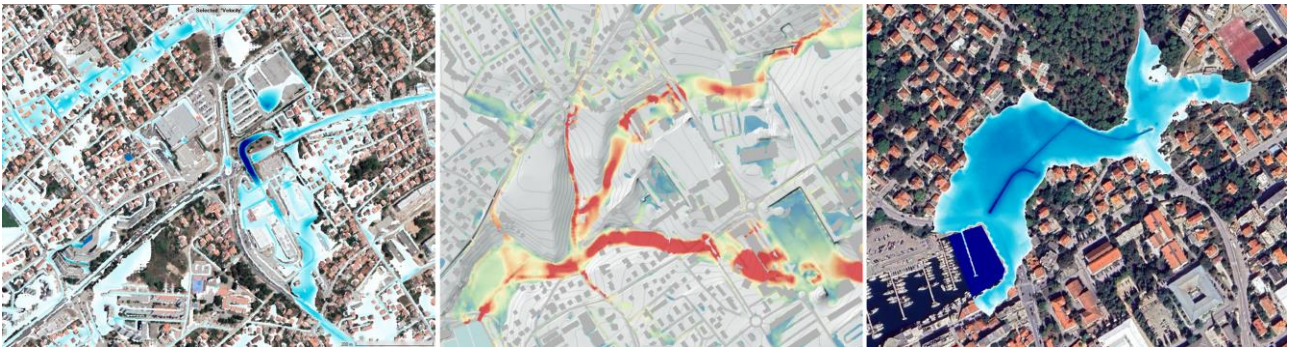


# Studija procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora na pilot područjima u Hrvatskoj (projekt STREAM)

## KNJIGA 3: SVEOBUHVAATNA ANALIZA URBANIH POPLAVA U ZADRU TE UNAPRJEĐENJE SUSTAVA PROGNOZE POPLAVA



Rijeka – Zagreb, prosinac, 2022.

Naručitelj:

**SVEUČILIŠTE U ZADRU**

Ulica Mihovila Pavlinovića 1

23 000 Zadar



Sveučilište u Zadru  
Universitas Studiorum  
Jadertina | 1396 | 2002 |

Predmet:

**USLUGA IZRADE HIDROLOŠKO-HIDRAULIČKE ANALIZE I  
PRIPADAJUĆIH KARATA TE IZRADE PLANA UPRAVLJANJA  
POPLAVNIM RIZICIMA**

Naziv:

**STUDIJA PROCJENE OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA  
USLIJED JAKIH OBORINA I DJELOVANJA MORA  
KNJIGA 3: SVEOBUHVAATNA ANALIZA URBANIH POPLAVA U  
ZADRU TE UNAPRJEĐENJE SUSTAVA PROGNOZE POPLAVA**

Razina dokumentacije:

Studija

Voditelj projekta:

Dr. sc. Nino Krvavica

Broj ugovora:

Sveučilište u Zadru (KLASA: 406-01/21-01/145)

Građevinski fakultet u Rijeci (KLASA: 361-08/21-01/11)

Vodoprivredno-projekttni biro d.d. (KLASA: VPB – KUG – 21-0034)

Državni hidrometeorološki zavod (KLASA: 920-08/21-13/14)

Izvršitelj:

(Zajednica gospodarskih  
subjekata)

**SVEUČILIŠTE U RIJECI, GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**VODOPRIVREDNO-PROJEKTNI BIRO d.d.**

**DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD**

Podizvoditelj:

**CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA d.o.o.**

Mjesto i datum:

Rijeka – Zagreb, prosinac, 2022.

**Stručni tim Izvršitelja:**  
**(nositelji pojedinih područja)**

Voditelj projekta i hidrauličkih istraživanja:	dr. sc. Nino Krvavica, dipl. ing. građ.
Voditelj hidroloških istraživanja:	dr. sc. Josip Rubinić, dipl. ing. građ.
Voditelj istraživanja dinamike mora:	dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.
Voditelj izrade plana upravljanja rizicima od poplava:	Ana Jelka Graf, dipl. ing. građ.
Savjetnik za hidrološko-hidrauličko modeliranje poplava:	Dario Kolarić, dipl. ing. građ.
Stručnjak za kvalitetu vode:	dr. sc. Neven Cukrov
Stručnjak za klimatologiju:	dr. sc. Ksenija Cindrić Kalin, dipl. ing. fiz.
Stručnjak za održive sustave odvodnje oborinskih voda:	Tatjana Uzelac, dipl. ing. građ.

Dekan:

  
dr. sc. Mladen Bulić



Direktorica:

  
Helena Jeftimija



Glavna ravnateljica:

  
dr. sc. Branka Ivančan-Picek



## SADRŽAJ PO KNJIGAMA

RADNI ZADATAK 1: Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora na pilot područjima u Hrvatskoj

- KNJIGA 1: Analiza oborina na pilot područjima
- KNJIGA 2: Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima
- **KNJIGA 3: Sveobuhvatna analiza urbanih poplava u Zadru te unaprjeđenje sustava prognoze poplava**

RADNI ZADATAK 2: Izrada plana upravljanja rizicima od poplava uslijed obilnih oborina i djelovanja mora

- KNJIGA 4: Plan upravljanja rizicima od poplava

KLASA: 361-08/21-01/11

URBROJ: 2170-57-05-00-22-11

Naručitelj: **SVEUČILIŠTE U ZADRU**  
Ulica Mihovila Pavlinovića 1, 23 000 Zadar

Izvršitelj: **SVEUČILIŠTE U RIJECI, GRAĐEVINSKI FAKULTET**  
(Zajednica gospodarskih subjekata) **VODOPRIVREDNO-PROJEKTI BIRO d.d.**  
**DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD**

Podizvoditelj: **CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA d.o.o.**

## STUDIJA PROCJENE OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA USLIJED JAKIH OBORINA I DJELOVANJA MORA

### KNJIGA 3: SVEOBUHVAATNA ANALIZA URBANIH POPLAVA U ZADRU TE UNAPRJEĐENJE SUSTAVA PROGNOZE POPLAVA

Broj studije: 033/2021

Voditelj studije: **dr. sc. Nino Krvavica**

Voditelj studije:



dr. sc. Nino Krvavica

Dekan Građevinskog fakulteta u Rijeci:



dr. sc. Mladen Bulić

Naziv:	STUDIJA PROCJENE OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA USLIJED JAKIH OBORINA I DJELOVANJA MORA KNJIGA 3: SVEOBUHVAATNA ANALIZA URBANIH POPLAVA U ZADRU TE UNAPRJEĐENJE SUSTAVA PROGNOZE POPLAVA
Naručitelj:	SVEUČILIŠTE U ZADRU Ulica Mihovila Pavlinovića 1, 23 000 Zadar
Izješće izradili:	SVEUČILIŠTE U RIJECI, GRAĐEVINSKI FAKULTET DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD
Voditelj studije:	dr. sc. Nino Krvavica, dipl. ing. građ.
Suradnici:	
Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet (vodeći član)	dr. sc. Bojana Horvat, dipl. ing. građ. dr. sc. Nevenka Ožanić, dipl. ing. građ. dr. sc. Igor Ružić, dipl. ing. građ. Andrea Tadić, dipl. ing. građ. dr. sc. Neven Cukrov (IRB) dr. sc. Dario Omanović (IRB)
Centar Građevinskog fakulteta d.o.o. (podizvoditelj)	dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.
Državni hidrometeorološki zavod (član)	dr. sc. Ivan Güttler dr. sc. Kristian Horvath

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod .....</b>	<b>11</b>
1.1	Uvodno o STREAM projektu .....	11
1.2	Projektni zadatak.....	12
1.2.1	<i>Radni zadatak.....</i>	<i>13</i>
1.2.2	<i>Sadržaj studije .....</i>	<i>16</i>
<b>2</b>	<b>Uvodno o urbanim poplavama .....</b>	<b>18</b>
2.1	Zakonodavni okvir .....	18
2.2	Općenito o poplavama u RH.....	19
2.2.1	<i>Specifičnosti pluvijalnih poplava .....</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Specifičnosti poplava s mora.....</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Specifičnosti složenih poplava u priobalnim područjima .....</i>	<i>25</i>
2.3	Rizik od poplava – definicije pojmova .....	27
2.4	Konceptualni model procjene urbanih poplava.....	31
2.5	Razine složenosti procjene urbanih poplava.....	33
2.6	Kartiranje poplava - razine, korisnici i sadržaj.....	35
<b>3</b>	<b>Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar.....</b>	<b>38</b>
3.1	Metodološki okvir procjene opasnosti i rizika .....	38
3.2	Metodologija analize opasnosti od pluvijalnih poplava.....	40
3.2.1	<i>Priprema podloga za procjenu opasnosti od poplava.....</i>	<i>40</i>
3.2.2	<i>Definiranje scenarija za procjenu opasnosti od poplava .....</i>	<i>47</i>
3.2.3	<i>Uspostava matematičkog modela površinskog otjecanja jakih oborina.....</i>	<i>48</i>
3.2.4	<i>Indikatori opasnosti od poplava.....</i>	<i>52</i>
3.3	Metodologija analize rizika od pluvijalnih poplava .....	54
3.3.1	<i>Priprema podloga za procjenu rizika od poplava.....</i>	<i>54</i>
3.3.2	<i>Analiza ranjivosti – izloženost receptora poplavama .....</i>	<i>62</i>

3.3.3	<i>Kvalitativna analiza rizika – procjena razine rizika</i> .....	64
3.3.4	<i>Kvantitativna analiza rizika – procjena direktne štete</i> .....	66
3.4	<b>Rezultati analize pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar</b> .....	68
3.4.1	<i>Povijesne pluvijalne poplave u urbanom dijelu naselja Zadar</i> .....	68
3.4.2	<i>Opasnost od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar</i> .....	71
3.4.3	<i>Usporedba rezultata na mezo i makro razini istraživanja</i> .....	75
3.4.4	<i>Ranjivost na pluvijalne poplave u urbanom dijelu naselja Zadar</i> .....	79
3.4.5	<i>Rizik od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar</i> .....	81
3.4.6	<i>Kritični podslivovi u urbanom dijelu naselja Zadar</i> .....	85
3.5	<b>Karte pluvijalnih poplava za urbani dio naselja Zadar</b> .....	86
<b>4</b>	<b>Analiza opasnosti i rizika od poplava s mora u priobalnom dijelu naselja Zadar</b> .....	<b>91</b>
4.1	<b>Uspostava numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija</b> .....	92
4.1.1	<i>Podaci o vjetru</i> .....	92
4.1.2	<i>Podaci o valovima</i> .....	96
4.1.3	<i>Podaci o dubinama i visinama</i> .....	104
4.1.4	<i>Podaci o refleksijskim svojstvima obalne linije</i> .....	105
4.1.5	<i>Podaci o morskim razinama</i> .....	107
4.1.6	<i>Proračunska mreža</i> .....	107
4.2	<b>Metodologija analize opasnosti i rizika od poplava s mora</b> .....	110
4.3	<b>Rezultati numeričkih simulacija valnih deformacija</b> .....	113
4.3.1	<i>Značajne valne visine</i> .....	113
4.3.2	<i>Dubine plavljenja</i> .....	119
4.4	<b>Zaključak o modeliranju valnog generiranja i valnih deformacija</b> .....	125
4.5	<b>Karte opasnosti i rizika od poplava s mora u Zadru</b> .....	126
<b>5</b>	<b>Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica</b> .....	<b>132</b>
5.1	<b>Metodologija analize opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica</b> .....	132
5.2	<b>Rezultati analize opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica</b> .....	135



5.2.1	<i>Povijesne pluvijalne poplave u slivu Vruljica</i> .....	135
5.2.2	<i>Opasnost od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica</i> .....	136
5.2.3	<i>Usporedba rezultata na mikro i mezo razini istraživanja</i> .....	139
5.2.4	<i>Ranjivost na pluvijalne poplave u slivu Vruljica</i> .....	143
5.2.5	<i>Rizik od pluvijalnih poplava na pilot području Zadar</i> .....	145
5.3	Karte pluvijalnih poplava u slivu Vruljica.....	147
<b>6</b>	<b>Statistička analiza složenih poplava u Zadru i utjecaj klimatskih promjena</b> .....	<b>151</b>
6.1	Analiza vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina u Zadru .....	151
6.1.1	<i>Metodologija provedenih statističkih analiza</i> .....	151
6.1.2	<i>Rezultati sezonske analize supojave visokih razina mora i jakih oborina</i> .....	154
6.1.3	<i>Rezultati vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina</i> .....	161
6.2	Sistematizacija saznanja o utjecajima klimatskih promjena na intenzitet oborina .....	168
6.3	Sistematizacija saznanja o utjecajima klimatskih promjena na podizanje razine mora ...	173
<b>7</b>	<b>Analiza složenih poplava u slivu Vruljica u Zadru</b> .....	<b>176</b>
7.1	Metodologija analize složenih poplava u slivu Vruljica.....	176
7.2	Uspostava modela složenih poplava u slivu Vruljica.....	180
7.2.1	<i>Model dinamike mora ispred uvale Vruljica</i> .....	180
7.2.2	<i>Hidrološki model sliva Vruljica</i> .....	187
7.2.3	<i>Hidraulički model parka Vruljica</i> .....	189
7.3	Rezultati analize složenih poplava u slivu Vruljica .....	190
<b>8</b>	<b>Analiza onečišćenja oborinskih voda</b> .....	<b>193</b>
8.1	Analiza oborinskih voda na području grada Zadra.....	193
8.1.1	<i>Uvodno o analizi oborinskih i slivnih voda</i> .....	193
8.1.2	<i>Metodologija uzorkovanja i mjerenja</i> .....	198
8.1.3	<i>Rezultati analize kakvoće oborinskih voda na području grada Zadra</i> .....	201
8.2	Istraživanje metala u tragovima u vodama donjeg toka rijeke Neretve.....	206
8.2.1	<i>Uzorkovanje</i> .....	206

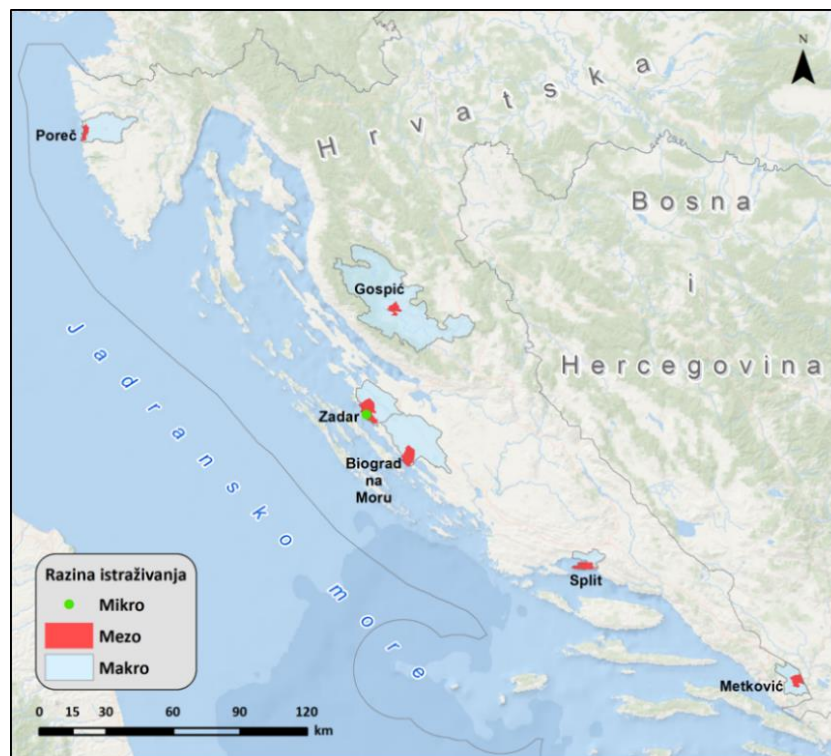
8.2.2	<i>Postupak mjerenja metala u tragovima</i>	207
8.2.3	<i>Rezultati analize metala u vodama donjeg toka rijeke Neretve</i>	207
<b>9</b>	<b>Sustavi prognoziranja poplava u RH</b>	<b>212</b>
9.1	Sustav prognoziranja i upozoravanja na opasne vremenske prilike	212
9.2	Unapređenje sustava prognoziranja i upozoravanja	216
<b>10</b>	<b>Probabilistički model prognoziranja pluvijalnih poplava u Zadru</b>	<b>222</b>
10.1	Uvodno o modelima prognoziranja pluvijalnih poplava	222
10.2	Metodologija uspostave sustava prognoziranja pluvijalnih poplava	223
10.2.1	<i>Izvešća o poplava</i>	223
10.2.2	<i>Obrada podataka</i>	224
10.2.3	<i>Pristup 1: Model praga kritične količine oborina</i>	228
10.2.4	<i>Pristup 2: Model strojnog učenja</i>	229
10.2.5	<i>Kriteriji za procjenu točnosti modela</i>	229
10.3	Rezultati modela prognoziranja pluvijalnih poplava u Zadru	231
10.3.1	<i>Točnost model praga kritične količine oborina</i>	231
10.3.2	<i>Točnost modela strojnog učenja</i>	233
<b>11</b>	<b>Zaključci i preporuke</b>	<b>238</b>
<b>12</b>	<b>Literatura</b>	<b>241</b>

# 1 Uvod

## 1.1 Uvodno o STREAM projektu

STREAM projekt je pokrenut u sklopu programa prekogranične suradnje INTERREG V-A Italija – Hrvatska 2014. – 2020. s ciljem unaprjeđenja sustava praćenja rizika i upravljanja rizikom od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora na šest odabranih pilot područja u Republici Hrvatskoj. Ona uključuju šira područja gradova Poreča, Gospića, Zadra, Biograda n/M, Splita i Metkovića, kako je prikazano na Slici 1.1.1.

Cilj projekta STREAM je doprinijeti povećanju sigurnosti projektnih pilot područja te smanjenju štetnih posljedica koje poplave uslijed jakih oborina i djelovanja mora imaju na ljudsko zdravlje, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarstvo. Specifični ciljevi projekta su postići bolje razumijevanje rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora, poboljšati sustav informiranja i uzbunjivanja s ciljem smanjenja rizika te unaprijediti upravljanje rizicima kroz integraciju rezultata u planske dokumente.



Slika 1.1.1. Pilot područja projektnog zadatka (iz Dokumentacije za nadmetanje, Knjiga 3. Projektni zadatak)

Projekt STREAM sastoji se od pet međusobno povezanih i usklađenih radnih paketa, unutar kojih se provodi niz aktivnosti iz tematski različitih područja, a to su ukratko:

- **Katastar poplava** koji omogućuje bolje razumijevanje urbanog i prirodnog planiranja te upravljanja u svrhu prevencije ili umanjenja štete od moguće poplave.
- **Kartiranje opasnosti i rizika od poplava** što omogućava prostorni prikaz područja koja bi mogla biti poplavljena prema tri vjerojatnosti, indikativan broj potencijalno pogođenih stanovnika, vrste potencijalno pogođene gospodarske aktivnosti područja, infrastrukturu koja bi mogla uzrokovati slučajno onečišćenje u slučaju poplave te prosječnu štetu po jedinici površine.
- **Sustav prognoziranja poplava** koji će se zasnivati na iskustvu višemodelskog sustava razvijenog u EU-Adriion I-STORMS projektu, pomorskoj službi Copernicus i postojećim regionalnim proizvodima.
- **Plan upravljanja rizicima od poplava (FRMP)** koji treba obuhvaćati ključne elemente za upravljanje poplavama: integrirati upravljanje vodama i korištenjem zemljišta, upravljati rizikom i nesigurnošću, usvojiti najbolje kombinacije strategija, osigurati participativni pristup te usvojiti integrirani pristup upravljanju opasnostima.
- **Međunarodni upravni odbor** koji se sastoji od multidisciplinarnih stručnjaka te predstavnika nacionalnih i regionalnih institucija koji će podržati provedbu projekta sudjelovanjem u obuci, aktivnostima komunikacije i diseminacije te podržavanjem implementacije FRMP-a.

Previđeno trajanje predmetnog projekta je od 01. travnja 2020. do 31. prosinca 2022. godine

## 1.2 Projektni zadatak

S područja hrvatske jedan od projektnih partnera je Sveučilište u Zadru (Naručitelj), za čije potrebe zajednica gospodarskih subjekata (Izvršitelj): Građevinski fakultet u Rijeci (GRADRI), Vodoprivredno-projektni biro d.d. (VPB) i Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) te podizvoditelj Centar Građevinskog fakulteta d.o.o. (CGF) provode predmetni zadatak s ciljem realizacije predviđenih aktivnosti kroz radne pakete.

Projektni zadatak podijeljen je u dvije cjeline:

- **Radni zadatak 1 - Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora na pilot područjima u Hrvatskoj.**
- **Radni zadatak 2 - Izrada Plana upravljanja rizicima od poplava uslijed obilnih oborina i djelovanja mora.**

U nastavku se daje detaljan opis dijela radnog zadatka 1 vezanog uz procjenu opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima, kako je to specificirano u Projektnom zadatku Knjige 3. Dokumentacije za nadmetanje.

### 1.2.1 Radni zadatak

Osnovni cilj radnog zadatka 1 je izrada **Studije procjene opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina i djelovanja mora** (u nastavku Studija). U okviru Studije, a i cijelog projekta STREAM, potrebno je provesti aktivnosti koje će rezultirati izrađenim katastrom poplava, odnosno kartama opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na šest pilot područja u Hrvatskoj te uspostavi i unaprjeđenju sustava za prognoziranje poplava od jakih oborina i djelovanja mora u Zadru, a sve uz pomoć hidrološko-hidrauličkih modeliranja. Također, iako postoje karte opasnosti i rizika od poplava s mora, iste su izrađene samo na osnovu projekcija visokih morskih razina i topografskih podloga te ne uključuju dinamiku mora, odnosno utjecaj valova, olujnih uspora i meteotsunamija, koji mogu znatno utjecati na obuhvat poplavljenog obalnog područja.

Odabrana pilot područja na kojima je potrebno procijeniti opasnosti i rizike od pluvijalnih poplava, izraditi odgovarajuće karte te ih uključiti u katastar poplava su šira područja sljedećih gradova:

- Poreč
- Gospić
- Zadar
- Biograd na Moru
- Split
- Metković

Odabrano pilot područje za procjenu opasnosti i rizika od poplava s mora kao integralnog dijela višemodelskog sustava za prognoziranje obalnih poplava je grad Zadar.

