



R 1.04.

## **PROJEKT RAINMAN – REGIONALNE SPECIFIČNOSTI MJERODAVNIH JAKIH OBORINA NA PILOT PODRUČJIMA U HRVATSKOJ**

**Nino Krvavica, Josip Rubinić**

*SAŽETAK:* U ovome radu, temeljenom na rezultatima istraživanja provedenim u okviru EU projekta RAINMAN, uspoređene su i opisane regionalne specifičnosti pljuska za projektiranje definiranog na temelju ombrografskih podataka s po dvije postaje na području Zagreba i Istre. Ukratko je opisana primijenjena metoda definiranja oblika krivulje pljuska za projektiranje te je provedena usporedba razlika u obliku krivulja s obzirom na razrede trajanja oborina. Također, na jednom praktičnom primjeru, analizirana je važnost definiranja mjerodavnih oborina pljuskom za projektiranje, ne samo kod analiza pluvijalnih poplava, već i kod dimenzioniranja određenih elemenata sustava za odvodnju oborinskih voda.

*KLJUČNE RIJEČI:* rizik od intenzivnih oborina, mjerodavna oborina, projektni pljusak, pluvijalne poplave, odvodnja oborinskih voda

### **PROJECT RAINMAN – REGIONAL CHARACTERISTICS OF DESIGN STORMS IN PILOT AREAS IN CROATIA**

*ABSTRACT:* This paper presents selected results from the research conducted within the EU project RAINMAN. In particular, the regional characteristics of the design storms derived from ombrograph data at two stations in the Zagreb and Istria pilot areas are described and compared. The methodology applied to deriving appropriate design storms is briefly described, and the differences in the shape of the design curves are compared with regards to the rainfall duration classes. Furthermore, one practical example is given to emphasize the importance of defining input rainfall data by using a design storm, not only in analyses of pluvial floods but also in sizing certain elements of storm water drainage systems.

*KEYWORDS:* heavy rain risk, rainfall, design storm, pluvial floods, storm water drainage

#### **1. UVOD**

Početak 21. stoljeća obilježile su, kod nas i u svijetu, sve izraženije poplave uvjetovane ekstremnim jakim oborinama na lokalnim slivnim područjima. Pritom su posebno ugrožene

urbane sredine, prije svega zbog neplanske i sve intenzivnije izgradnje nepropusnih površina, ali i neodgovarajućih projektnih rješenja. Kako bi se procijenile opasnosti te ublažile posljedice od poplava, neophodno je stručne analize temeljiti na pouzdanim hidrološko-hidrauličkim modelima, ali i raspolagati podlogama koje realno odražavaju značajke predmetnog područja. Naime, rezultati hidroloških analiza neposredno ovise o kvaliteti oborinskih značajki. Međutim, razina definiranih oborina vrlo često nije zadovoljavajuća, jer nerijetko zanemaruje prostornu i vremensku nehomogenost njihove pojave. Posebno se to odnosi na područje Republike Hrvatske, gdje su na geografski malom području prisutne vrlo izražene orografske i klimatske raznolikosti koje utječu na količine oborina, njihovu vremensku raspodjelu te vjerojatnost pojavljivanja. Stoga, u procjenama opasnosti od pluvijalnih poplava, kao i kod dimenzioniranja određenih elemenata sustava za odvodnju oborinskih voda, neophodno je mjerodavnu oborinu definirati tzv. *pljuskom za projektiranje* (Dietz, 2007). Naime, za razliku od HTP ili ITP krivulja koje predstavljaju anvelopu kišnih događaja iz različitih kišnih epizoda te unutar svoga trajanja uprosječuju intenzitete, pljusak za projektiranje uključuje i vremensku varijabilnost intenziteta unutar jedne kišne epizode.

U ovome radu prikazat će se odabrani rezultati istraživanja odgovarajućeg pljuska za projektiranje na dva pilot područja u Hrvatskoj, provedenih u okviru EU projekta RAINMAN (2019). Pri tome, posebno će se naglasiti regionalne specifičnosti pljuska za projektiranje, odnosno razlike u vremenskoj raspodjeli oborina između Istre i Zagreba. Također, na jednom praktičnim primjeru ilustrirat će se važnost korištenja pljuska za projektiranje umjesto tradicionalnog pristupa s oborinom ravnomjernog intenziteta.

