UDK: 627.51
Originalni naučni rad

STOHASTIČKI PRISTUP U ODREĐIVANJU ŠTETA OD POPLAVA

Nikola ROSIĆ, dipl. građ. inž.
dr Miodrag JOVANOVIĆ, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet, Beograd

REZIME

U ovom članku se opisuju deterministički i stohastički pristupi u određivanju očekivane godišnje štete od poplava. Njihova primena se ilustruje proračunima za jednu deonicu reke Tamnave. Namera je da se konkretnim primerom iz prakse ispita u kojoj meri neizvesnost ulaznih podataka utiče na očekivanu godišnju štetu, a preko nje, na eko-nomski optimalni stepen zaštite, izražen preko projektne visine odbrambenih nasipa.

Ključne reči: rizik od poplava, šteta od poplava, neizvesnosti, Monte Karlo metoda, dimenzionisanje nasipa

1. UVOD

U svetskoj literaturi, termin „hazard“ označava mogućnost poplavnog događaja sa određenom verovatnoćom realizacije, a termin „rizik“, potencijalnu direktnu štetu takvog događaja, izraženu kao novčani gubitak [1]. Kako je šteta od poplava slučajna veličina, zadatak analize rizika od poplava je ustvari utvrđivanje *očekivane godišnje štete* od potencijalnih poplavnih događaja. Rezultat ove analize je osnova za projektovanje i ekonomsko vrednovanje sistema za zaštitu od poplava.

Tradicionalni determinstčki postupak određivanja štete od poplava podrazumeva *jednoznačne* zavisnosti ulaznih hidrološko-hidrauličkih i ekonomskih veličina, pa je, shodno tome i sračunata šteta – jednoznačna veličina.

Stohastički pristup uzima u obzir brojne *neizvesnosti* u pogledu ulaznih podataka, koje mogu bitno uticati na konačni rezultat:

(a) Hidrološka neizvesnost je uslovljena slučajnom varijabilnošću padavina i oticaja. Ova neizvesnost obuhvata i neizvesnost hidroloških modela (izbor statističke raspodele i vrednosti parametara te raspodele).

(b) Hidraulička neizvesnost obuhvata razne aspekte modeliranja ustaljenih i neustaljenih tokova (uprošćenja računskog modela, procena rapavosti korita i drugih otpora, kvalitet topografskih podloga, greške u pozicioniranju i geometriji objekata itd.).

(c) Ekonomske i društvene neizvesnosti koje utiču na štete od poplava (koštanje objekata, izmene u nameni površina, reakcija javnosti na poplave itd.).

(d) Neizvesnosti u pogledu performansi sistema za zaštitu od poplava (stabilnost objekata u ekstremnim hidrološkim, hidrauličkim, geotehničkim i drugim uslovima).

U našoj praksi, navedene neizvesnosti do sada nisu eksplicitno razmatrane pri projektovanju objekata za zaštitu od poplava. Implicitno su uzimane u obzir kroz subjektivno usvojene vrednosti koeficijenata sigurnosti, odnosno rezerve u dimenzionisanju objekata (na pr. nadvišenje nasipa).

Savremeni pristup projektovanja sistema za zaštitu od poplava podrazumeva *kvantifikaciju rizika* od poplava i razmatranje uticaja pojedinih neizvesnosti na projektno rešenje. Pojam dugoročnog rizika je tradicionalno vezan za hidrološki rizik i matematički je odredjen verovatnoćom da će određena veličina X premašiti vrednost X^* *u bilo kojoj godini* zadatog perioda (najčešće„životnog veka“ objekta):

$$R = 1 - [\,1 - P(\,X \geq X^*\,)\,]^m\,, \qquad (1)$$

gde je: R – rizik, P – verovatnoća, a m – broj godina razmatranog perioda.

U oblasti zaštite od poplava, pojam rizika, kao što je na početku rečeno, obuhvata pored verovatnoće poplavnog događaja i njegovu posledicu – direktnu materijalnu štetu, što se može ovako formulisati:

$$R = P \cdot S, \qquad (2)$$

gde je S – direktna šteta od plavljenja [din, €].

