

## NUMERIČKI MODELI PAVLJENJA U ŠIBENSKOM PODRUČJU ZA POPLAVNI DOGAĐAJ IZ RUJNA 2025.

ANTONELA IVANKOVIĆ<sup>1</sup>, JADRAN BERBIĆ<sup>2</sup>, TATJANA VUJNOVIĆ<sup>3</sup>, ŽELJKO ŠRENG<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Hrvatska IDT d.o.o., Hrvatska

<sup>2</sup> Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu,

<sup>3</sup> Državni Hidrometeorološki Zavod, Hrvatska

<sup>4</sup> Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Hrvatska

### Sažetak

Dana 24. rujna 2025. područje Šibenika i okolice pogodila je intenzivna oborina koja je rezultirala pojavom bujičnih poplava. Mogućnost nastanka bujičnih poplava u pravilu se prognozira modelima na široj (kontinentalnoj) skali, odnosno modelima za rano upozoravanje, koji su i u ovom slučaju ukazivali na mogućnost pojave takvog događaja. Navedeno je potaknulo izradu numeričkih modela na manjoj, lokalnoj i regionalnoj prostornoj skali, s ciljem procjene točnosti modeliranja dosega plavljenja. U tu svrhu primijenjen je programski paket HEC-RAS, pri čemu su izrađena dva modela: jedan s prostornom konfiguracijom koja obuhvaća šire područje Šibenika te drugi koji obuhvaća uže gradsko područje.

