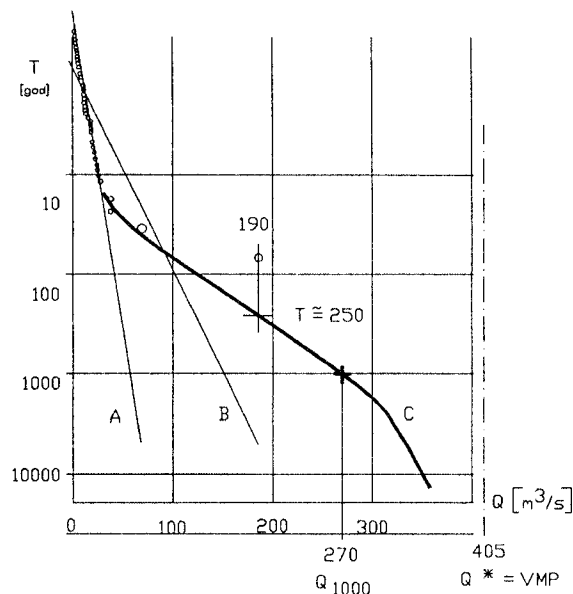
Glavna teškoća u primeni nabrojanih funkcija verovatnoće proizlazi iz njihovog oblika koji se ne prilagođava populaciji u domenu protoka izuzetno retke pojave. Naime ... "vanredno velike vode, takozvani ekscesi, prouzrokovani su od vanrednih klimatskih i oticajnih prilika i ne mogu se stavljati u užu vezu sa pojavom uobičajenih godišnjih velikih voda. Ne mogu se, dakle, velike vode retkih učestalosti određivati

produženjem prave linije verovatnoće ... Ne može se ni tražiti da tačke vanredno velikih voda leže na pravoj liniji verovatnoće čiji nagib zavisi od tačaka velikih voda veće učestalosti" (citat iz rada [3]).

Predhodni stav se zastupa i u radu [4] u kome se navodi da se ne može smatrati da raspodela verovatnoće koja važi za  $VGP = 0,01$  može važiti i za vrlo retke protoke koji imaju  $VGP \ll 0,01$  iz sledećih razloga:

- infiltracioni kapacitet tla je ograničen pa je, posledično, koeficijent oticaja za ekstremno velike padavine veći od koeficijenta za registrovane maksimalne padavine, odnosno protoke na osnovu kojih su određeni parametri raspodele verovatnoće,
- propusna moć rečnog korita je takođe ograničena, što dovodi do plavljenja priobalja odnosno do smanjenja vršnog izuzetno velikog protoka,
- količina padavina ima neku konačnu maksimalnu vrednost.

U istom radu je prikazana analiza maksimalnih godišnjih protoka reke Jona na kojoj je registrovano 64 maksimalnih godišnjih protoka.

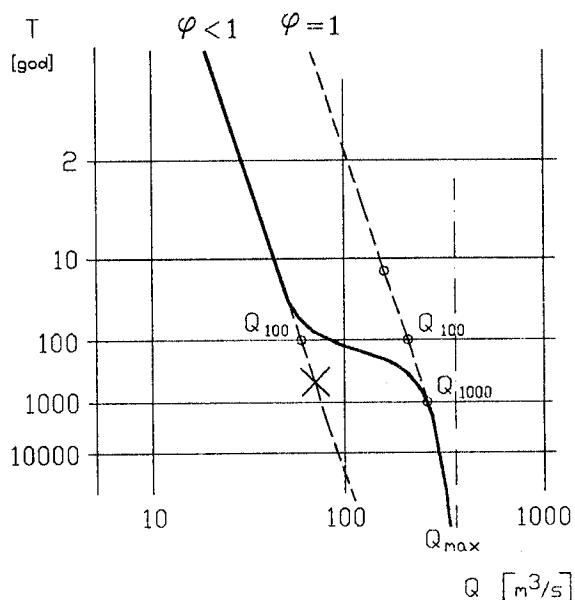


Slika 1. Odnos protok - verovatnoća za reku Jona [4]

Pri konstrukciji linije A na slici 1 izostavljena su dva najveća protoka dok je linija B konstruisana na osnovu svih raspoloživih podataka. Protoci verovatnoće 0.001 sa linija A i B su  $57 \text{ m}^3/\text{s}$  odnosno  $154 \text{ m}^3/\text{s}$  a maksimalni zabeleženi protok je  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ . Očigledno je da se kriva B ne prilagođava dobro registrovanim

podacima. Teoretski, kriva A se znatno bolje prilagođava. Ali ako se uzme u obzir da je najveći registrovani protok ( $190 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tri puta veći od 1000-godišnjeg protoka prema krivoj A, kao i da kiša koja je izazvala ovaj protok ima povratni period od svega 200÷300 godina, ima osnove za zaključak da ni kriva A ne predstavlja zavisnost protok-verovatnoća za populaciju dok bi kriva C to mogla da bude. Moguće objašnjenje za gore rečeno je vrlo veliki infiltracioni kapacitet tla pa je, posledično, registrovan relativno mali oticaj pri kišama umerenog intenziteta.

Kada je reč o izboru protoka merodavnog za sigurnost brane moglo bi se pretpostaviti da se ekstremni protoci mogu desiti samo kada je tlo zasićeno na početku pojave ovih protoka tj. kada je koeficijent oticaja  $\varphi=1$ . Pod ovom pretpostavkom realna funkcija verovatnoće koja bi važila za celu populaciju imala bi oblik kao na slici 2.



Slika 2. Šematska predstava realne krive protok-verovatnoća [5]

Iz prethodnog prizilazi da bi kriva protok-verovatnoća koja bi mogla da se prilagodi i protocima vrlo retke pojave morala da ima "S" oblik.

Australijski nacionalni komitet za visoke brane (ANCOLD) takođe ukazuje da raspodelu verovatnoće, određenu pomoću registrovanih maksimalnih godišnjih protoka srednje veličine, ne treba koristiti za vrednosti VGP manjih od 0.01 [6]. Ali, pošto u hidrotehničkoj

praksi postoji potreba za korišćenjem linije raspodele i za vrednosti VGP znatno manjih od 0.01 (npr. za određivanje ekonomski optimalnog rizika) Komitet je preporučio oblik krive koji treba koristiti u intervalu između  $VGP=0.01$  i verovatno maksimalnog protoka (VMP). Detaljan opis procedure za ekstrapolaciju linije verovatnoće i bezdimenzionalne koordinate ove krive prikazani su u literaturi [7].

Ukratko, može se zaključiti da probablistički pristup, iako jedan od najviše korišćenih metoda za određivanje merodavnih protoka, nije pouzdan zbog sledećih nedostataka metode:

- teoretske distribucije nemaju za bazu fizičke zakone oticaja,
- ekstrapolacijom linije raspodele verovatnoće ne određuje se pouzdano oblik ove linije u domenu malih verovatnoća,
- parametri funkcije raspodele mogu imati znatan stepen nepouzdanosti,
- registrovani protoci (posebno maksimalni) mogu biti netačni zbog greške pri merenju ili pri ekstrapolaciji krive protoka rečnog korita,
- registrovani podaci mogu biti heterogeni zbog modifikacije karakteristika sliva tokom vremena, što je i najveća prepreka korišćenju ove metode,
- registrovanim protocima moguće je prilagoditi više poznatih funkcija raspodele verovatnoće koje mogu dati vrlo različite protoke za vrlo malu verovatnoću prevazilaženja.

Ako je, pak, neophodno korišćenje linije verovatnoće u domenu verovatnoća manjih od 0.01, u tehničkoj literaturi se preporučuje ili primena "S" krivih prema literaturi [7] ili primena linearne ekstrapolacije linije verovatnoće od 100-godišnjeg protoka do verovatno maksimalnog protoka u log-log koordinatnom sistemu [8].

#### (b) Regionalna statistička analiza protoka

Statistička analiza registrovanih protoka na regionalnom nivou je jedna od metoda kojom se pokušava da se reši problem nedostatka dovoljno dugog niza registrovanih protoka u jednoj tački regiona.

U regionalnoj analizi se, između ostalih, koristi i metode standardizovanih protoka (Index Flood Method). Detaljan opis postupka izložen je u literaturi [9]. Osnovna ideja ove metode je da se na regionalnom nivou odredi raspodela verovatnoće,  $K=K(P)$ , indeksa

$K = Q/Q_{mp}$  gde je  $Q_{mp}$  - prosečna vrednost maksimalnih godišnjih protoka u profilu koji se analizira.

O ovom načinu određivanja protoka vrlo male verovatnoće prevazilaženja vladaju podeljena mišljenja. U SAD metoda je napuštena sredinom osamdesetih godina prošlog veka zato što ne obuhvata uticaj veličine slivne površine na statističke parametre funkcije  $K=K(P)$  kao i zbog teškoća u vezi sa standardizacijom registrovanih protoka [8].

#### (c) Statistička analiza padavina

Slično kao kod protoka, na registrovane serije godišnjih ekstrema određenog trajanja (na pr. 1 sat, 6 sati, 1 dan itd.) prilagođava se neka od poznatih raspodela. Takođe je moguće da se statistički analiziraju i sve kiše veće od neke unapred izabrane.

Ukoliko su sve maksimalne godišnje nepogode posledica iste klase meteoroloških uslova (npr. nema ciklona u pojedinim godinama) a intenzitet ekstremnih kiša ne varira mnogo iz godine u godinu, moguće je da se dovoljno tačno odrede intenziteti kiša za male vrednosti VGP, čak i do  $VGP=0.001$ . Ako nisu ispunjene gornje pretpostavke, zavisnost kiša-verovatnoća može biti korišćena do vrednosti  $VGP=0.01$  sa eventualnom ekstrapolacijom do  $VGP=0.002$ .

Interesovanje za statističku analizu merenih kiša, kao osnove za procenu protoka sa malim VGP, poraslo je posle pojave teorije jediničnog hidrograma. Jedna od prvih metoda ove vrste bila je da se, na osnovu kiše unapred izabrane verovatnoće prevazilaženja i jediničnog hidrograma, odredi odgovarajući oticaj. Pri tome se pretpostavljalo da kiše i odgovarajući oticaj imaju isto VGP. Ova pretpostavka se mora koristiti sa rezervom.

#### (d) Metoda Gradex

Metoda GRADEX počiva na hipotezi da svako povećanje kiše ( $dP_H$ ) izabranog trajanja iznad nede granične vrednosti, koja zavisi od infiltracionog kapaciteta tla pri kojoj je tlo zasićeno, proizvodi povećanje zapremine oticaja ( $dV_H$ ) jednake zapremini pale kiše. Posledično, linije raspodele ekstremnih kiša  $F(P_H)$  i odgovarajućih zapremina oticaja, tj. srednjih H-časovnih protoka  $G(Q_H)$ , su paralelne na Gumbel-ovom dijagramu.

U slučajevima kada se može upotrebiti, metoda GRADEX predstavlja vrlo jednostavan i pouzdan način za određivanje vrlo retkih protoka. Detaljan opis metode izložen je u radovima [10,11] a na našem jeziku u radu [12].

#### 2.1.3. Hidrometeorološke metode

U kontekstu određivanja merodavnih protoka ovu metodu čine:

- procedura za procenu izuzetno velike kiše koja bi mogla pasti na sliv u sadašnjim klimatološkim uslovima i
- procedura za određivanje odgovarajućeg hidrograma protoka u željenom profilu rečnog toka.

Najpoznatiji proizvod hidrometeoroloških metoda je "verovatno maksimalni protok (VMP)" kao posledica "verovatno maksimalne kiše (VMK)" koja može pasti na sliv.

U prvo vreme za izuzetno velike kiše korišćen je termin "maksimalno moguća kiša". Docnije je ovaj termin zamenjen izrazom "verovatno maksimalna kiša (VMK)" kojim se nagoveštava da je maksimalna vrednost kiše nešto manja u odnosu na maksimalno moguću i ukazuje da procena maksimalnog kišnog potencijala sadrži dozu neizvesnosti.

Korišćenjem raspoloživih metoda za konverziju padavina u protok može se odrediti hidrogram u bilo kom profilu rečnog toka kao posledica verovatno maksimalnog pljuska. Maksimalni trenutni protok u ovom hidrogramu nazvan je "verovano maksimalni protok (VMP)" i definiše se kao "protok koji se može očekivati iz najnepovoljnije kombinacije meteoroloških i hidroloških uslova koji su opravdano mogući u slivu". Drugim rečima, to je maksimalni protok za koji se smatra da postoji realna mogućnost da se desi. VMP, ili procenti od VMP, koriste se u mnogim zemljama kao protoci koji su merodavni za sigurnost brane i dimanzionisanje preliva.