Mera rizika je *očekivana godišnja šteta*:

$$\overline{S} = \int_0^1 S(P)\,\mathrm{d}P \approx \sum_{i=1}^{m} \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \cdot \Delta P_i \quad \text{[din/god]} \qquad (3)$$

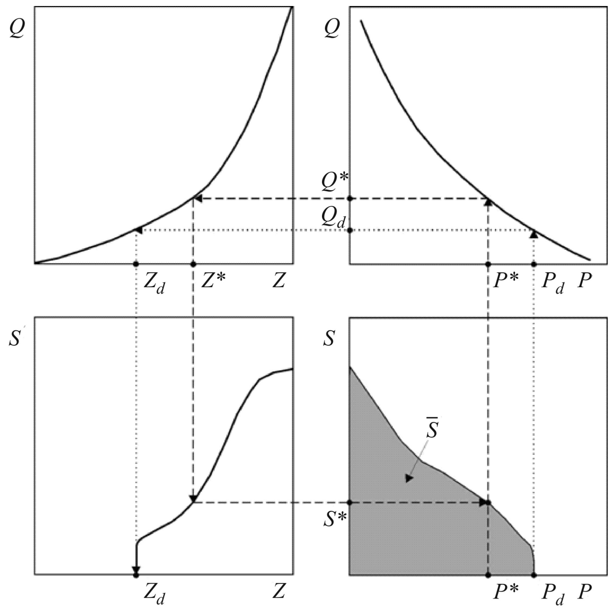
Ovaj izraz[1] pokazuje da se integral rešava numerički, primenom trapeznog pravila, iz parova vrednosti (S_i, P_i), gde indeks: i=1,2,..., m označava pojedini plavni događaj u ukupnom broju od m takvih događaja, dok je inkrement verovatnoće: $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$. Na osnovu izraza (3) može se konstatovati da očekivana godišnja šteta obuhvata razne verovatanoće u toku višegodišnjeg perioda i da je stoga, pravi reprezent slučajnih hidroloških pojava, odnosno hidrološkog rizika.

2. DETERMINISTIČKI PRISTUP

Na Slici 1 prikazan je skup međusobno povezanih dijagrama koji služe za određivanje očekivane godišnje štete. Za veličinu koja određuje „*opterećenje*“ ili „*intenzitet hazarda*“, izabrana je kota nivoa *Z*, dok je „*otpornost sistema*“ definisana *pragom štete* Z_d – najnižom kotom nivoa vode pri kome se javlja šteta. Ta kota može, na primer, odgovarati koti krune nasipa. Kriva štete *S*(*Z*) odražava „*ranjivost sistema*“, a kriva verovatnoće štete *S*(*P*) se zove i „*kriva rizika*“ [1].

Deterministički postupak određivanja očekivane godišnje štete opisan je na Slici 1, isprekidanom linijom sa strelicama. Ovaj pristup obuhvata samo prirodnu varijabilnost velikih voda (hidrološku neizvesnost), a zanemaruje ostale oblike neizvesnosti. Sve ulazne veličine su jednoznačno definisane, pa je i rezultat jednoznačan.

Korak u pravcu obuhvatanja neizvesnosti u okviru determinističkog pristupa je primena *anlize osteljivosti,* koja ima za cilj da se ustanovi uticaj promene ulanih podataka (ili pretpostavki, scenarija) na rezultate proračuna. Na taj način se razmatra opseg vrednosti očekivane godišnje štete, pa se iz skupa mogućih vrednosti, procenjuje ona, koja je merodavna za projektovanje zaštitnog sistema.