### Ključne riječi

Bujična poplava, HEC-RAS, model plavljenja, oborinski događaj, regionalna skala

## 1 Uvod

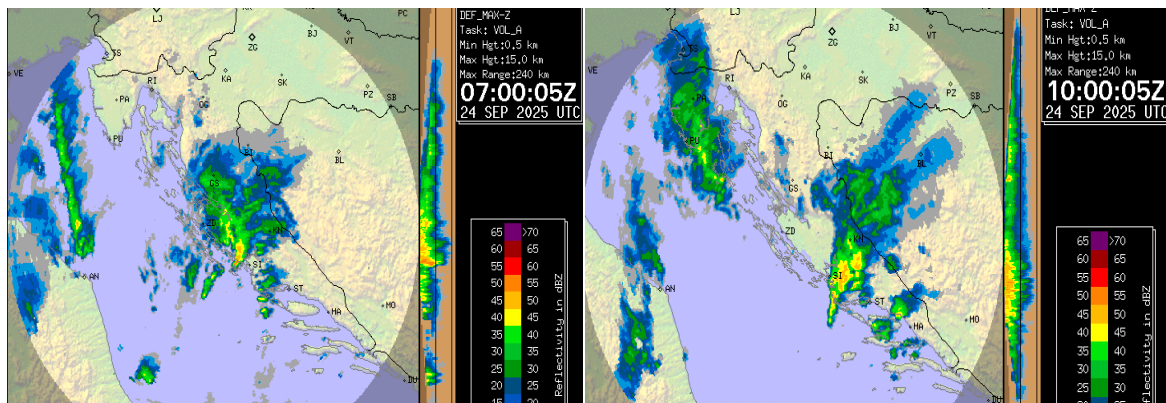
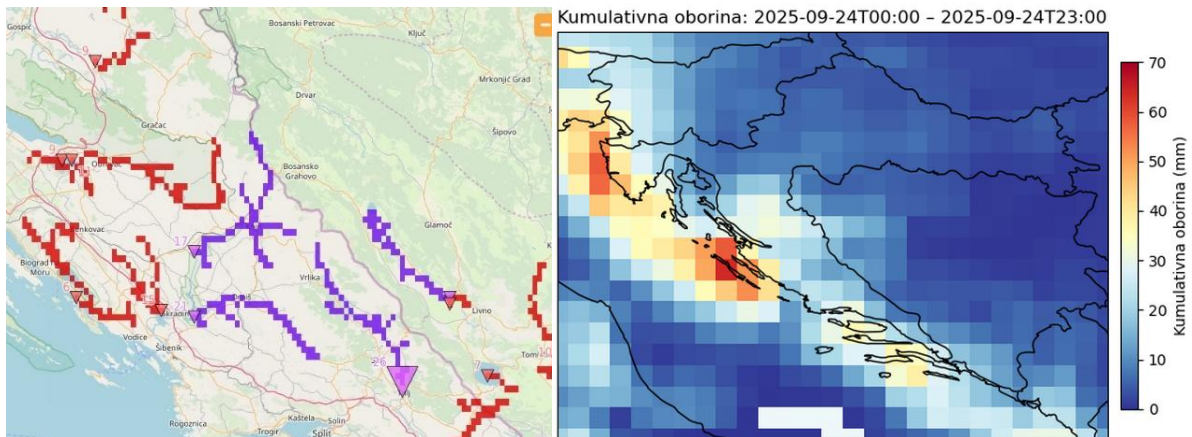
Oborina visokog intenziteta, sa značajnom količinom kiše u kratkom vremenu, pala je dana 24. rujna 2025. u širem području Šibenika, uzrokujući snažne bujične poplave u naseljima između Šibenika i Zadra. Navedeni događaj potaknuo je izradu numeričkog (površinskog) dvodimenzionalnog modela plavljenja za šire područje Šibenika (Model 1) i sam Šibenik (Model 2), za što je primijenjen program HEC-RAS. Cilj rada je dobiti uvid u površine zahvaćene ovim i sličnim oborinskim događajima te ih usporediti s rezultatima prognoza modela veće rezolucije (kontinentalnog), koji se u pravilu primijenjuju za rano upozoravanje. Primjerice, prognostički sustav EFAS-ERIC Flash Flood Indicator (European Flood Awareness System) u dvjema simulacijama, 23. rujna u 12:00 te 24. rujna u 00:00, ukazivao je na moguće bujične poplave u Dalmaciji i Lici (Slika 1). EFAS-ERIC rezultate dobiva na temelju simulacije oborina-otjecanje u fizikalno-konceptualnom modelu LISFLOOD. Prognostički sustav ukazuje na područja gdje je vjerojatnost prekoračenja određenog povratnog razdoblja (uobičajeno od 5 do 20 godina) površinskog otjecanja velika. Prostorna rezolucija EFAS-ERIC modela je od 1x1 km do 5x5 km. Za usporedbu, model u HEC-RAS izrađen na lokalnoj, tj., regionalnoj skali ima prostornu rezoluciju ~30x30 m. Posljedično, EFAS-ERIC pruža prognozu veličine poplave u područjima koja su zahvaćena prognoziranom oborinom (meteorološki prognostički modeli), dok izrađeni modeli pružaju informaciju o površinama "unutar" tih područja zahvaćenim oborinskim događajem.

## 2 Metode

### 2.1 Podloge

Kao primarni ulazni podatak korišteni su satni podaci oborine, a u oba modela definirana su dva plana nestacionarnog tečenja. Prvi plan (GAGE) koristi sirovu oborinu s glavne meteorološke postaje Šibenik (GMP Šibenik) kao rubni uvjet na definiranom prostornom obuhvatu modela. Drugi plan (ERA5) koristi prostorno-

vremenske podatke ERA5-reanalysis dostupnih u Copernicusu, nastalih reanalizom rezultata meteorološkog prognostičkog modela s asimilacijom na zabilježene podatke (Slika 1). U promatranom oborinskom događaju na meteorološkoj postaji Šibenik zabilježena je ukupna količina oborine od 82,1 mm, dok je prema ERA5-reanalysis podacima maksimalna kumulativna količina oborine u ćeliji s najvećim intenzitetom iznosila ukupno 64 mm. Radarske slike u 07:00 i 10:00 UTC prikazuju razvoj i jačanje oborinskog sustava tijekom jutra 24. rujna 2025. U 10:00 UTC vidljivo je lokalno pojačanje oborine nad širim područjem Šibenika, što potvrđuje da je riječ o kratkotrajnom, ali intenzivnom pljuskaju (Slika 2).



