

# Varijabilnost očekivane godišnje štete kao indikatora poplavnog rizika

---

Kekez, Toni

*Source / Izvornik:* **Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, Split, 14.-17. rujna, 2023. : zbornik radova, 2023, 158 - 163**

**Conference paper / Rad u zborniku**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.24>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:811580>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-04**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRADEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.24>

## VARIJABILNOST OČEKIVANE GODIŠNJE ŠTETE KAO INDIKATORA POPLAVNOG RIZIKA

Toni Kekez<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska,  
[toni.kekez@gradst.hr](mailto:toni.kekez@gradst.hr)

### Sažetak

Poplave uzrokovane izlivanjem rijeka spadaju u prirodne katastrofe koje učestalo uzrokuju značajnu novčanu štetu. Procjena poplavnog rizika i efikasno upravljanje njime predstavlja ključan pristup za smanjenje štetnih posljedica u budućnosti. Najčešći pristup kvantifikaciji poplavnog rizika je kroz izračun očekivane godišnje štete koji kombinira vjerojatnost pojave poplavnih događaja i potencijalnu štetu koja može nastati. Međutim, koncept očekivane godišnje štete predstavlja neutralni pristup koji ima za cilj maksimizirati ekonomski aspekt. Stoga se u ovom radu analizira varijabilnost očekivane godišnje štete kroz definiciju distribucije godišnje štete koja ima za cilj pokazati odnos očekivane godišnje štete i relativne godišnje štete prouzrokovane različitim poplavnim scenarijima. Rezultati su pokazali veliku vjerojatnost godišnjeg prekoračenja vrijednosti očekivane godišnje štete. Također, uslijed izražene asimetrije distribucije značajan je utjecaj ekstremnih poplavnih scenarija male vjerojatnosti pojave. Konačno, značajan je utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete kroz povećanu urbanizaciju i utjecaj klimatskih promjena.

*Ključne riječi: poplavni rizik, statistički momenti, distribucija godišnje štete*

## VARIABILITY OF EXPECTED ANNUAL DAMAGE AS FLOOD RISK INDICATOR

### Abstract

River floods are considered to be one of the most significant natural disasters, causing considerable damage each year. Risk assessment, as well as efficient risk management, are key aspects for the mitigation of flood-related consequences. The most common approach for quantifying flood risk is to estimate the expected annual damage, which combines the probability of occurrence and the associated damage. However, the concept of expected annual damage is considered a risk-neutral solution that maximizes economic efficiency. This paper analyzed the variability of expected annual damage as a risk indicator. The goal was to demonstrate the relationship between the expected annual damage and the values of the relative annual damage caused by different flood scenarios. The results showed a high probability of exceeding the expected annual damage. Furthermore, due to the notable asymmetry of the annual distribution of damage, the impact of low-probability flood scenarios with large damage is significant. Finally, future conditions such as climate change and urbanization will have a strong impact on the annual distribution of damage. *Keywords: flood risk, statistical moments, annual damage distribution*

Poplave spadaju u prirodne katastrofe koje prosječno na godišnjoj razini prouzroče preko 7.8 milijardi € štete te su procjene da je samo u Europi svake godine približno 172 000 ljudi izloženo riječnim poplavama [1]. Uslijed izmjene energije i postizanja dinamičke ravnoteže u vodotoku dolazi do izlivanja vode na prirodnom inundacijskom području što se kolokvijalno naziva poplava. Klimatološke prilike kao što su oborine, otapanje snijega i leda, te njihovo kombinirano djelovanje, uzrokuju poplave koje predstavljaju posljedicu površinskog otjecanja kao dijela hidrološkog ciklusa.

Procjena rizika kroz analizu vjerojatnosti pojave poplave i povezanih posljedica predstavlja standardni postupak za kvantifikaciju štetnog učinka na izloženom području. EU Direktiva o poplavama [2] implementirana u legislativu propisuje da se scenariji male, umjerene i velike vjerojatnosti moraju analizirati kako bi se kvantificirao poplavni rizik. S obzirom na utjecaj klimatskih promjena, ali i porast urbanizacije na izloženim područjima, očekuje se da će se poplavni rizik s vremenom povećati. Stoga, efikasno i održivo upravljanje poplavnim rizicima predstavlja jedan od ključnih izazova u budućnosti.

Upravljanje poplavnim rizikom odnosi se na ublažavanje i prevenciju negativnih posljedica poplava kombinacijom tehničkih i netehničkih mjera. Najčešći pristup kvantifikaciji poplavnog rizika je kroz izračun očekivane godišnje štete [3]. Prilikom planiranja investicija u zaštitu od poplava, donositelji odluka oslanjaju se na veličinu očekivane godišnje štete kao indikatora na kojem se baziraju analize troškova i koristi pojedinog projekta. Međutim, koncept očekivane godišnje štete kao osrednje varijable, predstavlja neutralni pristup iz aspekta procjene rizika koji ima za cilj maksimizirati ekonomski aspekt [4] budući da jednako vrednuje utjecaj svih poplavnih događaja.