##### 2.1.3.1. Procena verovatno maksimalne kiše

Kada generalizovane mape nisu raspoložive, za procenu VMK i njene prostorne i vremenske raspodele obično se koristi metoda maksimizacije najveće registrovane nepogode "in situ" ili nepogode koja je prenetna do sliva koji se analizira sa drugih lokacija unutar meteorološki homogenog regiona.

Ako topljenje snega značajno učestvuje u formiranju VMP mora se izučiti i odrediti kritična kombinacija kiše i istopljenog snega.

Detaljan opis procedure za određivanje VMK koristeći deterministički pristup prikazan je u literaturi [13] i [14].

Druga, često korišćena ali mnogo manje pouzdana metoda za procenu VMK je statistička procedura. Najviše korišćena statistička metoda, poznata pod imenom metoda Hershfield, bazira se na opštoj formuli [15]:

$$X_{\max} = X_n + K_{\max} S_n$$

gde je:

$X_{\max}$  = VMK

$X_n$  - prosečna vrednost serije od n godišnjih maksimalnih protoka

$S_n$  - standardna devijacija iste serije

$K_{\max}$  - broj standardnih devijacija

Vrednost  $K_{\max}$  zavisi od trajanja kiše i vrednosti  $X_n$  [16]. Što je region sušniji to je veća vrednost  $K_{\max}$ . U SAD i još nekim zemljama utvrđeno je da je koeficijent  $K_{\max} = 15-20$ .

Pošto se statističkom metodom određuje vrednost VMK u tački, potrebno je da se izvrši redukcija ove vrednosti kako bi se odredila prosečna visina kiše po celoj površini sliva. U tu svrhu koriste se redukcionne krive na osnovu kojih se određuje redukcionni koeficijent u zavisnosti od površine sliva i trajanja kiše [17].

Bilo na koji način da je određena, VMK mora biti predstavljena na način koji uslovljava model konverzije padavina u protoke. Generalno, VMK se predstavlja kao prostorno osrednjena vrednost po slivu, podslivu ili nekom geometrijskom elementu u zavisnosti od modela koji se koristi. Takođe i intenzitet kiše treba da bude osrednjen u nekom vremenskom intervalu.

### 2.1.3.2. Opšte o konverziji padavina u protok

Problem konverzije kiše u oticaj sa sliva se može podeliti na dva podproblema:

- (a) podela ukupne pale kiše na tri glavna dela: prihranjivanje podzemne vode, površinski oticaj (efektivna kiša) i ukupno isparavanje, uključujući i evapotranspiraciju i

- (b) reakcije sliva koje mogu biti opisane nekim funkcijama, prostim (na primer, jediničnim hidrogramom) ili složenim konceptualnim modelima ili veoma složenim modelima sa fizičkim parametrima.

Za korektnu konverziju padavina u protoke neophodno poznavati veći broj podataka koji se mogu svrstati u sledeće dve kategorije:

- fizički atributi sliva i
- podaci koji su u vezi sa kretanjem vode u okviru hidrološkog ciklusa

Jedan od važnih aspekata pri izboru procedure za konverziju padavina u protoke je veličina sliva uzvodno od rečnog profila za koji se oni određuju. Kada se ceo sliv može analizirati kao jedna celina, proračunati hidrogram u najnižvodnijem rečnom profilu u slivu je istovremeno i hidrogram koji se traži.

Velika slivna površina mora se podeliti u više podslivova i za svaki odrediti hidrogram na izlazima iz podsliva. Broj podslivova u koje je podeljen ceo sliv uglavnom zavisi od veličine celog sliva, karakteristika merodavne kiše (veličina i prostorna raspodela) i karakteristika sliva (uglavnom topografija, biljni pokrivač i tlo). Generalno uputstvo je da se ceo sliv podeli tako da prostorne varijacije kiša, karakteristike tla, biljnog pokrivača i topografskih karakteristika budu što manje unutar svakog od podslivova.

Kada su raspoloživi registrovani podaci, važan korak u procesu modelisanja oticaja je podešavanje (kalibracija) parametara fizičkih procesa koji se dešavaju u svakom od podslivova, podešavanje parametara koji su od uticaja na prostiranje i transformaciju talasa na nekoj deonici rečnog toka i, na kraju, podešavanje modela sliva kao celine. Podešavanje treba da se izvrši na bazi podataka koji su registrovani na svim mernim stanicama u slivu. Ukoliko zapremine talasa, vrhovi talasa i vremenski parametri koji su određeni pomoću podešenog modela i poznatih ulaznih podataka nisu približno jednaki odgovarajućim vrednostima za nekoliko registrovanih hidrograma koji su posledica istih ulaznih podataka, mora se izvršiti analiza uzroka odstupanja, tj. analiza greške.

Detaljan opis svih parametara hidrološkog sistema izložen je u [17].

### 2.1.3.3. Procena VMP na osnovu VMK

Padavine, gubici pale kiše, oticaji sa podslivova i prostiranje talasa duž prirodnog rečnog korita i akumulacije, su od najvećeg uticaja ne veličinu VMP.

#### (a) Verovatno maksimalna kiša (VMK)

Verovatno maksimalna kiša (VMK) može se odrediti ili na bazi zavisnosti intenzitet-učestalost-trajanje registrovanih kiša ili pomoću determinističke maksimizacije nekoliko najvećih registrovanih kiša. Druga metoda se u svetu znatno više koristi od prve koja je manje popularna, verovatno zbog arbitrarnog izbora funkcije raspodele kao i zbog još uvek arbitrarnog izbora verovatnoće prevazilaženja vrednosti VMK.

U našoj zemlji je deterministička metoda za određivanje merodavnih protoka veoma retko korišćena uglavnom zbog nekritičkog stava prema probabilističkoj metodi koja zahteva znatno manje uloženi sredstava i truda. Zbog toga još nije izrađena generalizovana mapa VMK za našu zemlju a verovatno nisu raspoložive ni potrebne meteorološke informacije za tu svrhu. Organizovanom prikupljanju ovih informacija trebalo bi pristupiti što pre, prvenstveno za slivove uzvodno od postojećih brana kako bi se omogućila provera njihove sigurnosti od proloma. Na lokacijama na kojima trenutno ne postoje uslovi za primenu hidrometeorološke metode, veličinu verovatno maksimalne kiše treba odrediti pomoću probabalističke metode za verovatnoću prevazilaženja  $10^{-6}$  ili pomoću metode Hershfield za  $K_{\max} = 20$ . Na ovaj način određena vrednost VMK morala bi da bude preispitana pomoću determinističke metode kada se za to steknu uslovi.

#### (b) Gubici kiše i verovatno maksimalna efektivna kiša (VMEK)

Za procenu infiltracionih gubitaka raspoloživo je više metoda koje mogu biti razvrstane na metode sa fizičkom osnovom (Green & Ampt), konceptualne (metode Holtan i Horton), empirijske metode (SCS-CN metode) i metoda incijalnih (izraženih u mm) i konstantnih (mm/čas) gubitaka.

Bilo koja od ovih metoda da se primenjuje neophodno je poznavati prethodne uslove vlažnosti površinskog pokrivača i tla.

Prethodno pomenute metode su detaljno opisane u literaturi [17] i [18]

Utvrđivanje ukupnih gubitaka je važan proces u nekim oblastima hidrologije kao što je, na primer, simulacija protoka reke u nekom dužem vremenskom periodu. Međutim, pri proceni VMEK, kiše su tako velike u odnosu na gubitke pa, posledično, greške u proceni gubitaka mogu biti beznačajne. Prethodni zaključak je osnova za konzervativni prilaz određivanju VMEK na bazi pretpostavke o nultim gubicima kiše. Tako je, na primer, pod ovom pretpostavkom određena VMEK za nekoliko desetina australijskih brana.

#### (c) Transformacija VMEK u površinski oticaj

Za ovu transformaciju na raspolaganju su dva prilaza. Prvi koristi jedinični hidrogram i oslanja se na pretpostavku da se, pri konverziji kiše u oticaj, slivna površina, ponaša kao linearni, vremenski nepromenljiv sistem. Drugi, simulacioni, prilaz sadrži izvestan broj matematičkih jednačina od kojih svaka opisuje komponente hidrološkog ciklusa (padavine, intercepcija, evaporacija, transpiracija, infiltracija, perkolacija i oticaj).

##### (c.1.) Metoda jediničnog hidrograma

Jedinični hidrogram može da bude izveden na osnovu registrovanih hidrograma protoka i odgovarajućih kiša ili je sintetizovan pomoću empirijskih odnosa između parametara jediničnog hidrograma i karakteristika sliva.

Za slivove bez registrovanih podataka, jedinični hidrogram se matematički može predstaviti funkcijom sa jednim ili dva parametra koji su u vezi sa karakteristikama slivne površine. Raspoloživ je priličan broj metoda pomoću kojih se može odrediti jedinični hidrogram. Sve ove metode se mogu svrstati u kategoriju empirijskih ili konceptualnih metoda. Najviše se koriste SLR, Nash, Clark, Snyder i SCS modeli. Prva tri modela su konceptualni a poslednja dva empirijski.

SCS metoda koristi sintetički trougaoni ili empirijski bezdimenzionalni jedinični dijagram  $Q/Q_p = F(t/T_p)$  i empirijske formule na osnovu kojih se mogu izračunati vrednosti  $Q_p$  i  $T_p$  gde su  $Q_p$  vrh jediničnog hidrograma a  $T_p$  vreme od početka oticanja do vrha talasa. Bezdimezionalni jedinični hidrogram metode SCS izrađen je za konstantu iskazanu brojem 484 mada ovaj broj može varirati u granicama od 600 (za slivove sa

strmim padovima) do 300 (blaži padovi). Potreba za usvajanjem konstantnog broja znatnije različitog od 484 (na primer, 300 ili 600) zahteva izradu kompletno novog bezdimenzionalnog jediničnog hidrograma. Zbog toga se ova metoda mora koristiti veoma obazrivo.

Detaljan opis svih pomenutih metoda može se naći u literaturi [17].

Raspoloživo je više računarskih programa za kombinovani proračun efektivne kiše, transfera ove kiše u direktni hidrogram oticaja pomoću jediničnog hidrograma i propagacije talasa duž rečnog toka. Takvi programi su, na primer, HEC-1 Flood Hydrograph Package (U.S. Army Corps of Engineers) ili odgovarajući modul softverskog paketa MIKE-11 (Danish Hydraulic Institute).

Metoda jediničnog hidrograma je izuzetno osetljiva na pogrešne procene baznog oticaja i infiltracije u procesu određivanja jediničnog hidrograma, odnosno kalibracije parametara koji ga opisuju.

Problemi pri korišćenju ove metode mogu da proizađu iz uprošćene predstave izrazito nelinearnog hidrološkog sistema linearnim funkcijama transfera padavina u oticaj. Ovo uprošćavanje može dovesti do velikih grešaka pri primeni metode na vrlo velike protoke ako je model podešen na osnovu umerenih protoka.

Jedinični hidrogram koji je izveden u profilu neke vodomerne stanice na bazi registrovanih podataka ne može se koristiti za procenu protoka u nekom udaljenijem profilu istog rečnog toka. Tako, na primer, metoda može dati pogrešne rezultate ako se za jedinični hidrogram na ulazu u akumulaciju usvoji jedinični hidrogram koji je izveden na osnovu podataka registrovanih u profilu brane u uslovima "bez akumulacije". Razlika nastaje zbog promene u vremenu koncentracije i zbog gubitka površinskih depresija. Iz prethodnog proizilazi da se za duboke i dugačke akumulacije moraju izvesti jedinični hidrogrami za slivnu površinu uzvodno od ulaza glavnog rečnog toka u akumulaciju kao i jedinični hidrogrami na ulivima u akumulaciju svih podslivova koji je okružuju.

Na kraju, može se zaključiti da metoda jediničnog hidrograma daje prihvatljive rezultate ako su jedinični hidrogrami izvedeni za male slivove, pri velikim kišama i u vlažnim predelima i ako su primenjivani u istim uslovima. Ova tri uslova (mali sliv, velika kiša, vlažan predeo) znače da su gubici pale kiše veoma mali u

odnosu na površinski oticaj (tj. efektivnu kišu) i da je sliv relativno ravnomerno pokriven kišom. U praksi se mnogo puta pokazalo da je primena jediničnog hidrograma dala pogrešne rezultate zato što pomenuta tri uslova nisu bila ispunjena.

#### (c.2.) Simulacione metode

Ova procedura za konverziju efektivne kiše u hidrogram ne sadrži pretpostavke o linearnosti i površinske osrednjenosti i tako prevazilazi ograničenja koje u primeni ima metoda jediničnog hidrograma.

Simulacioni model je atraktivan zbog toga što omogućava uvođenje u analizu mnogih karakteristika sliva koji se analizira. Takođe omogućava da se uzmu u obzir buduće potencijalne promene u slivu kao i efekti akumulacije koji mogu biti vrlo značajni.