Pripremljena je terenska podloga s visinama iz karte Mapzen Global Terrain (vertikalna točnost varira po područjima, ovisno o izvorima može doseći  $\pm 10$  m, horizontalna rezolucija  $\sim 30 \times 30$  m) te karta pokriva Corine Land Cover kao osnova za opis hrapavosti terena.

## 2.2. Opis modela

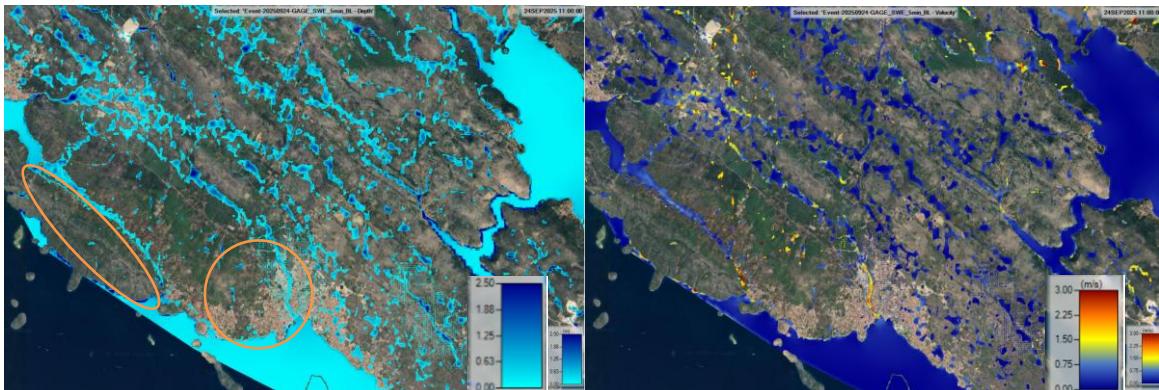
Modeliranje je provedeno primjenom dvodimenzionalnog (2D) površinskog hidrauličkog modela u programskom paketu HEC-RAS. Analizirana je prostorna raspodjela dubina (ili visina) i brzina površinskog otjecanja. Podaci za prvi plan (GAGE) u modelu primijenjeni su kao uniformni oborinski rubni uvjet nad cijelim prostornim obuhvatom modela. Takav pristup omogućuje izravno korištenje lokalno izmjerenih oborina i dobar prikaz ukupne količine pale kiše, no ne uzima u obzir njihovu prostornu varijabilnost unutar analiziranog područja. Podaci za drugi plan (ERA 5) omogućuju prikaz prostorne raspodjele oborine na regionalnoj skali. Međutim, zbog ograničene prostorne ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , 8 ćelija pokriva domenu Modela 1, a 3 ćelije Modela 2) i vremenske (1 sat) rezolucije, ERA5 podaci mogu podcijeniti lokalne vršne intenzitete oborine u odnosu na podatke izmjerene na meteorološkim postajama. Osim razlike u ukupnoj količini oborine,

ključna razlika između dvaju planova očituje se u njihovoj prostorno-vremenskoj raspodjeli. GAGE plan podrazumijeva prostorno jednoliku oborinu nad cijelim područjem modela, dok ERA5 plan omogućuje prostornu diferencijaciju intenziteta oborine, ali uz ublažene lokalne maksimume.