Tijekom izrade Studije, Naručitelj će u dogovoru s Izvršiteljem odabrati dodatno pilot područje na užem području u gradu Zadru za detaljnije analize poplava. Navedene analize poplava će uključivati i sveobuhvatna modelska istraživanja urbanih poplava s ciljem izrade probabilističkog modela za bolje razumijevanje pluvijalnih poplava.

Konačno, rezultati navedene Studije trebali bi pružiti podršku Naručitelju u ostvarivanju ciljeva i rezultata projekta STREAM, stoga je potrebna stalna suradnja između Naručitelja, Izvršitelja i ostalih partnera na projektu tijekom trajanja projekta. Također, ova Studija trebala bi doprinijeti ispunjavanju obveza koje je Naručitelj preuzeo u sklopu projekta STREAM, a što pored prethodno navedenih stavki uključuje i objavu pet znanstvenih radova.

U sklopu studije potrebno je provesti procjenu opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina (pluvijalne poplave) na šest pilot područja (Zadar, Split, Metković, Poreč, Gospić i Biograd na Moru)

te izraditi karte opasnosti i rizika od poplava. Navedene karte potrebno je implementirati u katastar poplava zajedno sa svim korištenim podlogama. U početku aktivnosti Izvršitelj će napraviti izvještaj o prikupljenim i sistematiziranim podacima.

Na jednom pilot području (Zadar) Izvršitelj će provesti sveobuhvatna istraživanja urbanih poplava na mikro razini s ciljem razvoja sustava prognoze poplava od jakih oborina i poplava s mora (Flood Forecasting System).

Studija se sastoji od tri tematske cjeline:

1. Analiza oborina na pilot područjima
2. Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima
3. Sveobuhvatna analiza urbanih poplava u Zadru te unaprjeđenje sustava prognoze urbanih poplava

U nastavku je dan detaljan opis projektnog zadatka vezan uz tematsku cjelinu Sveobuhvatna analiza urbanih poplava u Zadru te unaprjeđenje sustava prognoze urbanih poplava, što je i predmet ovog dokumenta.

### **C. Sveobuhvatna analiza urbanih poplava u Zadru te unaprjeđenje sustava prognoze poplava.**

U okviru Studije Izvršitelj će provesti i modelska istraživanja poplava s mora za grad Zadar te probabilistička istraživanja pluvijalnih poplava na užem području grada Zadra. Također, Izvršitelj će dodatno analizirati i kombinirano djelovanje poplava s mora (plima, olujni uspori, valovi) te kopna (direktno površinsko otjecanje oborina, kanalizirani površinski tok, tečenje kroz kanalizacijski sustav). Analize trebaju obuhvatiti povijesno i buduće stanje te utjecaj klimatskih promjena na oborinskih režim i na podizanje razine mora. Na ovoj mikro razini plavljenje odabranog sliva u urbanoj sredini Izvršitelj će analizirati na podlogama vrlo visoke razlučivosti (< 30 cm), uz uvažavanje svih mjerodavnih infrastrukturnih elemenata (sustav odvodnje oborinskih voda, prometna i obalna infrastruktura, itd.). Također, Izvršitelj će provesti terenska mjerenja i uzorkovanja kako bi se procijenila kvaliteta i teret onečišćenja oborinskih voda na odabranoj lokaciji. Potrebne analize koje će Izvršitelj napraviti trebaju uključivati sljedeće:

- Detaljan opis značajki užeg pilot područja na kojima će se analizirati urbane poplave uz opis svih mjerodavnih infrastrukturnih elemenata koji utječu na površinsko otjecanje.
- Pripremu i prikaz detaljnih podloga (meteorološke, hidrološke, oceanografske, batimetrijske, topografske, infrastrukturne, pokrov zemljišta) za provedbu hidrauličkih modeliranja.
- Analizu i obradu svih djelovanja koje mogu prouzročiti urbane poplave (otjecanje oborine, tok rijeka, tečenje u kanalizacijskom sustavu, plime, olujni uspori, morski valovi).

- Razradu metodologije za procjenu urbanih poplava na mikro razini.
- Terenska istraživanja koja uključuju obilazak lokacije te prikupljanje podataka o postojećim problemima.
- Sistematizaciju saznanja o utjecajima klimatskih promjena na intenzitet oborina te na podizanje razine mora i kvantificiranu ocjenu mogućih utjecaja takvih promjena na poplavljanje obalnog i urbanog područja.
- Izradu 2D/1D numeričkog modela otjecanja površinskih voda od jakih oborina u odgovarajućem računalnom programu.
- Provedbu numeričkih simulacija za različite vjerojatnosti pojave poplava od jakih oborina na odabranom pilot području.
- Izradu 2D modela valne dinamike u akvatoriju ispred pilot područja u odgovarajućem računalnom programu.
- Provedbu numeričkih simulacija za različite vjerojatnosti pojave poplava s mora na odabranom pilot području.
- Provedbu numeričkih simulacija za različite vjerojatnosti pojave složenih poplava uslijed kombinacije djelovanja s mora i kopna na odabranom pilot području.
- Izrada detaljnih karata opasnosti i rizika od složenih poplava na odabranom pilot području.
- Uzorkovanje i analizu relevantnih fizikalnih i kemijskih parametara onečišćenih oborinskih voda s urbanih površina na odabranoj lokaciji u urbanom pilot području.
- Tehničku pomoć u izradi probabilističkog modela za bolje razumijevanje pluvijalnih poplava te razvoj sustava prognoziranja pluvijalnih poplava.
- Tehničku pomoć u unaprjeđenju sustava prognoziranja poplava s mora.

Sve računalne simulacije poplava Izvršitelj će provesti koristeći kombinaciju naprednih nestacionarnih 2D i 1D hidrauličkih modela (2D modeli valne dinamike, 2D hidraulički modeli površinskog toka, 1D hidraulički modeli kanaliziranog toka), koji uvažavaju hidrodinamičke jednadžbe plitkih voda. Prostorni obuhvat modela za poplave s mora treba uključivati područje od otvorenog mora prema obali kako bi se što preciznije izračunala deformacija valova oko otoka i izgrađene obalne infrastrukture. Rezultati moraju uključivati dubinu vode, brzinu vode te prostorni obuhvat poplave za tri različite vjerojatnosti pojave olujnih uspora i valova te jednu ekstremnu situaciju. Numeričke analize moraju uključivati i prognozu podizanja razine mora koja se očekuje uslijed klimatskih promjena. Rubni uvjeti za simulacije trebaju biti definirani u skladu s najnovijim statističkim metodama (npr. bivarijantne metode) za procjenu složenih poplava i istodobnih djelovanja više međusobno povezanih uzroka. Karte opasnosti i rizika od poplava s mora Izvršitelj će

izraditi u mjerilu 1:2000, a karte pluvijalnih poplava na užem području Izvršitelj će izraditi u mjerilu 1:1000.

Uzorkovanje relevantnih fizikalnih i kemijskih parametara onečišćenih oborinskih voda Izvršitelj će provesti na odabranom urbanom području u Zadru za tzv. Prvi pljusak, odnosno nakon minimalno 30 sušnih dana. Uzorke će Izvršitelj uzimati uzastopno (minimalno 10 uzoraka po kišnom događaju) tijekom najmanje 3 kišna događaja kako bi se definirano polutogram otjecanja oborinskih voda s urbanih površina (vremenska promjena onečišćenja). Analize oborinske vode trebaju uključivati osnovne fizikalno-kemijske pokazatelje te multielementarnu analizu metala, BTEX-a i PAH-ova.

Provedene numeričke analize koje će Izvršitelj napraviti predviđene su kao podrška projektnoj aktivnosti Sustav predviđanja poplava (*Flood forecasting system*) te će doprinijeti rezultatima za Višemodelski sustav za prognoziranje obalnih poplava (*Coastal multimodel forecasting system*) i Probabilistički model za razumijevanje pluvijalnih poplava te razvoj sustava prognoziranja pluvijalnih poplava (*Probabilistic model designed for better understanding the pluvial floods, its prediction and promptness in reactions of urgent services*). Također, rezultati provedenih numeričkih analiza poplava koje će Izvršitelj napraviti direktno će se uključiti u katastar poplava kao dio projektnih aktivnosti Katastra poplava (*Flood Cadastre*) te rezultata Izvještaja o napretku u kreiranju katastra poplava (*Report of the progress in creating flood cadaster*), Izvještaja o napretku u osvježavanju katastra poplava (*Report of the progress in updating flood cadaster*) te Izrade karata i prostornih podataka područja podložnih poplavama (*Maps showing flood-prone areas and related spatial information*). Za navedene isporučevine Izvršitelj će prema uputama Naručitelja dostaviti izvješća na temelju kojih će Naručitelj potvrditi izvršenje pojedine aktivnosti.

### 1.2.2 Sadržaj studije

Predmetna studija sastoji se od sljedećih poglavlja kroz koje su obrađeni pojedini dijelovi radnog zadatka:

- Poglavlje 2: **Uvodno o urbanim poplavama**. U ovom poglavlju dan je pregled problematike urbanih poplava s pregledom zakonodavnog okvira, specifičnosti pluvijalnih poplava, poplava s mora te složenih poplava u priobalnim područjima. Također su dane definicije pojmova vezanih uz rizike od poplava, predstavljen je konceptualni model procjene urbanih poplava te pregled razina složenosti i kartiranja urbanih poplava.
- Poglavlje 3: **Analiza opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina u urbanom dijelu naselja Zadar**. U ovom poglavlju dan je metodološki okvir procjene opasnosti i rizika od



pluvijalnih poplava. Također je razrađena i opisana metodologija za procjenu opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava na mezo razini detaljnosti te su prikazani rezultati i karte proizašle iz analize pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar.

- Poglavlje 4: **Analiza opasnosti i rizika od poplava s mora u priobalnom dijelu naselja Zadar.** U ovom poglavlju dan je pregled metodologije za procjenu opasnosti i rizika od poplava s mora te je opisana uspostava numeričkog modela valne dinamike u akvatoriju ispred Zadra. Konačno su prikazani rezultati numeričkih simulacija valnih deformacija te karte opasnosti i rizika od poplava s mora u priobalnom dijelu naselja Zadar.
- Poglavlje 5: **Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica.** U ovom poglavlju provedena je analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava na mikro razini detaljnosti te su prikazani rezultati i karte opasnosti i rizika od poplava u slivu Vruljica u Zadru.
- Poglavlje 6: **Statistička analiza složenih poplava u Zadru i utjecaj klimatskih promjena.** U ovom poglavlju provedena je statistička analiza složenih poplava u Zadru vezano uz istodobno pojavljivanje visokih razina mora i jakih oborina. Također je dan pregled saznanja o utjecajima klimatskih promjena na intenzitet oborina te na podizanje razine mora i ocjenu mogućih utjecaja takvih promjena na poplavljanje obalnog i urbanog područja.
- Poglavlje 7: **Analiza složenih poplava u slivu Vruljica u Zadru.** U ovom poglavlju opisana je metodologija i uspostava modela te su prikazani rezultati analize složenih poplava uslijed kombinacije djelovanja s mora i kopna na odabranom pilot području u slivu Vruljice na mikro razini.
- Poglavlje 8: **Analiza onečišćenja oborinskih voda.** U ovom poglavlju opisana je metodologija te su prikazani rezultati analize onečišćenja oborinskih voda s urbanih površina na području sliva Vruljica u Zadru. Također su dani rezultati istraživanja metala u tragovima u vodama donjeg toka rijeke Neretve.
- Poglavlje 9: **Sustavi prognoziranja poplava u RH.** U ovom poglavlju dan je pregled sustava prognoziranja i upozoravanja na opasne vremenske prilike u Republici Hrvatskoj te je dan prijedlog unapređenja sustava prognoziranja i upozoravanja na poplave.
- Poglavlje 10: **Probabilistički model prognoziranja pluvijalnih poplava.** U ovom poglavlju opisana je metodologija uspostave sustava prognoziranja pluvijalnih poplava te su prikazani rezultati modela prognoziranja pluvijalnih poplava u gradu Zadru.
- U poglavlju 11 su dani zaključci i preporuke vezano uz sve analize provedene u okviru predmetne studije.

## 2 Uvodno o urbanim poplavama

### 2.1 Zakonodavni okvir

Procjena opasnosti i rizika od poplava u ovom dokumentu provedena je u skladu sa **Zakonom o vodama** (NN 66/2019, 84/21) kojim se, među ostalim, uređuje zaštita od štetnog djelovanja voda. Ovim zakonom se također u pravni poredak Republike Hrvatska prenosi i Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2007. godine o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima (u nastavku **Direktiva o poplavama**). Osnovna svrha Direktive o poplavama je uspostaviti okvir za procjenu i upravljanje poplavnim rizicima s ciljem smanjenja štetnih posljedica poplava na zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost.

Zakon o vodama propisuje da su Hrvatske vode dužne izraditi karte opasnosti i karte rizika od poplava za vodno područje. Sadržaj navedenih karata i scenariji za koje se one izrađuje propisane su **Planom upravljanja vodnim područjima (PUVP)**, odnosno njezinim komponentom **Planom upravljanja rizicima od poplava (PURP)**. Treba napomenuti da je u trenutku izrade ovog dokumenta na snazi Plan upravljanja vodnim područjima za razdoblje 2016.-2021., a da je novi Plan za razdoblje 2022.-2027. izrađen do razine Nacrta te da je isti trenutno na javnoj raspravi.

**Direktiva o poplavama** pruža detaljnije informacije o postupku izrade karata opasnosti i karata rizika od poplava. Karte opasnosti od poplava treba izraditi prema sljedećim scenarijima:

- a) poplava male vjerojatnosti ili scenariji ekstremnih događaja,
- b) poplave srednje vjerojatnosti te
- c) poplave velike vjerojatnosti.

Za svaki scenarij, karte opasnosti trebaju prikazati:

- a) opseg poplava,
- b) dubinu vode ili vodostaj,
- c) brzinu toka ili odgovarajući protok vode.

Karte rizika od poplava trebaju prikazati moguće štetne posljedice koje se povezuju sa svakim prethodno navedenim scenarijem, a mogu biti izrađene kao:

- a) okvirni broj potencijalno pogođenih stanovnika,
- b) vrsta gospodarske aktivnosti na potencijalno pogođenom području,

- c) postrojenja koja bi mogla prouzročiti iznenadno onečišćenje u slučaju poplava te potencijalno pogođena zaštićena područja,
- d) ostale informacije koje država članica smatra korisnima te informacije o drugim značajnim izvorima onečišćenja.

## 2.2 Općenito o poplavama u RH

Pojam poplave definiran je Zakonom o vodama (NN 66/2019).

„**Poplava** je privremena pokrivenost vodom zemljišta, koje obično nije prekriveno vodom, uzrokovana izlivanjem rijeka, bujica, privremenih vodotoka, jezera i nakupljanja leda, kao i morske vode u priobalnim područjima i suvišnim podzemnim vodama; ovaj pojam ne obuhvaća poplave iz sustava javne odvodnje.„

Plan upravljanja rizicima od poplava (Hrvatske vode, 2022) prepoznaje nekoliko osnovnih tipova poplava prema izvorima plavljenja:

- riječne poplave zbog obilnih kiša i/ili naglog topljenja snijega (fluvijalne poplave),
- bujične poplave manjih vodotoka zbog kratkotrajnih kiša visokih intenziteta,
- poplave na krškim poljima zbog obilnih kiša i/ili naglog topljenja snijega, te nedovoljnih propusnih kapaciteta prirodnih ponora,
- poplave unutarnjih voda na ravničarskim površinama,
- ledene poplave,
- poplave uzrokovane visokim razinama mora uslijed olujnih uspora i šćiga,
- umjetne (akcidentne) poplave zbog eventualnih proboja brana i nasipa, aktiviranja klizišta, neprimjerenih gradnji i slično.

U aktualnom planskom ciklusu (2022.-2027.) PURP-om obuhvaćene su:

- riječne (fluvijalne) poplave, uključujući i poplave uzrokovane ledom na velikim rijekama i poplave gubitkom funkcionalnosti sustava za obranu od poplava,
- poplave uzrokovane podzemnim vodama, karakteristične za područje krša,
- plavljenje uslijed visokih razina mora,
- plavljenje uslijed zatajenja vodne infrastrukture - kanala i akumulacija.

Pritom, plavljenje oborinskim vodama (pluvijalne poplave), iako značajan izvor plavljenja u Hrvatskoj, je obuhvaćeno u manjoj mjeri sukladno pravnim i tehničkim okolnostima, dok u ovom planskom ciklusu upravljanja rizicima od poplava, poplave iz kanalizacijskih sustava nisu predmet obrada.

### 2.2.1 Specifičnosti pluvijalnih poplava

U svrhu procjene rizika od pluvijalnih poplava, bitno je iste definirati i razlikovati od drugih tipova poplava. Pritom, treba napomenuti kako se određeni tipovi poplava često pojavljuju istodobno, najčešće zbog istog uzroka/izvora plavljenja (kao što su obilne oborine), ali su različitog prostornog obuhvata i mehanizma plavljenja. Za početak treba razjasniti po čemu se pluvijalne poplave razlikuju od fluvijalnih poplava te razjasniti međudnose pojmove kao što su pluvijalne poplave, bujične poplave, urbane poplave te poplave iz kanalizacijskih sustava.

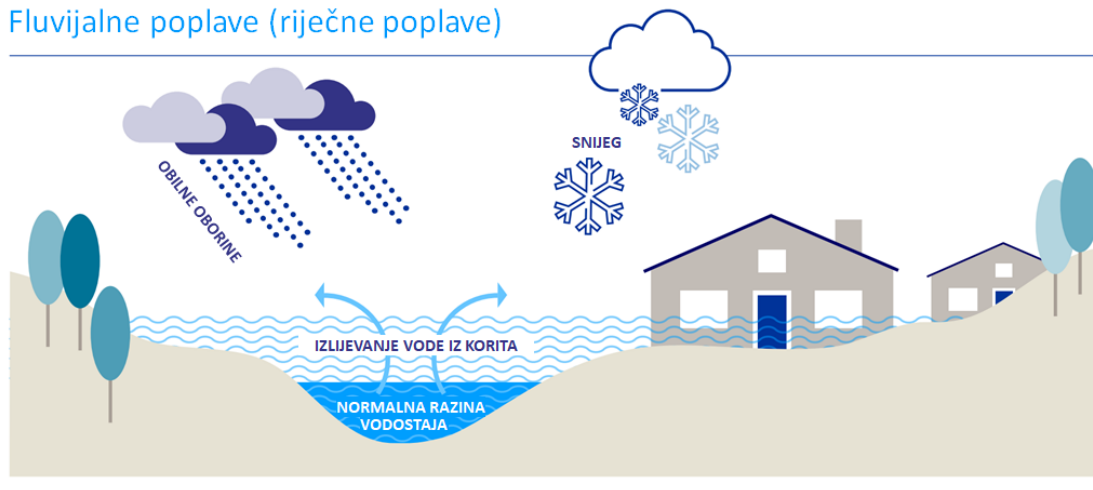
Općenito, **fluvijalne ili riječne poplave** nastaju kada razina vode u rijeci, jezeru ili potoku poraste i prelije se preko nasipa ili ruba obale na okolno zemljište. Porast razine vode u rijeci može biti posljedica prekomjerne kiše ili topljenja snijega u neposrednoj blizini ili daleko od mjesta nastanka poplave (slika 2.2.1). **Pluvijalne poplave**, s druge strane, nastaju uslijed otjecanja jakih oborina, ali su neovisne o vodnim tijelima (slika 2.2.2). Često se pod pojmom pluvijalne poplave podrazumijeva dva različita oblika poplava: a) urbane poplave i b) bujične poplave. Pritom, urbane poplave nastaju na urbaniziranim područjima i često su posljedica premašenja kapaciteta sustava za odvodnju oborinskih voda u kombinaciji s visokim stupnjem izgrađenosti zemljišta. Buijne poplave nastaju na brdskim područjima ili strmim terenima, a karakterizira ih nagla pojava i velika brzina vode. U okviru projekta RAINMAN (2020) naglašeno je da osnovni aspekt pluvijalnih poplava u urbanim područjima nije samo nedostatak odgovarajućeg sustava odvodnje, već na njih uvelike utječe nedostatan retencijski i infiltracijski kapacitet zemljišta (što je najčešće posljedica intenzivne urbanizacije). Poplave iz kanalizacijski sustava su podvrsta urbanih poplava koje su direktno vezana uz podkapacitirani ili neodržavani sustav odvodnje oborinskih voda.

U okviru projekta RAINMAN (2020) postignut je značajan napredak u jasnoći i preciznosti definiranja pluvijalnih poplava. Također je naglašeno da je bitno razlikovati pluvijalne poplave od fluvijalnih, ali i bujičnih poplava. Općenito se može smatrati da (RAINMAN, 2020):

- **Fluvijalne poplave** opisuju površinske vode koje **dolaze iz** vodnih tijela.
- **Pluvijalne poplave** opisuju površinske vode koje **teku prema** vodnim tijelima.

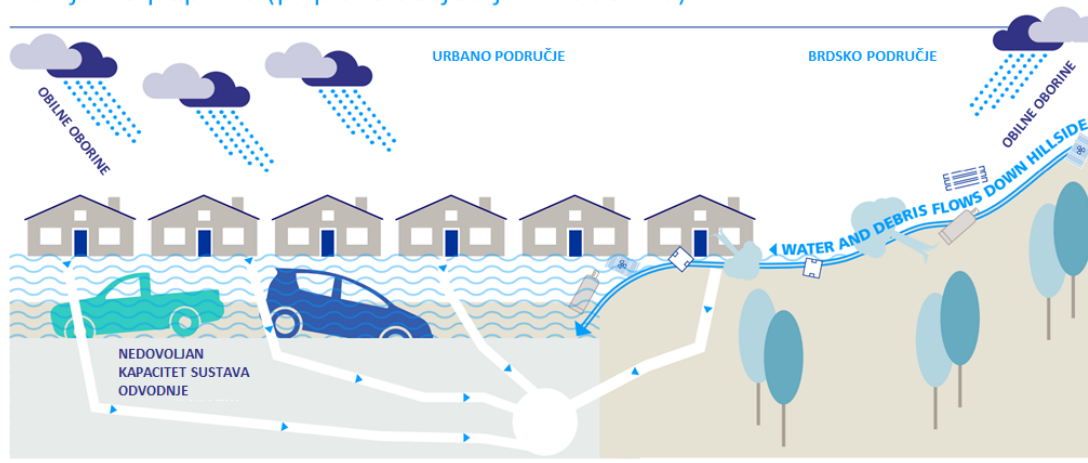
U skladu s navedenim smjernicama, bujične poplave se mogu smatrati integralnim dijelom pluvijalnih poplava jedino ako nastaju na područjima gdje nema jasno definiranih bujičnih korita ili ako se dominantno plavljenje događa tijekom otjecanja površinskih voda prema vodotocima. U suprotnom, poplave koje nastaju kada se voda izlijeva iz korita bujice po okolnom zemljištu se trebaju promatrati kao zaseban tip poplava - bujične poplave.