## 2. METODOLOGIJA DEFINIRANJA MJERODAVNE OBORINE

Pljusak za projektiranje (eng. *design storm*), za razliku od ravnomjernog intenziteta oborine dobivenog iz ITP krivulja, sadrži vremenski varijabilne intenzitete oborina kako bi se što realnije prikazala stvarna oborina (Dietz, 2007). Može biti definiran sintetičkim hijetogramom izvedenim iz niz zabilježenih kišnih događaja ili, rjeđe, odabirom pojedinih zabilježenih ekstremnih povijesnih oborina. U prvom slučaju, vremenska raspodjela oborina računa se ili direktno iz HTP/ITP krivulja ili statističkom obradom niza zabilježenih oborina (Dietz, 2007).

U sklopu EU projekta RAINMAN razvijena je metodologija definiranja pljuska za projektiranje na temelju metode prosječne varijabilnosti oborinskog intenziteta (Pilgrim, 1987). Naime, pomoću navedene metode definiraju se determinističke vrijednosti pljuska za projektiranje određenog trajanja i povratnog perioda, koje su jednostavnije za primijeniti u praksi u usporedbi s (češće korištenim) probabilističkim pristupom metode kvartilnih krivulja, a daju prihvatljivu aproksimaciju karakterističnog oblika kumulativne oborine (Krvavica i sur., 2018). Predložena se metodologija sastoji od dva koraka: (i) pripreme ulaznih podataka o oborinama te (ii) generiranja krivulje projektnog pljuska.

### 2.1. Obrada ombrografskih podataka

Odabir reprezentativnih događaja proveden je s obzirom na unaprijed definirane pragove (donje granice) za intenzitet i visinu oborina različitog trajanja s kojima se u hrvatskoj praksi ulazi u sekundarne obrade (Bonacci, 1994). Nakon što su odabrani svi pojedinačni događaji na temelju kojih se definira oblik pljuska za projektiranje,

definirane su kumulativne krivulje uzastopnim zbrajanjem 5-min vrijednosti visine oborina. Transformacija krivulja u bezdimenzionalni prostor provedena je na način da se  $y$  vrijednosti zabilježenih količina oborine po krivulji kumulante podijele s ukupnom zabilježenom oborinom  $H$ , a  $x$  zabilježene vrijednosti trajanja krivulje podijele s ukupnim trajanjem oborine  $t_k$ . Na ovaj način svaka krivulja smještena je unutar koordinata  $(0, 0)$  i  $(1, 1)$ .

Krivulje su kategorizirane u četiri razreda prema trajanju oborina. Razredi trajanja odabrani su iskustveno s obzirom na karakteristike oborina, prvenstveno njihove vremenske varijabilnosti. Prvi razred čine oborine trajanja duljeg od 15 min i kraćeg ili jednakog od 60 min. Ove oborine su najintenzivnije, ali zbog kratkog trajanja imaju slabije izraženu vremensku varijabilnost. Oborine kraće od 15 minuta isključene su iz analize, jer zbog vremenskog koraka klasičnih ombrografskih uređaja od 5 min ne sadrže dovoljno informacija o vremenskoj varijabilnosti oborine. Drugi razred čine oborine trajanja duljeg od 1 h i kraćeg od ili jednakog 3 h. Ove oborine mogu biti vrlo intenzivne te imaju i vrlo izraženu vremensku varijabilnost. Oborine trajanja duljeg od 3 h i kraćeg od ili jednakog 6 h čine treći razred oborine. U ovom razredu trajanja očekuju se oborine slične vremenske varijabilnosti kao i oborine drugog razreda. Pritom, moguće je da oborine ovog trajanja imaju složeniji oblik s dva maksimuma trenutnog intenziteta. Posljednji, četvrti razred čine sve oborine trajanja dužeg od 6 h. Ovo su oborine nešto slabije izražene vremenske varijabilnosti, uz više odvojenih maksimuma trenutnog intenziteta.