Ova vrsta modela ima više parametara koji moraju biti podešeni i zahteva raspoloživost podataka o padavinama, protocima, temperaturi i potencijalnoj evaporaciji za period od nekoliko godina. Treba uzeti u obzir da bi parametri modela koji su definisani za frekventnije uslove, mogli biti neadekvatni za slučaj izuzetno velikih protoka kao što je, na primer, VMP. Zbog toga je neophodno da se proceni mogući uticaj podešavanja modela na vrednost VMP.

U poslednjih 30 godina razvijen je znatan broj konceptualnih modela za simulaciju oticaja na osnovu podataka o padavinama. Neki od komercijalnih modela koji su u širokoj upotrebi su:

- SSARR - U.S. Army Corps of Engineers
- HSPF i druge verzije poznatog SWM (Stanford Watershed Model) modela - Stanford University, U.S.A.
- Sacramento Watershed Model - National Weather Service, Sacramento, USA
- NAM modul iz već pomenutog paketa MIKE 11
- RORB - The Institution of Engineers, Australia [19]
- EHS - European Hydrological System [20] i dr.

Bilo koji od ovih modela, kao i mnogi drugi, mogu biti korišćeni za transformaciju VMK u VMP pod uslovom da je raspoloživo dovoljno podataka za pouzdano podešavanje modela. Naime, za slivove bez dovoljnog broja registrovanih podataka primena simulacionih modela po svaku cenu može dati vrlo pogrešne rezultate.



Prema tome, izbor konvencionalnije metode jediničnog hidrograma ili kasnije razvijenih simulacionih tehnika treba da bude baziran na brižljivoj analizi obima i kvaliteta raspoloživih podataka. Generalno, za podešavanje modela za upotrebu pod VMK uslovima neophodno je raspolagati sa, najmanje, nekoliko registrovanih većih nepogoda i odgovarajućih kiša. Takođe je važno da raspodela kišomernih stanica unutar i u blizini sliva bude takva da garantuje prihvatljivu tačnost površinske i vremenske raspodele palih kiša.

#### (d) Prostiranje talasa velike vode

Prostiranje talasa je proces koji određuje vremensku i prostornu promenu hidrograma velike vode tokom njenog kretanja duž neke deonice vodnog toka ili akumulacije. U ovom procesu se obe koordinate hidrograma (protok i vreme) menjaju zbog uticaja efekata zapremine i otpora strujanju unutar deonice toka koja se analizira.

Danas je raspoloživ veći broj metoda za proračun prostiranja talasa koje se, generalno, mogu svrstati u hidrološke i hidrauličke kategorije metoda. Prva kategorija metoda daje prihvatljive rezultate proračuna ako nema značajnijeg uticaja usporavnja rečnog toka ili izraženih diskontinuiteta vodnog ogledala u podužnom smeru. Metodama iz druge kategorije mogu se obuhvatiti efekti usporavanja rečnog toka kao i posledice unutrašnjih graničnih uslova kao što su pragovi, mostovi i druge građevine u koritu reke.

U kategoriji hidroloških metoda za proračun propagacije talasa najpoznatije su:

- Metoda kvaziustaljenog strujanja (Modified Puls Method to Rivers)
- Metoda Muskingum
- R & D procedura (Working Research and Development Routing Procedure) i
- Metoda Muskingum - Cunge

Matematički izrazi koji definišu procese kao i detalji u vezi sa primenom napred nabrojanih metoda izloženi su u literaturi [17].

Osnovni podaci koji su neophodni da bi mogla da se primeni neka od hidrauličkih metoda (aproksimacija) su podaci o protoku (hidrogram), poprečni preseki rečnog korita, dužina deonice, koeficijenti rapavosti, početni i granični uslovi. [17] Za rešenje ovog zadatka

raspoloživo je više komercijalnih računarskih programa od kojih se navode sledeći:

- Gradually Varied Unsteady Flow Profile, Generalized Computer Program - U.S. Army Corps of Engineers
- DAMBRK - U.S. National Weather Service
- HD modul računarskog programa MIKE 11
- River CAD - Boss International
- Surfacewater Modeling System (SMS) - Boss International

Hidrogram protoka koji ulazi u akumulaciju takođe se deformiše u njoj. Raspoloživo je više računarskih programa za ovu vrstu proračuna, a u praksi se najviše koristi metoda kvazistacionarnog strujanja zasnovana na jednačini održanja mase.

#### 2.1.4. Prva generacija kriterijuma

Metode proračuna i kriterijumi prve generacije su u uzajamnoj sprezi. Tako, za sve metode koje za osnovu imaju probabilistički prilaz, ovi kriterijumi se iskazuju vrednostima verovatnoće prevazilaženja merodavnih protoka. Ukoliko se primenjuju hidrometeorološke metode merodavni protok je VMP ili % VMP.

Zajedničko za sve kriterijume prve generacije je da su empirijske prirode i da su, skoro po pravilu, primenjivani za bilo koji veću branu, u bilo kojoj prilici i bez uzimanja u obzir veličine brane, zapremine akumulacije i hazarda. Danas se korišćenje kriterijuma prve generacije na ovaj način smatra zastarelim prilazom u procesu određivanja merodavnih protoka.

Većina preliva na izgrađenim branama u našoj zemlji dimenzionisana je na osnovu probabilističke procedure i kriterijuma prve generacije. Prelivi na većim nasutim branama dimenzionisani su za protok sa  $VGP=0.0001$  dok je za kapacitet preliva betonskih brana usvajan protok sa  $VGP = 0.001$ .

Treba istaći da većina naših organizacija za projektovanje brana i danas koristi probabilistički prilaz u sprezi sa kriterijumima prve generacije.

## 2.2. METODE I KRITERIJUMI DRUGE GENERACIJE

Posledice rušenja brane mogu biti veoma različite od slučaja do slučaja. Zbog toga se metodologija za

određivanje protoka merodavnih za hidrološku sigurnost brane mora zasnivati na odnosu između ovih protoka s jedne i nizvodnih negativnih posledica s druge strane. Ovo je i razlog zbog koga se kriterijumi druge generacije zasnivaju prvenstveno na kategorizaciji brana prema priraštaju hazarda koji potencijalni prolom brane može izazvati nizvodno [21].

U oviru druge generacije kriterijuma, priraštaj hazarda se definiše kao mera priraštaja negativnih posledica proloma tj. mera priraštaja potencijalnih gubitaka ljudskih života, ekonomskih gubitaka, socijalnih potresa i udara na životnu sredinu zbog povećanog plavljenja izazvanog prolomom brane. Priraštaj hazarda je razlika između ukupnih negativnih posledica zbog plavljenja pri maksimalnom protoku pri kome se brana još uvek ne ruši i ukupnih negativnih posledica koje izaziva talas zbog rušenja brane.

Jedan od češće korišćenih parametara pri klasifikaciji brane je tzv. faktor brane  $V \cdot H$  (proizvod zapremine jezera i visine brane). Ali, s obzirom da štete očigledno ne zavise samo od parametara  $V$  i  $H$  već i od naseljenosti doline koja znatno varira od slučaja do slučaja, korišćenje faktora brane gubi realni smisao. Naime, sasvim je jasno da i male zapremine akumulacije mogu izazvati ogromne štete u slučaju proloma brane ako se neposredno nizvodno nalazi veće naselje [22].

Podela na tri klase hazarda (mali, značajni i veliki) je najučestalija i primenjuje se u većini zemalja Evrope, Južnoj Africi, SAD, Kanadi (BCHydro) i dr.

U mnogim zemljama su, zajedno sa klasifikacijom hazarda, uvedena u praksu i dva protoka: protok koji je merodavan za sigurnost brane i protok koji je merodavan za dimenzionisanje preliva.

U vezi sa protocima merodavnim za sigurnost brana velikog hazarda, prisutna su dva svetska trenda:

- SAD, Velika Britanija, Kanada, Australija i zemlje pod njihovim ekonomskim i tehnološkim uticajem koriste determinističke modele i VMP.
- Većina evropskih zemalja koristi probabilističke metode i protoke vrlo malog VGP

U tabeli koja sledi, prikazani su, kao primer, merodavni protoci koji se koriste u Španiji [34].

Kategorija brane	Protoci $Q_p$ merodavni za dimenzionisanje evakuacionih organa (povratni period)	Protoci $Q_s$ merodavni za sigurnost brane (povratni period)
A	1000 godina	$5000 \div 10\ 000$ godina
B	500 godina	$1000 \div 5\ 000$ godina
C	100 godina	$100 \div 500$ godina

Kategorija A odgovara velikom hazardu, B značajnom a C malom hazardu.

Za brane čiji prolom ne ugrožava ljudske živote protok merodavan za sigurnost brane može se odrediti i na bazi analize ekonomski optimalnog rizika (EOR).

Osnovna ideja analize EOR je relativno prosta: treba optimizirati vrednost merodavnog protoka  $Q_s$ , verovatnoće prevazilaženja  $P_s$ , koji mora da bude ispušten iz akumulacije a da, pri tome, ne izazove prolom brane. Jasno je da povećanje merodavnog protoka ima za posledicu povećanje troškova izgradnje preliva ali i redukciju šteta zbog proloma, odnosno da postoji zavisnost između veličine merodavnog protoka i ukupnih očekivanih godišnjih troškova. Verovatnoća proloma brane koja odgovara minimalnoj sumi očekivanih troškova je rizik koji je opravdan sa ekonomske tačke gledišta tj. to je optimalni rizik.

### 2.3. METODE I KRITERIJUMI TREĆE GENERACIJE

Kriterijumi druge generacije su, očigledno, vrlo važna i pozitivna promena u analizi hidrološke sigurnosti brane. Ipak, i ovim kriterijumima se može uputiti nekoliko zamerki od kojih su najvažnije sledeće:

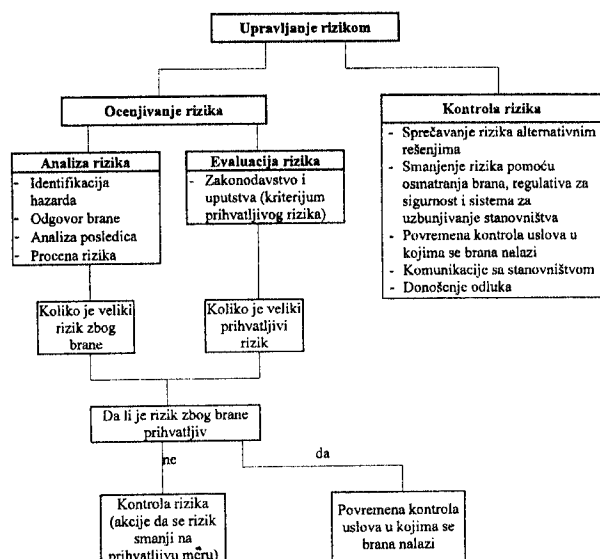
- (1) klasifikacija brane prema priraštaju hazarda je generalno kvalitativna, bez jasno definisanih granica između klasa;
- (2) subjektivnosti pri određivanju klasa je vrlo prisutna pa je, zbog toga, u svetu razvijen veći broj klasa i kriterijuma za izbor merodavnih protoka;
- (3) odnos između potencijalnih posledica nizvodno i kategorija brana je diskontinualan i stepenast a trebalo bi da bude kontinualan
- (4) u kontekstu sigurnosti brane od prelivanja kriterijumi druge generacije ne uzimaju u obzir mogućnost da preliv u jednom trenutku nije operativan onako kako je projektovan pa se može desiti da brana bude prelivena pri protoku koji je manji od merodavnog za sigurnost brane;

- (5) kriterijum VMP koji se najčešće koristi za brane velikog hazarda je konzervativan, ne uzima u obzir broj mogućih izgubljenih života a prilagođavanje izgrađenih brana ovim kriterijumima najčešće zahteva vrlo velike investicije.

Navedeni nedostaci druge generacije kriterijuma bili su povod za razvoj postupka za izbor protoka merodavnog za sigurnost brane na osnovu prihvatljivog rizika usled proloma brane.

U tehničkoj literaturi [23] ovaj postupak je poznat pod nazivom "proces upravljanja rizikom" a tri osnovne komponente procesa su analiza rizika, ocena rizika i kontrola rizika.

Grafički prikaz aktivnosti u procesu upravljanja rizikom prikazan je na sledećem dijagramu toka (slika 3).



Slika 3. Dijagram toka za upravljanje rizikom [23]

Posledično, formirani su kriterijumi na osnovu kojih se utvrđuje da li je rizik zbog postojanja brane prihvatljiv (tj. da li je brana hidrološki sigurna), odnosno određuje se protok koji je merodavan za sigurnost brane.

Proces upravljanja rizikom i kriterijumi treće generacije u svetu se sve više koriste u procesu donošenja odluke o protocima merodavnim za sigurnost brane.