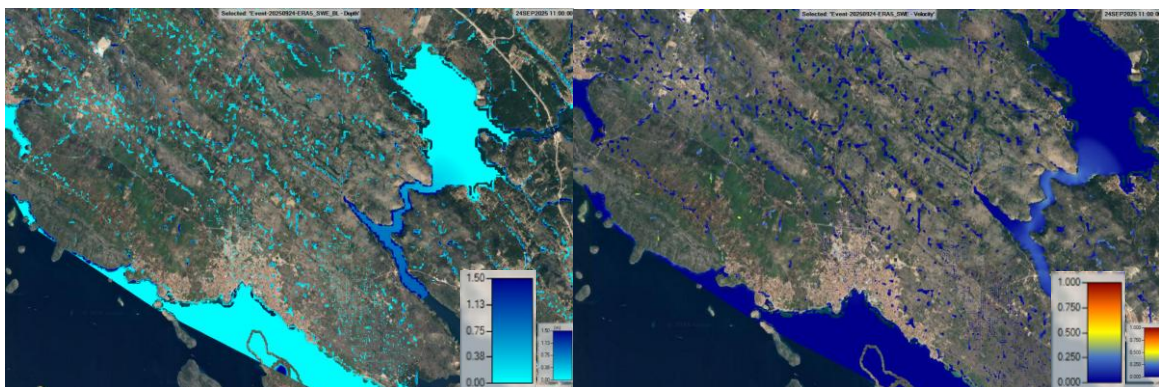
### 3 Rezultati

Pogođene (poplavljene) površine prema rezultatima iz HEC-RAS-a slične su prirode kao i rezultati EFAS-ERIC modela. S obzirom na veću rezoluciju HEC-RAS modela izrađenog baš za predmetno područje, dobivena je preciznija slika pogođenih površina. Razlike u oborinskim ulaznim podacima izravno se odražavaju na rezultate plavljenja. Plan GAGE rezultira izraženijim i lokalno intenzivnijim poplavnim površinama, s većim dubinama vode i većim brzinama površinskog otjecanja, osobito u nižim reljefnim zonama i prirodnim udolinama. Suprotno tome, rezultati dobiveni primjenom ERA5 oborinskih podataka pokazuju prostorno manje izražene poplavljene površine te niže maksimalne dubine i brzine. Raspored zahvaćenih područja u velikoj mjeri ostaje sličan.

U slučaju plana GAGE (Slika 3), jasno se izdvajaju pogođena područja u naseljima Sovlje, Tribunj i Vodice. Modelom su identificirane i specifične lokacije poplavljene tijekom kišnog događaja, poput lokalne ceste oštećene bujičnim tokom te središta Tribunja. U području Vodica model pokazuje znatne površine zadržavanja vode (označeno, Slika 3). Za plan GAGE postignute dubine u pogođenim zonama uglavnom se kreću od 0,5 do 2,0 m, uz lokalno veće vrijednosti u udolinama, dok su brzine površinskog otjecanja većinom u rasponu od 0,5 do 3,0 m/s, s mjestimičnim porastima. Plan ERA5 (Slika 4) rezultira manjim dubinama, pretežito od 0,3 do 1,0 m, te nižim brzinama otjecanja. Za većinu područja brzine su ispod 1,0 m/s, dok je prostorni raspored zahvaćenih površina sličan onome iz plana GAGE.



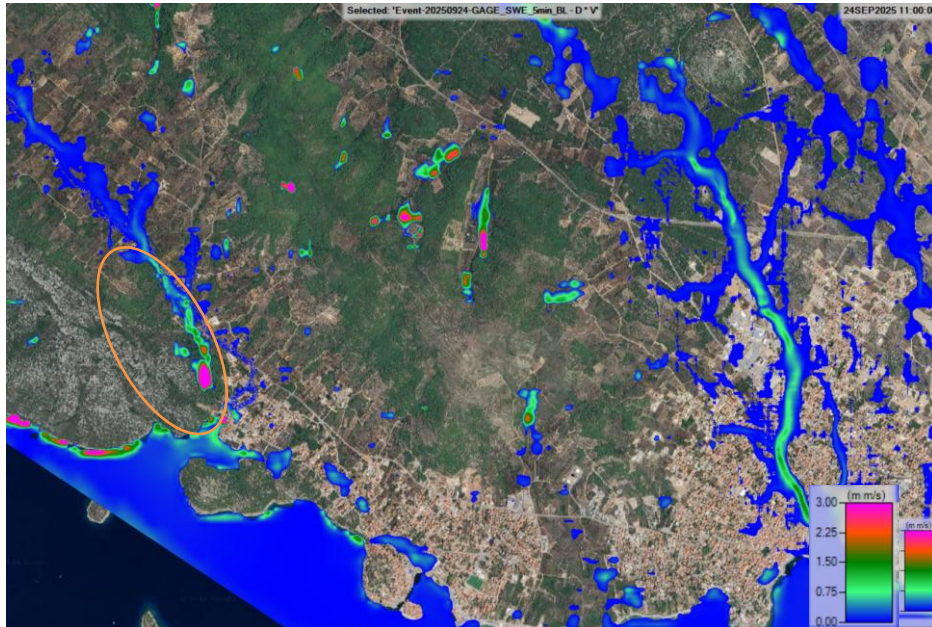
Slika 3. Rezultati Modela 1 sa planom GAGE, 11:00, UTC+2 (lijevo – polje dubina, desno – polje brzina)