### Fluvijalne poplave (riječne poplave)



Slika 2.2.1 Shematski prikaz fluvijalne (Riječne) poplave (modificirano prema [www.zurich.com](http://www.zurich.com))

### Pluvijalne poplave (poplave uslijed jakih oborina)

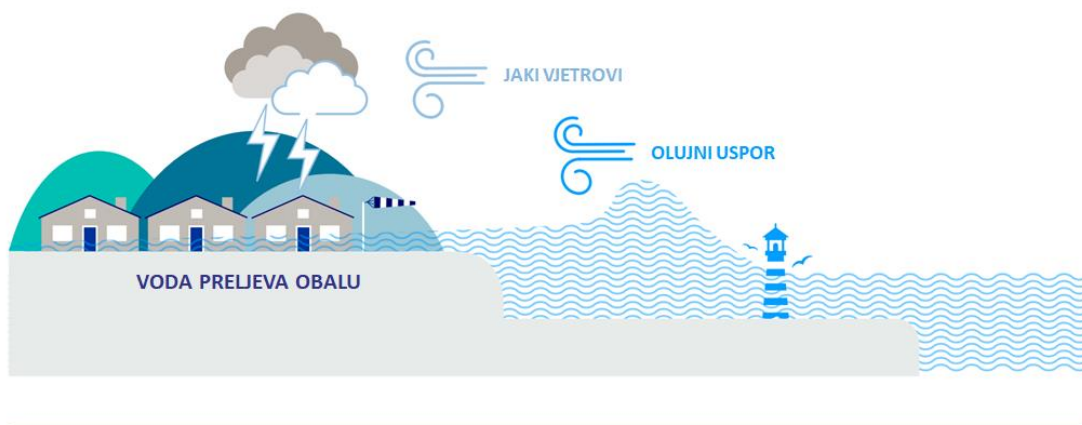


Slika 2.2.2 Shematski prikaz pluvijalne i bujične poplave (modificirano prema [www.zurich.com](http://www.zurich.com))

## 2.2.2 Specifičnosti poplava s mora

Sjeverna i istočna obala Jadranskog mora su pod stalnom prijetnjom od poplava izazvanih ekstremno visokim razinama mora. Najpoznatije i najbolje stražene su Venecije poznate pod lokalnim nazivom „Acqua Alta“ (tal. Visoka voda) (Cavaleri, 2000.; Trincardi i sur., 2016.; Cavaleri i sur., 2019.), a koje često imaju destruktivan efekt, povremeno rezultiraju i smrtnim slučajevima (Cavaleri i sur., 2020.) te su navele gradske vlasti Venecije za pokušaju izraditi sustav brana za zaštitu od poplava „Mose“ koji je prvi put aktiviran 10. listopada 2020. godine kada je uspješno obranio Veneciju od poplave (<https://www.italymagazine.com/featured-story/venices-flood-barriers-project-mose-activated-first-time>). Iako manje istraživanene i manje poznate, poplave izazvane ekstremno visokim razinama mora javljaju se i na istočnoj, odnosno hrvatskoj obali jadranskog mora (primjerice Vilibić i Šepić, 2009.; Međugorac i sur., 2015., 2016., 2018.; Vilibić i sur., 2017.). U Tablici 2.2.1 dan je popis takvih registriranih poplava u razdoblju od 1990.-2018. godine, a na Slici 2.2.4 prikazane su odgovarajuće lokacije. Može se uočiti da poplave podjednako pogađaju čitav hrvatski dio obale Jadranskog mora. S obzirom na mjesec u kojem se pojavljuju, za očekivati je da je većina navedenih poplava izazvana sinoptičkim atmosferskim djelovanjem, tj. da je riječ o olujnim usporima (Međugorac i sur., 2015, 2016, 2018), prikazano na Slici 2.2.3., dok se manji broj događaja potvrđeno može smatrati meteorološkim tsunamijima (Vilibić i Šepić, 2009.; Denamiel i sur., 2019.).

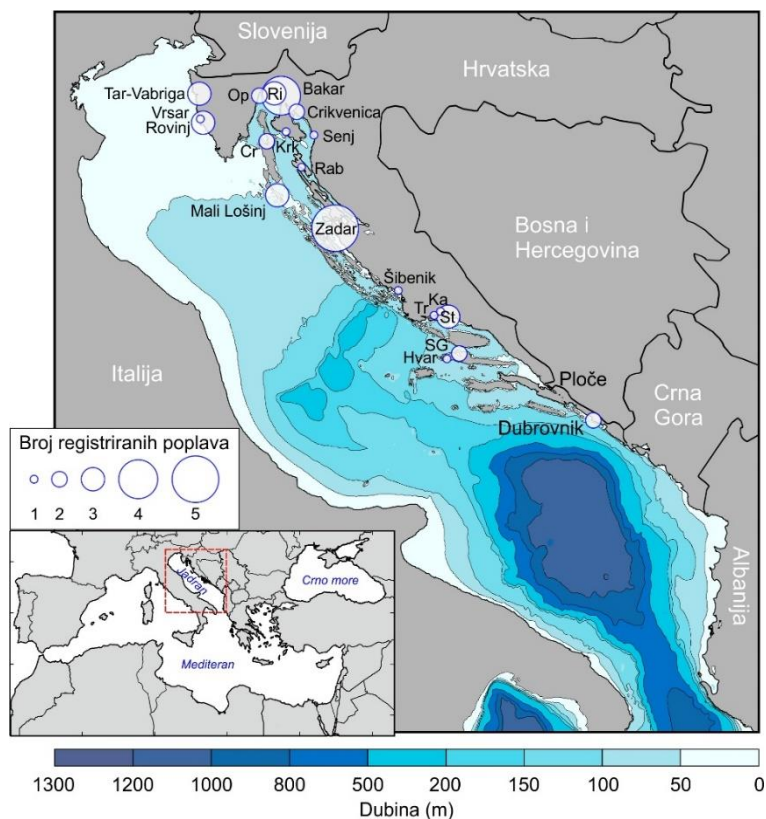
### Poplave mora (olujni uspori)



Slika 2.2.3 Shematski prikaz poplave s mora uslijed olujnih uspora (modificirano prema [www.zurich.com](http://www.zurich.com))

Tablica 2.2.1. Registrirane poplave od mora u razdoblju 1990.-2018. (VEPAR, 2022.)

DATUM POPLAVNOG DOGAĐAJA	POČETKA	OPĆINA GRAD	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	TRAJANJE (dana)	IZVOR PLAVLJENJA	MEHANIZAM PLAVLJENJA	ŠIFRA POPLAVNOG DOGAĐAJA
20.10.1998		CRES	0.152	2	A17	A26	SE_1998_002
24.12.2000		SENJ	0.21	1	A17	A26	SE_2000_003
27.6.2003		STARI GRAD	NP	NP	A14	A26	SF_2003_001
27.6.2003		STON	NP	NP	A14	A26	SF_2003_002
22.8.2007		ZADAR	NP	NP	A14	A26	SF_2007_001
11.9.2007		BRINJE	0.806	5	A17	A26	SE_2007_003
15.8.2008		MALI LOŠINJ	NP	NP	A14	A26	SE_2008_005
1.12.2008		RUEKA	NP	NP	A14	A26	SE_2008_002
1.12.2008		BAKAR	NP	NP	A14	A26	SE_2008_006
1.12.2008		ZADAR	NP	NP	A14	A26	SF_2008_001
1.12.2008		TROGIR	NP	NP	A14	A26	SF_2008_002
2.8.2009		SPLIT	NP	NP	A14	A26	SF_2009_001
2.8.2009		DUBROVNIK	NP	NP	A14	A26	SF_2009_002
23.12.2009		BAKAR	NP	NP	A14	A26	SE_2009_018
23.12.2009		ROVINI	NP	NP	A14	A26	SE_2009_019
23.12.2009		ZADAR	NP	NP	A14	A26	SF_2009_003
31.12.2009		ZADAR	NP	NP	A14	A26	SF_2009_004
31.12.2009		SPLIT	NP	NP	A14	A26	SF_2009_005
31.12.2009		DUBROVNIK	NP	NP	A14	A26	SF_2009_006
19.2.2010		STARI GRAD	NP	NP	A14	A26	SF_2010_007
3.12.2010		BAKAR	NP	NP	A14	A26	SE_2010_011
3.12.2010		ROVINI	NP	NP	A14	A26	SE_2010_012
3.12.2010		ŠIBENIK	NP	NP	A14	A26	SF_2010_005
3.12.2010		SPLIT	NP	NP	A14	A26	SF_2010_008
3.12.2010		ZADAR	NP	NP	A14	A26	SF_2010_009_2
1.11.2012		RUEKA	NP	NP	A14	A26	SE_2012_024
1.11.2012		CRIKVENICA	NP	NP	A14	A26	SE_2012_025
1.11.2012		BAKAR	NP	NP	A14	A26	SE_2012_026
1.11.2012		CRES	NP	NP	A14	A26	SE_2012_027
1.11.2012		RAB	NP	NP	A14	A26	SE_2012_028
10.2.2016		ROVINI	NP	NP	A14	A26	SE_2016_028
10.2.2016		TAR-VABRIGA	NP	NP	A14	A26	SE_2016_029
6.3.2016		TAR-VABRIGA	NP	NP	A14	A26	SE_2016_030
6.3.2016		VRSAR	NP	NP	A14	A26	SE_2016_031
6.3.2016		OPATJA	NP	NP	A14	A26	SE_2016_032
16.6.2016		KAŠTELA	NP	NP	A14	A21	SF_2016_001
11.7.2017		MALI LOŠINJ	NP	NP	A14	A26	SE_2017_018
11.9.2017		ZADAR	0.561	2	A11	A21, A24	SF_2017_001
11.9.2017		ZADAR	5.38	1	A12, A13	A21	SF_2017_002
29.10.2018		RUEKA	NP	NP	A14	A26	SE_2018_018
29.10.2018		OPATJA	NP	NP	A14	A26	SE_2018_019
29.10.2018		TAR-VABRIGA	NP	NP	A14	A26	SE_2018_021
29.10.2018		CRIKVENICA	NP	NP	A14	A26	SE_2018_022
29.10.2018		BAKAR	NP	NP	A14	A26	SE_2018_023
29.10.2018		MALI LOŠINJ	NP	NP	A14	A26	SE_2018_024
29.10.2018		KRK	NP	NP	A14	A26	SE_2018_025
30.10.2018		HVAR	NP	NP	A14	A21	SF_2018_003



Slika 2.2.4. Prostorna raspodjela registriranih poplava od mora na hrvatskoj obali Jadrana (VEPAR, 2022.)

Ekstremno visoke razine Jadranskog mora u pravilu se mogu podijeliti u dvije kategorije te se mogu vezati uz dva atmosferska fenomena: (1) olujne uspore izazvane prolaskom dubokih ciklona nad područjem Jadrana te zajedničkim djelovanjem atmosferskog tlaka zraka i vjetra (Međugorac i sur., 2015., 2016., 2018.); (2) meteorološke tsunamije izazvane prolaskom mezoskalnih atmosferskih poremećaja tlaka zraka nad pogođenim područjem (Vilibić i Šepić, 2009.). Olujni uspori u pravilu zahvaćaju veće područje (red veličine do nekoliko stotina kilometara), duljeg su trajanja – nekoliko sati do par dana, i najčešće se mogu predvidjeti korištenjem združenih atmosferskih i oceanografskih modela (Cavaleri, 2020.). S druge strane, meteorološki tsunamiji u pravilu pogađaju manja izolirana područja (red veličine do nekoliko desetaka kilometara pa i manje) te se učestalo javljaju na istim mjestima pogodnih batimetrijsko-topografskih karakteristika primjerice u Veloj Luci na otoku Korčuli ili Stari Gradu na otoku Hvaru (Vilibić i Šepić, 2009.; Šepić i sur., 2016.), kraćeg su trajanja – nekoliko desetaka minuta, te ih je s trenutno dostupnim modelima i mjernim sustavima nemoguće kvalitetno (kvantitativno) prognozirati (Denamiel i sur., 2019.).



### 2.2.3 Specifičnosti složenih poplava u priobalnim područjima

Priobalna su područja osjetljiva na poplave zbog izloženosti višestrukim oceanografskim i hidrološkim pojavama, uključujući olujne uspore, velike valove, visoku plimu, riječne poplave i poplave od otjecanja jakih oborina. Međutim, istodobna ili uzastopna pojava više različitih uzroka poplava može dovesti do znatno većih posljedica nego u slučaju njihovog zasebnog djelovanja (Bevacqua i sur., 2019). Takvi se događaji nazivaju složene poplave (SP) (Zscheischler i sur., 2018). Međuvladin panel za klimatske promjene (IPCC) definira složeni događaj kao (Seneviratne i sur., 2012):

- dva ili više ekstremna događaja koji se događaju istovremeno ili uzastopce,
- kombinacije ekstremnih događaja koji pojačavaju ukupne posljedice, i
- kombinacije događaja koji pojedinačno nisu ekstremni, ali zajedno dovode do ekstremnih događaja.

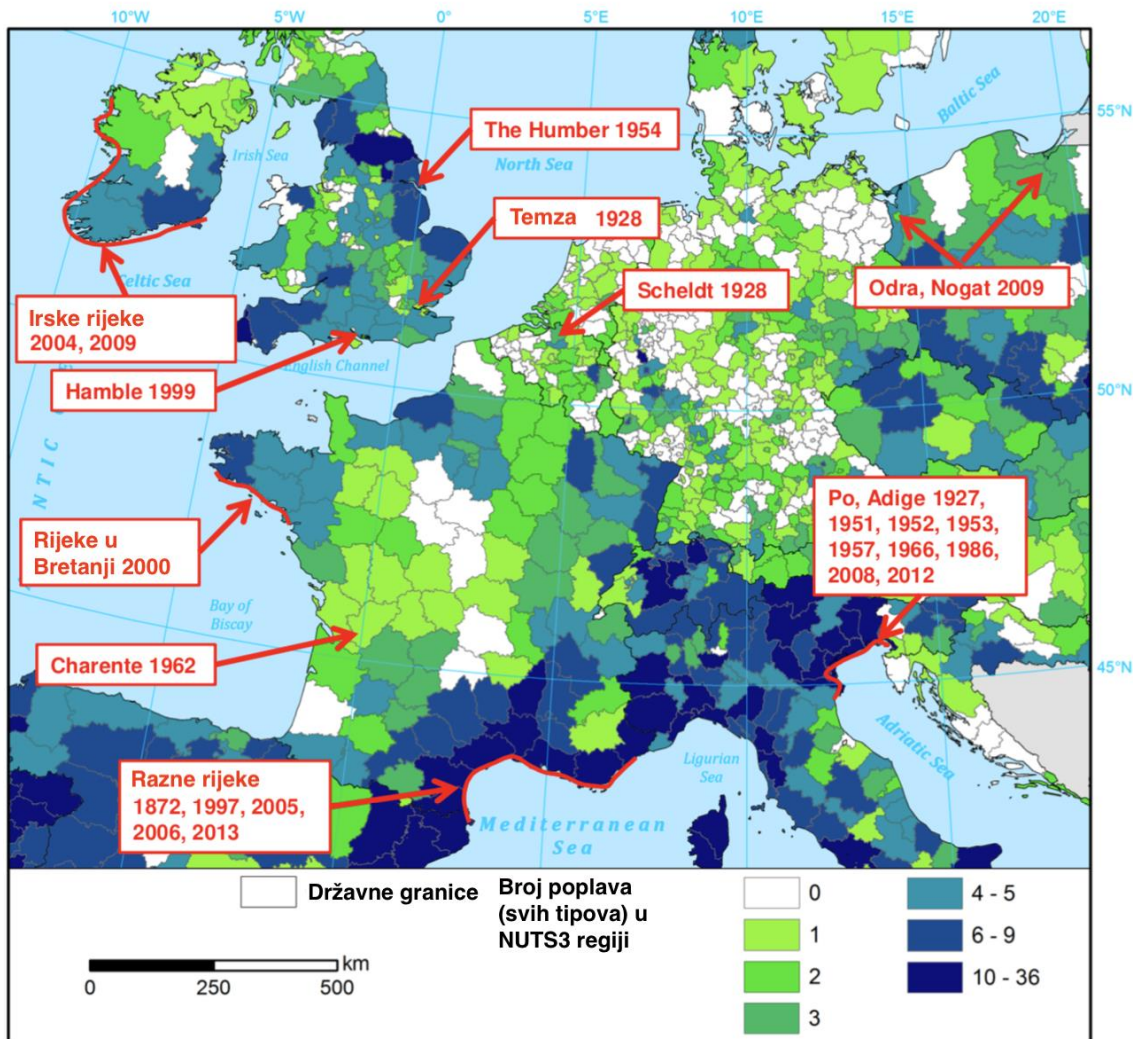
Konkretno, tri najčešća mehanizma za SP-e u priobalnim regijama su (Wahl i sur., 2015):

- zajednička pojava olujnih uspora i jakih oborina koja može povećati razinu vode u priobalnim područjima i uzrokovati poplavu,
- ekstremni olujni uspor čije se posljedice mogu pojačati ne-ekstremnim oborinama ili
- umjereni olujni uspor koji ne uzrokuje poplavu, ali može spriječiti ili usporiti istjecanje oborinskih voda.

Recentne studije koje su proučavale problematiku SP-u slažu se da bi zanemarivanje zavisnosti između dvaju ili više događaja koji se mogu dogoditi istovremeno ili uzastopce moglo podcijeniti ukupnu opasnost od poplava, dok bi pretpostavka o direktnoj povezanosti dvaju uzroka poplava mogla biti previše konzervativna i dovela bi do nerazumno visokih rizika od poplava (Bevacqua i sur., 2019; Bermúdez i sur., 2019). Statistička zavisnost između visokih razina mora i velikih protoka rijeka identificirana je na globalnoj razini (Ward i sur., 2018; Couasnon i sur., 2019), kao i na kontinentalnoj razini u Australiji (Zhang i sur., 2013 .; Wu i sur., 2018.) i Europi (Paprotny i sur., 2018b; Bevacqua i sur., 2019).

Ovaj problem dodatno naglašavaju istraživanja koja sugeriraju da je najveća vjerojatnost SP-a u sadašnjoj klimi uglavnom koncentrirana duž Sredozemnog mora (Bevacqua i sur., 2019.), a povijesne analize pokazuju da je najveći broj složenih poplava u Europi zabilježen duž obalne linije sjevernog Jadranskog mora (Paprotny i sur., 2018a). Na Slici 2.2.5 dan je prikaz složenih poplava zabilježenih između 1870. i 2016. godine na području EU. Talijanske regije Veneto i Friuli-Venezia Giulia su široko

poznate po poplavama s mora, a posebno Venecija s lokalnim fenomenom poznatim kao *acqua alta*. Međutim, hrvatska obala Jadranskog mora podjednako je izložena poplavama s mora, s ponekad još i izraženijim posljedicama (Međugorac i sur., 2015). Također, na hrvatskoj obali izraženije su pojave poplavlivanja sustava za odvodnju oborinskih voda u kombinaciji s olujnim usporima i poplavama s mora.



Slika 2.2.5. Prikaz složenih poplava između 1870. i 2016. godine gdje su crvenim označene složene poplave i godine nastanka svih 23 poplava (prema Paprotny I sur., 2018a).

## 2.3 Rizik od poplava – definicije pojmova

Pojam rizika ima više mogućih značenja, a u stručnoj i znanstvenoj zajednici koristi se na različite načine, stoga je neophodno definirati sve indikatore i elemente kojima se procjenjuje rizik od poplava. Zakonom o vodama (NN 66/2019), koji je usklađen s Direktivom o poplavama, daje se definicije rizika od poplava.

„**Rizik od poplava** je kombinacija vjerojatnosti poplavnog događaja i potencijalnih štetnih posljedica poplavnog događaja za život, zdravlje i imovinu ljudi, okoliš, kulturno naslijeđe i gospodarsku aktivnost.“ (Zakon o vodama, NN 66/2019)

Gore navedenu definiciju moguće je matematički izraziti kao:

$$RIZIK = p_h \times C$$

gdje je  $p_h$  vjerojatnost poplavnog događaja, a  $C$  potencijalno štetna posljedica (EXCIMAP, 2007.).

Rizik od poplava općenito obuhvaća dva indikatora – **opasnost i ranjivost** (Merz i sur., 2007).

**Opasnost od poplava** (eng. *flood hazard*) se u kontekstu procjene rizika općenito definira kao vjerojatnost premašenja potencijalno štetnog poplavnog događaja na određenom području (Merz i sur., 2007). Pritom, opasnost od poplava ne prenosi informaciju o posljedicama poplava na stanovništvo, građevine ili okoliš. U nastavku se navodi i nešto šira definicija opasnosti prema UN-u (2004).

„**Opasnost** je potencijalno štetni fizički događaj, pojava ili ljudska aktivnost koja može uzrokovati gubitak života ili ozljede, materijalnu štetu, društveni i ekonomski poremećaj ili narušavanje kvalitete okoliša.“ UNISDR (2009).

Opasnost od poplava najčešće se izražava indikatorima **obuhvata poplave** (eng. *flood extent*) i **dubinom vode** (eng. *water depth*) koja ima najizraženiji utjecaj na štetne posljedice poplava. Pored toga, u slučaju bujičnih poplava i poplava u urbanim područjima, često se koristi indikator **brzine vode** (eng. *water velocity*) koja utječe na štete na građevinama i infrastrukturi te **protok vode** (eng. *flow rate*) koji se računa kao umnožak dubine i brzine vode kako bi se odredio utjecaj na stabilnost ljudi, životinja i pokretnih receptora.

U slučaju poplava od izlivanja rijeka ili poplava od mora, još se koriste i indikatori **trajanja poplave** te **brzine plavljenja**, koja se može izraziti kao vrijeme do nailaska poplavnog vala ili brzina izdizanja razine vode, što je bitno za sustave ranog upozoravanja i evakuaciju stanovništva. U pojedinim slučajevima korisno je procijeniti i **koncentraciju** i veličinu različitih tvari koje se pronose poplavom, kao što je sediment ili različite onečišćujuće tvari, što može rezultirati velikim štetama, ne samo po izgrađeni okoliš, već i cjelokupni ekosustav.