U okviru kriterijuma treće generacije rizik se iskazuje proizvodom verovatnoće događaja (u konkretnom slučaju proloma brane) i posledica, odnosno

očekivanim godišnjim gubitkom ljudskih života i/ili očekivanim godišnjim gubitkom novčanih iznosa. [25]

Poželjno je da rizik bude što manji i uniformno mali za sve brane. Posledica uniformnosti je da brane sa velikim posledicama zbog proloma moraju imati manju verovatnoću proloma od onih kod kojih su posledice proloma male. Ovo je u saglasnosti sa kriterijumima druge generacije u kojima brane sa visokim hazardom imaju merodavne protoke veće od onih za brane sa malim hazardom.

Procena verovatnoće inicijalnog događaja kao i procena verovatnoće događanja koji mogu da se razviju posle pojave inicijalnog događaja je jedan od najvažnijih koraka u procesu upravljanja rizikom. Metoda za proračun pomenutih verovatnoća se bazira na analizi stabla događaja (event tree). Svako stablo događaja je grafički prikaz svih mogućih sekvenci koje se mogu realizovati posle nekog inicijalnog događaja (npr. velike vode, zemljotresa i dr.) u kome se svaka od mogućih sekvenci prikazuje kao jedna grana stabla za koju se procenjuje verovatnoća da će se sekvenca desiti ili se neće desiti. Na osnovu procenjene verovatnoće inicijalnog događaja i uslovne verovatnoće svake grane stabla može se proceniti verovatnoća konačnog događaja (na primer, brana se ruši ili se ne ruši) za svaki od inicijalnih događaja. Stablo događaja je, dakle, vezano za posledice i modelira sve događaje koji mogu zadesiti branu (uključujući i njen prolom) a koji su posledica nekog inicijalnog događaja.

Proces upravljanja rizikom pri proceni hidrološke sigurnosti brane primenjiv je na sve tipove postojećih brana kao i one koje su u procesu projektovanja.

### 2.3.1. Opšte o proceni hidrološke sigurnosti brane na osnovu procesa upravljanja rizikom

Brana se smatra hidrološki sigurnom ako, pri pojavi velikih protoka, uključujući i protoke merodavne za njenu hidrološku sigurnost, izvršava sve namenjene funkcije bez nametanja neprihvatljivog rizika društvu zbog svog prisustva. Ova definicija zahteva da se zna koji je rizik prihvatljiv a koji nije.

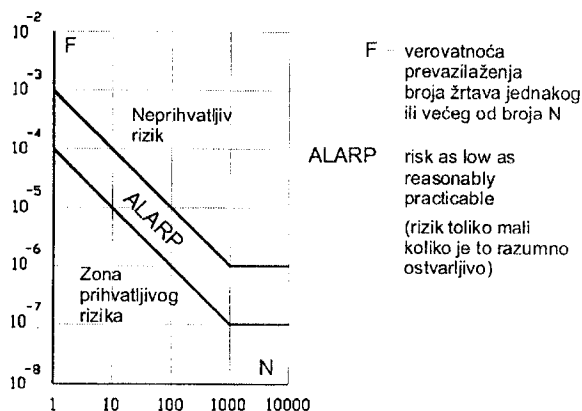
S obzirom da ukupni rizik usled proloma brane čine dodatni rizik gubitaka života i dodatni ekonomski rizici u profilu brane i izvan ovog profila, moraju se definisati bar dva nezavisna prihvatljiva rizika: prihvatljiv rizik

gubitaka ljudskih života (društveno prihvatljiv rizik) i ekonomski prihvatljiv rizik.

Društveno prihvatljiv rizik je, generalno, opisan tzv. F-N diagramom, gde je F verovatnoća prevazilaženja broja žrtava jednakog ili većeg od broja N za sve modalitete koji dovode do proloma brane.

Na slici 4 je, kao primer, prikazan F-N dijagram koji se koristi u Australiji [23].

Ekonomski prihvatljiv rizik određuje ukupna očekivana šteta koja se može izraziti nekom unapred izabranom vrednošću (na primer, BC Hydro - Kanada, je za svoje brane usvojio vrednost 10 000 \$/god po brani) ili vrednošću koja je jednaka nešto uvećanim ekvivalentnim godišnjim troškovima izgradnje preлива koji se određuju za svaku branu posebno.



Slika 4. Australijski F-N dijagram [23]

Redosled aktivnosti u procesu procene hidrološke sigurnosti brane je sledeći:

1. Identifikacija modaliteta koji mogu dovesti do rušenja brane
2. Konstrukcija stabla događaja i razvoj detaljnijih sekvenci
3. Procena verovatnoće pojave događaja koje sadrži stablo i ukupne verovatnoće proloma brane
4. Procena ukupne štete i rizika usled proloma brane
5. Upoređenje izračunatih rizika sa kriterijumima prihvatljivih rizika
6. Određivanje mera koje treba realizovati da bi se rizik doveo na prihvatljivu meru (kontrola rizika).

**Identifikaciju modaliteta** koji mogu dovesti do rušenja brane radi grupa eksperata iz odgovarajućih tehničkih oblasti. Rezultat rada tima eksperata je lista modaliteta proloma. Tim eksperata takođe procenjuje kako će se u budućnosti ponašati vitalni objekti brane.

Prolom brane može se desiti zbog:

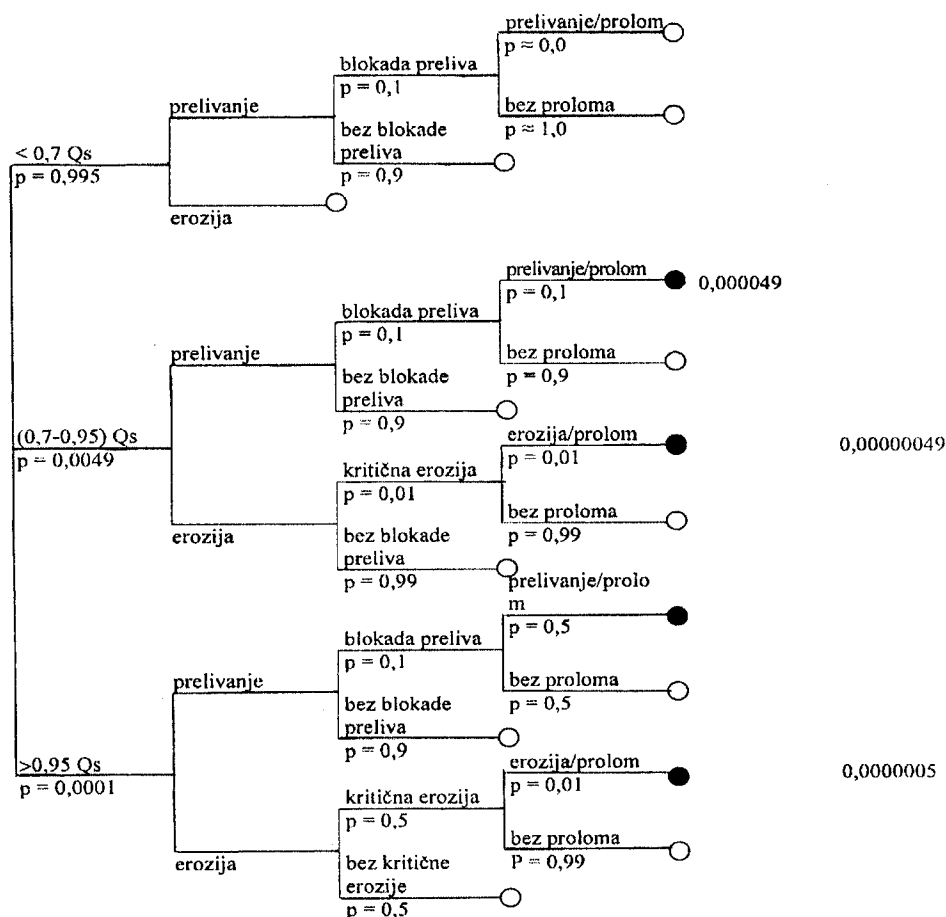
- (1) preliivanja preko krune brane (naročito nasute) u slučaju da u akumulaciju dotiču protoci koji su veći od procenjenog protoka merodavnog za sigurnost brane;
- (2) nepredviđeno velikih talasa u akumulaciji pri nivou vode merodavnom za sigurnost brane (redak ali moguć slučaj kod zemljanih nasutih brana);
- (3) preliivanja preko krune brane zbog blokade slobodnog preliivanja plivajućom vegetacijom ili ledom, odnosno zbog potpunog ili delimičnog otkaza funkcionisanja ustava na prelivu (najčešći razlozi za otkaz funkcionisanja ustava su otkazi sistema za manevrisanje, indikaciju, merenje nivoa vode u akumulaciji, daljinsko upravljanje, zaštitu od leda, otkaz rezervnog operativnog sistema, blokada ustava privajućom vegetacijom ili ledom, prekid napajanja energijom iz mreže, nemogućnost prilaza prelivu i blagovremene intervencije zbog porušenih mostova i saobraćajnica, prekid spoljnjih telekomunikacionih linija, operatorova pogrešna procena situacije itd.);
- (4) preliivanje preko krune brane ili bočnih zidova brzotoka zbog toga što je brzotok blokiran plivajućom vegetacijom, ledom/snegom ili odronjenim materijalom sa nestabilnih bočnih useka (kod nasutih brana preliivanje preko bočnih zidova može izazvati prolom brane ako su jedan ili oba bočna zida u kontaktu sa nasipom; kod betonskih brana preliivanje preko bočnih zidova brzotoka koji je u sklopu tela brane je obično bez većih posledica po njenu stabilnost);
- (5) erozija dna i bočnih strana doline neposredno nizvodno od nožice brane zbog čega može doći do potkopavanja temelja betonske brane ili temelja nizvodne kosine nasute brane usled čega ona može da sklizne (kritična erozija fundamenta ili direktna erozija nizvodne kosine nasute brane je obično posledica povratnog strujanja vode kod preliiva sa odskokom).

Konstrukcija stabla događaja je sledeća aktivnost tima eksperata. Svaki od modaliteta koji mogu dovesti do proloma brane se razlaže u logične serije događanja i konstruiše stablo događaja. Kada je reč o nekontrolisanom prelivanju brane, stablo događaja obezbeđuje potpunu informaciju šta se sve može desiti

kao posledica pojave inicijalnog događaja (protoka ili nivoa vode) koji je određen determinističkom metodom.

Na slici 5 je, kao primer, prikazano stablo događaja za jednu nasutu branu sa slobodnim prelivom i odskokom [21].

Hazard	Inicijalni modeliteti proloma	Mehanizam proloma	Odgovor brane	Verovatnoća proloma	
				Poplave	Erozije



**Legenda**

- Qs - protok merodavan za sigurnost brane
- - prolom na kraju grane
- - bez proloma na kraju grane

Slika 5. Primer stabla događaja [21]

Iz stabla se vidi da je tim eksperata procenio da prolom brane mogu izazvati dva modaliteta: preliivanje preko krune brane zbog blokade slobodnog preliiva i klizanje nizvodne kosine brane zbog direktne erozije kosine ili potkopavanja nizvodne nožice brane. Tim je dalje procenio da se prolom ne može desiti pri protocima koji su manji od 0,7 Qs. Zbog toga je ceo mogući interval verovatnoće pojave hazarda pokriven sa tri protoka sa godišnjim verovatnoćama pojave 0,995, 0,0049 i 0,0001, čiji zbir mora da iznosi 1,00.

**Procena verovatnoće pojave** svih događanja unutar stabla događaja zasniva se na probabalističkoj analizi za inicijalni događaj (verovatnoća pojave velikih voda) i proceni verovatnoće dešavanja, odnosno ne dešavanja, ostalih događanja. Ovu verovatnoću određuje tim eksperata na bazi subjektivne procene. Da bi se postigla interna usaglašenost u timu, kao i usaglašenost od jedne do druge brane, preporučene su sledeće verovatnoće.

Opis	Verovatnoća
Virtualno izvesno	0,999
Vrlo moguće	0,99
Moguće	0,9
Neutralno	0,5
Neizvesno	0,1
Vrlo neizvesno	0,01
Virtualno nemoguće	0,001

Mogu se koristiti i interpolirane vrednosti između nabrojanih klasa.

Za primer sa sl. 5, verovatnoće pojave koje su pridodate svakoj od grana su procenjene vrednosti ekspertskeg tima na osnovu geoloških karakteristika rečnog korita u oblasti povratnog strujanja i karakteristika kamene zaštite nizvodne kosine kao i procene količine plivajuće vegetacije koje vodni tok nosi sa sobom. Iz stabla događaja se vidi da je prolom brane zbog blokade preliiva (ukupne verovatnoće pojave 0,000055) verovatniji od proloma brane zbog erozije (ukupna verovatnoća pojave 0,0000099). Zaključak ove analize je da se mora sprečiti blokada preliiva odgovarajućim merama.