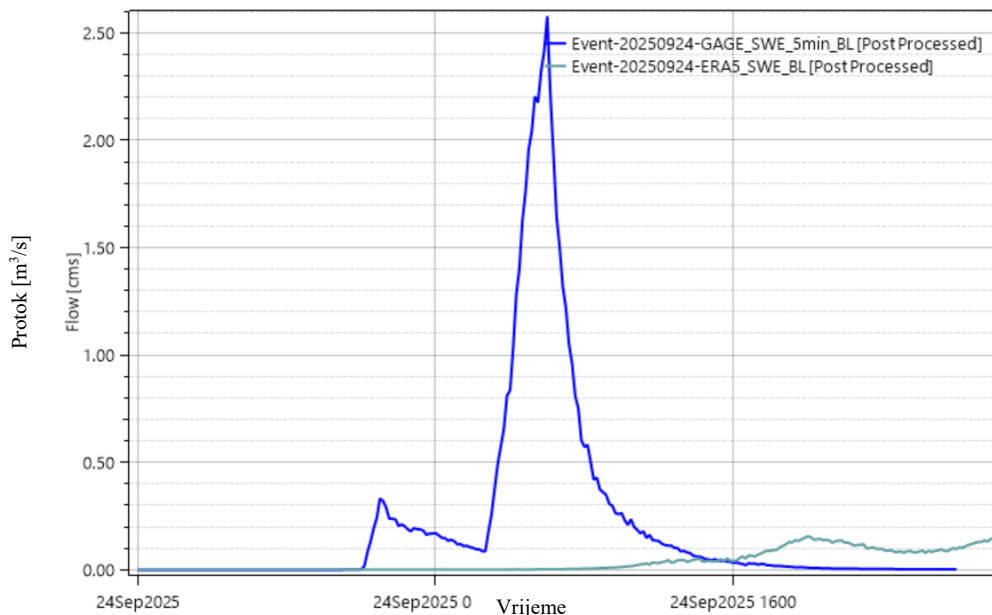
Slika 4. Rezultati Modela 1 sa planom ERA5, 11:00, UTC+2 (lijevo – polje dubina, desno – polje brzina)

Rezultati dvaju analiza također su korišteni u procjeni erozijskog potencijala koji se definira kao umnožak dubine i brzine površinskog otjecanja (parametar DV). Prema rezultatima plana GAGE, povišene vrijednosti

parametra DV poklapaju se s lokacijom gdje su zabilježena oštećenja lokalne prometnice, u blizini Tribunja (označeno na Slici 5). Rezultati modela ERA5 ne pokazuju poplavnu prostornu podudarnost sa spomenutom lokacijom. Prosječne brzine otjecanja prema GAGE scenariju na lokaciji ceste iznosile su oko 2 m/s, dok je modelska dubina otjecanja iznosila oko 20 cm. Hidrogrami otjecanja za oba scenarija prikazani su na Slici 6, odakle se jasno bujični karakter otjecanja u rezultatu plana GAGE. Iz hidrograma otjecanja dodatno se potvrđuje da su povišene vrijednosti parametra DV posljedica kratkotrajnog, ali izrazito intenzivnog bujičnog otjecanja, koje se ne reproducira jednako u oba oborinska scenarija.