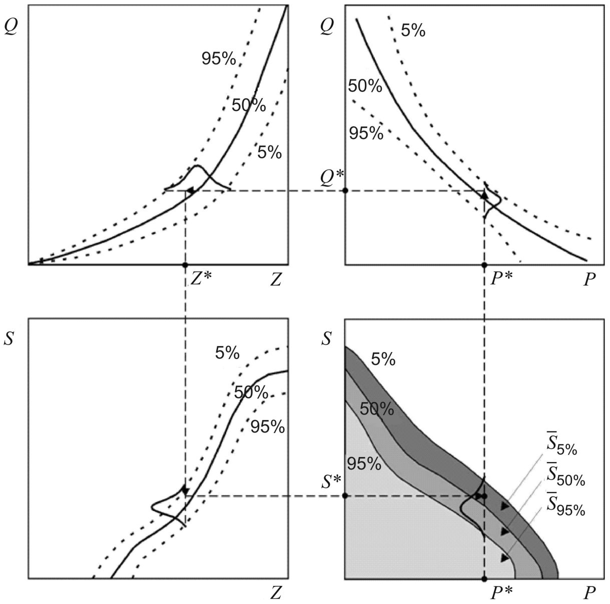
Slika 1. Postupak determinističkog određivanja očekivane godišnje štete [1]; kriva *Q*(*P*), određena statističkom obradom najvećih godišnjih protoka u višegodišnjem periodu, opisuje verovatnoću da protok premaši određenu vrednost; kriva *Z*(*Q*) je osrednjena kriva protoka, dobijena na osnovu registrovanih vodostaja; *S*(*Z*) je zavisnost štete od kote nivoa, dobijena na osnovu podataka iz prošlosti, ili na osnovu sintetičkih krivih šteta [2]; rezultujući dijagram *S*(*P*), predstavlja krivu rizika, a zatamnjena površina ispod ove krive predstavlja, shodno izrazu (3), očekivanu godišnju štetu. Isprekidana linija sa strelicama pokazuje kako se, polazeći od izabrane vrednosti *P**, preko odgovarajućih vrenosti *Q** i *Z**, dolazi do vrednosti *S**, a ponavljanjem ovog postupka, formira zavisnost *S*(*P*).

3. STOHASTIČKI PRISTUP

Osnovna ideja ovog pristupa je da se sve ulazne veličine tretiraju kao slučajne promenljive, koje imaju svoje statističke raspodele. To znači da, umesto jednoznačnih zavisnosti na Slici 1, zavisnosti mogu biti višeznačne, kao što je prikazano na Slici 2. Umesto jedne vrednosti očekivane godišnje štete, stohastički pristup daje kao krajnji rezultat *funkciju gustine raspodele očekivane godišnje štete*. Statistike ove raspodele se mogu naknadno odrediti, pri čemu je srednja vrednost od interesa za odredjivanje optimalnog stepena zaštite od poplava.

[1] Po definiciji, matematičko očekivanje je: $E(S) = \int_{-\infty}^{\infty} S \cdot f(S)\,\mathrm{d}S$

Kako je funkcija gustine raspodele $f(S)=\mathrm{d}P(S)/\mathrm{d}S$, sledi: $E(S) = \int_0^1 S(P)\,\mathrm{d}P \equiv \overline{S}$



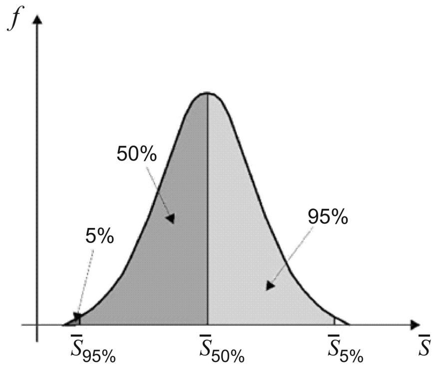
Slika 2. Stohastički pristup u analizi rizika od poplava [1]; isprekidane linije obeležene vrednostima 95% i 5% označavaju intervale poverenja, a puna linija obeležena 50%, povezuje medijane prikazanih funkcija gustina uslovnih raspodela.

U ovom slučaju se primenjuje stohastički pristup koji je zasnovan na velikom broju podataka, generisanih pomoću slučajnih brojeva. Slučajni brojevi se generišu po unapred zadatim raspodelama, što predstavlja osnov simulacione metode Monte Karlo. Moguće su dve varijante [6].

Generisanje grešaka. U ovoj varijanti, očekivana godišnja šteta se računa prema postupku prikazanom na Slici 1, s tim da se u svakom simulacionom koraku, vrednostima Q^*, Z^* i S^* dodaje slučajna komponenta - „greška" (ε). Greška se opisuje nekom funkcijom gustine raspodele. Najčešće je to dvoparametarska standardizovana normalna raspodela, kod koje je srednja vrednost jednaka nuli, dok se vrednosti standardne devijacije σ_z zadaju. U slučaju da je funkcija $Q(P)$ definisana teorijskom raspodelom log Pearson III, greška se opisuje t-raspodelom [6]. Generatorom slučajnih brojeva po usvojenim raspodelama, dodeljuju se greške veličinama Q^*, Z^* i S^*, čime i zavisnosti $Q(P)$, $Q(Z)$, $S(Z)$ i $S(P)$ dobijaju slučajan karakter (Slika 2). Podrazumeva se da su greške pri sukscesivnim poplavama nekorelisane.