Totalna verovatnoća proloma je zbir verovatnoća proloma za svaki od kritičnih modaliteta. Verovatnoća proloma brane iz primera sa sl. 5 iznosi 0,000055 i koristi se za procenu rizika zbog brane.

**Procena priraštaja ukupne štete** zbog proloma brane je osnova za zaključak da li je rizik društveno i

ekonomski prihvatljiv. Tim eksperata procenjuje mogući broj izgubljenih života, ekonomsku vrednost svih šteta a zatim i ekonomski i društveni rizik zbog brane kao proizvoda verovatnoće proloma i posledica proloma. U primeru sa sl. 5 procenjeno je da bi, zbog proloma brane, bilo izgubljeno 5 života i da bi ukupna šteta iznosila 50 miliona dolara. Prema tome, društveni rizik je  $2,75 \times 10^{-5}$  života godišnje a ekonomski 1375 \$ godišnje.

**Poređenje ocenjenih rizika** sa kriterijumima o prihvatljivim rizicima je osnova za donošenje zaključaka o društvenoj i ekonomskoj prihvatljivosti rizika usled proloma brane. U većini razvijenih zemalja u svetu u kojima se primenjuje procedura upravljanja rizikom (Kanada, Australija, SAD) kriterijumi za prihvatljive rizike su:

- društveno prihvatljiv rizik 10<sup>-3</sup> života/godišnje
- ekonomski prihvatljiv rizik 10.000 \$/godišnje

Na osnovu ovih kriterijuma moglo bi se zaključiti da je rizik zbog brane sa sl. 5 i društveno i ekonomski prihvatljiv tj. da je brana hidrološki sigurna.

Ukoliko bi bar jedan od izračunatih rizika (naročito društveni) ušao u oblast neprihvatljivog rizika, tim eksperata bi morao da odredi **mere za smanjenje rizika**. Ove mere bi mogle da obuhvate povećanje protoka merodavnog za sigurnost brane (granica je VMP), povećanje nivoa vode u akumulaciji merodavnog za sigurnost brane, povećanje sigurnosti funkcionisanja glavnog preliiva projektovanim kapacitetom (tj. bez blokada), dodavanje sigurnosnih preliiva raznih tipova koji automatski stupaju u akciju kada nivo vode u akumulaciji poraste iznad kritičnog nivoa vode, promenu tipa brane, a u kranjem slučaju može se zaključiti da izgradnja brane u tom pregradnom profilu nije prihvatljiva jer se prolom brane ne može dozvoliti ni u kom slučaju a sprečavanje proloma izlazi iz ekonomski prihvatljivih okvira.

### 2.3.2. Opšte o određivanju protoka merodavnog za sigurnost brane na osnovu procesa upravljanja rizikom

Određivanje merodavnog protoka na bazi upravljanja rizikom (treća generacija kriterijuma) za brane u fazi projektovanja i, a za izgrađene brane, u primeni je u više zemalja, agencija i organizacija. Vodeću ulogu u razvoju i primeni ove procedure imaju Australija [27], Norveška [28], Švedska [29], Južna Afrika [30], U.S.

Bureau of Reclamation [31] i BC Hydro, Kanada [32]. U prošloj godini se i u Nemačkoj, preko revidovanih normi DIN 19700, po prvi put uvode elementi verovatnoće u oblast akumulacija i brana, posebno pri određivanju protoka merodavnih za hidrološku sigurnost brane [33]. Modeli na bazi upravljanja rizikom koriste se i u Holandiji pri proceni hidrološke sigurnosti odbrambenih nasipa.

Neke razvijene evropske zemlje (Španija, Švajcarska, Francuska, Velika Britanija i dr.) zadržale su konvencionalne procedure za određivanje merodavnih protoka na bazi kriterijuma druge generacije uz poboljšano osmatranje ponašanja brane, prognozu nailaska velikih voda i uz povećanu sigurnost funkcionisanja sistema za uzbunjivanje i evakuaciju stanovništva iz ugroženih oblasti (npr. Švajcarska [5]).

Međutim, treba konstatovati da organizacije i agencije za projektovanje i eksploataciju brana i akumulacija u velikom broju zemalja još uvek koriste kriterijume prve generacije pri određivanju merodavnih protoka iako se, zbog sadašnjeg nivoa naučnih dostignuća u ovoj oblasti, ovi kriterijumi moraju smatrati prevaziđenim.

Kada se merodavni protok određuje na osnovu procesa upravljanja rizika u praksi se posebno određuju društveno prihvatljiv i ekonomski prihvatljiv rizik. Cilj procesa upravljanja rizikom je da se odredi vrednost  $Q_s$  koja zadovoljava oba postavljena kriterijuma.

Redosled aktivnosti u toku procesa određivanja protoka merodavnog za sigurnost brane je sledeći:

- (1) Određivanje mogućih dodatnih gubitaka ljudskih života ( $N$ ) i dodatnih ukupnih šteta ( $D$ ) zbog proloma brane.
- (2) Određivanje očekivanog godišnjeg broja ljudskih žrtava (društveni rizik).
- (3) Određivanje očekivane godišnje štete (ekonomski rizik).
- (4) Formiranje zavisnosti između ekvivalentnih troškova izgradnje preliva i protoka  $Q_s$ .
- (5) Na osnovu društveno prihvatljivog rizika ili F-N dijagrama, nalazi se protok  $Q_{SD}$  za koji društveni rizik iz tačke 2 ima ovu vrednost.
- (6) Određuje se vrednost  $Q_{SE}$  za koju su eventualni godišnji troškovi izgradnje preliva (tačka 4) nešto manji od očekivane godišnje dodatne štete zbog proloma brane (tačka 3).

- (7) Za protok ( $Q_s$ ) koji je merodavan za hidrološku sigurnost brane usvaja se veća vrednost protoka  $Q_{SD}$  i  $Q_{SE}$ . Ukoliko je verovatnoća prevazilaženja izabranog protoka  $Q_s$  iz tačke 7 veća od VMP usvaja se  $Q_s = VMP$ .

Jedna od najslabijih karika u lancu napred opisanog procesa je procena verovatnoće prevazilaženja protoka  $Q_s$  koji se koriste u analizi zbog nepouzdanosti rezultata za  $VGP \ll 0,01$ . U svetu su u toku naponi hidroloških i drugih eksperata da se formuliše metoda za određivanje verovatnoće prevazilaženja za VMP kao i metoda za određivanje najpogodnije linije raspodele za  $VGP \ll 0,01$ . U međuvremenu, u literaturi se preporučuje da se za verovatnoću prevazilaženja verovatno maksimalnih protoka (VMP) koristi vrednost  $VGP = 10^{-6}$  a procedura za ekstrapolaciju linije verovatnoće u intervalu  $10^{-6} \leq VGP < 10^{-2}$  prema literaturi [7].

Posle izbora protoka ( $Q_s$ ) merodavnog za sigurnost brane prema napred opisanoj proceduri sledi konstrukcija stabla događaja. Inicijalni događaj je izabrani  $Q_s$  sa svojom verovatnoćom prevazilaženja. Modalitete proloma, dalji razvoj mogućih događanja metodom "korak po korak do proloma" i procenjivanje verovatnoće dešavanja mogućih događanja treba da izvrši tim eksperata. Krajnji rezultat analize je procena ukupne verovatnoće proloma brane i procena društvenog i ekonomskog rizika. Ukoliko kriterijumi o prihvatljivim rizicima nisu zadovoljeni, pristupa se kontroli rizika tj. preduzimanju mera da se oba rizika dovedu na prihvatljivi nivo.

### 3. ODREĐIVANJE PROTOKA I NIVOA MERODAVNIH ZA HIDROLOŠKU SIGURNOST BRANA U SRBIJI I CRNOJ GORI .

#### 3.1. OSNOVNI ULAZNI PODACI

Protoci na ulazu i izlazu iz akumulacije su osnovni ulazni podaci u analizi hidrološke sigurnosti brane. Ulazni protok u akumulaciju ( $Q_s$ ) je prirodna a izlazni iz akumulacije ( $Q_{si}$ ) izvedena veličina. Kada u akumulaciji postoji posebni deo zapremine za ublažavanje ulaznog talasa, ova dva protoka mogu znatno da se razlikuju. Kada posebna zapremina ne postoji izlazni protok je praktično jednak ulaznom. Kako je protok  $Q_s$  prirodna veličina logično je da protok  $Q_s$  bude osnovni parametar za koji je izvedeni

protok ( $Q_{si}$ ) vezan jednačinom  $Q_{si} = \Psi(Q_s, V_u)$ , gde je  $V_u$  - raspoloživa zapremina akumulacije za ublaženje ulaznog hidrograma protoka. Veličina ove zapremine zavisi od nivoa vode u akumulaciji koji je merodavan za hidrološku sigurnost brane. Protok  $Q_{si}$  mora se ispuštati iz akumulacije pri nivou vode merodavnom za sigurnost brane a da, pri tome, projektovana namena brane i akumulacije ne bude prekinuta zbog proloma ili velikih oštećenja brane i njenih pratećih objekata. Objekti uz branu koji nisu vitalni za akumulisanje i ispuštanje vode mogu biti oštećeni do mere koja ne zahteva ekonomski neprihvatljive popravke.

Primena bilo kog kriterijuma druge ili treće generacije podrazumeva poznavanje izlaznog protoka pri kome se brana ruši, odnosno njenog ekvivalentnog ulaznog protoka u akumulaciju. Po definiciji, ovaj protok mora biti veći od protoka ( $Q_s$ ) merodavnog za hidrološku sigurnost brane. Preporučuje se da se za protok pri kome se brana ruši usvoji protok  $Q_{si}$  s obzirom da je razlika između ova dva protoka najčešće mala u odnosu na protok  $Q_{si}$  i zanemarljivog je uticaja na konačni rezultat.

### **3.2. PREDLOG UPUTSTVA ZA ODREĐIVANJE NIVOA VODE U AKUMULACIJI MERODAVNOG ZA HIDROLOŠKU SIGURNOST BRANE**

Ovaj nivo je najviši dozvoljeni nivo vode u akumulaciji koji se dopušta samo kada u akumulaciju ulazi protok merodavan za sigurnost brane.

Nivo vode merodavan za sigurnost brane obično se vezuje za unapred poznatu kotu krune brane koja je određena na osnovu potrebnog zazora. Ali, može se desiti da je zapreminu za transformaciju talasa, odnosno kotu krune brane, potrebno odrediti na osnovu ekonomskog optimuma, naročito kada je ulazni hidrogram male zapremine sa velikim vršnim protokom a velika površina akumulacije na koti normalnog uspora. U literaturi [26] je iznet slučaj brane Qued El Mmakhazine, Maroko, za koju je, u toku izgradnje brane, zaključeno da se merodavni protok mora povećati 2,5 puta (sa 3500 m<sup>3</sup>/s na 8600 m<sup>3</sup>/s). Problem je rešen izdizanjem kote krune brane za 0,5 m tj. povećanjem zapremine za transformaciju ulaznog talasa. Ukupni troškovi izgradnje povećani su za 3%.

Merodavni nivo vode je vrlo uticajan faktor pri izboru veličine protoka merodavnog za sigurnost brane. Od

ovog nivoa zavisi veličina maksimalnog protoka koji otiče nizvodno kao i zapremina akumulacije u kojoj se vrši transformacija ulaznog hidrograma. Prema tome, merodavni nivo utiče na troškove izgradnje preliava kao i na veličinu dodatne štete usled proloma brane.

U zavisnosti od tipa brane merodavni nivo može biti iznad, u nivou ili ispod krune brane. Kod nasutih brana sa valobranom, prisustvo ove konstrukcije treba zanemariti kao građevine koja drži stalan uspor.

Najviša merodavna kota nivoa vode za nasute brane od lako erodibilnog materijala (zemlja, pesak, šljunak, jalovšini materijal) treba da bude jednaka koti krune vodoržive zaptivke.

Kod nasutih brana od valjanog kamena i kontraforanih brana, nivo vode merodavan za sigurnost brane može se podići najviše do kote krune brane.

Kod brana od valjanog betona merodavni nivo vode može biti najviše 0,5 m iznad krune brane jer se procenjuje da prelivni mlaz ove visine koji se sliva niz kaskadnu nizvodnu kosinu brane ne može erodirati ni kosinu brane ni tlo na kome je brana fundirana.

Predlaže se da se merodavni nivo za gravitacione betonske brane može kretati u granicama od kote krune brane do maksimalno 1,0 m iznad kote krune u zavisnosti od procene otpornosti na eroziju stene na kojoj je brana fundirana.

S obzirom da su lučne brane najmanje osetljive na prelivanje preko krune, preporučuje se da merodavni nivo vode može biti najviše 2,0 m iznad krune brane.