## 2.2. Metoda prosječne varijabilnosti

Metoda prosječne varijabilnosti (Pilgrim, 1987) temelji se na obradi karakteristika niza zabilježenih oborina. Originalna metoda provodi se za niz oborina istoga trajanja te stoga daje različite oblike pljuska za svako pojedino trajanje oborine. U radu Krvavice i sur. (2018) predložena je modifikacija metode prosječne varijabilnosti koja se provodi istovremeno za oborine različitog trajanja, koje se nalaze unutar unaprijed definiranog razreda, te stoga producira znatno manji broj oblika pljuska za projektiranje. U ovom radu odabrana su četiri razreda trajanja, kako je prethodno obrazloženo.

Za svaki razred trajanja oborine, postupak određivanja krivulje pljuska za projektiranje provodi se u tri koraka (Krvavica i sur., 2018). Prvo se svaka bezdimenzionalna kumulativna krivulja oborine transformira u bezdimenzionalni hijetogram s unaprijed definiranih  $N$  vremenskih intervala. Potom se za svaku oborinu trenutni bezdimenzionalni intenziteti sortiraju u  $N$  razreda od najvećeg prema najmanjem. Za svaki razred intenziteta izračuna se prosječni intenzitet. Pored toga se svakom intervalu dodijeli odgovarajući razred oborine s obzirom na prosječne vrijednosti. Konačno se svakom intervalu dodijeli odgovarajući prosječni intenzitet. Na ovaj način dobiven je sintetički hijetogram koji odražava vremenske varijabilnosti niza zabilježenih oborina. Sumiranjem pojedinačnih postotnih intenziteta, dobiva se kumulativna krivulja pljuska za projektiranje.

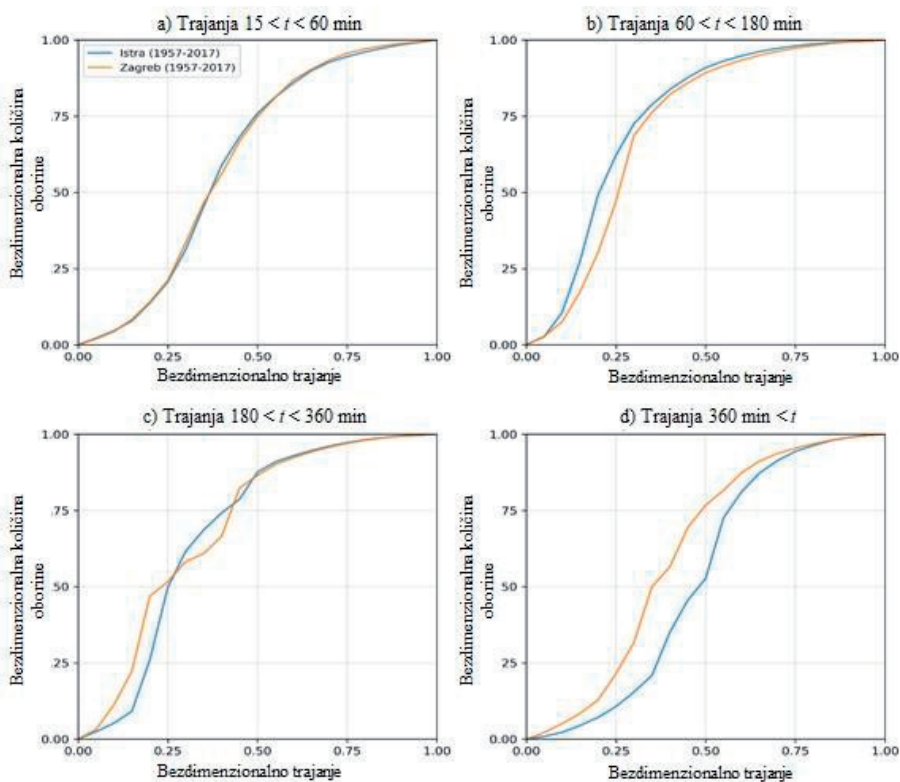
## 3. REZULTATI PROVEDENIH OBRADA PLJUSKA ZA PROJEKTIRANJE

U nastavku će se prikazati rezultati provedenih obrada oborina te definiranja pljuska za projektiranje na pilot područjima Istre i Zagreba. Prvo se prikazuju sintetičke kumulativne krivulje i hijetogrami dobiveni za navedena pilot područja te se komentiraju njihove

razlike s ciljem naglašavanja regionalnih specifičnosti. Potom se daje jedan primjer praktične primjene pljuska za projektiranje na području grada Zagreba, sve s ciljem naglašavanja važnosti korištenja vremenski varijabilne oborine u usporedbi s oborinom ravnomjernog intenziteta.