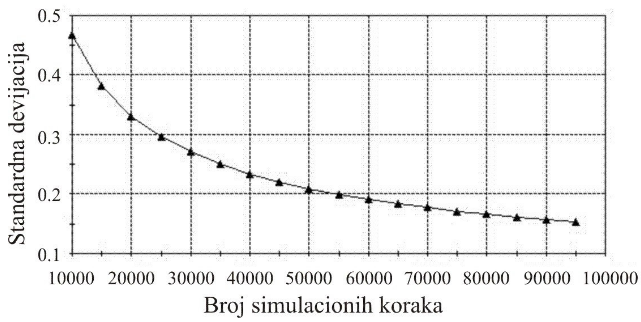
Generisanje funkcija. Ova varijanta se zasniva na generisanju slučajnih brojeva za parametre ranije utvrđenog tipa teorijske raspodele najvećih godišnjih protoka. Najčešće se radi o raspodelama tipa Pearson III ili log Pearson III. Na taj način se u toku jednog simulacionog ciklusa generiše slučajna funkcija $Q(P)$ iz skupa mogućih funkcija. Slučajne funkcije $Q(Z)$, $S(Z)$ generišu se kao u prethodnoj varijanti.

U svakom simulacionom koraku (po obe varijante), dobija se vrednost očekivane godišnje štete $\bar{S}$. Nakon velikog broja simulacionih koraka, formiran je niz vrednosti $\bar{S}$, čijom se statističkom obradom dolazi do odgovarajuće funkcije gustine raspodele (Slika 3).



Slika 3. Shematski prikaz gustine raspodele očekivane godišnje štete; srednja vrednost je merodavna za dimenzionisanje nasipa.

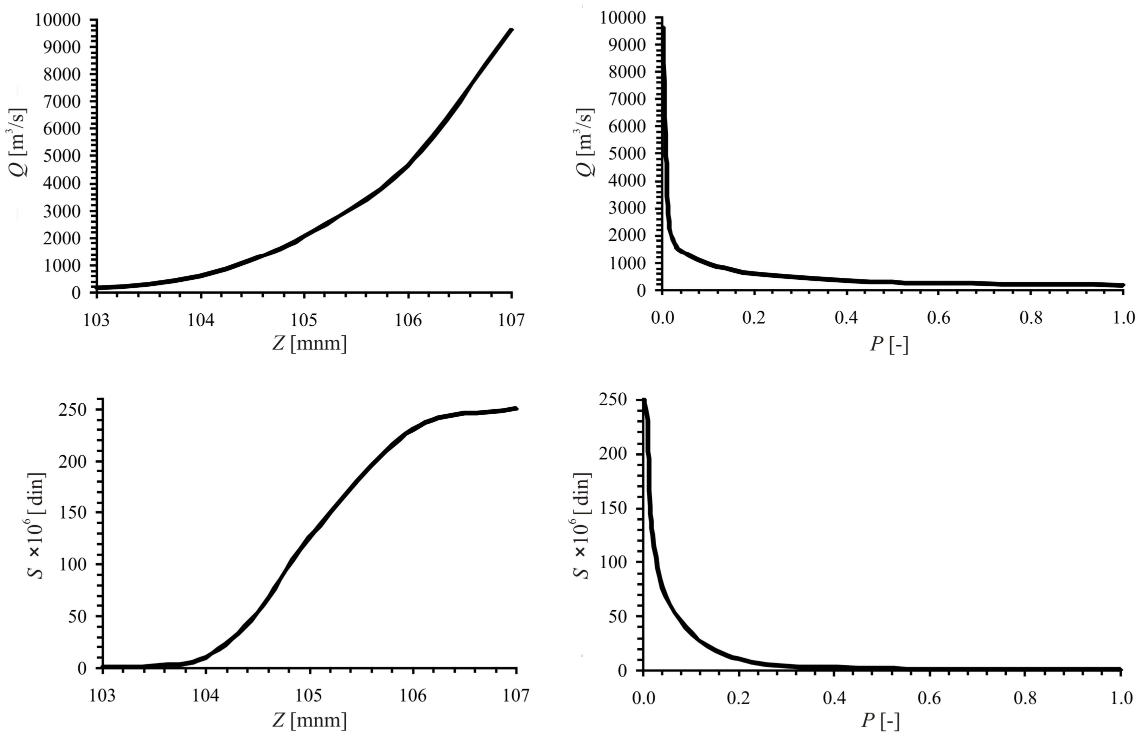
Da bi simulacija dala pouzdane rezultate, broj simulacionih koraka mora biti dovoljno velik. Taj broj se iskustveno određuje. Kriterijum završetka proračuna je da se vrednosti statistika generisa-nog niza $\bar{S}$ sa daljim povećanjem broja simulacionih koraka bitno ne menjaju. Primera radi, na Slici 4 prikazana je promena vrednosti standardne devijacije sa brojem simulacionih koraka.