Za betonske brane koje su u fazi projektovanja, nivo vode merodavan za hidrološku sigurnost određuje statičko opterećenje na branu. Pri kontroli hidrološke sigurnosti izgrađenih brana, merodavni nivo vode u akumulaciji može uslovljavati statička stabilnost izgrađene brane što u procesu kontrole hidrološke sigurnosti treba najpre utvrditi.

Ukoliko je neposredno uz nizvodno lice lučne ili gravitacione brane izgrađen neki važan i skup objekat (npr. pribranska hidroelektrana) koji bi mogao da bude oštećen mlazom vode koji preliava preko krune, merodavni nivo vode treba odrediti na osnovu troškova izgradnje preliava povećanog kapaciteta s jedne, i štete na objektu s druge strane.



Kod svih tipova brana kod kojih se do površinskih preliva sa ustavama prilazi po kruni brane, nivo vode merodavan za hidrološku sigurnost treba da je niži od krune brane ili krune valobrana za visinu zazora zbog talasa pri brzini vetra sa pet puta većom verovatnoćom prevazilaženja od one koju ima protok merodavan za hidrološku sigurnost brane.

### 3.3. PREDLOG UPUTSTVA ZA ODREĐIVANJE PROTOKA MERODAVNOG ZA HIDROLOŠKU SIGURNOST BRANE

U ovom predlogu Uputstva za određivanje protoka merodavnih za hidrološku sigurnost brana u Srbiji i Crnoj Gori (kako za brane u fazi projektovanja, tako i za izgrađene brane), predviđeno je da se koriste dve metode (primarna i sekundarna) sa ciljem da se obezbedi zaštita od moguće velike greške u rezultatu analize ili da se potvrdi proračunati merodavni protok. Primarna metoda je metoda koja se bazira na procesu upravljanja rizikom uz korišćenje kriterijuma treće generacije. Sekundarna, kontrolna, metoda ima za osnovu kategorizaciju brana prema priraštaju hazarda i kriterijume druge generacije.

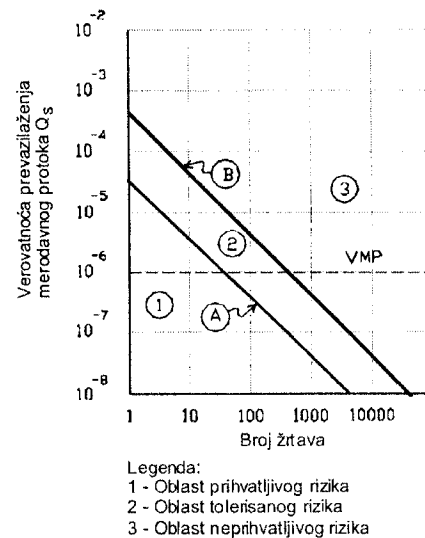
Rezultat analize na bazi procesa upravljanja rizikom je veličina merodavnog protoka za koju društveni i ekonomski rizici imaju prihvatljivu vrednost i to kako pri neometanom tako i pri ometanom funkcionisanju preliva (brana u posebnim uslovima).

S obzirom na nepouzdanost hidroloških, ekonomskih, društvenih i drugih raspoloživih podataka kao i na subjektivnost pri proceni verovatnoće da će se neki događaj desiti ili se neće desiti, neophodno je da se veličina merodavnog protoka odredi i na osnovu kategorizacije brana prema priraštaju hazarda i kriterijuma druge generacije.

Ukoliko se rezultati malo razlikuju (ne više od 30%) treba usvojiti vrednost prema primarnoj metodi. Ako je razlika znatna, neophodno je da se konstatuje uzrok neslaganju a zatim izvrši detaljnija analiza posledica usled proloma brane i na osnovu ove analize donese konačna odluka o veličini protoka merodavnog za sigurnost brane. Uzrok neslaganju rezultata može biti pogrešna procena priraštaja rizika (posebno ekonomskog) i/ili pogrešna procena neke od kategorija posledica, odnosno pogrešna procena klase brane.

#### 3.3.1. Određivanje merodavnog protoka na bazi procesa upravljanja rizikom (primarna metoda)

F-N dijagram na slici 6 je predlog kriterijuma za određivanje prihvatljivog društvenog rizika za brane u Srbiji i Crnoj Gori. Dijagram je konstruisan na osnovu svetskog iskustva uz prilagođavanje našim prilikama.



Slika 6. F-N dijagram za brane u Srbiji i Crnoj Gori

Linija A predstavlja granicu prihvatljivog društvenog rizika za brane koje su u fazi projektovanja.

Za izgrađene brane u Srbiji i Crnoj Gori prihvatljivim društvenim rizikom se smatraju i tačke iz oblasti tolerisanog rizika, omeđene linijama A i B.

Parametri koji moraju biti poznati pre početka analize su:

- nivo vode u akumulaciji koji je merodavan za sigurnost brane i
- zapremina akumulacije koja je raspoloživa za transformaciju ulaznog protoka  $Q_s$  u protok  $Q_{si}$  koji ističe iz akumulacije preko preliva, ili i preko krune ne rušeći branu.

Prvi korak u analizi je određivanje verovatno maksimalnog protoka (VMP) prema nekoj od poznatih procedura. Na osnovu preporuka iz tehničke literature usvaja se da VMP ima  $VGP=10^{-6}$ .

Sledi određivanje parametara raspodele verovatnoće koja se najbolje prilagođava nizu registrovanih godišnjih maksimalnih protoka a zatim i ekstrapolacija

linije verovatnoće u intervalu  $10^{-2} < VGP \leq 10^{-6}$ , odnosno u intervalu  $Q_{100} < Q \leq VMP$  gde je  $Q_{100}$  protok verovatnoće prevazilaženja 0,01 sa usvojene linije raspodele verovatnoće. Ekstrapolaciju treba izvršiti prema proceduri opisanoj u literaturi [7].

Proračun VMP-a, izbor i ekstrapolaciju funkcije raspodele verovatnoće treba realizovati i za brane u fazi projektovanja i za izgrađene brane.

Za brane u fazi projektovanja dalji tok analize je sledeći:

- (1) Izabere se nekoliko ulaznih protoka  $Q_s$  sa odgovarajućim hidrogramima, proračunaju se izlazni protoci  $Q_{si}$  i uspostavi veza  $Q_{si} = \varphi_1(Q_s)$ . Najveći izabrani protok ne može biti veći od VMP.
- (2) Izračuna se prostiranje talasa zbog rušenja brane, odrede linije maksimalnih nivoa vode nizvodno od pregradnog profila i, na topografskim kartama, omeđi površina plavljenja. Ova površina ne zavisi od protoka  $Q_s$ .
- (3) Ustanovi se broj stanovnika koji živi u zoni plavljenja a zatim proceni broj mogućih ljudskih žrtava usled proloma na osnovu:
  - broja stanovništva koji je na udaru poplavnog talasa isled proloma;
  - sigurnosti i efikasnosti sistema za uzbunjivanje stanovništva;
  - veličine plavljenja pre proloma brane;
  - vremenskog razvoja proloma brane;
  - sigurnosti i efikasnosti sistema za prognozu nadolaska kritičnih protoka;
  - brzine kretanja poplavnog talasa niz dolinu;
  - raspodele gustine naseljenosti doline duž rečnog toka u ugroženoj zoni;
  - blizine sigurnosnih zona u koje treba da bude evakuisano ugroženo stanovništvo;
  - prohodnosti saobraćajnica do ovih zona u vreme poplava koje prethode prolomu brane;
  - obučenosti i pripremljenosti stanovništva u vezi sa uzbunjivanjem i evakuacijom.

Pretpostavlja se da postoji operativni sistem i plan za uzbunjivanje kao i plan za evakuaciju u slučaju proloma brane iz bilo kog razloga (prelivanje preko krune, zeljotres, procurivanje i sufuzija, ratna dejstva i dr.).

Procenjeni broj ljudskih žrtava ne zavisi od protoka  $Q_s$ .

- (4) Za svaki od protoka  $Q_s$  iz tačke (1) izračuna se društveni rizik (proizvod verovatnoće proloma i posledica) i formira zavisnost između protoka ( $Q_s$ ) i društvenog rizika (RD)

$$RD = \varphi_2(Q_s)$$

- (5) Na osnovu zavisnosti  $RD = \varphi_2(Q_s)$  odredi se protok  $Q_{SD}$  kome, za brane u fazi projektovanja, odgovara društveno prihvatljiv rizik od  $RDP = 5 \times 10^{-5}$  žg

- (6) Za svaki od protoka  $Q_s$  iz tačke (1) izračunaju se troškovi izgradnje preлива i ostalih objekata za kontrolisano i sigurno ispuštanje vode iz akumulacije. Zatim se ovi troškovi svedu na sadašnju vrednost na početku eksploatacionog perioda brane, proračunaju ekvivalentni godišnji troškovi (EGT) i uspostavi veza

$$EGT = \varphi_3(Q_s)$$

- (7) Procene se troškovi ( $D_1$ ) dovođenja brane u operativno stanje posle proloma. Ovi troškovi ne zavise od protoka  $Q_s$ .

- (8) Procene se ukupne dodatne štete ( $D_2 = D_2' + D_2''$ ) na objektima izvan pregradnog profila i dodatne štete ( $D_3 = D_3' + D_3''$ ) zbog gubitaka dohotka.

- (9) Za svaki od protoka  $Q_s$  iz tačke (1) izračuna se ekonomski rizik (RE) zbog proloma brane po jednačini:

$$RE(Q_s) = (D_1 + D_2' + D_3') \times P(Q_s) + [D_2(Q_s) + D_3(Q_s)] \times P(Q_s)$$

gde su:

$P(Q_s)$  - verovatnoća prevazilaženja protoka  $Q_s$ , ( $s=1, 2 \dots N$ )

$D_1$  - troškovi dovođenja brane u operativno stanje

$D_2'$  - štete na objektima izvan pregradnog profila zbog proloma brane

$D_3'$  - ukupni gubitak dohotka zbog proloma brane u periodu rekonstrukcije brane i/ili objekata koji su proizvodili dohodak

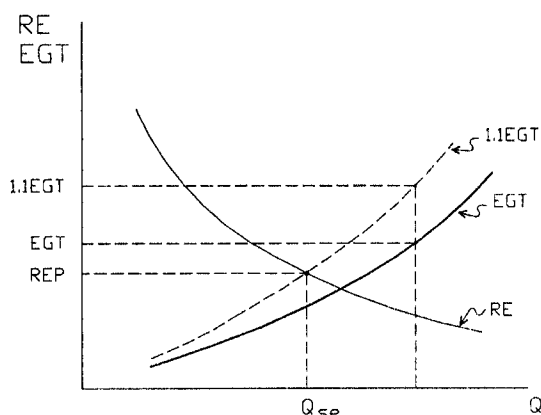
$D_2(Q_s)$  - štete na nizvodnim objektima izvan pregradnog profila zbog plavljenja neposredno pre proloma brane

$D_3(Q_s)$  - ukupni gubici dohotka zbog plavljenja neposredno pre proloma brane u periodu rekonstrukcije objekata koji su proizvodili dohodak

- (10) Uspostavi se veza

$$RE = \varphi_4(Q_s)$$

- (11) Na osnovu odnosa  $EGT = \varphi_3(Q_s)$  i  $RE = \varphi_4(Q_s)$  odredi se protok  $Q_{SE}$  za koji je ekonomski prihvatljiv rizik  $REP = a \cdot EGT$  gde je  $a$  koeficijent sigurnosti s obzirom na nepouzdanost podataka na osnovu kojih se procenjuje ekonomski rizik. Za brane u fazi projektovanja preporučuje se vrednost  $a = 1.1$ . Na Sl. 7 šematski su prikazani dijagrami  $EGT$  i  $RE$  kao i veličine  $REP$  i  $Q_{SE}$ .



Slika 7. Grafička predstava odnosa  $EGT = \varphi_3(Q_s)$  i  $RE = \varphi_4(Q_s)$

- (12) Za protok ( $Q_s$ ) koji je merodavan za hidrološku sigurnost brane bira se veći od protoka  $Q_{SD}$  (tačka 5) i  $Q_{SE}$  (tačka 11).

Pri kontroli hidrološke sigurnosti izgrađenih brana, nešto izmenjeni redosled aktivnosti je kako sledeći:

- Odredi nivo vode koji je merodavan za sigurnost brane i odgovarajuća zapremina za ublažavanje ulaznog protoka.
- Izračuna se verovatno maksimalni protok (VMP) na ulazu u akumulaciju.
- Izabere se funkcija raspodele verovatnoće na osnovu registrovanih godišnjih maksimalnih protoka i izvrši ekstrapolacija u intervalu  $10^{-2} < VGP \leq 10^{-6}$  odnosno  $Q_{100} < Q \leq VMP$  prema literaturi [7].
- Na osnovu podataka pod (a) i poznate vrednosti maksimalnog kapaciteta postojećeg preliva, rekonstruiše se aktualni protok  $Q_s$  i odgovarajući hidrogram protoka.