### 3.1. Regionalne specifičnosti pljuska za projektiranje

Kako bi se evidentirale regionalne razlike pljuska za projektiranje na područjima Istre i Zagreba, krivulje pojedinačnih pljuskova objedinjene su po stanicama odabranih područja. Za područje Istre, objedinjeni su svi zabilježeni pljuskovi s postaja Pula i Pazin, te je na osnovu tih podataka proveden postupak definiranja kumulativne krivulje i hijetograma pljuska za projektiranje. Za područje Zagreba objedinjeni su svi pojedinačni pljuskovi s postaja Zagreb-Grič i Zagreb-Maksimir te je također proveden postupak definiranja kumulativne krivulje i hijetograma pljuska za projektiranje.

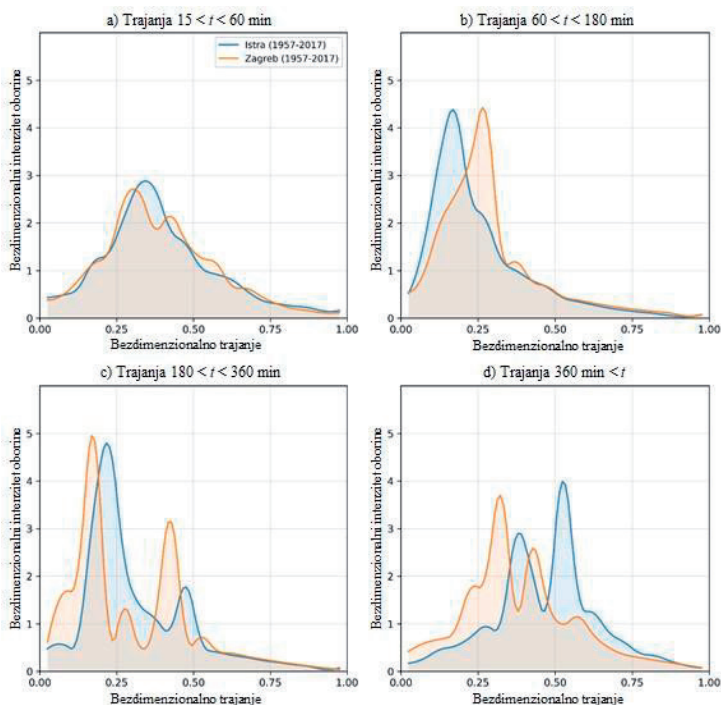


Slika 1. Bezdimenzionalni oblici kumulativne krivulje pljuska za projektiranje za pilot područja Istre i Zagreba, za četiri razreda trajanja oborine

Usporedba kumulativnih krivulja pljuska za projektiranje za područja Istre i Zagreba prikazana je na slici 1, za sva četiri razreda trajanja oborine. Iz usporedbe mogu se primijetiti skoro identične krivulje za sva tri razreda trajanja kraća od 6 sati. Razlike u

krivuljama su jasnije tek kod najduljeg razreda trajanja, gdje se može primijetiti kako se na području Istre sporije razvijaju najizraženiji trenutni intenziteti oborine.