U ovom radu analizira se koncept očekivane godišnje štete i njegova održivost kroz definiciju distribucije godišnje štete koja ima za cilj pokazati odnos veličine očekivane godišnje štete i relativne godišnje štete uslijed različitih poplavnih scenarija. Također, analiziraju se varijacije vrijednosti očekivane godišnje štete kroz projekciju budućeg stanja.

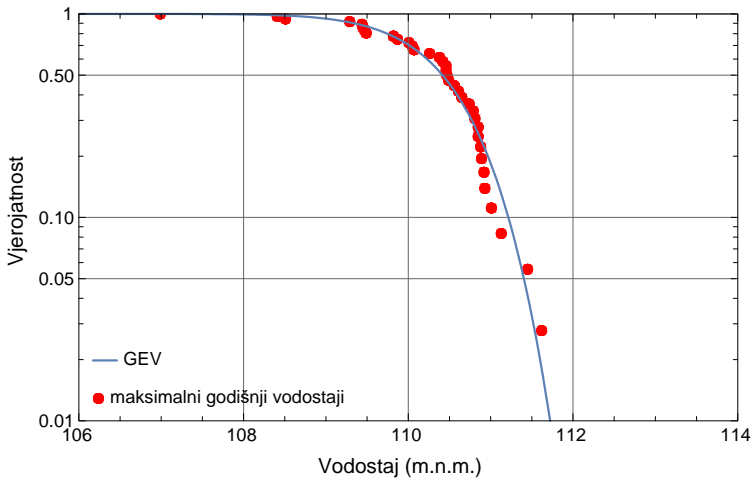
## 5. Kvantifikacija poplavnog rizika

### 5.1. Indikatori poplavnog rizika

Poplavni rizik (1) u općem smislu definiran je kao produkt vjerojatnosti pojave poplavnog događaja i potencijalne štete prouzročene poplavnim događajem:

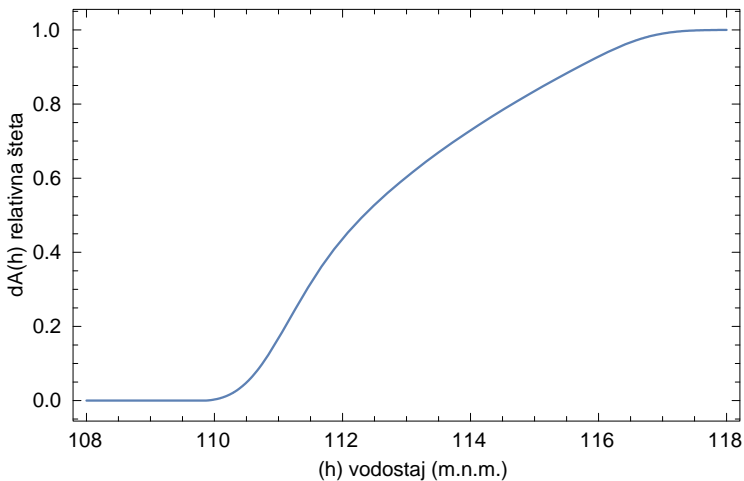
$$\text{Poplavni rizik} = \text{vjerojatnost poplave} \cdot \text{potencijalna šteta} \quad (1)$$

Procjena vjerojatnosti pojave poplavnog događaja temelji se na funkciji gustoće vjerojatnosti koja je definirana temeljem povijesnih podataka o izmjerenim ekstremnim vodostajima. Primjer funkcije gustoće vjerojatnosti za različite vrijednosti izmjerenih vodostaja prikazan je na Slici 1. gdje je za izmjerene set podataka odabrana teorijska distribucija pod nazivom *Generalized Extreme Value* (GEV).



**Slika 1.** Maksimalni godišnji vodostaji opisani s GEV funkcijom

Odabrana teorijska distribucija koja opisuje vjerojatnosti pojave ekstremnih vodostaja predstavlja ulaznu varijablu za definiranje poplavnih događaja i odgovarajuće štete. Potencijalna šteta na imovini za svaki poplavni događaj određena je temeljem *vodostaj-šteta* funkcije (Slika 2.) razvijene za urbane aglomeracije [5].