- Utvrdi se verovatnoća prevazilaženja aktualnog protoka  $Q_s$  iz tačke (d) pomoću novoformirane linije raspodele verovatnoće iz tačke (c).

- Za verovatnoću proloma brane koja je jednaka verovatnoći prevazilaženja protoka  $Q_s$  (tačka e) izračuna se vrednost  $RD$ ,  $EGT$  i  $RE$  prema proceduri kao za brane u fazi projektovanja.

- Ukoliko kriterijumi za društveno i ekonomski prihvatljive rizike nisu zadovoljeni, povećaće se aktualni protok  $Q_s$  iz tačke (d). Postupak se ponavlja do zadovoljenja kriterijuma ili do veličine  $Q_s = VMP$ . Ukoliko su kriterijumi zadovoljeni zaključuje se da je za aktualni ulazni protok ( $Q_s$ ) iz tačke (d), brana hidrološki sigurna.

Poželjno je da prihvatljivi društveni i ekonomski rizici budu isti za brane u fazi projektovanja i izgrađene brane. Međutim, u investiciono nepovoljnijim slučajevima, izgrađena brana se može smatrati hidrološki sigurnom ako su zadovoljena sledeća dva ublažena kriterijuma:

- izračunati društveni rizik ( $RD$ ) je jednak ili manji od tolerisanog društvenog rizika  $RDT = 5 \times 10^{-4}$  pg
- izračunati ekonomski rizik je jednak ili manji od tolerisanog ekonomskog rizika  $RET = 1,2 EGT$ , gde je  $EGT$  predstavlja aktualizirane ekvivalentne godišnje troškove izgradnje postojećeg preliva, uvećani za ekvivalentne godišnje troškove za dogradnju novog ili rekonstrukciju postojećeg preliva ukoliko je to potrebno.

### 3.3.2. Određivanje merodavnog protoka na bazi klasifikacije brana (sekundarna, kontrolna metoda)

Prema ovoj proceduri, merodavni protok za hidrološku sigurnost brane zavisi samo od priraštaja hazarda usled proloma brane. Moguće je da su posledice poplave neposredno pre proloma brane tako katastrofalne da nema priraštaja gubitaka ljudskih života (stanovništvo je već evakuisano) a priraštaj ekonomskih šteta je nedovoljan da se brana svrsta u kategoriju velikog priraštaja hazarda iako je ukupni hazard veoma velik. Zbog toga se priraštaj hazarda mora procenjivati za svaku branu posebno.

Predlaže se da sve brane u Srbiji i Crnoj Gori, budu svrstane u jednu od sledeće tri klase: brane sa velikim,

sa zapaženim i sa malim priraštajem hazarda. Svaku od klasa određuju sledećih pet kategorija posledica:

- (1) priraštaj potencijalnih ljudskih žrtava;
- (2) priraštaj indirektnih opasnosti po život ljudi zbog prekida funkcionisanja usluga bitnih za život (kritičnih: nemogućnost dolaska do medicinskih centara, prekid snabdevanja pijaćom vodom i hranom zbog porušenih saobraćajnica, i dr; osnovnih: prekid snabdevanja električnom energijom, prekid u komunikacijama i dr.);
- (3) priraštaj direktnih šteta na objektima i priraštaj šteta zbog gubitaka dohotka industrijskih postrojenja;
- (4) priraštaj negativnih uticaja na okolinu, posebno u slučaju proloma brana koje formiraju jalovišta;
- (5) dovođenje brane u operativno stanje posle proloma.

Svrstavanje brane u jednu od klasa treba da izvrši tim eksperata na osnovu procene priraštaja posledica.

Podela brana na klase prema priraštaju hazarda prikazana je u sledećoj tabeli:

Kategorija posledica	Klasifikacija priraštaja hazarda		
	veliki	zapažen	mali
Priraštaj ljudskih žrtava	Izvestan (jedno ili više razvijenih stambenih, trgovinskih ili industrijskih centara)	Neizvestan (seosko naselje sa nekoliko kuća)	Ne očekuje se (nema stalno naseljenih objekata)
Priraštaj indirektnih opasnosti po život	Prekid rada kritičnih usluga i prilaznih puteva	Prekid rada osnovnih usluga i prilaznih puteva	Nema prekida rada osnovnih usluga
Priraštaj šteta	Prekomeran	Primetan	Mali
Priraštaj negativnog uticaja na okolinu	Obimni troškovi zaštite ili nemogućnost zaštite	Primetan priraštaj troškova za neophodnu zaštitu	Minimalan priraštaj troškova zaštite
Dovođenje brane u operativno stanje	Popravka brane nije izvodljiva, a brana je od suštinskog značaja;	Popravka brane izvodljiva; raspoloživa alternativna izvorišta vode	Popravka brane izvodljiva; indirektni gubici nisu značajni

Za klasifikaciju brana u klasu sa većim hazardom dovoljno je da samo jedna kategorija posledica bude ispunjena.

U sledećoj tabeli prikazani su protoci merodavni za sigurnost brane za svaku od klasa prema priraštaju hazarda.

	Klasifikacija priraštaja hazarda		
	veliki	zapažen	mali
Protok merodavan za sigurnost brane	VMP	0,5 VMP	VGP = 0,01

### 3.3.3. Konačni izbor protoka merodavnog za hidrološku stabilnost brane

Konačna odluka o veličini ovog protoka se donosi na osnovu rezultata prema primarnoj i sekundarnoj metodi, uzimajući u obzir uticaj nepouzdanosti korišćenih podataka i subjektivnosti pri proceni rizika u procesu upravljanja rizikom s jedne i kvantitativnu neodređenost granica između klasa s druge strane.

Ako se rezultati iz dva pomenuta postupka razlikuju za manje od 30%, usvaja se veća vrednost prema primarnoj metodi. Ako se međusobno razlikuju za više od 30%, mora se posebnom analizom utvrditi razlog neslaganja i uskladiti kriterijumi na osnovu kojih će biti doneta konačna odluka o veličini protoka merodavnog za sigurnost brane.

### 3.3.4. Hidrološka sigurnost brane u posebnim uslovima

S tačke gledišta hidrološke sigurnosti, brana se može naći u posebnim uslovima ako je normalno funkcionisanje preлива, dimenzionisanog da propusti merodavni protok, ometeno iz bilo kog razloga. Naime, prolom brane se može desiti zbog potpunog ili delimičnog otkaza funkcionisanja preлива i pri protocima znatno manje verovatnoće prevazilaženja u odnosu na merodavni protok. Zbog toga je neophodno da se, posle usvajanja konačnog merodavnog protoka, odrede modaliteti koji bi mogli dovesti do proloma brane, konstruiše stablo događaja, oceni verovatnoća proloma brane i izračunaju društveni i ekonomski rizici koji moraju biti u obasti prihvatljivih ili, bar, tolerisanih rizika. U protivnom, moraju se preduzeti odgovarajuće mere za kontrolu (smanjenje) rizika.

#### 4. ODREĐIVANJE PROTOKA I NIVOVA MERODAVNIH ZA DIMENZIONISANJE PRELIVA NA BRANAMA U SRBIJI I CRNOJ GORI

##### 4.1. UVODNA RAZMATRANJA

Oblik i dimenzije preлива za bilo koji tip brane određuju se na osnovu protoka i nivoa vode u akumulaciji koji su merodavni za dimenzionisanje preлива. Sve komponente preлива treba da budu projektovane tako da mogu da obezbede evakuaciju protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива bez oštećenja.

Na osnovu ovog merodavnog protoka i nivoa vode određuju se, na primer, broj i dimenzije ustava za prelive sa ustavama ili dužina i oblik prelivnog praga za prelive bez ustava.

U svetu se danas koriste različiti metode i kriterijumi za određivanje protoka koji je merodavan za određivanje oblika i dimenzija preлива. Ove metode se, uglavnom, mogu svesti u tri grupe.

U zemljama u kojima se još uvek koriste kriterijumi prve generacije, određuje se samo jedan protok koji je merodavan i za sigurnost brane i za dimenzionisanje preлива. Ovaj protok se evakuše iz akumulacije pri maksimalno dozvoljenom nivou vode koji je niži od krune brane za visinu maksimalnog zazora zbog talasa ili, kod nasutih brane, zbog sleganja usled zemljotresa. Uobičajena praksa je da protoci za nasute brane imaju deset puta manju verovatnoću prevazilaženja od protoka za betonske brane. Prelivi iz ove grupe su često predimenzionisani, sa nepotrebno uvećanim troškovima izgradnje.

U zemljama u kojima se koristi klasifikacija brana prema priraštaju hazarda i kriterijumi druge generacije, protok merodavan za dimenzionisanje preлива zavisi od klase brane i za svaku klasu definisan je ili kao %VMP ili kao vrednost VGP koji su isti za sve tipove nasutih i betonskih brana unutar jedne klase [8, 9, 21, 34,35, 36]. U praksi ovih zemalja, odnos između protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива ( $Q_p$ ) i protoka merodavnog za sigurnost brane ( $Q_s$ ) kreće se u granicama od 1:1,5 do 1:2 ako se koristi %VMP, odnosno 1:10 ako se koriste vrednosti VGP.

U zemljama u kojima se koriste metode i kriterijumi treće generacije odnos između  $Q_p$  i  $Q_s$  nije posebno definisan već se, uglavnom, koriste odnosi iz druge grupe.

Kriterijume za izbor protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива moguće je formirati na više načina:

- definiše se VGP ili VMP ili %VMP za svaku klasu brana prema klasifikaciji na osnovu priraštaja hazarda;
- za svaku klasu brana odredi se odnos ( $\beta$ ) između protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane i protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива:  $\beta = Q_s/Q_p$ ;
- izabere se konstantni odnos koji važi za sve klase i tipove brana:  $\beta = \text{konst.}$

Praktičnost kriterijuma  $\beta = \text{konst.}$  je očigledna pa je cilj da se odredi vrednost  $\beta$  pri kojoj su zadovoljeni kriterijumi o protoku sa relativno malim VGP pri kome nema oštećenja objekata za akumulisanje i ispuštanje vode iz akumulacije kao i kriterijumi o retkom ulasku nivoa vode u visinu zazora, odnosno o retkom prelivanju vode preko krune betonskih brana.

Smatra se da su oba navedena kriterijuma ispunjena za vrednost  $\beta = 1,5 \div 2,0$ .

Izbor navedenog intervala odnosa  $\beta$  se oslanjao na istraživanja koja su realizovana u Švajcarskoj i Francuskoj. Naime, u Švajcarskoj se kontrola hidrološke sigurnosti brane vrši za protoke koji su 1,5 puta veći od protoka merodavnih za dimenzionisanje preлива [5]. U Francuskoj je analiziran odnos između protoka merodavnih za sigurnost brane i kapaciteta preлива na 55 izgrađenih brana i utvrđeno da ovaj odnos iznosi 1:1,5 do 1:2 za sve tipove brana, sem za brane kojima se kontroliše sliv manji od 100 km<sup>2</sup> za koji je ovaj odnos znatno veći [37].

##### 4.2. PREDLOG UPUTSTVA ZA ODREĐIVANJE NIVOVA VODE MERODAVNOG ZA DIMENZIONISANJE PRELIVA

Predlaže se da za prelive sa ustavama za sve tipove brana, kota nivoa vode koja je merodavna za dimenzionisanje preлива bude jednaka koti normalnog uspora.

Za brane sa prelivom bez ustava ovaj merodavan nivo vode u akumulaciji je izdignut iznad krune praga (tj. iznad kote normalnog uspora) za visinu prelivnog mlaza ( $\Delta H_p$ ). Teoretski, veličina  $\Delta H_p$  određuje se na osnovu optimizacije troškova izgradnje preлива i troškova

nadvišenja brane. U praksi, optimizacija vrednosti  $\Delta H_p$  ne daje praktične rezultate zbog dominacije troškova nadvišenja brane nad troškovima izgradnje preлива jer ovi prvi mnogo brže rastu sa porastom vrednosti  $\Delta H_p$  nego što opadaju troškovi izgradnje preлива. Zbog toga je proračunata optimalna vrednost  $\Delta H_p$  relativno mala pa je uobičajeno da se ona usvaja u granicama od 2,0 m do 5,0 m.

Visinom  $\Delta H_p$  je određena zapremina akumulacije u kojoj se transformiše ulazni talas.