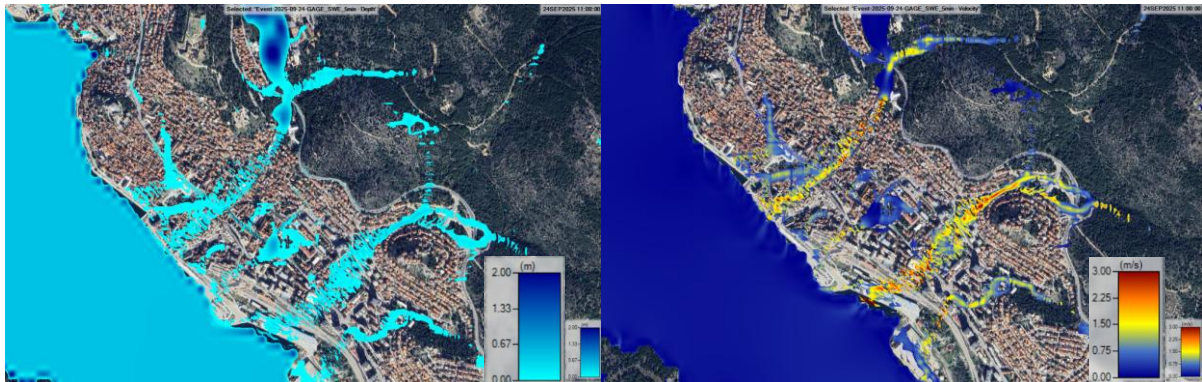
**Slika 5.** Rezultati Modela 1 – vrijednosti parametra DV sa planom GAGE, 11:00, UTC+2



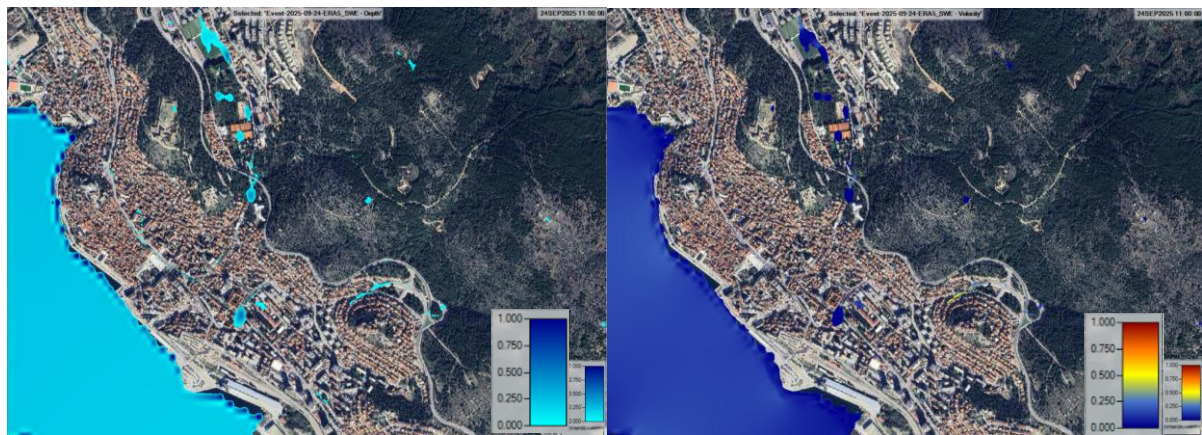
**Slika 6.** Hidrogrami otjecanja na lokaciji lokalne ceste u Tribunju (Plan GAGE - tamo plava linija, plan ERA5 -svijetlo plava linija)

Rezultati Modela 2 (grad Šibenik) ukazuju da vrlo brdoviti teren u Šibeniku uvjetuje relativno brz nastanak i završetak bujične poplave u kratkoj intenzivnoj oborinskoj epizodi. Postignute brzine u planu GAGE (Slika 7)

kreću se uglavnom 1,0 do 2,5 m/s, a mjestimično i do 3,5 m/s, dok su u planu ERA5 postignute brzine manje od 0,5 m/s (Slika 8). Važno je napomenuti da Model 2, zbog ograničene prostorne rezolucije, prikazuje otjecanje uglavnom duž prirodno najstrmijih dijelova terena, dok u manjoj mjeri uzima u obzir geometrijsku konfiguraciju izgrađenih objekata.