Slika 4. Kriterijum završetka Monte Karlo simulacija; sa povećanjem broja simulacionih koraka, vrednosti standardne devijacije opadaju i konvergiraju.

4. PRIMER REKE TAMNAVE

Projektom regulacije reke Tamnave, najveće leve pritoke reke Kolubare, predviđena je izgradnja nasipa za zaštitu od velikih voda naselja Šabačka Kamenica [4]. Razmatrana je deonica dužine oko 3 km, u zoni naselja. Pored seoskih objekata, poplavama je ugrožen lokalni put sa mostom, a najveći deo plavnog područja, širine 400-700 m, ima poljoprivrednu namenu. Na Slici 5 prikazani su dijagrami koji su korišćeni u determinističkom pristupu određivanja šteta od poplava.



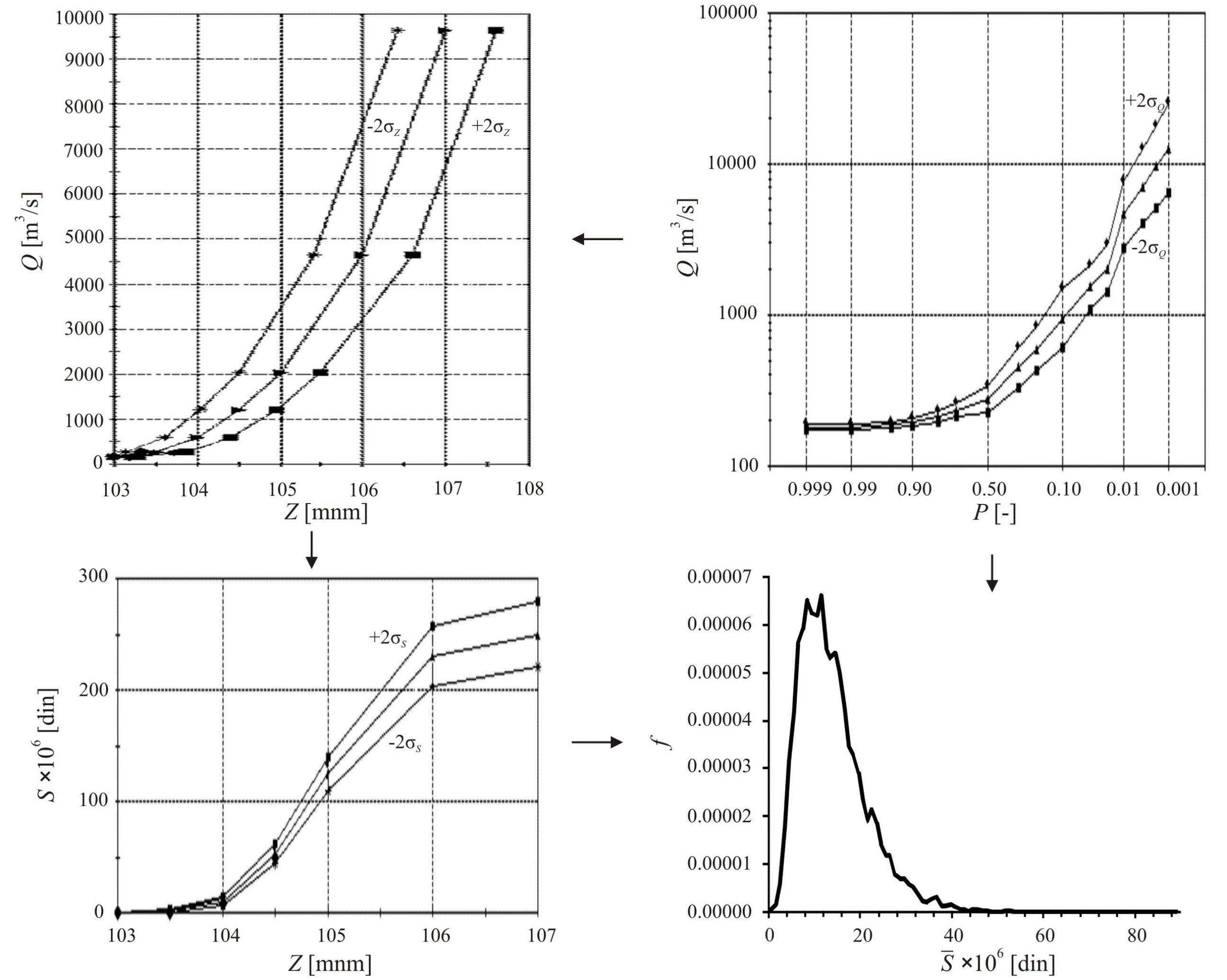
Slika 5. Funkcije korišćene u determinističkoj analizi rizika od poplava na jednoj deonici reke Tamnave; kriva verovatnoće velikih voda $Q(P)$određena je statističkom obradom registrovanih vodostaja u profilu vodomerne stanice Koceljeva, 8 km nizvodno od Šabačke Kamenice; računska kriva protoka $Q(Z)$ na nizvodnoj granici razmatrane deonice određena je proračunom linijskog ustaljenog tečenja; kriva štete $S(Z)$ određena je na osnovu rezultata hidrauličkih proračuna (veličine plavnog područja i visine plavljenja) i podataka prikupljenih na terenu (broj, vrsta i vrednost ugroženih, objekata, podaci o infrastrukturi, podaci o obradivim površinama i vrstama useva itd.) [4,5].