**Slika 2.** Primjer *vodostaj-šteta* funkcije za procjenu relativne štete

Konačno, očekivana godišnja šteta kao indikator ekonomske kvantifikacije poplavnog rizika predstavlja sumu umnoška svih vjerojatnosti pojave poplavnih događaja i veličine odgovarajuće relativne štete. Promatra li se godišnja šteta kao slučajna varijabla, onda očekivana godišnja šteta (EAD) predstavlja prvi statistički moment:

$$EAD = \mu_{AD} = \int_0^{\infty} \int_0^h f(\lambda) d_1(h, \lambda, k) p(h) d\lambda dh \quad (2)$$

## 5.2. Statistički momenti višeg reda i distribucija godišnje štete

Nesigurnost u procjeni rizika primjenom parametra očekivane godišnje štete temelji se na činjenici da navedeni koncept predstavlja neutralni pristup za ekonomsku kvantifikaciju poplavnog rizika, posebice zanemarujući pritom utjecaj ekstremnih događaja male vjerojatnosti. Nesigurnost u procjeni slučajne varijable godišnje štete promatra se kroz analizu varijance godišnje štete (3), kao i ostalih karakteristika funkcije distribucije putem statističkih momenata višeg reda (4, 5) čije će se vrijednosti izračunati temeljem izvedenih analitičkih izraza [5]:

$$\sigma_{AD}^2 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^2 p(h) dh - [\mu_{AD}]^2 \quad (3)$$

$$\mu_3 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^3 p(h) dh - 3\mu_{AD}\sigma_{AD}^2 - [\mu_{AD}]^3 \quad (4)$$

$$\mu_4 = \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^4 p(h) dh - 4\mu_{AD} \int_0^{\infty} [d_A(h, k)]^3 p(h) dh + 6\mu_{AD}^2 \sigma_{AD}^2 + 3[\mu_{AD}]^4 \quad (5)$$

gdje  $\mu_3$  i  $\mu_4$  predstavljaju treći i četvrti statistički moment godišnje štete a skošenost i spljoštenost funkcije godišnje štete evaluiraju se kroz  $\mu_3/\sigma_{AD}^3$  odnosno  $\mu_4/\sigma_{AD}^4$ .

Koristeći izračunate vrijednosti statističkih momenata definirat će se distribucija godišnje štete kao i vrijednosti viših statističkih momenata. Za definiciju distribucije godišnje štete odabrana je beta distribucija budući da su vrijednosti relativne godišnje štete u rasponu 0-1.

## 6. Rezultati procjene poplavnog rizika

### 6.1. Distribucija godišnje štete

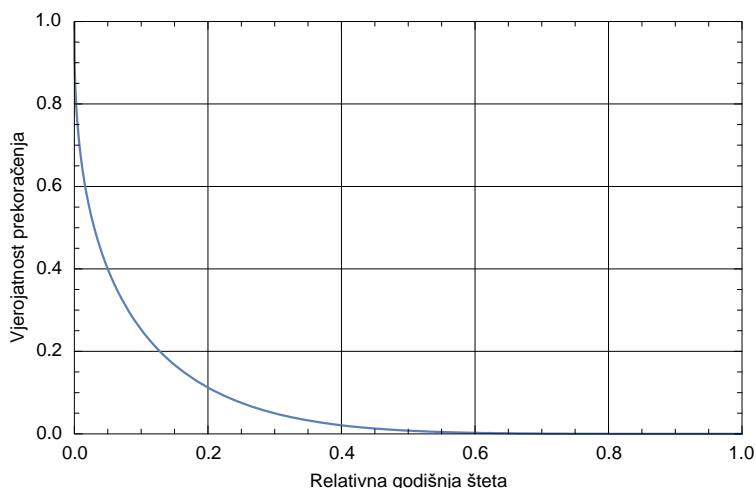
Koristeći predloženi pristup definirana je distribucija godišnje štete koja obuhvaća cijeli prostor vjerojatnosti (Slika 3.), a ne samo diskretne vrijednosti. Temeljem analitičkih izraza (2, 3, 4, 5), za konkretan primjer izračunata su i četiri statistička momenta (Tablica 1.)

**Tablica 1.** Vrijednosti prva četiri statistička momenta distribucije godišnje štete

EAD ( $\mu_{AD}$ )	Standardna devijacija ( $\sigma_{AD}$ )	Skošenost ( $\mu_3/\sigma_{AD}^3$ )	Spljoštenost ( $\mu_4/\sigma_{AD}^4$ )
0,074	0,1	1,75	5,55

Distribucija godišnje štete na Slici 3. prikazana je u formi funkcije prekoračenja. Ovakav pristup često se koristi u analizama prirodnih katastrofa [6] i predstavlja vjerojatnost da slučajna varijabla godišnje štete prekorači određenu vrijednost. Analizirajući oblik distribucije, izraženi koeficijent asimetrije odnosno pozitivna skošenost, kao i leptokurtični oblik, ukazuju da postoji značajan utjecaj događaja male vjerojatnosti i visoke štete na konačni oblik distribucije. Analizirajući rezultate temeljem distribucije godišnje štete, vrijednost očekivane

godišnje štete jednaka je 0,074 odnosno 7,4 % ukupne štete. Međutim, vjerojatnost prekoračenja očekivane godišnje štete uslijed izražene asimetrije iznosi čak 31 %.