Slika 7. Rezultati Modela 2 sa planom GAGE, 11:00, UTC+2 (lijevo – polje dubina, desno – polje brzina)



Slika 8. Rezultati Modela 2 sa planom ERA5, 11:00, UTC+2 (lijevo – polje dubina, desno – polje brzina)

#### 4 Zaključak

Po pitanju zahvaćenog šireg područja, rezultati numeričkih modela u skladu su s prognozama Europskog EFAS-ERIC sustava za rano upozoravanje na bujične poplave. Rezultati temeljeni na prostornim podacima oborine pokazuju manju magnitudu poplavnog događaja u odnosu na stvarno zabilježene podatke s postaje. Vrijedi napomenuti da bi za unaprjeđenje modela bilo potrebno razmotriti i primjenu dodatnih ERA5 reanaliziranih produkata. Također, prostorni podaci su pogodniji za modele veće prostorne rezolucije, koji osjetljivije reagiraju na prostorno i vremenski “razvučenije” vrijednosti od onih s postaje. S druge strane, veća prostorna i vremenska rezolucija značajno povećavaju vrijeme provedbe simulacija (npr. GAGE s petominutnim vrijednostima oborine otprilike 24-48 sati). Važno je napomenuti da je predmetni događaj izrazito lokalnog karaktera te da stvarna oborina može značajno varirati u vremenu i prostoru (radarski snimak), dok modeli tretiraju podatke s postaje kao prostorno jednoliko raspoređene. Konvektivne oborinske epizode karakterizira snažan vremensko-fazni pomak u prostoru, a smjer kretanja oluje značajno utječe na formiranje i odvijanje otjecanja. Dodatni ograničavajući čimbenik je prostorna rezolucija terenske podloge, koja utječe na prikaz mikroreljefnih značajki ključnih za nastanak i usmjeravanje bujičnih tokova. Unatoč navedenim ograničenjima, prostorni obrazac plavljenja pokazuje podudarnost između različitih oborinskih scenarija, što upućuje na to da dominantni reljefni oblici određuju glavne zone poplavne opasnosti čak i pri ovoj rezoluciji. Stoga se ovdje prikazani rezultati mogu smatrati konzervativnom procjenom poplavnog

obuhvata na regionalnoj skali, prikladnom za usporedbu s kontinentalnim sustavima ranog upozoravanja i za identifikaciju prioritetnih ugroženih područja. Daljnje povećanje prostorne rezolucije ulaznih podataka, osobito digitalnog modela reljefa, predstavlja ključan korak prema pouzdanijoj i detaljnijoj primjeni modela u urbanom planiranju i sustavima zaštite od bujičnih poplava.

## Zahvala

Rad financira Europska unija – NextGenerationEU. Izneseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

## Literatura

- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2023) ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47
- Državni Hidrometeorološki zavod (2025) Relacijska meteorološka baza podataka
- European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2017) ERIC flash flood indicator. Dostupno na: <http://data.europa.eu/89h/2cb90898-76a4-46cf-a6d4-24a46d098327> (Preuzeto: 28. listopada 2025).
- European Environment Agency (EEA) (2018) CORINE Land Cover (CLC) 2018. Dostupno na: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (Preuzeto: 28. listopada 2025).
- Ferreira, T. M., & da Rocha, J. (2025). Hazard classification, social and economic losses in flooded urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 105395. DOI: 10.1016/j.ijdr.2025.105395
- Google Maps (2025) Google Maps. Google LLC. Dostupno na: <https://www.google.com/maps> (Preuzeto: 28. listopada 2025).
- Hydrologic Engineering Center (2024) HEC-RAS, River Analysis System, Version 6.6. Davis, CA, USA: U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Mapzen (2017) Mapzen Global Terrain. Mapzen, Open Terrain Data Project. Dostupno na: <https://github.com/tilezen/joerd> (Preuzeto: 28. listopada 2025)