Svi prethodno navedeni indikatori su kvantitativni, međutim, ponekad je opasnost od poplava korisnije izraziti kvalitativno, odnosno kao **razinu opasnosti poplave** (eng. *flood severity*) koja odražava kombinaciju različitih indikatora (npr. niska, srednja i visoka opasnost).

Treba napomenuti da se u okviru analize opasnosti od poplava često prikazuje i obuhvat poplave i/ili dubine vode za odabrane povijesne poplave. U tom slučaju ne mora nužno biti definirana vjerojatnost premašenja, ali ovi rezultati se također nazivaju kartama opasnosti od poplava, iako se u angloameričkom govornom području koristi drugačiji pojam (eng. *flood danger*).

Pored opasnosti od poplava, procjena rizika uključuje i identifikaciju elemenata koji su izloženi riziku (eng. *elements at risk*), što uključuje sve subjekte i objekte u izgrađenom i prirodnom okolišu koji potencijalno mogu biti poplavljeni – **receptori rizika**. To su primjerice, stanovništvo, vozila, građevine, infrastruktura, gospodarske aktivnosti, ekosustav i ostalo.

Iz definicije rizika direktno proizlazi da **procjena rizika** od poplava uključuje i analizu **potencijalno štetnih posljedica**, koje ne ovise samo o karakteristikama i vjerojatnostima pojave poplavnog događaja (definirano kroz opasnosti), već i o **ranjivosti receptora** koji su izloženi poplavama. U literaturi postoje različite definicije **ranjivosti** (eng. *vulnerability*). Primjerice, Merz (2007) ranjivost definira kao kombinaciju dva elementa, **izloženosti** (eng. *exposure*) i **podložnosti** (eng. *susceptibility*). Procjena izloženosti odgovara na pitanje „Tko ili što može biti pogođeno poplavom?“, dok procjena podložnosti odgovara na pitanje „Kako i koliko će izloženi receptori biti pogođeni ili oštećeni?“ (Merz, 2007). Stoga se može dati sljedeća sažeta definira potencijalno štetnih posljedica:

$$C = S \times V \times E$$

gdje su  $C$  potencijalno štetne posljedice,  $S$  je podložnost,  $V$  je vrijednost receptora,  $E$  je izloženost receptora (EXCIMAP, 2007.).

**Podložnost**  $S$  opisuje štetni učinak na receptore, najčešće se definira krivuljama dubine-štete (postotak štete u odnosu na dubinu vode) te može poprimiti vrijednost u rasponu od 0 do 1.

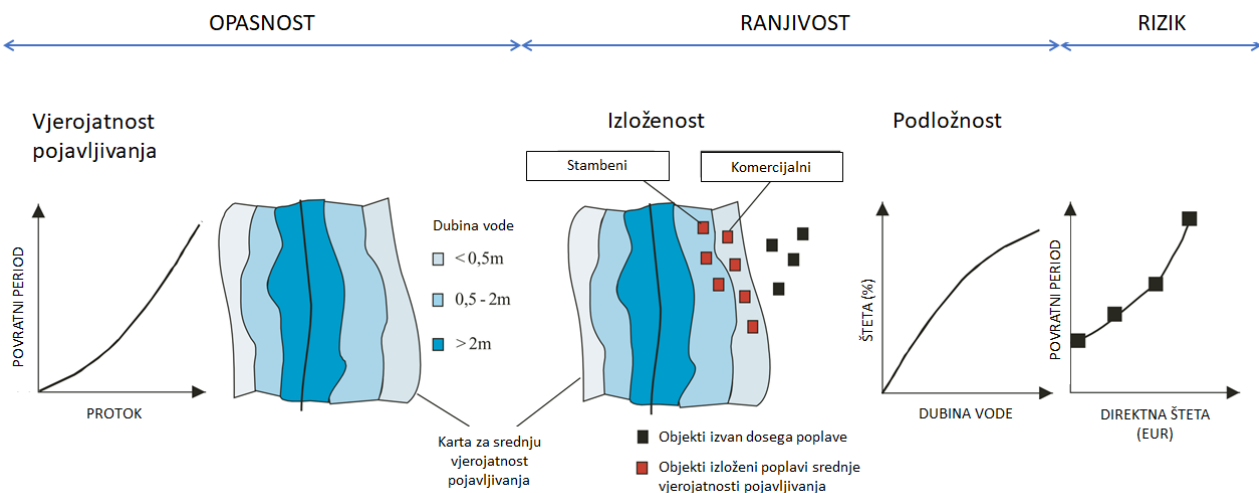
**Vrijednost elementa  $V$**  je pored ekonomske vrijednosti moguće izraziti i kao broj stanovnika ili pojedine grupe stanovništva, ekonomsku aktivnost, duljinu infrastrukture, broj objekata, lokacije objekata koje sadrže onečišćujuće ili opasne tvari i slično.

**Izloženost  $E$**  je definirana kao vjerojatnost da će receptor biti izložen poplavi (vezano uz opasnost od poplave) te može poprimiti vrijednost u rasponu od 0 do 1. U praksi se izloženost češće izražava direktno kao kombinacija vrijednosti elementa i izloženosti.

Treba napomenuti da je ranjivost složena i dinamička karakteristika receptora koja opisuje njegovu podložnost na negativne posljedice poplava. Pritom, podložnost receptora proizlazi iz vlastitih karakteristika, odnosno skupa sociološko-kulturnih, fizičkih, ekonomskih i okolišnih čimbenika. Visoka podložnost (i izloženost) receptora često je rezultat lošeg upravljanja prostorom kao što su nekontrolirana urbanizacija, neodržavanje infrastrukture i okoliša te popratna degradacija ili gubitak odgovarajuće podrške uzrokovane demografskim promjenama (Cardona i sur., 2012). U nastavku se daje jedna od često korištenih definicija ranjivosti stanovništva.

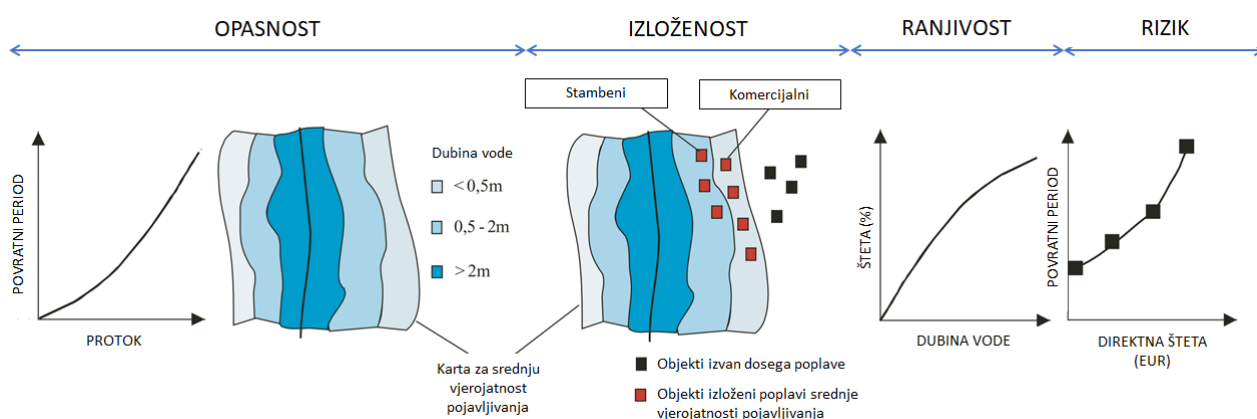
„**Ranjivost** je skup okolnosti određenih fizičkim, društvenim, ekonomskim i okolišnim čimbenicima ili procesima koji povećavaju podložnost pojedinca, zajednice, imovine ili sustava na štetne posljedice opasnosti“ (UNISDR, 2009).

Na Slici 2.3.1. prikazan je koncept definiranja rizika kao kombinacije opasnosti i ranjivosti.

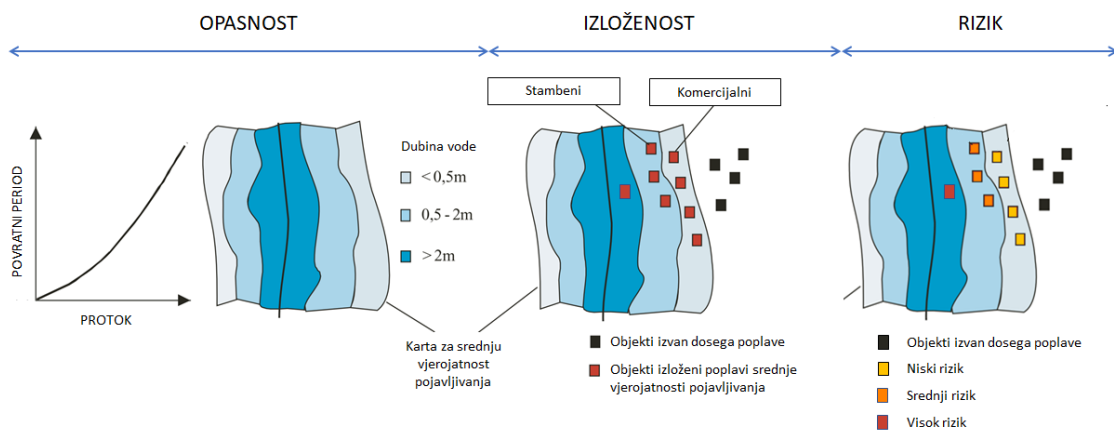


Slika 2.3.1 Koncept rizika od poplava kao kombinacija opasnosti i ranjivosti (izloženost i podložnost), modificirano prema Merz (2007.). Rizik je izražen kvantitativno kao vjerojatnost očekivanih šteta.

Treba napomenuti kako se u literaturi često nailazi na pristupe prema kojoj se rizik od poplava alternativno definira kao kombinacija opasnosti, izloženosti i ranjivosti. U tom se slučaju štetni učinak na receptore (npr. krivulje dubine-štete) naziva ranjivost, no razlika je u suštini semantička, a procjena se provodi na identičan način kao i što je prethodno prikazano i objašnjeno (Slika 2.3.2). Također, u literaturi se može naići i na pojam osjetljivosti koja se koristi kao alternativni naziv za podložnost.

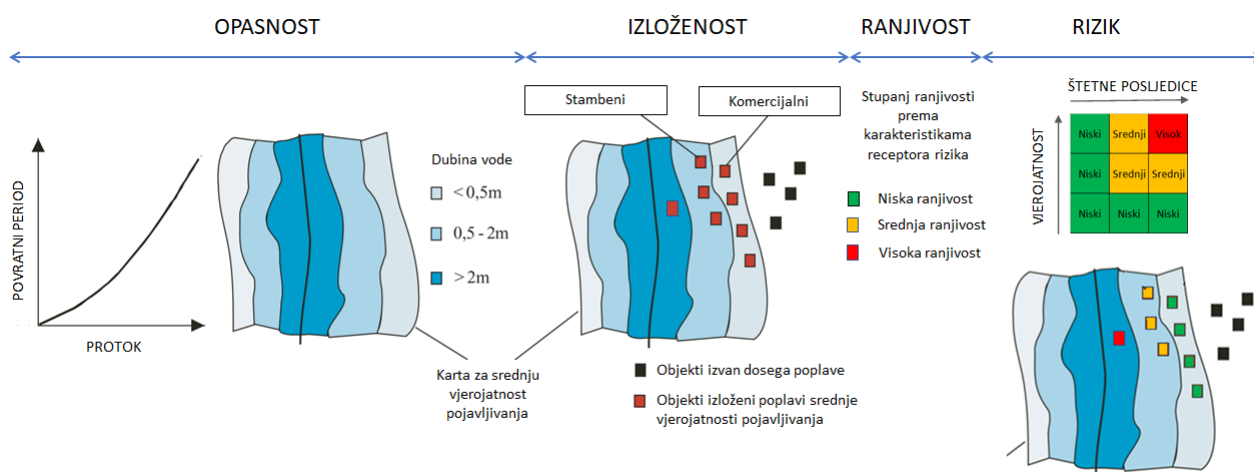


Slika 2.3.2 Koncept rizika od poplava kao kombinacija opasnosti, izloženosti i ranjivosti, modificirano prema Merz (2007.). Rizik je izražen kvantitativno kao vjerojatnost očekivanih šteta.



Slika 2.3.3 Koncept rizika od poplava kao kombinacije opasnosti i izloženosti. Rizik je izražen kvalitativno kao razina rizika za svaku vjerojatnost pojavljivanja.

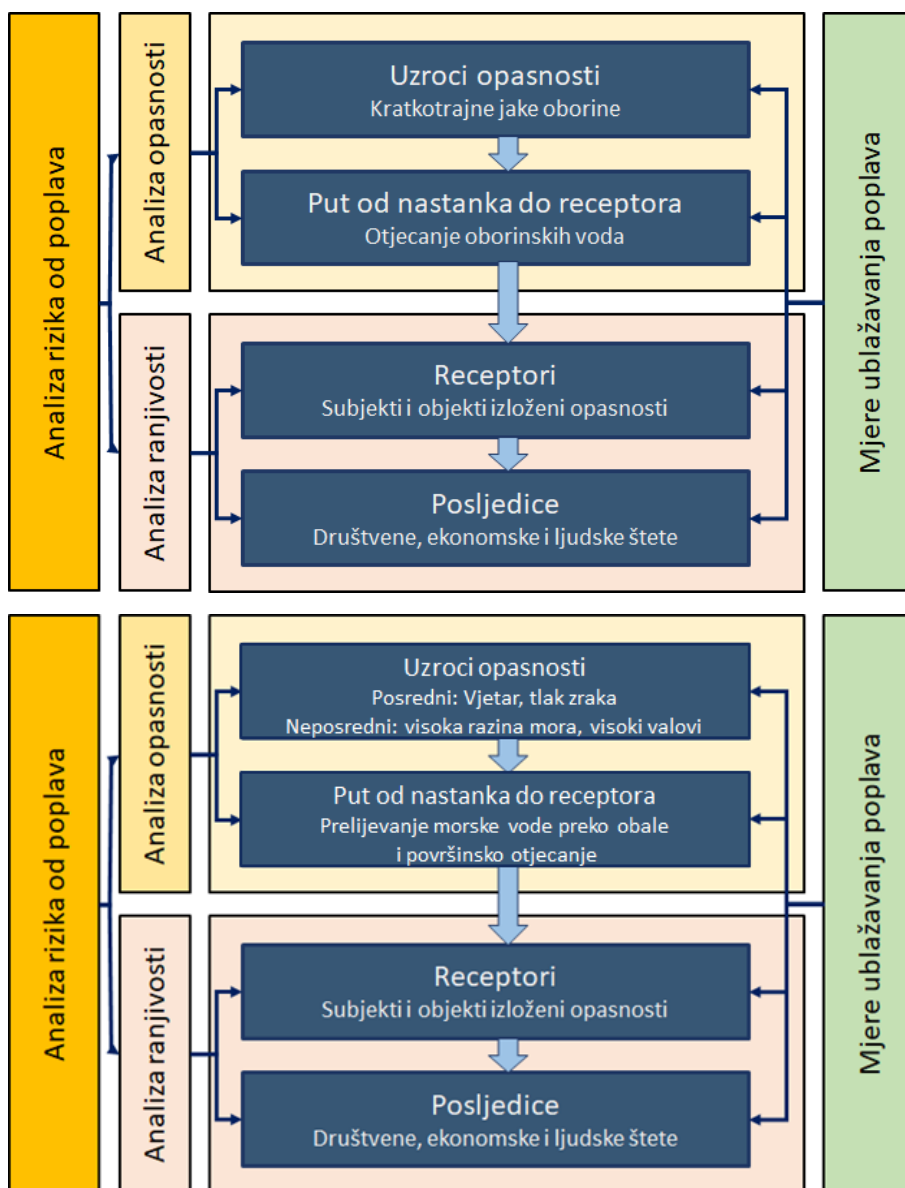
Također, treba napomenuti da je prethodno prikazani pristup vezan uz kvantitativnu procjenu rizika od poplava, međutim, rizik se može izraziti i kvalitativno. U pojednostavljenom pristupu se često zanemaruje podložnost te se koristi samo opasnost i izloženost, a rizik se izražava opisnim ili brojčanim razinama (npr. niska, srednja i visoka razina rizika), koje su direktno vezane uz razine opasnosti od poplava za pojedinu vjerojatnost (Slika 2.3.3). Navedeni koncept je ponekad nadograđen na način da se uvede i kvalitativna podložnost definirana prema karakteristikama receptora (npr. niska, srednja i visoka ranjivost) te se pomoću matrice rizika određuje pripadajuća razina rizika (Slika 2.3.4). Međutim, treba naglasiti da matrica rizika češće koristi pri usporedbi različitih vrsta rizika, a rjeđe za ocjenu razine rizika vezano uz jedan uzrok.



Slika 2.3.4 Koncept rizika od poplava kao kombinacije opasnosti, izloženosti i ranjivosti, uz matricu rizika. Rizik je izražen kvalitativno kao razina rizika.

## 2.4 Konceptualni model procjene urbanih poplava

Konceptualni model SPRC (eng. *Source-Pathway-Receptor-Consequence*) često se koristi u procesu procjene rizika s ciljem boljeg razumijevanja pojedinačnih elemenata rizika i odnosa između svih relevantnih indikatora (Samuels i Gouldby, 2009). Navedeni koncept definira vezu između opasnosti, ranjivosti i rizika kao linearnu funkciju od uzroka opasnosti, puta između nastanka opasnosti i receptora, karakteristika receptora do štetnih posljedica (Slika 2.4.1).



Slika 2.4.1 Konceptualni model rizika SPRC za pluvijalne poplave i za poplave s mora (modificirano prema Sauer i sur., 2018)

U kontekstu pluvijalnih poplava, glavni uzrok opasnosti su kratkotrajne jake oborine i proces generiranja površinskog otjecanja oborina. Put od uzroka do receptora opisuje površinsko otjecanje oborinske vode. Receptori su subjekti i objekti izloženi opasnosti od poplava i potencijalno podložni štetnim posljedicama, dok se pojam štetne posljedice odnosi na sve negativne i neželjene procese



kao što su štete na objektima (ekonomske posljedice), ozljede stanovništva i traume (socijalne posljedice) te onečišćenje vodnih resursa ili tla (okolišne posljedice).

U kontekstu poplava s mora, glavni neposredni uzrok opasnosti su visoke razine mora (olujni uspori) i visoki valovi, dok je put od uzroka do receptora definiran prvenstveno procesom prelijevanja obale i obalnih građevina te površinskim otjecanje morske vode. Receptori i posljedice su iste kao i kod pluvijalnih poplava.

Mjere ublažavanja rizika mogu utjecati na svaki element SPRC koncepta. Primjerice izgradnjom retencijskih bazena može se pozitivno utjecati na otjecanje oborinskih voda, dok se održivim pristupom prostornog upravljanja može ublažiti uzrok opasnosti – količina generiranog otjecanja oborina. Pritom, pri analizi rizika potrebno je cjelokupni sustav razmatrati integralno te pažljivo procijeniti utjecaj raspoloživih mjera na svaki element sustava.

## 2.5 Razine složenosti procjene urbanih poplava

Razina složenosti uvjetuje odabir metodološkog pristupa, potrebne podatke i podloge, kao i stručne, financijske i druge resurse potrebne za procjenu rizika od urbanih poplava. U okviru EU projekta RAINMAN (Sauer i sur., 2018) opisane su tri razine složenosti s prijedlogom odgovarajućih metoda za analizu opasnosti i ranjivosti te prikladnim razinama za analizu rizika i generiranje karata (Tablica 2.5.1).

Tablica 2.5.1 Razine složenosti procjene poplava u odnosu na ciljeve, mjerilo, raspoloživost podataka i razinu stručnosti stručnjaka (modificirano prema Sauer i sur., 2018).

Razina složenosti	Objašnjenje	Primjer procjene rizika
Razina 1	<p><b>Osnovna razina analize:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indikativne informacije o poplavama</li> <li>• Niska razina angažmana i stručnosti</li> <li>• Primjereno u kontekstu vrlo ograničene raspoloživosti podataka i niskih financijskih resursa</li> </ul> <p><b>Kriteriji:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opasnosti: iskustvo i opažanja</li> <li>• Ranjivosti: iskustvo i opažanja</li> </ul>	Identifikacija prioritetnih područja za upravljanje poplavnim rizicima na temelju iskustvenog znanja o poplavnim događajima i štetnim posljedicama. Bez informacija o stvarnom riziku zbog nedostatka podataka o vjerojatnostima pojave i očekivanim štetama.

<p><b>Razina 2</b></p>	<p><b>Srednja razina analize:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Detaljnije od osnovne analize, ali i dalje samo opće informacije i pojednostavljeni pristupi</li> <li>• Srednja razina angažmana</li> <li>• Primjereno u kontekstu bolje raspoloživosti podataka te više razine stručnog iskustva i dostupnih financijskih resursa</li> </ul> <p><b>Kriteriji:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opasnosti: GIS analize (stacionarno modeliranje)</li> <li>• Ranjivosti: Procjena štetnih posljedica bez podataka o dubini i brzini vode</li> </ul>	<p>Procjena rizika primjenom prostornih analiza o razini mora, odnosno smjerovima toka i zadržavanju oborinske vode te procjena šteta na temelju grube procjene po jedinici površine.</p>
<p><b>Razina 3</b></p>	<p><b>Visoka razina analize:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Detaljni rezultati</li> <li>• Korištenje modernih i naprednih metodoloških pristupa</li> <li>• Primjereno u kontekstu dobre raspoloživosti podataka, visoke razine stručnog iskustva i visokih financijskih resursa</li> </ul> <p><b>Kriteriji:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opasnosti: Nestacionarni modeli i simulacije</li> <li>• Ranjivost: Procjene šteta na temelju dubina i brzina vode</li> </ul>	<p>Modeliranje rizika primjenom hidrološko-hidrauličkih modela te kvantitativna analiza šteta na temelju karakteristika receptora i funkcija dubine-štete, što omogućuje detaljnije planiranje i prijedloge za prioritizaciju mjera.</p>

U nastavku se daju detaljniji primjeri analiza za svaku od navedenih razina složenosti u okviru koncepta modeliranje rizika prema SPRC pristupu (Sauer i sur., 2018). Pritom, treba napomenuti da se prilikom procjene rizika mogu kombinirati različite razine složenosti, ovisno o dostupnim podacima, raspoloživim resursima i karakteristikama područja.

#### 1. Analiza opasnosti (izvor i put):

- Razina 1: Pregled i dokumentiranje povijesnih događaja na terenu (tragovi poplava, nanos sedimenta, erozija, oštećenja).
- Razina 2: Topografska analiza smjera tečenja i analiza prirodnih depresija (visine terena, nagibi terena, oblici reljefa koji su relevantni za otjecanje i poplave).