Postupkom koji je opisan pomoću dijagrama na Slici 1, određena je, uzevši u obzir poplave raznih povratnih perioda, očekivana godišnja šteta od oko 13 miliona din/god.

Stohastička analiza u ovom slučaju obuhvata neizvesnosti hidroloških i hidrauličkih ulaznih podataka, kao i neizvesnost u proceni štete od visine plavljenja. Analizom *nisu* obuhvaćene neizvesnosti u pogledu širih ekonomskih i društvenih prilika, kao neizvesnosti vezane za funkcionisanje i stabilnost objekata za zaštitu od poplava. Formirane statističke zavisnosti komentarišu se u nastavku.

Hidrološkom analizom datog slivnog područja određene su vrednosti najvećih godišnjih protoka za povratne periode od: 1, 2, 5, 15, 50, 100 i 500 godina (verovatnoće 1, 0,5,..., 0,002). Na osnovu ovih podataka, bez analitičkog definisanja date zavisnosti, određeni su intervali poverenja primenom statistike uređenog uzorka[2] [4]. Kriva koja povezuje parove (Q,P) i predstavlja krivu srednjih vrednosti, kao i krive intervala poverenja $\pm 2\sigma_Q$, prikazane su na Slici 6.

[2] Korišćenje statistike uređenog uzorka predviđeno je posebnom opcijom u programu HEC-FDA.



Slika 6. Rezultati Monte Karlo simulacije za plavno područje reke Tamnave; gore desno: zadata zavisnost $Q(P)$ označava srednje vrednosti u odnosu na koje su generisane krive intervala poverenja $\pm 2\sigma_Q$; gore levo: računska kriva protoka koja označava vrednosti medijane, sa intervalima poverenja $\pm 2\sigma_Z$; dole levo: funkcija štete sa intervalima poverenja $\pm 2\sigma_S$; dole desno: funkcija gustine raspodele očekivane godišnje štete, generisana posle 10000 simulacionih koraka [5].

Kriva protoka je određena računskim putem, sa procenjenim vrednostima Manningovog koeficijenta rapavosti.