Za detaljniji uvid treba promotriti hijetograme pljuska za projektiranje (slika 2). Za najkraći razred trajanja oborine (od 15 do 60 minuta), hijetogrami oba predmetna područja se gotovo preklapaju. Za drugi razred trajanja (od 60 min do 3 h) može se primijetiti kako se na području Istre ranije razvijaju maksimalni intenziteti, iako su na oba područja maksimumi intenziteta relativno podjednake veličine. Slična situacija je i kod trećeg razreda oborine (od 3 do 6 h), gdje su maksimumi intenziteta također podjednake veličine, a i pojavljuju se u približno jednako vrijeme. Jedina razlika je što se na području Zagreba mogu očekivati izraženiji sekundarni maksimumi trenutnog intenziteta. Najizraženije razlike između projektne hijetograma na područjima Istre i Zagreb prisutne su za trajanja oborine dulja od 6 h. Na oba područja jasno su primjetni dvostruki maksimumi trenutnog intenziteta. Međutim, na području Istre prvi maksimum je znatno slabiji od drugoga, dok je na području Zagreba situacija obrnuta. Na području Zagreba se oba maksimuma intenziteta očekuju u drugom kvartilu trajanja oborine, dok se na području Istre manji od dva maksimuma očekuje u drugom kvartilu, dok se veći maksimum očekuje u trećem kvartilu trajanja oborine. Sveukupno, na području Istre se očekuju veći maksimumi intenziteta.



Slika 2. Bezdimezionalni hijetogrami pljuska za projektiranje za pilot područja Istre i Zagreba, za četiri razreda trajanja oborine

### 3.2. Primjer proračuna otjecanja pomoću pljuskaja za projektiranje

U nastavku se prikazuje cjelokupan postupak proračuna otjecanja oborine definirane pljuskom za projektiranje na jednom praktičnom primjeru. Pored toga, rezultirajući hidrogram otjecanja uspoređen je s hidrogramom otjecanja oborine jednolikog intenziteta te hidrogramom otjecanja realne kišne epizode zabilježene na meteorološkoj stanici Zagreb-Grič 27. lipnja 2009. godine. Ova usporedba daje se s ciljem naglašavanja važnosti korištenja pljuskaja za projektiranje kao realnijeg opisa stvarnih oborina.

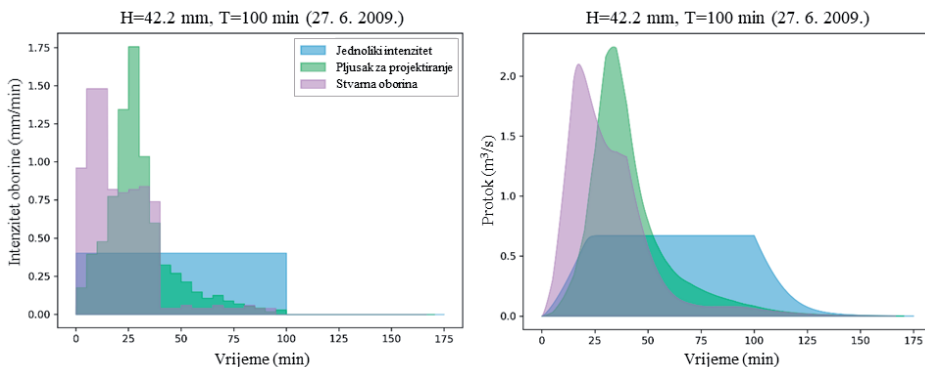
U lipnju 2009. godine na postaji Zagreb-Grič zabilježena je oborina trajanja 100 minuta, tijekom kojih je palo 42,2 mm oborine (slika 3). Prema HTP krivuljama za istoimenu postaju, ova kišna epizoda odgovara povratnom periodu 10 godina (RAINMAN, 2019):

$$H_{10god} = 14,613 \times t^{0,2199} \text{ za } t < 1,03 \text{ h} \quad (1)$$

gdje je  $H_{10god}$  ukupna količina oborine 10-godišnjeg povratnog perioda, a  $t$  trajanje oborine.

Za oborinu trajanja 100 minuta, očekuje se 40,2 mm oborine. Stoga, hijetogram jednolikog intenziteta određen iz HTP krivulja definiran je trajanjem od 100 min i ravnomjernim intenzitetom od 0,40 mm/min (slika 3).

Za definiranje hijetograma pljuskaja za projektiranje prvo je potrebno prethodno izvedenom bezdimenzionalnom hijetogramu (slika 2) dodijeliti pripadajuće trajanje te prosječni intenzitet oborine. Konačno, hijetogrami realne oborine, oborine ravnomjernog intenziteta te oborine definirane pljuskom za projektiranje prikazani su na slici 3.