- Razina 3: Hidrološko-hidrauličko modeliranje (uključujući analizu jakih oborina kao primarni uzrok pluvijalnih poplava, odnosno analizu olujnih uspora i dinamike valova kao primarni uzrok poplava s mora).

## 2. Analiza ranjivosti (receptor i posljedica):

- Razina 1: Pregled i dokumentiranje oštećenja, intervencije vatrogasaca i civilne zaštite.
- Razina 2: Procjena ranjivosti pomoću GIS prostornih analiza uz identificiranje broja izloženih receptora (npr. ljudi, zgrade, duljina cesta, ...) ili površine područja (npr. izgrađena, komercijalna, poljoprivredna...).
- Razina 3: Kvantitativna analiza ranjivosti temeljena na monetarnim indikatorima maksimalnih šteta (npr. primjena funkcija dubine-štete specifičnih za receptor).

## 3. Analiza rizika (kombinacija opasnosti i ranjivosti putem izloženosti).

## 4. Kartiranje opasnosti i rizika (transformacija rezultata analize rizika u statički prikaz ili dinamički geografski informacijski sustav).

## 2.6 Kartiranje poplava - razine, korisnici i sadržaj

U skladu s predstavljenim metodološkim okvirom, Merz i sur. (2007) predlažu da se prilikom procjene rizika od poplava izrade sljedeće karte:

- **Karta opasnosti od poplava** koja za različite vjerojatnosti prikazuje obuhvat poplave, prostornu raspodjelu dubine vode, brzina vode, protoka vode i ostale relevantne indikatore.
- **Karta ranjivosti na poplave** koja za različite vjerojatnosti prikazuje izloženost stanovništva te izgrađenog i prirodnog okoliša i ostalih relevantnih elemenata.
- **Kartu rizika od poplava** koja za različite vjerojatnosti prikazuje prostornu raspodjelu očekivanih šteta ili za pojedine elemente ili po jedinici površine.

Za početak treba napomenuti da karte poplava predstavljaju temelj za izradu plana upravljanja poplavnim rizicima. Pritom, preduvjet za izradu kvalitetnog plana upravljanja poplavnim rizicima je poznavanje prostorne raspodjele te razine opasnosti i rizika od poplava na cjelokupnom promatranom području. Također, kartama poplava će se koristiti različiti dionici, pored spomenutog upravljanja poplavnim rizicima, za planiranje korištenja zemljišta, upravljanje prostorom, planiranje reakcija na prirodne nepogode, podizanje razine svijesti te i u privatnom sektoru, primjerice u

sektoru osiguranja. S obzirom na namjenu, svaki potencijalni korisnik ima specifične zahtjeve u pogledu sadržaja i mjerila karata poplava. U Tablicama 2.6.1. – 2.6.4. dani su prikazi razina, mjerila, korisnika i sadržaja s gledišta različite namjene korištenja karata poplava, prema Priručniku o kartiranju poplava (EXCIMAP, 2007) i Izvješću o pripremi karata (Vincze i sur., 2014).

Tablica 2.6.1 Razine, mjerila, namjene, korisnici i pripadajući sadržaji karata poplava s gledišta upravljanja poplavnim rizicima.

Razina / mjerilo	Namjena	Korisnici / složenost	Sadržaj karata poplava	
			Nužni elementi	Poželjni elementi
Nacionalna / 1:100.000 – 1:1.000.000	Planiranje i prioritizacija mjera upravljanja poplavnim rizicima Nacionalne strategije	Donosioci odluka / lako razumljive i pojednostavljene karte	Obuhvat Rizici Ranjiv okoliš Onečišćenja Imovina	Okvirna ranjivost
Regionalna / 1:25.000 – 1:100.000	Planiranje i prioritizacija mjera upravljanja poplavnim rizicima Regionalne strategije Plan upravljanja poplavnim rizicima na razini slivova Sudjelovanje javnosti	Donosioci odluka Tehničke službe Opća javnost / lako razumljive i pojednostavljene karte	Obuhvat Rizici Ranjiv okoliš Onečišćenja Imovina	Okvirna ranjivost
Lokalna / 1:2.000 – 1:25.000	Planiranje i procjena lokalnih i specifičnih mjera upravljanja poplavnim rizicima Sudjelovanje javnosti	Donosioci odluka Tehničke službe Opća javnost Stručnjaci / Složenije karte	Obuhvat Dubina Brzina	Ranjivost Štete Utjecaj na okoliš

Tablica 2.6.2 Razine, mjerila, namjene, korisnici i pripadajući sadržaji karata poplava s gledišta prostornog planiranja.

Razina / mjerilo	Namjena	Korisnici / složenost	Sadržaj karata poplava	
			Nužni elementi	Poželjni elementi
Nacionalna i regionalna / 1:100.000 – 1:500.000	Prostorno planiranje (nacionalni i županijski planovi) Namjeni zemljišta za razvoj Planiranje koridora za infrastrukturu	Donosioci odluka Prostorni planeri / Pojednostavljene karte	Obuhvat Rizici Ranjiv okoliš Onečišćenja Imovina	Dodatni indikatori relevantni za procjenu opasnosti
Lokalna /	Prostorno planiranje (planovi gradova i općina, urbanistički	Jedinice lokalne samouprave (JLS)	Obuhvat	Dodatni parametri

1:5.000 – 1:25.000 (razina katastra)	planovi uređenja, detaljni planovi) Upravljanje slivnim područjima Podrška odlučivanju u upravljanju područjem.	Prostorni planeri / Pojednostavljene karte		opasnosti (dubina, brzina, trajanje, stupanj)
---	--	--	--	--

Tablica 2.6.3 Razine, mjerila, namjene, korisnici i pripadajući sadržaji karata poplava s gledišta postupanja u slučaju opasnosti, nesreća i katastrofa.

Razina / mjerilo	Namjena	Korisnici / složenost	Sadržaj karata poplava	
			Nužni elementi	Poželjni elementi
Nacionalna i regionalna / 1:100.000 – 1:500.000	Planiranje za velike nesreće i katastrofe koje mogu zahtijevati nacionalnu ili regionalnu intervenciju	Prostorni planeri Civilna zaštita Političari i donosioci odluka	Obuhvat Rizici Pogođeno stanovništvo Pogođena infrastruktura	Dodatni indikator relevantni za procjenu opasnosti, ranjivosti i rizika
Lokalna / 1:5.000 – 1:25.000	Planiranje postupanja u slučaju lokalnih opasnosti	Civilna zaštita Političari i donosioci odluka Hitne službe	Obuhvat Dubina Ranjivost stanovništva Rizici (infrastruktura, onečišćenja, kulturalna baština, itd.)	Povratne informacije u realnom vremenu, gdje i kada je to moguće

Tablica 2.6.4 Razine, mjerila, namjene, korisnici i pripadajući sadržaji karata poplava s gledišta javnosti.

Razina / mjerilo	Namjena	Korisnici / složenost	Sadržaj karata poplava	
			Nužni elementi	Poželjni elementi
Lokalna / 1:5.000 – 1:25.000	Javne informacije o poplavama	Opća javnost Stručna javnost / Lako razumljive karte	Obuhvat Dubina	Povijesne poplave Brzina, protok, erozija, debritni tokovi, i ostalo relevantno za pojedino područje.

## 3 Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar

### 3.1 Metodološki okvir procjene opasnosti i rizika

U Knjizi 2 ove Studije (Procjena opasnosti i rizika od poplava uslijed jakih oborina na pilot područjima) provedene su analize pluvijalnih poplava na šest pilot područja na makro razini. Makro razina definirao je cjelokupnim slivom koji gravitira predmetnom naselju. U ovom dokumentu provedena je vrlo slična analiza pluvijalnih poplava ali na podlogama više rezolucije i manjeg obuhvata – urbanog dijela naselja Zadar.

Procjena rizika od poplava uslijed jakih oborina – pluvijalnih poplava – u predmetnoj studiji provedena je u skladu sa Zakonom o vodama (NN 66/2019), Direktivom o poplavama (EC 2007/60/EZ) te Priručnikom o kartiranju poplava (EXCIMAP, 2007). Analiza rizika od poplava stoga uključuje analize opasnosti od poplava i analize ranjivosti na poplave. U nastavku se daje sažeti opis odabrane metodologije za procjenu rizika od pluvijalnih poplava. Opasnosti od poplava procijenjeni su putem hidrološko-hidrauličkih simulacija površinskog otjecanja oborinskih voda. Osnovna podloga za navedene simulacije su oborine definirane projektnim pljuskom za različite vjerojatnosti. Rezultat analiza opasnosti od poplava su karte dubina i brzina vode te razine opasnosti za svaku promatranu vjerojatnost.

Ranjivost je analizirana procjenom izloženosti i podložnosti receptora poplava. Pritom je izloženost analizirana za korištenje zemljišta, javne usluge, izvore onečišćenja, kulturu baštinu, zaštićena područja i građevine. Izloženost prikazuje identificirane receptore koje se nalaze unutar obuhvata poplave za svaku promatranu vjerojatnost. Podložnost je procijenjena s obzirom na krivulje dubine-štete, koje definiraju postotak štete s obzirom na dubinu vode te namjenu korištenja zemljišta unutar koje se nalazi pojedina građevina. Za razliku od makro razine (Knjiga 2) u predmetnoj analizi na mezo razini procjena podložnosti provedena je uz zemljišta i za pojedinačne objekte.

Kvalitativni rizik je procijenjen na osnovu kombinacije razine opasnosti i izloženosti te prikazuje razinu rizika (razine R0 – R4) svake izložene građevine za svaku promatranu vjerojatnosti. Rizik je također analiziran kvantitativno procjenom očekivanih direktnih šteta, na osnovu opasnosti i ranjivosti. Pritom su korištene karte dubina vode, karte izloženosti zemljišta, poligoni građevina,

krivulje dubine-štete te prosječne vrijednosti receptora kako bi se izradila karta direktnih šteta izražena u postocima i EUR/m<sup>2</sup>. Konačan rezultat je krivulja šteta za različite vjerojatnosti.

U odnosu na razine složenosti procjene rizika predstavljene u poglavlju 2.5, predmetna analiza se provodi na visokoj razini složenosti, sa sljedećim pojedinačnim karakteristikama (Tablica 3.1.1).

1. Analiza opasnosti (izvor i put):

- **Razina 3:** Hidrološko-hidrauličko modeliranje (uključujući analizu jakih oborina kao primarni uzrok pluvijalnih poplava).

2. Analiza ranjivosti (receptor i posljedica):

- **Razina 2:** Procjena ranjivosti pomoću GIS prostornih analiza uz identificiranje broja izloženih receptora (građevine) i površine područja (namjena korištenja zemljišta).
- **Razina 3:** Kvantitativna analiza ranjivosti temeljena na monetarnim indikatorima maksimalnih šteta (primjena funkcija dubine-štete specifičnih za klasu korištenja zemljišta).

3. Analiza rizika (kombinacija opasnosti i ranjivosti putem izloženosti).

4. Kartiranje opasnosti i rizika (transformacija rezultata analize rizika u statički prikaz – PDF karte - i dinamički geografski informacijski sustav – GIS datoteke).

Tablica 3.1.1 Razina složenosti procjene rizika u predmetnoj studiji

Element SPRC	Metoda	Razina složenosti		
		Razina 1	Razina 2	Razina 3
<b>Uzrok</b>	<b>Povijesne poplave</b> vremenske rezolucije 5 min. <b>Projektni pljusak</b> trajanja 1, 3, 6, 12, i 24 h za scenarije velike, srednje i male vjerojatnosti (VGP 20, 4, i 1 %). <b>Infiltracija opisana SCS metodom</b> i prostorno promjenjivim CN brojevima krivulje.			x
<b>Put</b>	<b>Hidrološko-hidrauličke nestacionarne simulacije</b> površinskog otjecanja oborinskih voda. <b>2D numerički model</b> (HEC-RAS 6.0) Indikatori: <b>Dubina, brzina, protok.</b>			x
<b>Receptor</b>	<b>GIS analiza:</b> Broj građevina, namjena korištenja zemljišta, kulturna baština, zaštićena područja, javne usluge i lokacije objekata koje mogu prouzročiti onečišćenje.		x	

<b>Posljedica</b>	<p>Podložnost štetnim posljedicama putem <b>funkcija dubine-štete</b>.  <b>Procjene direktnih šteta na razini objekta i na razini piksela (za zemljišta)</b> s obzirom na dubinu vode, funkcije dubine-štete, tablične vrijednosti maksimalnih šteta i kartu namjene korištenja zemljišta.</p>			<b>x</b>
-------------------	--	--	--	----------

## 3.2 Metodologija analize opasnosti od pluvijalnih poplava

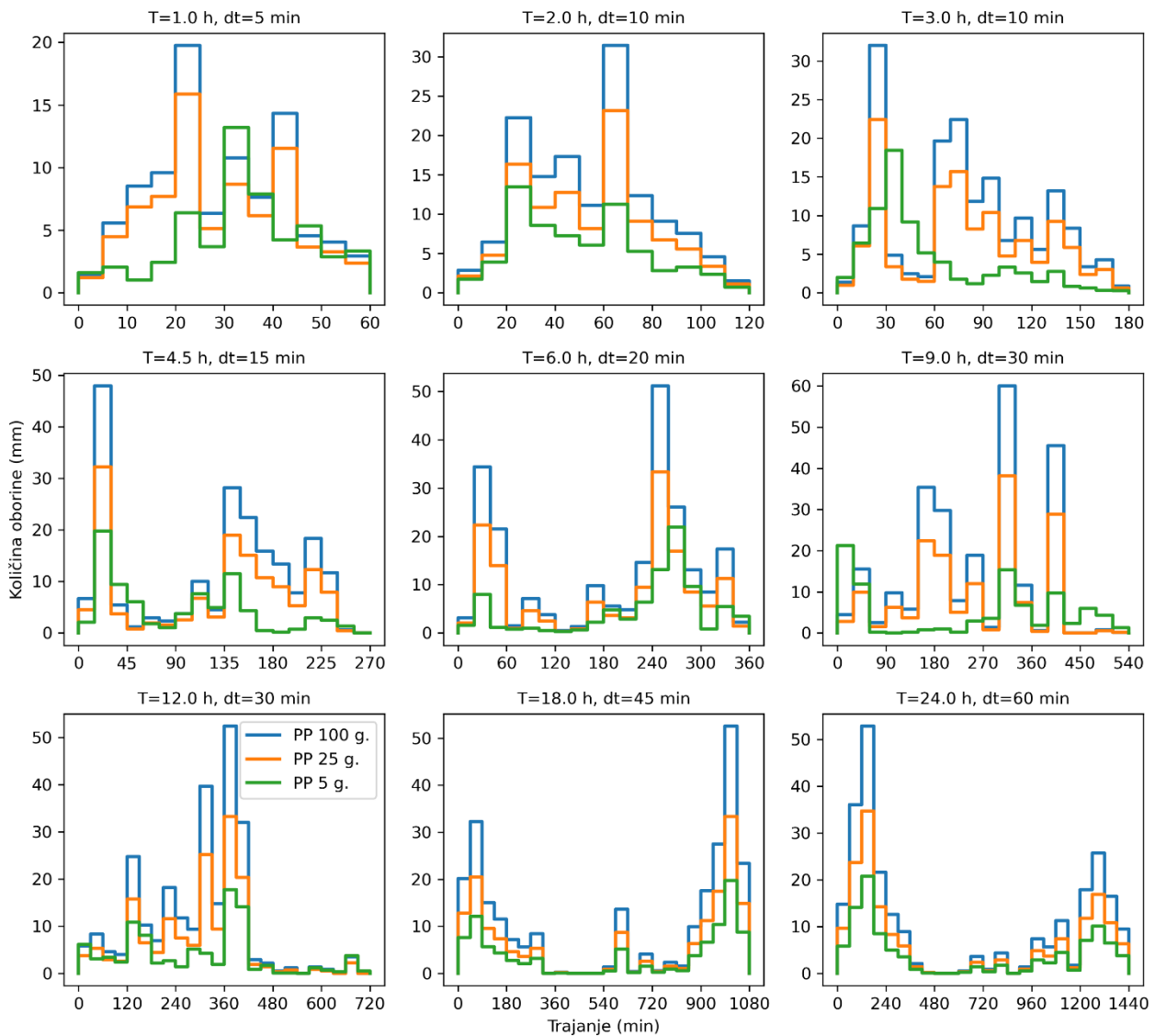
### 3.2.1 Priprema podloga za procjenu opasnosti od poplava

Za potrebe procjene opasnosti od poplava pripremljene su meteorološke i prostorne podloge koje se detaljnije opisuju u nastavku.

#### 3.2.1.1 Meteorološke podloge za procjenu opasnosti od poplava

Analiza oborina provedena je u „Studiji analize oborina na pilot područjima“ (Knjiga 1 ovog projekta) u kojoj su definirane HTP krivulje (količina – trajanje – vjerojatnost oborine) za pet ombrografskih postaja vezanih uz odabrana pilot područja. Za predmetne analiza korišteni su podaci s postaje Zadar, za koju su dostupni podaci iz razdoblja 1961. – 2020. Konačan rezultat analize oborina su pluviogrami projektnog pljuska kojima su definirane sintetičke oborine različitog trajanja za tri vjerojatnosti (povratni period 5, 25 i 100 godina). Primjer dobivenih rezultata oblika projektnog pljuska (pluviogrami) za postaju Zadar prikazan je na Slici 3.2.1.





Slika 3.2.1 Primjer sintetičke oborine – pluviogram projektne pljuska – za pilot područje Zadar.

### 3.2.1.2 Prostorne podloge za procjenu opasnosti od poplava

U svrhu provedbe hidrološko-hidrauličke analize otjecanja oborinskih voda, odnosno procjene opasnosti od poplava, prikupljene su i generirane prostorne podloge. U Tablici 3.2.1 dan je pregled svih prikupljenih i generiranih prostornih podloga s opisom i izvorom.

Tablica 3.2.1 Pregled prikupljenih i generiranih prostornih podloga za potrebe procjene opasnosti od pluvijalnih poplava

Podloga	Tip podatka	Izvor
Katastar poplava	Vektorski (poligoni i točke)	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru)
Digitalni model terena (DMT)	Rasterski, rezolucija 1 m	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru) na temelju digitalnog modela reljefa (DMR) nabavljenog od Državne geodetske uprave (DGU).
Karta zemljišnog pokrova	Rasterski, rezolucija 1 m	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru).
Karte nepropusnosti podloge (Imperviousness Density)	Rasterski, rezolucija 10m	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Originalni izvor: Copernicus Land Monitoring Service.
Građevine	Vektorski (poligoni), rasterizirano na rezoluciju 1 m	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Originalni izvor: OpenStreetMap.
Prometna infrastruktura	Vektorski (linije), rasterizirano na rezoluciju 1 m	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Originalni izvor: OpenStreetMap.
Karta hrapavosti podloge	Rasterski, rezolucija 1 m	Generirano na temelju karte zemljišnog pokrova i rasteriziranog sloja prometnica, prema tabličnim vrijednostima iz literature.
Karta infiltracije (CN brojevi krivulje)	Rasterski, rezolucija 1 m	Generirano na temelju karte zemljišnog pokrova, rasteriziranog sloja prometnica i karte hidrološke grupe tla prema tabličnim vrijednostima iz literature.

Digitalni model terena rezolucije 1 m izrađen je od strane stručnog tima Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru na temelju vektorskih podataka digitalnog modela reljefa (DMR). Na osnovu navedenog modela terena izrađen je hibridni model koji sadrži dvije modifikacije:

- 1) U DMR su „utisnute“ sve prometnice iz OSM-a za 20 cm (prosječna visina rubnjaka). Pritom su sve prometnice originalno u linijskom formatu pretvorene u poligone širine koja odgovara razredu prometnice (širine od 5 – 12 m).
- 2) DMR je na lokacija svih građevina, također preuzetih iz OSM-a, podignut za 30 cm (prosječna visina temelja).

Na Slici 3.2.2. prikazana je usporedba digitalnog modela terena rezolucije 5 m (model terena koji je korišten za makro razinu – Knjiga 2 ove studije) i hibridnog modela terena rezolucije 1 m (model korišten na mezo razini – predmetna analiza).

Za procjenu hrapavosti i infiltracije korištena je karta pokrova zemljišta Urbani Atlas (UA). Navedena karta je najdetalnija službena karta pokrova zemljišta na području EU i Republike Hrvatske, a izrađena je kombinacijom statističke klasifikacije i vizualne interpretacije multispektralnih satelitskih snimaka vrlo visoke rezolucije (2 do 2,5 m). Za procjenu gustoće urbanih područja UA sloja koristi se sloj visoke rezolucije izgrađenih područja (eng. *Imperviousness density, IMD*). Definirana CLC nomenklatura za UA sloj uključuje 27 klasa koje su raspoređene u 4 razine, od kojih svaka opisuje različit pokrov zemljišta. Vektorski podaci su dostupni u mjerilu 1 : 10 000 s minimalnim područjem kartiranja od 0.25ha za urbane klase i 1ha za ruralne klase. Na četvrtoj razini klasifikacije zemljišnog pokrova definirano je ukupno 17 urbanih i 10 ruralnih klasa.

S obzirom da ne postoje unificirane i opće prihvaćene vrijednosti hrapavosti podloge s obzirom na klase zemljišnog pokrova, provedena je analiza koeficijenta hrapavosti iz različitih izvora (Burek i sur., 2014; USACE, 2021; NRCS, 2016; Babister i Barton, 2012). Konačna vrijednost dobivena je usrednjavanjem svih vrijednosti za pojedinačnu klasu pokrova zemljišta. Pritom, korišten je, najšire rasprostranjeni, Manningov koeficijent hrapavosti (Chow, 2010). Infiltracijski kapacitet podloge opisan je CN brojem krivulje prema NRCS metodologiji (USDA, 2017; Hong i Adler, 2008) te su svakoj klasi pokrova zemljišta pridodane odgovarajuće vrijednosti. U Tablici 3.2.3 dan je prikaz usvojenih vrijednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti i CN brojeva krivulja za četiri hidrološke grupe tla.