Pod pretpostavkom normalne raspodele, standardna devijacija greške u proceni kote nivoa može imati opseg vrednosti koji je naveden u Tabeli 1

Tabela 1. Vrednosti standardne devijacije greške u koti nivoa (σ_Z) pri određivanju računske krive protoka [6]

Pouzdanost procene vrednosti Manningovog koeficijenta	Poprečni profili snimljeni na terenu	Poprečni profili definisani pomoću topografskih karata u pogodnoj razmeri
Dobra	0,1 m	0,2 m
Osrednja	0,2 m	0,3 m
Mala	0,4 m	0,5 m

Treba napomenuti da je u slučaju kada nema uslova za kalibraciju koeficijenta otpora, određivanje vrednosti standardne devijacije u kontekstu neizvesnosti kote nivoa, može biti predmet analize osetljivosti ili ekspertske procene [6]. Naime, ako se za dati protok, proceni prosečna razlika najviših i najnižih mogućih kota nivoa na datoj deonici (ΔZ_{sr}) i ta razlika proglasi za „opseg neizvesnosti“ unutar koga će se naći kote nivoa sa verovatnoćom 95%, sledi:

$$\sigma_Z = \Delta Z_{sr} / 4. \qquad (4)$$

Takođe treba imati u vidu da vrednosti parametra σ_Z u načelu zavise i od povratnog perioda, odnosno veličine poplavnog talasa, jer su neizvesnosti tečenja u inundacijama, s obzirom na neravnomernost rapavosti i brzina, daleko veće nego kod tečenja u osnovnom koritu.

Ako se pretpostavi da deterministički određena kriva štete $S(Z)$ označava srednje vrednosti i da greška ima normalanu raspodelu $N(\mu_\varepsilon=0,\ \sigma_\varepsilon)$, vrednosti standardne devijacije greške mogu se definisati za svaku dubinu plavljenja na osnovu ekspertske procene [6]. U konkretnom slučaju su usvojene vrednosti: σ_ε = 0,75-15 $\times$ 10^6 din (za opseg srednjih vrednosti šteta: 1,5-250 $\times$ 10^6 din).

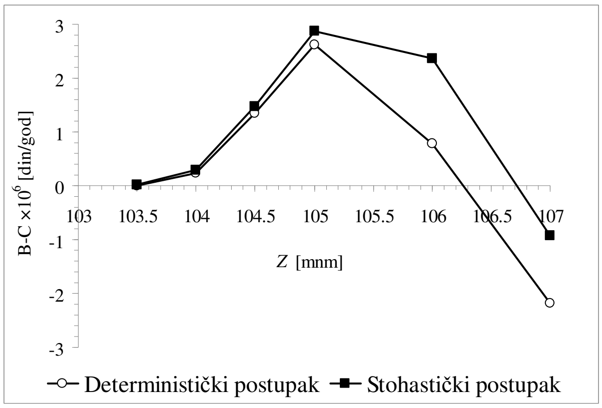
Korisni podaci o funkcijama šteta koje obuhvataju stambene objekte, industriju, infrastrukturu i poljoprivredu, mogu naći u literaturi [2, 3 i 6].

Konačan rezultat simulacionog proračuna je *generisana* funkcija gustine raspodele očekivane godišnje štete, koja je prikazana na Slici 6. Statistike ove raspodele su: srednja vrednost: 14,5$\times 10^6$ din/god, standardna devijacija: 7,2$\times 10^6$ din/god i koeficijent asimetrije: 1.145.

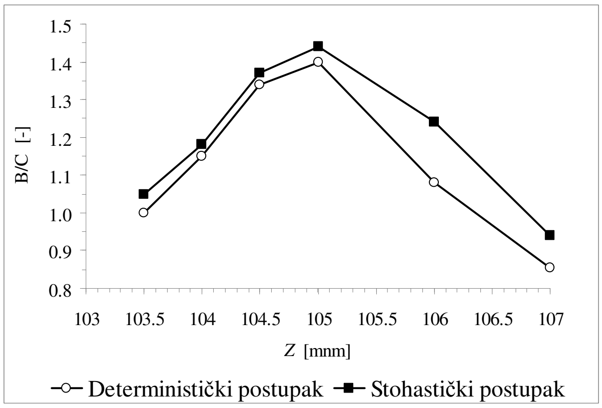
Srednja vrednost očekivane štete od 14,5$\times 10^6$ din/god predstavlja merodavan podatak za dalje analize. Može se konstatovati da se ova vrednost relativno malo razlikuje od vrednosti koja je dobijena determinističkim pristupom, bez uzimanja u obzir neizvesnosti, svega oko 10%, što je posledica konkretnih prirodnih i drugih uslova na vrlo kratkoj razmatranoj deonici Tamnave, kao i procene nekih ulaznih podataka.