Slika 3. Hijetogram i hidrogram otjecanja oborine definirane ravnomjernim intenzitetom, pljuskom za projektiranje te realna oborina zabilježena 27. lipnja 2009.

Na slici 3 uz dobivene hijetograme daje se i prikaz hidrograma otjecanja oborine definirane jednolikim intenzitetom, pljuskom za projektiranje te realnom oborinom. Proračun otjecanja oborine proveden je pomoću metode kinematičkog vala, s obzirom na zadane parametre sliva. Odabran je sliv pravilne pravokutne površine, duljine  $L = 1000$  m, širine  $B = 100$  m, uz poprečni pad od  $I = 1\%$  te uzdužni pad  $S = 0,5\%$ . Površina je nepropusna, pa sva pala oborina direktno sudjeluje u površinskom otjecanju, a Manningov koeficijent hrapavosti iznosi  $n = 0,015 \text{ s/m}^{1/3}$ .

Sve tri oborine jednakog su trajanja i ukupne količine oborine, međutim, primjetno je kako maksimalni intenzitet realne oborine i pljuska za projektiranje u određenim trenucima znatno nadmašuje prosječni intenzitet. Jednako tako, rezultirajući hidrogram otjecanja, ukazuje na činjenicu kako oborina jednolikog intenziteta nekoliko puta podcjenjuje vršni protok. S druge strane, hidrogram od pljuska za projektiranje rezultira skoro identičnim, samo malo većim, vršnim protokom kao i realna oborina.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu ukratko je prikazana metodologija te rezultati obrada pljuska za projektiranje na pilot područjima Istre i Zagreba. Provedene su usporedbe dobivenih kumulativnih krivulja te sintetičkih hijetograma kako bi se evidentirale regionalne razlike između dva pilot područja. Može se općenito zaključiti kako je pljusak za projektiranje vrlo sličnih vremenskih karakteristika na područjima Istre i Zagreba za trajanja oborine kraća od 6 h, dok se za duže oborine ipak očekuju određene razlike u vidu vremenske varijabilnosti i strukture jakih oborina. Također treba naglasiti kako se najveće promjene trenutnog intenziteta očekuju za trajanja između 3 h i 6 h, kada iznos trenutnog maksimalnog intenziteta nadmašuje prosječni intenzitet za otprilike pet puta. Prikazani primjer naglašava prednosti korištenja pljuska za projektiranje pri proračunu otjecanja oborinskih voda, što je od posebne važnosti za analize rizika od pluvijalnih poplava, kao i za dimenzioniranje retencijskih i infiltracijskih građevina unutar sustava odvodnje oborinskih voda. Razvijena metodologija te prikazane analize oborina predstavljaju primjerenu polaznu osnovu za buduća promišljanja o prognoziranju i ublažavanju posljedica od pluvijalnih poplava na području RH, posebice u urbanim sredinama. Kao preduvjet takvih proračuna, nužno je da se provedu obrade oblika pljuska za projektiranje i za ostala područja u Hrvatskoj te provede njihova prostorna regionalizacija.

## LITERATURA

- [1] Bonacci, O. (1994): *Oborine - glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus*. Geing, Split, 341 str.
- [2] Dietz, M.E. (2007): *Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions*. Water, air, and soil pollution, 186, 1-4, 351-363.
- [3] Krvavica, N., Jaredić, K., Rubinić, J. (2018): *Metodologija definiranja mjerodavne oborine za dimenzioniranje infiltracijskih sustava*. Građevinar, 70(8), 657-669.
- [4] Pilgrim, D.H. (1987): *Australian rainfall and runoff, a guide to flood estimation*. The Institution of Engineers, ACT, Australia, 1987.
- [5] RAINMAN (2019): *Analiza oborina na pilot područjima u Istri i Zagrebu (projekt RAINMAN)*, (voditelj studije: Rubinić, J.), Građevinski fakultet u Rijeci i Državni hidrometeorološki zavod, Rijeka-Zagreb.

**AUTORI**

doc. dr. sc. Nino Krvavica <sup>a</sup>

doc. dr. sc. Josip Rubinić <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, [nino.krvavica@uniri.hr](mailto:nino.krvavica@uniri.hr), [jrubinic@uniri.hr](mailto:jrubinic@uniri.hr)