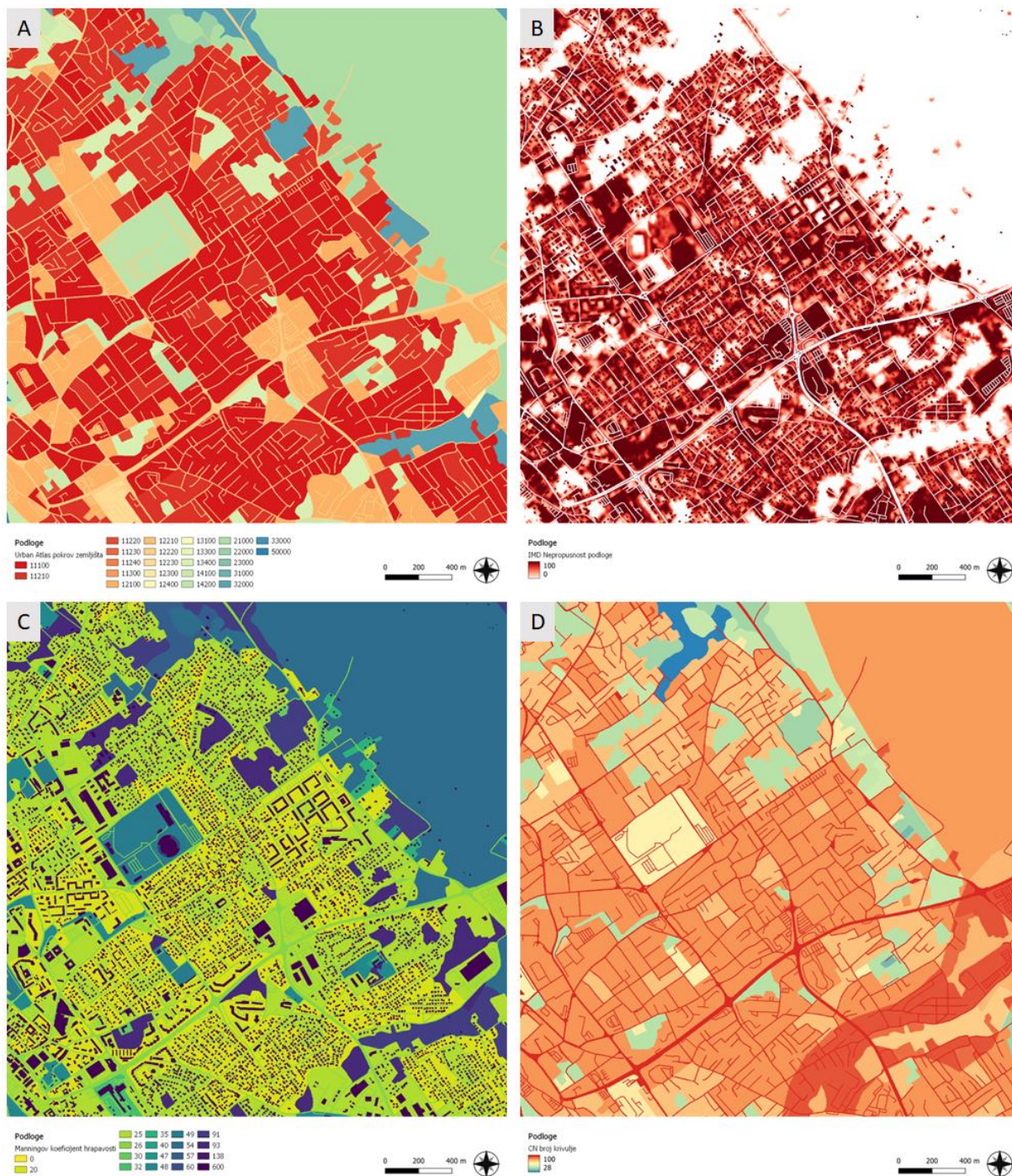


Slika 3.2.2 Satelitska snimka dijela naselja Zadar te usporedba digitalnog modela terena 5-m rezolucije (makro razina) i hibridnog model terena 1-m rezolucije (mezo razina).

Tablica 3.2.2 Manningov koeficijent hrapavosti i CN broj krivulje (infiltracija) za četiri hidrološke grupe tla za svaku klasu pokrova zemljišta prema Urban Atlas karti.

Klasa	Kod klase	n	CN A	CN B	CN C	CN D
Cjelovita urbana područja (>80% površine)	11100	0.03	85	90	93	94
Nepovezana urbana područja veće gustoće (50-80%)	11210	0.035	77	85	90	92
Nepovezana urbana područja srednje gustoće (30-50%)	11220	0.04	68	80	87	90
Nepovezana urbana područja manje gustoće (10-30%)	11230	0.045	54	70	80	85
Nepovezana urbana područja vrlo male gustoće (<10%)	11240	0.05	39	59	72	80
Izdvojena područja	11300	0.05	39	59	72	80
Industrijski, komercijalni, javni, vojni i privatni objekti	12100	0.035	85	90	93	94
Brze ceste i pripadajuće zemljište	12210	0.026	98	98	98	98
Ostale ceste i pripadajuće zemljište	12220	0.026	98	98	98	98
Željeznice i pripadajuće zemljište	12230	0.032	69	80	85	88
Lučke površine	12300	0.03	85	90	93	94
Zračne luke	12400	0.03	85	90	93	94
Mjesta eksploatacija mineralnih sirovina i odlagališta otpada	13100	0.093	49	69	79	84
Gradilišta	13300	0.093	49	69	79	84
Područja bez trenutne namjene	13400	0.093	49	69	79	84
Zelene gradske površine	14100	0.048	49	69	79	84
Športsko rekreacijske površine	14200	0.049	67	80	87	91
Oradivo zemljišta, jednogodišnji nasadi	21000	0.054	52	69	79	84
Višegodišnji nasadi	22000	0.057	28	52	67	75
Pašnjaci	23000	0.047	44	63	75	85
Šume	31000	0.138	38	62	75	81
Grmolike i travnate, prirodne biljne zajednice	32000	0.091	45	65	75	80
Otvorene površine sa malo ili bez vegetacije	33000	0.035	70	81	88	92
Vodene površine	50000	0.026	100	100	100	100

Na Slici 3.2.3 dan je primjer svih korištenih prostornih podloga – prikupljene podloge digitalnog modela terena, karte nepropusnosti podloge, karte hidrološke grupe tla, karte pokrova zemljišta te generirane podloge karte Manningovog koeficijenta hrapavosti i karte infiltracije opisane CN brojem krivulje. Treba napomenuti da su s ciljem postizanja što realnije simulacije otjecanja oborinskih voda u urbanim sredinama, a uzimajući u obzir mogućnosti koje pružaju podloge visoke rezolucije, provedene dvije dodatne prilagodbe (unaprjeđenja) podloga.



Slika 3.2.3 Prostorne podloge za procjenu opasnosti od poplava (detalj): a) Urban Atlas pokrov zemljišta b) nepropusnost podloge (%), c) Manningov koeficijent hrapavosti ( $10^{-3} \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ) i d) CN broj krivulje

Prvo, unutar tlocrtna površine svih građevina zadan je vrlo visoki koeficijent hrapavosti ( $n=0.6 \text{ m}^{-1/3}$ ) kako bi se „onemogućilo“ površinsko otjecanje vode preko građevina, odnosno kako bi se što realnije simulirao tok oborinskih voda oko i između izgrađenih objekata. Na ovaj način smanjuje se protjecajni profil što može rezultirati većim (i realnijim) brzinama toka oborinskih voda u urbanim sredinama u odnosu na model koje ne uključuje utjecaj građevina (što je slučaj na makro razini).

Drugo, unutar površine svih prometnica i parkirališta zadana je kontinuirana infiltracija površinskih voda kako bi se simulirao rad sustava za odvodnju oborinskih voda. Navedeno se smatra realnijim pristupom u odnosu na umanjenje efektivne oborine, što je česti pristup u praksi modeliranja površinskog otjecanja oborinskih voda. Procjena protoka na koji je dimenzioniran javni sustav odvodnje oborinskih voda provedena je prema relevantnoj projektnoj dokumentaciji - Studiji kanalizacije grada Zadra (Građevinski institut Zagreb, 1991.) i Idejnom projektu sustava odvodnje otpadnih voda „Centar“ - Zadar (Hidroprojekt-ing, 1999.). Prema navedenoj dokumentaciji sustav odvodnje oborinskih voda Grada Zadra dimenzioniran je na povratni period od 0,5 godina te za vrijeme koncentracije sliva od 15 minuta. Intenzitet navedene oborine prema ITP krivuljama (1961.-1993.) iz Idejnog projekta (Hidroprojekt-ing, 1999.) iznosi 0,882 mm/min, što je umanjeno za 30% kako bi se uključio utjecaj (ne)održavanja komunalne infrastrukture.

### 3.2.2 Definiranje scenarija za procjenu opasnosti od poplava

Analiza opasnosti od poplava je provedena za poplave male, srednje i velike vjerojatnosti, pri čemu su navedene vjerojatnosti vezane uz povratni period odnosno vjerojatnost godišnjeg premašenja, kako je to prikazano u Tablici 3.2.3.

Tablica 3.2.3 Odabrani scenariji za analizu opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava

Scenarij	Povratni period (PP)	Vjerojatnost godišnjeg premašenja (VGP)
Poplava velike vjerojatnosti	5	20%
Poplava srednje vjerojatnosti	25	4%
Poplava male vjerojatnosti	100	1%

Poplava velike vjerojatnosti odgovara vjerojatnosti godišnjeg premašenja (VGP) od 20%, poplava srednje vjerojatnosti odgovara VGP od 4%, dok poplava male vjerojatnosti odgovara VGP od 1%. Analiza opasnosti provedena je uz pretpostavku izjednačenosti vjerojatnosti pojave jakih oborina i pluvijalnih poplava (primjerice oborina koja ima vjerojatnost godišnjeg premašenja 4% rezultira poplavom koja ima vjerojatnost godišnjeg premašenja 4%).

### 3.2.3 Uspostava matematičkog modela površinskog otjecanja jakih oborina

Analiza opasnosti od poplava zasniva se na hidrološko-hidrauličkim simulacijama površinskog otjecanja jakih oborina. U tu svrhu korišten je matematički model HEC-RAS 6.0 (Brunner, 2021), računalni program za hidrauličke proračune koji omogućava proračun jednodimenzijskog (1D) i dvodimenzijskog (2D) stacionarnog i nestacionarnog toka površinskih voda. Bitno je spomenuti da navedeni model dopušta definiranje vremenske raspodjele oborina po cijeloj površini 2D domene (tzv. *rain-on-grid*) te dodatne hidrološke elemente proračuna, prvenstveno infiltracije vode u podlogu, koja se može definirati konstantnim koeficijentima, empirijskom SCS metodom ili fizikalnom Green-Ampt jednadžbom.

Uspostava matematičkog modela površinskog otjecanja jakih oborina sastoji se od sljedećih koraka:

- a) Definiranje digitalnog modela terena
- b) Definiranje prostornih parametara procesa infiltracije
- c) Definiranje prostorne gustoće izgrađenosti (nepropusnosti)
- d) Definiranje prostorne raspodjele hrapavosti
- e) Definiranje prostorne domene modela i generiranje proračunske mreže
- f) Definiranje rubnih uvjeta
- g) Definiranje parametara numeričkog proračuna
- h) Definiranje scenarija

Na Slici 3.2.4 prikazan je primjer definiranog digitalnog modela terena i proračunske mreže uz satelitski snimak izdvojenog područja. Sve podloge, uključujući i digitalni model terena, karta CN brojeva, karta nepropusnosti podloge i karta hrapavosti direktno su implementirani u matematički model HEC-RAS na temelju prostornih podloga prikazanih u poglavlju 3.2.1.

Prostorna domena modela odgovara površini sliva, međutim granica domene je proširena za 200 m i modificirana (ublažena) na mjestima naglih promjena rubnih linija. Na ovaj način obuhvaćeni su i procesi na rubovima sliva te je osigurana stabilnost proračuna. Proračunska mreža definirana je



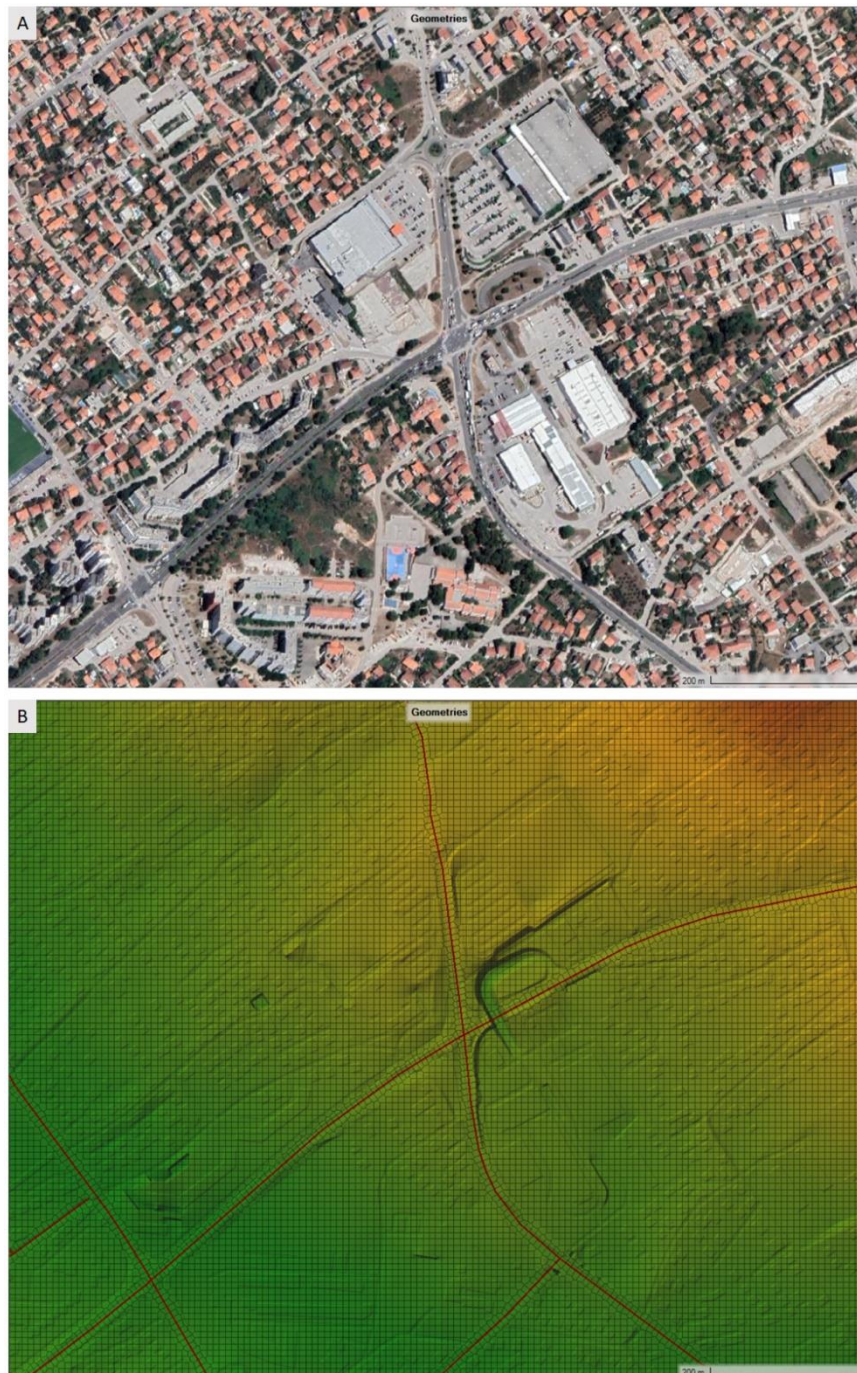
unutar domene modela, korištena je strukturirana pravokutna mreža širine 8,0 m, koja je modificirana uzduž glavnih prometnica i osi kanala (Slika 3.2.4b).

U modelu su definirana tri rubna uvjeta, dva na granicama domene (linijski rubni uvjeti) i jedan po cjelokupnoj površini domene (površinski rubni uvjet):

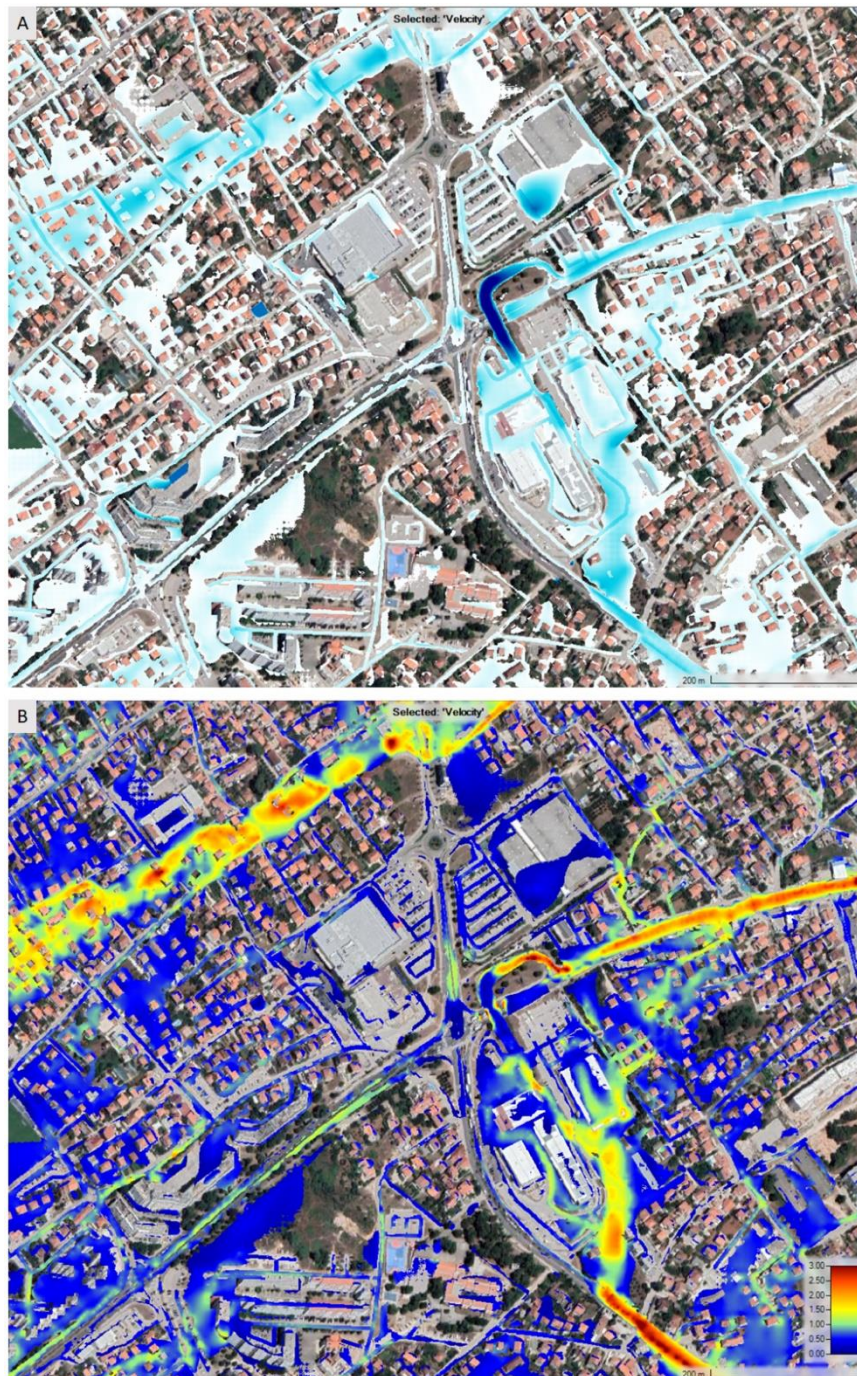
- Na kopnenoj granici domene zadan je uvjet normalnog toka uz prosječni nagib terena.
- Na morskoj granici domene zadana je visoka razina mora (+0,5 m n.m.).
- Po površini domene definirana je prostorno homogena, ali vremenski varijabilna oborina u obliku pluviograma (projektni pljusak, poglavlje 3.2.1.1).

U svrhu numeričke analize toka vode korišten je nestacionarni 2D proračun te sustav jednadžbi opisan metodom difuznog vala (eng. *Diffusion Wave*) uz vremenski promjenjiv vremenski korak. Za implicitni proračun korišten je parametar  $\theta = 1,0$ , a za rješavanje matrica korišten je PARDISO algoritam (Brunner, 2021). Vremenski korak dinamički se računa s obzirom na CFL broj u rasponu od 0,8 do 4,0.

Za svako pilot područje provedena je analiza tri scenarija (Tablica 3.2.3), a za svaki scenarij provedeno je pet proračuna za trajanja oborine od 1, 3, 6, 12, 24 sata. Dodatno je provedena i reanaliza tri povijesna poplavna događaja. Stoga je ukupno provedeno po 18 računskih simulacija po svakom pilot području. Rezultat simulacije je vremenski zapis dinamike površinskog otjecanja, a rezultati se daju u obliku maksimalnih zabilježenih dubina i brzina vode (Slika 3.2.5). Konačan rezultat je dan u obliku anvelope maksimalnih vrijednosti svih navedenih parametara za svaki pojedini scenarij (tri rezultata za svako pilot područje).



Slika 3.2.4 Primjer definiranih prostornih podloga u HEC-RAS modelu: a) satelitska snimka dijela sliva, b) digitalni model terena s proračunskom mrežom.



Slika 3.2.5 Primjer rezultat HEC-RAS proračuna: a) prostorna raspodjela dubina, b) prostorna raspodjela brzina.

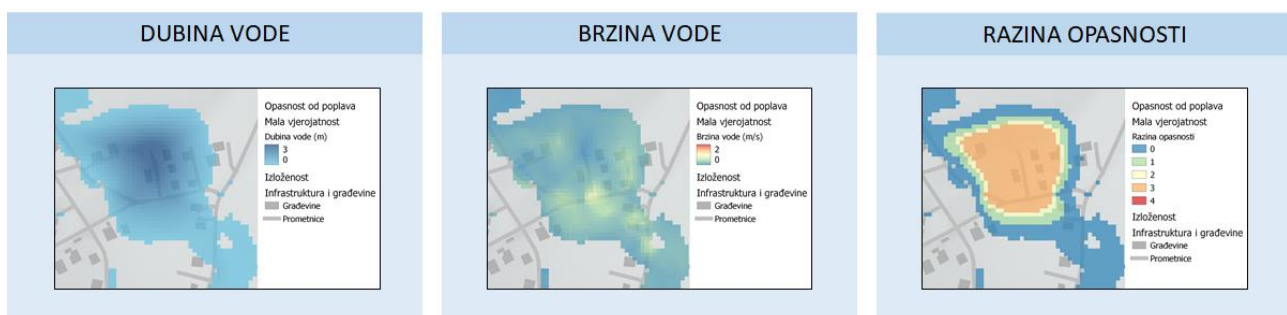
### 3.2.4 Indikatori opasnosti od poplava

Opasnost od pluvijalnih poplava izražena je prema tri indikatora za tri scenarija (vjerojatnosti):

- **Dubina vode.**
- **Brzina vode.**
- **Razina opasnosti.**

Slika 3.2.6 prikazuje primjer sva tri navedena indikatora za jedan scenarij. Dubina vode u poplavljenom području ima najznačajniji utjecaj na štete od poplava i smatra se osnovnim indikatorom opasnosti od poplava. Brzina vode također utječe na razinu štete na objektima, međutim ovaj indikator je bitan faktor i za procjenu opasnosti za stanovništvo, odnosno stabilnost ljudi i stabilnost vozila. Za procjenu (ne)stabilnosti ljudi dodatan indikator je i specifični protok vode (umnožak dubine i brzine vode), koji se u predmetnoj studiji računa, ali ne prikazuje u obliku zasebne karte. U svrhu jasnije ocjene opasnosti za stanovništvo, vozila i građevine provodi se i procjena razine opasnosti.