Dobijena vrednost očekivane godišnje štete korišćena je za određivanje optimalnog stepena zaštite razmatranog područja od plavljenja, odnosno optimalne visine odbrambenih nasipa. U konkretnom slučaju, trasu nasipa su diktirali lokalni uslovi i visoka cena eksproprijacije zemljišta, tako da je prosečni razmak projektovanih nasipa na levoj i desnoj obali iznosio oko 110 m.

Na Slikama 7 i 8 prikazani su rezultati analize dobiti i troškova zaštite razmatranog područja nasipima [4, 5].



Slika 7. Krive neto dobiti; dobit B („benefit“) predstavlja odsustvo štete od plavljenja; troškovi C („cost“) se odnose na projektovane nasipe. Veličine B i C se iskazuju na godišnjem nivou i određene su diskontnim računom za obračunski period od 100 godina. Može se konstatovati da je optimalna kota krune nasipa 105,00 mnm, što u datom slučaju odgovara koti nivoa povratnog perioda 50 godina.



Slika 8. Krive odnosa dobiti i troškova koje pokazuju da je, kao po prethodnom kriterijumu, optimalna kruna nasipa 105,00 mnm.

5. ZAKLJUČAK

Rizik od poplava kvantifikuje se očekivanom godišnjom štetom. Za njen proračun može se primeniti deterministički ili stohastički postupak. Ovaj drugi omogućava da se obuhvate razni vidovi neizbežnih neizvesnosti, kao što su hidrološka, hidraulička i ekonomska neizvesnost, kao i funkcionalna neizvesnost objekata za zaštitu od poplava.

Stohastički pristup takođe pruža uvid u to kako se navedene neizvesnosti, preko ulaznih podataka, prenose na rezultat proračuna. Za to mogu poslužiti vrednosti standardne devijacije očekivane godišnje štete. Stoga, stohastički pristup ima nesumnjive predosti u odnosu na klasični deterministički pristup. Nedostatak stohastičkog pristupa predstavlja izvesan stepen subjektivnosti u statističkom opisu neizvesnosti, a odnosi se na zadavanje tipa funkcije gustine raspodele grešaka ulaznih veličina, kao i vrednosti parametara tih funkcija. U odnosu na deterministički pristup, stohastički postupak zahteva veći obim i kvalitet podataka, kao i utrošak računskih resursa.

LITERATURA

[1] Branisavljević, N., Komatina, D., Jovanović, M., Flood Damage Assessment and Uncertainties in Flood Damage Estimation, Postgraduate Course in Water Resources and Environmental Management – Educate!, 2008.

[2] Jovanović, M., Flood Risk Mapping, Postgraduate Course in Water Resources and Environmental Management – Educate!, 2008.

[3] Kron, A., Flood Damage Estimation and Flood Risk Mapping, Chapter 10, Advances in Urban Flood Management, Ashley, R. et al. (ed.), Taylor & Francis, London, 2007.

[4] Marinković, M., Idejno rešenje regulacije Tamnave u zoni naselja Kamenica, diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 2003.

[5] Rosić, N., Stohastički pristup u analizi rizika od poplava, seminarski rad iz predmeta „Zaštita od poplava“, doktorske studije, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.

[6] US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering, Requirements for Flood Reduction Studies, EM 1110-2-1619, 1996.

[7] US Army Corps of Engineers, Uncertainty Estimates for Nonanalytic Frequency Curves, ETL 1110-2-537, 1997.

STOCHASTIC APPROACH TO FLOOD DAMAGE ASSESSMENT

by

Nikola ROSIC, dipl. civ. eng.
dr Miodrag JOVANOVIC, dipl. civ. eng.
University of Belgrade
Faculty of Civil Engineering

Summary

This article deals with deterministic and stochastic approaches to assess the expected annual flood damages. Each approach is illustrated by a case study pertaining to floods at different sections of the Tamnava river in Serbia. The objective was to use examples from engineering practice in order to demonstrate how various uncertainties may affect the expected annual damage, and consequently, how to determine the economically optimal degree of flood protection, expressed by the designed height of the levees.

Key words: flood risk, flood damage, uncertainties, Monte Carlo method, levee design

Redigovano 20.12.2008.