**Slika 3.** Distribucija godišnje poplavne štete

Rezultati prikazani u Tablici 2. odnose se na izračunate vjerojatnosti prekoračenja odgovarajuće vrijednosti relativne godišnje štete za pojedine poplavne scenarije. Rezultati pokazuju da je vjerojatnost prekoračenja godišnje štete za poplavne scenarije veće vjerojatnosti u skladu s vrijednostima godišnje vjerojatnosti pojave. Međutim, promatraju li se ekstremni događaji poput 500 godišnje poplave, vjerojatnost prekoračenja godišnje štete iznosi 1,4%, što je sedam puta više u odnosu na godišnju vjerojatnost pojave od 0,2%.

**Tablica 2.** Vjerojatnost prekoračenja očekivane godišnje štete za različite scenarije

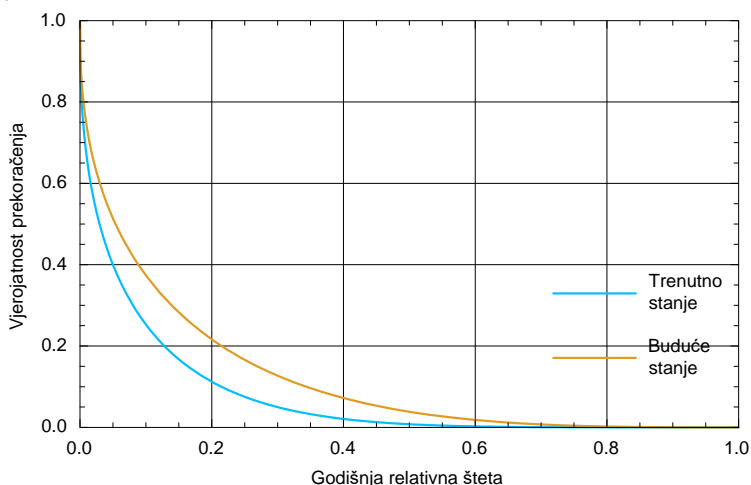
Povratni period	Vjerojatnost pojave	Godišnja relativna šteta	Vjerojatnost prekoračenja (%)
10	0,1	0,23	8,7
50	0,02	0,39	2,8
100	0,01	0,43	2
500	0,002	0,49	1,4

## 6.2. Utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete

Uzimajući u obzir promjene koje se mogu dogoditi u budućnosti, nužno je ispitati promjene koje mogu nastati u distribuciji godišnje štete uslijed, primjerice, klimatskih promjena ili dodatne urbanizacije. Budući da vrijednosti očekivane godišnje štete proizlaze iz distribucije godišnje štete, promjene u vrijednostima mogu direktno utjecati na planiranu ekonomsku analizu te održivost implementiranih mjera obrane. Utjecaj budućeg stanja na distribuciju godišnje štete demonstriran je za primjer povećanja urbanizacije na promatranom području,

što rezultira s potencijalno većom izloženosti poplavnim događajima i promjenom u distribuciji godišnje štete.

Promatrajući iznos od 0,23 relativne štete, što odgovara poplavnom scenariju povratnog perioda 10 godina, primjećuje se da vjerojatnost prekoračenja raste na 18 % u usporedbu s prethodnih 8,7 %. S druge strane, za poplavni scenarij koji odgovara povratnom periodu od 100 godina, veličina odgovarajuće godišnje relativne štete pada s 0,43 na 0,35 ali vjerojatnost prekoračenja raste na 7,3 %.



Slika 4. Promjene u distribuciji godišnje poplavne štete za buduće stanje

## Literatura

- [1] Dottori, F., Mentaschi, L., Bianchi, A., Alfieri, L. and Feyen, L., Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change, EUR 29955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-12946-2, doi:10.2760/14505, JRC118425.
- [2] Europska Komisija, Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks, (Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2007. o procjeni i upravljanju rizicima od poplava), 2007. Dostupno online: <https://eurlex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>
- [3] Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thielen, A. Review article assessment of economic flood damage, Natural Hazards and Earth System Sciences 2010, 10, 1697 –1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- [4] Merz, B.; Elmer, F.; Thielen, A.H. Significance of high probability/low damage versus low probability/high damage flood events. Natural Hazards and Earth System Sciences 2009, 9, 1033–1046. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1033-2009>
- [5] Kekez T, Andricevic R, Knezic S. Flood Risk Modeling under Uncertainties: The Case Study of Croatia. Water. 2022; 14(10):1585. <https://doi.org/10.3390/w14101585>
- [6] Humphreys, N. Exceedance probability in catastrophic modeling. Casualty Actuarial Society E-Forum 2021, 1 – 61.