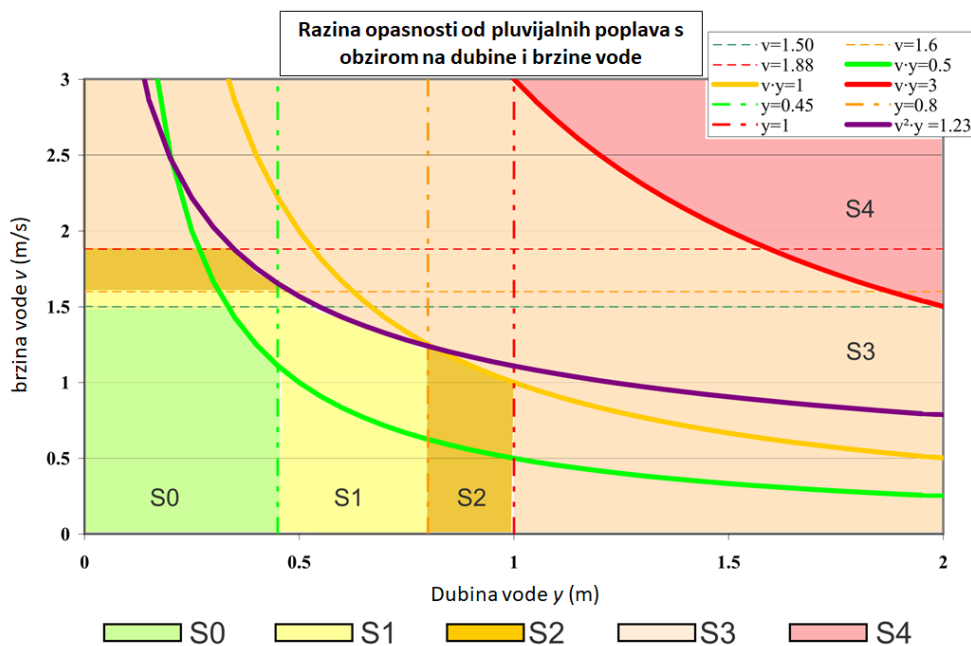
Procjena razine opasnosti u predmetnoj studiji provodi se prema SUFRI metodologiji, koja je proizašla kao rezultat europskog projekta *Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management* (Escuder-Bueno i sur., 2011). U okviru ovog projekta definirane su održive strategije upravljanju poplavnim rizicima, koje uključuju analizu ranjivosti, napredni sustav ranog upozoravanja na poplave te komunikaciju s ciljem optimizacije upravljanja rizicima. Posebna pozornost u okviru SUFRI projekta posvećena je analizi ranjivosti i rizika od poplava za stanovništvo te je predložena metodologija procjene razine opasnosti koja uključuje indikatore dubine vode ( $y$ ), brzine vode ( $v$ ) te parametre otpora ( $yv$ ) i parametre klizanja ( $v^2y$ ). Kriteriji za procjenu razine opasnosti prikazani su u Tablici 3.2.4 te na Slici 3.2.7.



Slika 3.2.6 Primjer odabranih indikatora opasnosti od pluvijalnih poplava: dubina vode, brzina vode i razina opasnosti.

Tablica 3.2.4 Tablični prikaz uvjeta za proračun razine opasnosti (modificirano prema SUFRI, 2011)

Razina opasnosti		Dubina $y$ (m)	Brzina $v$ (m/s)	Parametar otpora $vy$ ( $m^2/s$ )	Parametar klizanja $v^2y$ ( $m^3/s^2$ )
<b>S0</b>	<b>Neznatna opasnost.</b> Ne očekuju se ozljede ljudi.	$< 0,45$	$< 1,50$	$< 0,50$	$< 1,23$
<b>S1</b>	<b>Niska opasnost.</b> Moguće narušavanje stabilnosti, stanovništvo u opasnosti.	$< 0,80$	$< 1,60$	$< 1,00$	$< 1,23$
<b>S2</b>	<b>Umjerena opasnost.</b> Značajno narušavanja stabilnosti. Automobili mogu izgubiti kontakt s podlogom. Voda može odnijeti manje objekte.	$< 1,00$	$< 1,88$	$< 1,00$	$< 1,23$
<b>S3</b>	<b>Visoka opasnost.</b> Velika opasnost za stanovništvo. Niska opasnost za građevine.	$\geq 1,00$	$\geq 1,88$	$\geq 1,00$	$\geq 1,23$
<b>S4</b>	<b>Vrlo visoka opasnost.</b> Mogu se očekivati strukturalna oštećenja građevina.	$\geq 1,00$	$\geq 1,88$	$\geq 3,00$	$\geq 1,23$



Slika 3.2.7 Grafički prikaz uvjeta za proračun razine opasnosti (modificirano prema SUFRI, 2011)

### 3.3 Metodologija analize rizika od pluvijalnih poplava

#### 3.3.1 Priprema podloga za procjenu rizika od poplava

U svrhu procjene ranjivosti i rizika od poplava prikupljene su i generirane tablične podloge vezane uz maksimalne štete te funkcije koje definiraju odnos dubine vode i očekivane štete, kao i različite prostorne podloge koje se detaljnije prikazuju i opisuju u nastavku.

##### 3.3.1.1 Prostorne podloge za procjenu ranjivosti i rizika

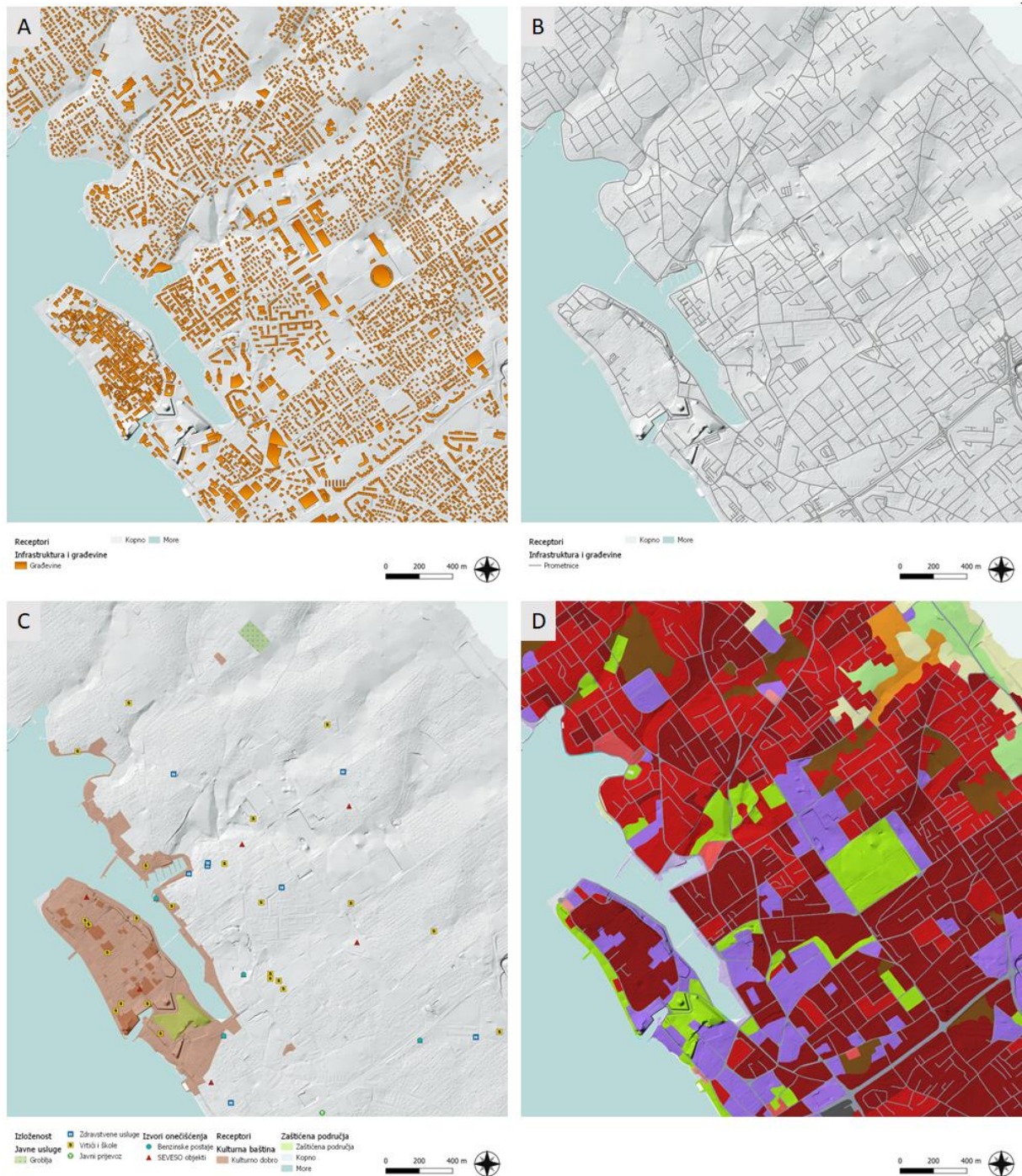
U Tablici 3.3.1. dan je pregled svih prikupljenih i generiranih prostornih podloga s opisom i izvorom, a na Slici 3.3.1 primjer navedenih podloga na dijelu pilot područja Zadar.

Tablica 3.3.1 Pregled prikupljenih i generiranih prostornih podloga za potrebe procjene ranjivosti i rizika od poplava

Podloga	Tip podatka	Izvor
Namjena korištenja zemljišta	Rasterski, rezolucija 1 m	Generirano objedinjavanjem različitih razina karata namjene korištenja zemljišta dobivenih od Naručitelja (izvor: Copernicus Land Monitoring Service) i namjene korištenja zemljišta iz OpenStreetMap baze podataka.
Stanovništvo	Vektorski (točke)	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Prostorna analiza javno dostupnih podataka o gustoći stanovništva (WorldPop), statističkih podataka o ukupnom broju stanovnika po naseljima u RH (DZS) te vektorskih podataka o građevinama (OpenStreetMap).
Građevine	Vektorski (poligoni)	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Originalni izvor: OpenStreetMap.
Prometna infrastruktura	Vektorski (linije)	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Originalni izvor: OpenStreetMap.
Javne usluge	Vektorski (točke)	Dobiveno od Naručitelja (pripremio tim s Odjela za geografiju Sveučilišta u Zadru). Lokacije javnog

		prijevoza, vrtića, škola, zdravstvenih ustanova, groblja.
Lokacije objekata koje mogu prouzročiti iznenadno onečišćenje	Vektorski (točke)	Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. Registar onečišćivača, postrojenja u kojima su prisutne opasne tvari (SEVESO), odlagališta otpada, lokacije odbačenog otpada, benzinske postaje i skladišta.
Kulturna baština	Vektorski (poligoni)	Ministarstvo kulture. Kulturna dobra RH.
Zaštićena područja	Vektorski (poligoni)	Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. Zaštićena područja RH.

Metodološki pristup definiranju postojećih klasa korištenja i namjene površina temelji se na prostornim podacima iz postojećih baza Copernicus programa, konkretnije na području Zadra radi se o Urban Atlasu. Metodologija generiranja i reklasifikacije konačne karte korištenja površina za potrebe analize rizika detaljnije je opisan u Knjizi 2 ove Studije. Treba napomenuti da se Urban Atlas odlikuje najkvalitetnijom prostornom informacijom u usporedbi sa ostalim vrstama prostornih informacija o pokrovu zemljišta iz Copernicus program.



Slika 3.3.1 Prostorne podloge za procjenu ranjivosti i rizika od poplava: a) građevine, b) prometna infrastruktura, c) javne usluge i lokacije potencijalnih onečišćenja, d) namjena korištenja zemljišta.



### 3.3.1.2 Tablične podloge za procjenu ranjivosti i rizika

Tablične podloge prikupljene su i sistematizirane u svrhu procjene ranjivosti, odnosno direktnih šteta od poplava, a sastoje se od dvije grupe podataka:

- **Maksimalne štete** za različite namjene korištenja zemljišta.
- **Funkcije dubine-štete** za različite namjene korištenja zemljišta.

Obje grupe podataka, kao i metodologija za procjenu šteta, preuzeta je iz vodiča *Global flood depth-damage functions* (Huizinga i sur., 2017). U navedenom priručniku provedena je sveobuhvatna analiza vrijednosti, šteta i funkcija dubine-štete koje se koriste u različitim državama te su dane preporuke na globalnoj razini te po kontinentima i državama. Sve štete i funkcije vezane su uz šest klasa namjene korištenja zemljišta:

- Stambena namjena (RES)
- Komercijalna namjena (COM)
- Industrijska namjena (IND)
- Prijevoz i promet (TRA)
- Prometna infrastruktura (INF)
- Poljoprivredna namjena (AGR)

Za svaku kategoriju u Vodiču dane su vrijednosti izgradnje (eng. *construction cost*) iz 2010. godine. Za neke kategorije (RES, COM, IND i AGR) dostupne su vrijednosti za Hrvatsku, dok su za preostale dvije kategorije (TRA, INF) dostupne samo vrijednosti na razini EU. U slučaju kada nisu dostupni podaci za Hrvatsku, isti su ekstrapolirani iz vrijednosti za EU s obzirom na omjer bruto domaćeg proizvoda (BDP) po stanovniku između EU i Hrvatske za 2010. godinu. Svi podaci su potom ekstrapolirani na razinu 2020. godine s obzirom na indeks potrošačkih cijena (CPI). Oba ekonomska pokazatelja (BDP i CPI) su preuzeta iz službene baze podataka Svjetske banke za odgovarajuću godinu. U Tablici 3.3.2 dan je prikaz BDP-a za EU i Hrvatsku za 2010 godinu, potom CPI-a za Hrvatsku za 2010. i 2020. godinu te na kraju vrijednosti troška izgradnje za svih šest kategorija za Hrvatsku u 2020. godini.

Nakon što su određeni i sistematizirani podaci o troškovima izgradnje za različite kategorije namjene korištenja zemljišta, provedena je procjena maksimalnih šteta prema metodologiji iz Vodiča (Huizinga i sur., 2017). Pritom je u obzir uzeto nekoliko faktora korekcije, kao što su omjer između troška izgradnje i amortizacije, maksimalne vrijednosti inventara i sadržaja objekata, postotak neoštećenog dijela te faktor korekcije vezan uz materijal koji je korišten za izgradnju objekata.

Pritom, kategorija stambene namjene dodatno je podijeljena na više kategorija s obzirom na gustoću izgrađenosti, odnosno nepropusnost podloge (IMD).

Tablica 3.3.2 Osnovni podaci o trošku izgradnje svih kategorija namjene korištenja zemljišta za Hrvatsku u 2020. godini (sivom bojom su označene preuzete vrijednosti, a bijelo izračunate).

	Europa	Hrvatska	
	2010	2010	2020
BDP / st. (USD)	43.097	13.501	
CPI		100	109,986

Kategorija	(EUR/m <sup>2</sup> )	(EUR/m <sup>2</sup> )	(EUR/m <sup>2</sup> )
RES		1.027	1.129,6
COM		1.041	1.145
IND		639	702,8
TRA	751	235,3	258,8
INF	24	7,5	8,2
AGR		0,15	0,16

U nastavku se daju faktori korekcije za procjenu maksimalnih šteta, koji su djelomično preuzeti iz Vodiča (Huizinga i sur., 2017), a djelomično nadopunjeni iskustvenim procjenama za predmetna pilot područja.

### 1. Trošak izgradnje vs. Amortizacija

Faktor korekcije (množi trošak izgradnje)

RES	0.6	(default = 0.6)
COM	0.6	(default = 0.6)
IND	0.6	(default = 0.6)

### 2. Maksimalna vrijednost inventara/sadržaja

Faktor korekcije (množi maksimalnu vrijednost objekta)

RES	0.5	(default = 0.5)
COM	1	(default = 1.0)
IND	1.5	(default = 1.5)

### 3. Neoštećeni dio

Postotak objekta koji se smatra da neće biti oštećen poplavom

RES	0.4	(u slučaju otpornih građevnih materijala)
COM	0.4	(u slučaju otpornih građevnih materijala)
IND	0.4	(u slučaju otpornih građevnih materijala)

### 4. Korišteni materijali

Faktor korekcije u slučaju jeftinijih i/ili manje otpornih materijala (drvo, blato, itd.)

RES	1	klasična gradnja (beton, cigle, kamen)
COM	1	klasična gradnja (beton, cigle, kamen)
IND	1	klasična gradnja (beton, cigle, kamen)

Za razliku od makro razine (Knjiga 2) gdje je analiza šteta provedena na razini namjene korištenja zemljišta, na mezo razini (predmetna analiza) štete su procijenjene za izgrađene objekte i neizgrađeno zemljište (prometnice, parkirališta, zelene površine, itd.). Sve vrijednosti su prikazane u valuti Euro i izražene po jedini površine. U Tablici 3.3.3 prikazan je konačan rezultat provedene sistematizacije podataka za štete, gdje je za svaku jedinicu karte namjene korištenja zemljišta pridružena vrijednost maksimalnih šteta i odgovarajući tip krivulje.

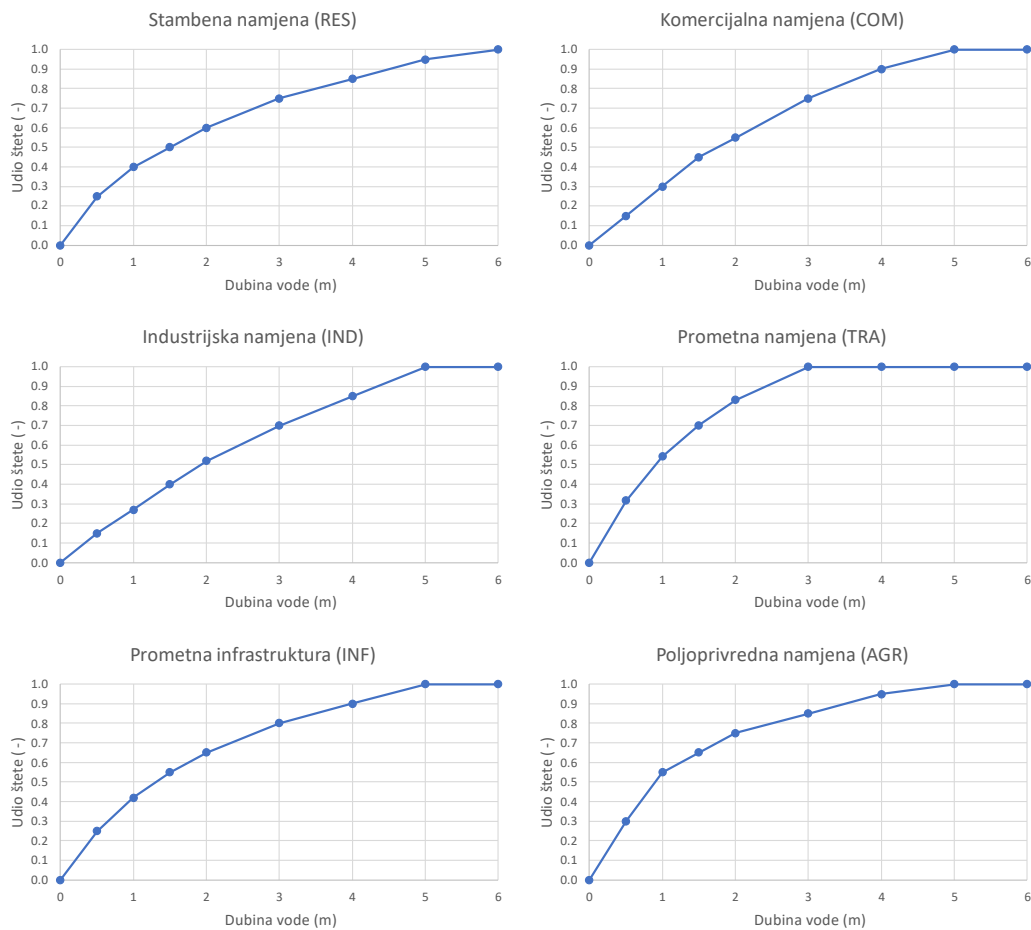
Pored tabličnih vrijednosti maksimalnih šteta, prikupljene su i tablične vrijednosti vezane uz funkcije dubine-štete, koje opisuju podložnost, odnosno očekivanu štetu izraženu kao postotak maksimalne vrijednosti u odnosu na dubinu vode poplavljenog područja. Ove funkcije su također preuzete iz Vodiča (Huizinga i sur., 2017) te su dane za prethodno prikazanih šest kategorije namjene korištenje zemljišta. Tablica 3.3.4 prikazuje numeričke vrijednosti funkcija dubine-štete, dok Slika 3.3.2 daje grafički prikaz tih funkcija.

Tablica 3.3.3 Namjene korištenja zemljišta s pripadajućim tipom funkcije dubine-štete (Func), šifrom karte namjene korištenja zemljišta (FR kod), vrijednosti maksimalnih šteta konstrukcije u EUR/m<sup>2</sup> (VAL STR), vrijednosti maksimalnih šteta sadržaja u EUR/m<sup>2</sup> (VAL CON) te vrijednosti maksimalnih šteta za neizgrađeno zemljište (VAL LAND).