#### 4.3. PREDLOG UPUTSTVA ZA ODREĐIVANJE PROTOKA MERODAVNOG ZA DIMENZIONISANJE PRELIVA

Ulazni hidrogram sa vršnim protokom  $Q_p$  transformiše se u izlazni hidrogram sa vršnim protokom  $Q_{pi}$  ukoliko se u akumulaciji može formirati posebna zapremina za tu svrhu. Zbog toga, izlazni projektni protok ( $Q_{pi}$ ) može biti jednak ili manji od ulaznog protoka ( $Q_p$ ).

Za prelive sa ustavama ulazni protok je praktično jednak izlaznom. Za prelive bez ustava (slobodne prelive), ulazni protok  $Q_p$  se samnjuje zbog transformacije talasa u akumulacionom prostoru koji definiše visina prelivnog mlaza ( $\Delta H_p$ ).

Oblici i dimenzije objekata za evakuaciju velike vode iz akumulacije određuju se na osnovu izlaznog protoka  $Q_{pi}$ .

Na osnovu iznetog u poglavlju 4.1., preporučuje se da se za protok merodavan za dimenzionisanje preлива izabere ona veličina iz intervala  $Q_p = 0.67Q_s \div 0.5 Q_s$  za koju se postiže najpovoljniji ekonomski odnos između ukupne širine preлива i visine prelivnog mlaza. Ukoliko se i za optimalnu vrednost  $Q_p$  dobije nepraktičan odnos između veličina B i H, tada se broj i dimenzije ustava, odnosno visina prelivnog mlaza kod preлива bez ustava, određuje na osnovu optimizacione analize. Može se desiti da se optimalno rešenje postiže za nivo merodavan za sigurnost brane koji je iznad nivoa određenog na osnovu potrebne visine zazora zbog vetra ili zemljotresa.

#### 5. UMEMSTO ZAKLJUČAKA

Sigurnost brane od proloma je najvažniji faktor u projektovanju brana pa je i logično što se u tehničkoj literaturi ovom problemu posvećuje i najveća pažnja, a

posebno potencijalnim prirodnim uzrocima proloma kao što su velike vode i zemljotres.

Statistički pregled ICOLD-a iz 1995. pokazuje da je prelivanje preko krune brane bilo najučestaliji uzrok proloma što ukazuje na veliki značaj hidrološke sigurnosti brane. Smatra se da je brana hidrološki sigurna ako je, pri prolazu i posle prolaza protoka merodavnog za sigurnost brane, sposobna da ispunjava sve projektovane namene, bez nametanja neprihvatljivog rizika društvu zbog svog pristustva. Iz prethodno navedenog prizilazi da je, kada je reč o hidrološkoj sigurnosti brane, osnovni zadatak da se odredi protok merodavan za hidrološku sigurnost brane za koji se društveni i ekonomski rizici u profilu i izvan profila brane nalaze u prihvatljivim granicama. Prihvatljivi društveni rizik je primarni kriterijum koji najpre mora biti ispunjen. Prihvatljiv ekonomski rizik zavisi od troškova izgradnje preлива pa je određivanje protoka merodavnog za dimenzionisanje preлива jedna od važnih aktivnosti u postupku određivanja protoka merodavnog za sigurnost brane.

Procedura za određivanje merodavnih protoka koja je detaljno opisana u prethodnim poglavljima, uglavnom se zasniva na sledećim polazištima:

- Određuju se i koriste dva merodavna protoka i nivoa:
  - protok i nivo merodavan za sigurnost brane i
  - protok i nivo merodavan za dimenzionisanje preлива.
- Određuju se i koriste merodavni protoci na ulazu (prirodne veličine) i izlazu iz akumulacije (izvedene veličine).
- Primarna metoda za određivanje protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane je proces upravljanja rizikom. Sekundarna metoda je klasifikacija brana u tri klase prema priraštaju hazarda (veliki, zapaženi i mali).
- Primarni kriterijumi su prihvatljivi društveni i ekonomski rizici (kriterijumi treće generacije). Sekundarni kriterijumi su merodavni protoci za svaku klasu brane.
- Za izgrađene brane mogu se koristiti i propisane vrednosti tolerisanog rizika.
- Verovatnoća prevazilaženja protoka merodavnog za sigurnost brane određuje se pomoću izabrane funkcije raspodele verovatnoće do  $VGP=0,01$  i

ekstrapolacije raspodele verovatnoće u intervalu  $Q_{100} < Q \leq VMP$ .

- Ukoliko izgrađena brana može doći u posebne uslove (otkaz vitalnih komponenti preliva), hidrološku sigurnost treba odrediti pomoću analize stabla događaja i ukupne verovatnoće proloma brane.
- Protok merodavan za dimenzionisanje preliva je 1,5 do 2,0 puta manji od protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane.

Jedan od osnovnih parametara koji se koristi u predloženom postupku je verovatno maksimalni protok (VMP) za svaku od brana koje se analiziraju. Ukoliko nisu raspoloživi potrebni podaci za deterministički način određivanja VMP-a, za isti se, privremeno, može koristiti vrednost koja je određena pomoću metode Hershfield.

Preporučuje se da se izvrši klasifikacija svih 70 izgrađenih brana u Srbiji i Crnoj Gori i ovim podatkom dopuni postojeći Registar izgrađenih brana. Istovremeno treba početi sa registrovanjem i/ili dopunom podataka koji su neophodni za primenu determinističkog pristupa za određivanje VMP-a za sve postojeće brane ili, u prvo vreme, za brane iz klase sa visokim priraštajem hazarda.

Određivanje zemljotresa koji je merodavan za seizmičku stabilnost brane nije u sadržaju ovog rada ali se ističu sledeće specifičnosti ovog problema:

- sve brane su bez izuzetka izložene opasnosti od preliivanja dok je mnogo manji broj brana izložen uticaju značajnih seizmičkih sila;
- konstruktivne karakteristike većine brana su takve da mogu da podnesu dejstvo seizmičkih sila bez dodatnih konstruktivnih mera, sem brana u seizmički aktivnim zonama; suprotno ovome, zaštita brana od preliivanja uvek zahteva izgradnju dodatnih objekata (prelivi, ispusti);
- prolom zbog zemljotresa je znatno opasniji po ljudske živote jer se dešava iznenadno, bez najave i brzo; suprotno ovome, prolomu brane zbog preliivanja prethode velike poplave koje primoravaju stanovništvo da se blagovremeno skloni u bezbedne zone;
- istovremena pojava protoka i zemljotresa merodavnih za sigurnost brane je virtuelno nemoguća;

- definicija zemljotresa merodavnog za seizmičku sigurnost brane treba da je slična definiciji protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane: brana se smatra seizmički sigurnom ako je pri dejstvu ovog zemljotresa i posle njega, sposobna da drži akumulaciju i da ispunjava sve projektovane namene, premda može biti deformisana u prihvatljivim okvirima, sa oštećenjima koja se mogu popraviti;
- verovatnoća prevazilaženja zemljotresa merodavnog za seizmičku sigurnost brane treba da bude jednaka verovatnoći prevazilaženja protoka merodavnog za hidrološku sigurnost brane jer različite verovatnoće nemaju ekonomsko opravdanje.

Ovaj rad je skraćena radna verzija Uputstva za izbor merodavnih protoka za prelive na branama koje je autor ovog rada priredio za stručni odbor za hidrauličke aspekte projektovanja brana jugoslovenskog društva za visoke brane. [38]

#### LITERATURA

- [1] ICOLD: Dam Failures. Statistical analysis; Bulletin 99, Paris, 1995
- [2] Lombardi G.: Analyse frequentielle des crues. Distributions bornees; ICOLD, XVI Congress, Q63-R17, San Francisco, 1988
- [3] Bidovec S.: Metoda računa verovatnoće nije odgovarajuća metoda za određivanje velikih voda retkih učestalosti; Savetovanje o proračunu velikih voda, Vodoprivreda 13-14, oktobar 1971
- [4] Biedermann R. i dr.: Safety of Swiss Dams against Flood, Design Criteria and Design Flood; ICOLD, XVI Congress, Q63-R22, San Francisco, 1988
- [5] Biedermann R.: Safety Concept for Dams; Development of the Swiss Concept since 1980; Wasser, Energie, Luft, 3-4, Baden, 1997
- [6] Pilgrim D. H. i dr.: Estimation of Spillway Design Floods for Australian dams; ICOLD, XVI Congress, Q63- R16, San Francisco, 1988
- [7] Rowbottom I.A. i dr.: Estimation of rare floods (Between the PME and the 1 in 100 floods); CE Transactions, Inst. of Engineers Australia, Vol CE 28, 1986

- [8] U.S. Committee on Safety Criteria for Dams: Safety of Dams, Flood and Earthquake Criteria; National Academy Press, Washington D.C., 1985
- [9] NERC: Flood Studies Report (in five volumes); London, 1975
- [10] Guillot P., Duband D.: La metode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues a partir des pluies; IASH, Publication No.84, Fort Collins, 1967
- [11] Duband D. i dr.: Estimating Extreme Value Floods and the Design Flood by the GRADEX Method; ICOLD, XVI Congress, Q63-R60, San Francisco, 1988
- [12] Lazarevic Dj.: Primena metode GRADEX za izracunavanje verovatnoce pojave velikih voda na osnovu padavina; Savetovanje o proračunu velikih voda; Vodoprivreda No.13-14, 1971
- [13] World Meteorological Organization: Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation; Geneva, 1986
- [14] Cudworth A.G.: Flood Hydrology Manual; Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1989
- [15] Hershfield D.M.: Estimating the Probable Maximum Precipitation; Journal Hydraulic Division, Vol.87, pg.99-106, 1961
- [16] Hershfield D.M.: Methods of Estimating Probable Maximum Precipitation; Journal of American Waterworks Association, No.57, 1965
- [17] USASCE: Flood - Runoff Analysis No.19; ASCE, 1997
- [18] U.S. Bureau of Reclamation: Design of Small Dams; 1973
- [19] Laurenson E.M. i dr.: A Flexible Model for Spillway Design Flood Computation ICOLD, XIV Congress, C12, Rio de Janeiro, 1982
- [20] Abbott M.B. i dr.: Introduction to the EHS; Journal of Hydrology, 87, 1986
- [21] ICOLD: Dams and flood; Committee on Dams and Floods, radna verzija, mart 2000
- [22] Lafitte R.: Classes of Risk for Dams; Hydropower and Dams, No.6, 1996
- [23] Kreuzer H.: The Use of Risk Analysis to Support Dam Safety Decisions and Management; ICOLD, XX Congress, Q76-GR, Beijing, 2000
- [24] Zelenhasic E., Ruski M.: Inženjerska hidrologija; Naučna knjiga, Beograd, 1991
- [25] ICOLD: Guidelines on Risk Assessment for Dams; 1998
- [26] Mriouah D.: Crues importantes imprevuees: cas du barrage de Qued el Makhazine au Maroc; ICOLD, XVI Congress, Q63-R82, 1988
- [27] ANCOLD: Guidelines on Selection of an Acceptable Flood Capacity for Dams; 1999
- [28] Workshop on Risk Based Dam Safety Evaluations; Trondheim, Norveska, 1997
- [29] Graham L.P. : Safety Analysis of Swedish Dams : Risk Analysis for the Assessment and Management of Dam Safety; Royal Inst. of Technology, Stockholm, 1995
- [30] Oosthuizen C. i dr.: Risköbased Dam Safety Analysis; Dam Engineering, januar 1991
- [31] Hartford DND.: Dam Risk Management in Canada; Workshop on RBDSE, Trondheim, 1997
- [32] U.S. Bureau of Reclamation: Guidelines for Achieving Public Protection in Dam Safety Decision Making; 1997
- [33] Rissler P.: Dimensioning of the Design Flood as Part of a Reservoir Safety Concept, 69th ICOLD Annual Meeting, 2002
- [34] Berga L.: Failures and Hydrological Incidents of Dams in Spain; ICOLD, Q75-R31, Florence, 1997
- [35] ICOLD: Selection of Design Flood; Bulletin 82, 1992
- [36] ICE: Floods and Reservoir Safety; Third Edition, 1996
- [37] Bister D., Le Dellion P.: Analyse de risque et crue de danger ICOLD, XX Congress, Q76-R36, Beijing, 2000
- [38] JDVB: Uputstvo za izbor merodavnih protoka za prelive na branama, Radna verzija, Beograd, juli 2002.



## DESIGN FLOODS FOR SPILLWAYS

by

Živodar ERČIĆ  
Energoprojekt, Beograd

### Summary

This paper recommends the utilization of the Hydrologic Safety Check Flood, Design Flood and corresponding water levels in the storage. Methods and criteria for determination of these flood discharges and levels are presented and their advantages and shortcomings are summarily exposed. Guidelines for determination of safety flood discharges and levels is

presented, based on Risk Management (primary method) and on Incremental Flood Hazard Category of the dam (secondary method).

Key words: safety check flood, corresponding levels, hydrologic safety of dam, hazard, risk, risk management

Redigovano 20.09.2002.