OPIS	Func	FR kod	VAL STR	VAL CON	VAL LAND
Izgrađene površine	RES/COM/IND	1000	357.3	331.7	11.2
Stambene površine	RES	1100	407	203.5	11.2

Kontinuirane stambene površine (nepropusno > 80 %)	RES	1110	407	203.5	11.2
Diskontinuirane stambene površine (nepropusno 0-80 %)	RES	1120	407	203.5	11.2
<i>Diskontinuirane stambene površine (nepropusno 50-80 %)</i>	RES	1121	407	203.5	11.2
<i>Diskontinuirane stambene površine (nepropusno 30-50 %)</i>	RES	1122	407	203.5	11.2
<i>Diskontinuirane stambene površine (nepropusno 10-30 %)</i>	RES	1123	407	203.5	11.2
<i>Diskontinuirane stambene površine (nepropusno &lt; 10 %)</i>	RES	1124	407	203.5	11.2
<b>Industrijske, komercijalne, javne i vojne površine</b>	COM/IND	1200	332.5	395.8	11.2
Industrijske i komercijalne površine	COM/IND	1210	332.5	395.8	11.2
<i>Industrijske površine</i>	IND	1211	253	379.5	11.2
<i>Komercijalne površine</i>	COM	1212	412	412	11.2
Javni i vojni objekti	COM	1220	412	412	11.2
Nuklearne elektrane i pripadajuće zemljište	IND	1230	253	379.5	11.2
<b>Transportna infrastruktura</b>	INF	1300	11.2	0	11.2
Cestovna infrastruktura i pripadajuće zemljište	INF	1310	11.2	0	11.2
Željeznička infrastruktura i pripadajuće zemljište	INF	1320	11.2	0	11.2
Luke, marine i pripadajuće zemljište	TRA	1330	352.7	352.7	11.2
<i>Teretne i putničke luke</i>	TRA	1331	352.7	352.7	11.2
<i>Marine</i>	TRA	1332	352.7	352.7	11.2
<i>Brodogradilišta</i>	TRA	1333	352.7	352.7	11.2
Aerodromi i pripadajuće zemljište	TRA	1340	352.7	352.7	11.2
<b>Rudokopi, odlagališta i gradilišta, zemljište trenutno bez namjene</b>	RES	1400	407	203.5	11.2
Rudokopi	RES	1410	407	203.5	11.2
Odlagališta	RES	1420	407	203.5	11.2
Gradilišta	RES	1430	407	203.5	11.2
Zemljište trenutno bez namjene	RES	1440	407	203.5	0
<b>Urbane zelene, sportske i rekreativne površine</b>	RES	1500	407	203.5	0.16
Zelene urbane površine	RES / AGR	1510	407	203.5	0.16
Sportski objekti	RES	1520	407	203.5	11.2
<b>Poljoprivredne površine</b>	AGR	2000	60	60	0.16
<b>Obradive površine</b>	AGR	2100	60	60	0.16
Navodnjavano i nenavodnjavano zemljište	AGR	2110	60	60	0.16
Staklenici i plastenici	AGR	1210	60	60	0.16
<b>Stalni nasadi</b>	AGR	2200	60	60	0.16

Vinogradi, voćnjaci, plantaže bobičastog voća	AGR	2210	60	60	0.16
Maslinici	AGR	2220	60	60	0.16
<b>Raznolike poljoprivredne površine</b>	AGR	2300	60	60	0.16
Jednogodišnji i višegodišnji usjevi	AGR	2310	60	60	0.16
Mozaik različitih načina poljoprivrednog korištenja	AGR	2320	60	60	0.16
Poljoprivredne površine sa značajnim udjelom prirodne vegetacije	AGR	2330	60	60	0.16
Poljo-šumska područja	AGR	2340	60	60	0
<b>Pašnjaci</b>	AGR	2400	60	60	0



Slika 3.3.2 Grafički prikaz funkcija dubine-štete za različite kategorije namjene korištenja zemljišta (modificirano prema Huizinga i sur., 2017).

Tablica 3.3.4 Tablica funkcija dubine-štete za različite namjene korištenja zemljišta (Huizinga i sur., 2017).

Dubina (m)	RES	COM	IND	TRA	INF	AGR
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.25	0.15	0.15	0.32	0.25	0.30
1	0.40	0.30	0.27	0.54	0.42	0.55
1.5	0.50	0.45	0.40	0.70	0.55	0.65
2	0.60	0.55	0.52	0.83	0.65	0.75
3	0.75	0.75	0.70	1.00	0.80	0.85
4	0.85	0.90	0.85	1.00	0.90	0.95
5	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

### 3.3.2 Analiza ranjivosti – izloženost receptora poplavama

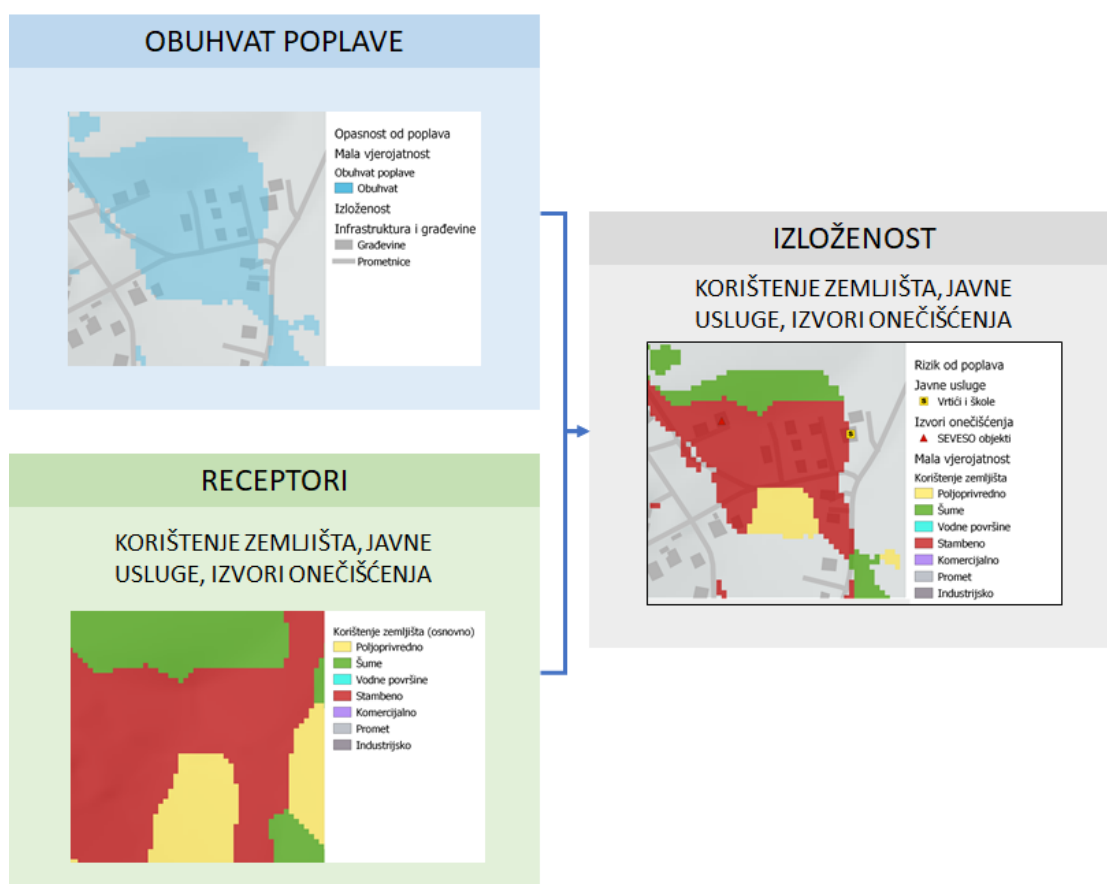
Analiza ranjivosti provedena je prvenstveno u svrhu procjene rizika, što će se detaljnije obrazložiti u sljedeća dva poglavlja. Međutim, u okviru analize ranjivosti provedena je i zasebna analiza izloženosti receptora poplavama. Pritom je izloženost određena na osnovu prostorne raspodjele receptora i obuhvata poplave. Stoga se izloženost određuje za svaku vjerojatnost, odnosno za tri odabrana scenarija.

U analizu izloženosti uključeni su sljedeći receptori:

- Pojednostavljena namjena korištenja zemljišta (sve kategorije prikazane u Tablici 3.3.3 objedinjene su u sedam osnovnih klasa: poljoprivredno zemljište, šume, vodne površine, stambeno zemljište, komercijalno zemljište, promet i industrijsko zemljište)
- Javne usluge (zdravstvene ustanove, vrtići i škole, javni prijevoz, groblja)
- Objekti koji mogu prouzročiti onečišćenje (SEVESO objekti, industrijska postrojenja, odlagališta otpada, divlji deponiji, benzinske postaje)
- Zaštićena područja
- Kulturno dobro

Shema metodologije i primjer karata izloženosti prikazan je na Slici 3.3.3 za pojednostavljenu namjenu zemljišta. Treba napomenuti da je izloženost namjene korištenja zemljišta određena preklapanjem s obuhvatom poplava kako je to prikazano na Slici 3.3.3, dok su receptori koji su

prikazani točkastim elementima i manjim poligonima (javne usluge, potencijalni izvori onečišćenja, zaštićena područja i kulturno dobro) prikazani neovisno o obuhvatu poplave kako bi se zadržala informacija i o svim receptorima koji se nužno ne nalaze unutar obuhvata, ali su vrlo blizu istome. S jedne strane ovakav pristup je odabran zbog razine istraživanja čiji cilj zbog preciznosti podloge nije identifikacija individualnih objekata izloženih poplavama, već poplavljenih zona i glavnih smjerova toka vode. S druge strane, na ovaj se način omogućava svim korisnicima da pregledom dinamičkih karata utvrde i ocjene blizinu receptora potencijalno poplavljenim područjima.



Slika 3.3.3 Shematski prikaz koncepta analize ranjivosti – izloženosti receptora poplavama.

### 3.3.3 Kvalitativna analiza rizika – procjena razine rizika

Kvalitativna analiza rizika od poplava provedena je sa ciljem procjene razine rizika, koja se definira kao kombinacija razine opasnosti od poplava te izloženosti receptora riziku za određenu vjerojatnost.

$$\text{RAZINA RIZIKA} = \text{RAZINA OPASNOSTI} \times \text{IZLOŽENOST RECEPTORA}$$

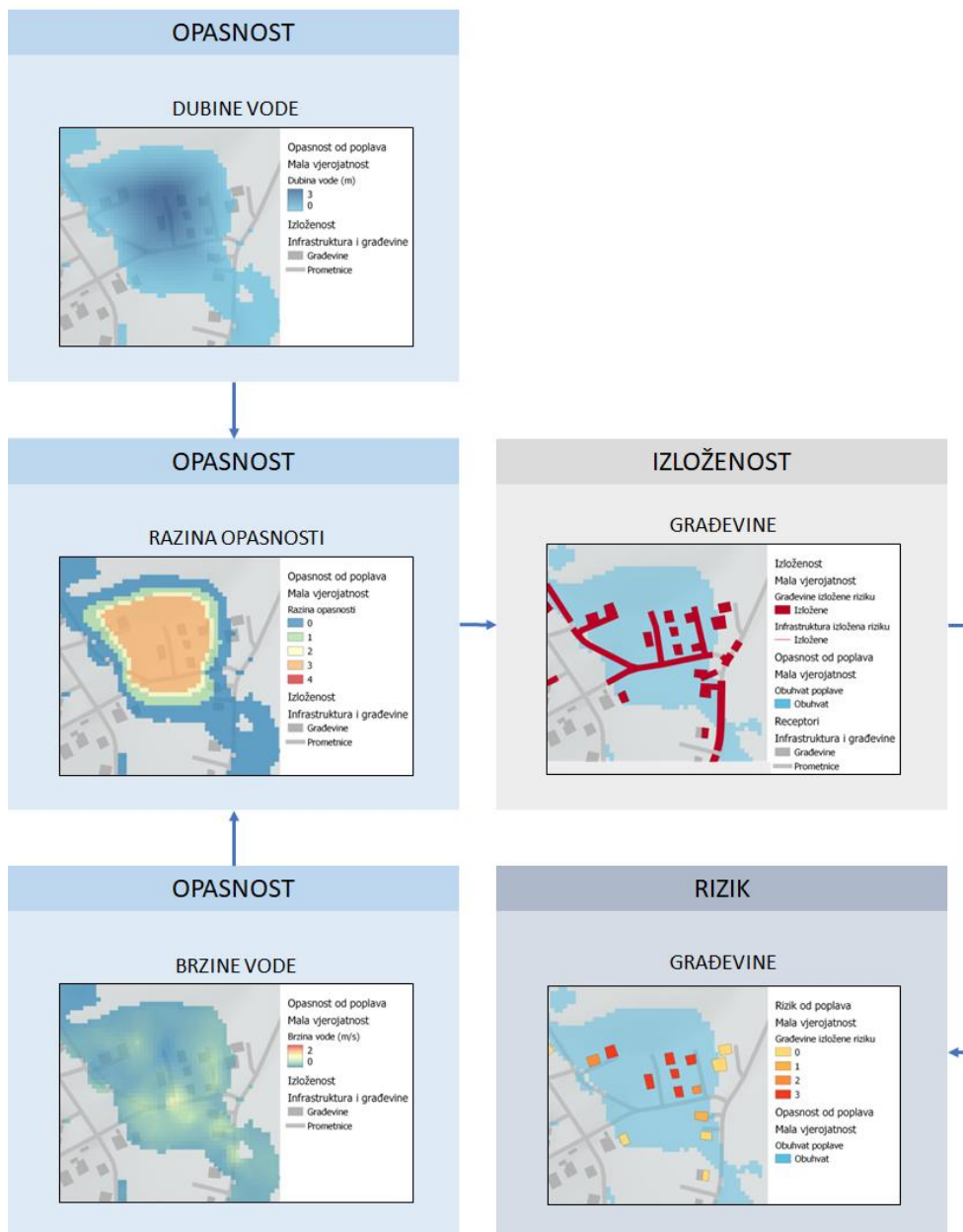
Razina rizika procijenjena je za sve građevine. Za razliku od makro razine nije procijenjena razina rizika za prometnice, zbog previsoke rezolucije. Naime, na mezo razini dobivena je prostorna distribucija dubine i brzine vode te razine opasnosti po površini prometnice, pa se isto prikazuje u rasterskom obliku.

Razina rizika proizlazi direktno iz razine opasnosti od poplava za receptore koji su izloženi poplavi. Primjerice receptor koji je izložen umjerenj opasnosti (S2) ima ujedno i umjereni rizik od poplava (R2). Stoga, sukladno SUFRI metodologiji moguće je dodijeliti razine rizika od R0 do R4 za svaki promatrani scenarij, odnosno malu, srednju i veliku vjerojatnost (vidi Tablicu 3.3.5). Shema metodologije i primjer karata procjene razine rizika prikazana je na Slici 3.3.4 za građevine.

Tablica 3.3.5 Razine rizika definirane kao kombinacija izloženosti i razine opasnosti.

Razina opasnost	Razina rizika	
S0	R0	Neznatan rizik
S1	R1	Niski rizik
S2	R2	Umjereni rizik
S3	R3	Visoki rizik
S4	R4	Vrlo visoki rizik





Slika 3.3.4 Shematski prikaz koncepta kvalitativne analize rizika – procjena razine rizika za građevine.

### 3.3.4 Kvantitativna analiza rizika – procjena direktne štete

Kvantitativna analiza rizika od poplava provedena je s ciljem procjene direktnih šteta, koje se definirano kao kombinacija opasnosti od poplava i ranjivosti na poplave, pri čemu se koriste indikatori dubine vode (opasnost), namjene korištenja zemljišta (izloženost), krivulja dubine-štete (podloženost) i vrijednosti maksimalnih šteta.

$$RIZIK = OPASNOST \times IZLOŽENOST \times PODLOŽNOST$$

Pri čemu:

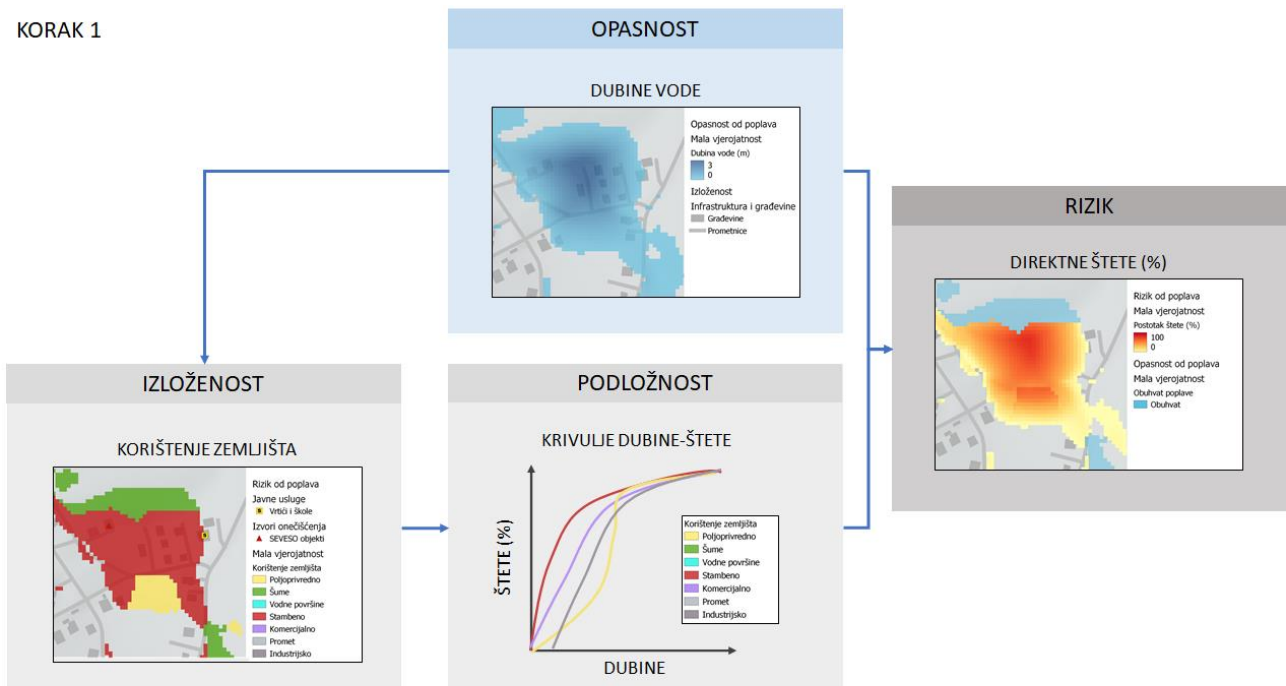
- Indikator rizika je očekivana direktna šteta za pojedini scenarij (vjerojatnost),
- indikator opasnosti je dubina vode za pojedini scenarij (vjerojatnost),
- indikator izloženosti je namjena korištenja zemljišta unutar obuhvata poplave za pojedini scenarij (vjerojatnost),
- indikator podloženosti je krivulja dubine-štete za svaku kategoriju korištenja zemljišta.

Analiza rizika se provodi na razini piksela (eng. *pixel-based analysis*) u dva koraka (Slika 3.3.5):

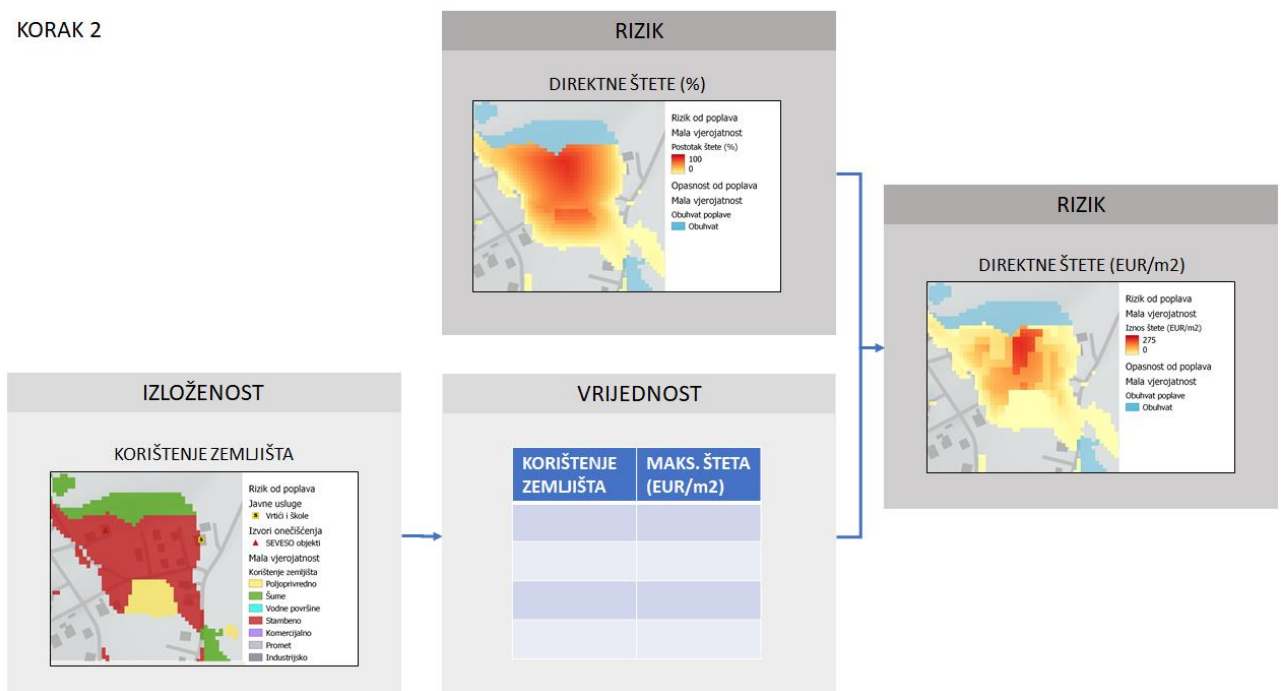
1. U prvom koraku se za svaki piksel (5x5 m) koje se nalazi unutar obuhvata poplava očitava dubina vode iz karte opasnosti i klasa namjene korištenja zemljišta iz karte izloženosti. Potom se iz funkcije dubine-štete za identificiranu klasu korištenja zemljišta očitava postotak štete za dubinu vode. Pritom, za svaki pojedinačni poligon koji predstavlja građevinu očitava se maksimalna razina vode unutar tog poligona i unutar „buffer“ zone oko objekta širine 1 m kako bi se uključile i dubine voda koje obilaze objekte, ali su u direktnom kontaktu s granicom objekta. Rezultat ove faze je karta direktne štete koja je izraženo kao postotak maksimalne štete za cjelokupni obuhvat poplave te za svaki scenarij (malu, srednju veliku vjerojatnost). Svakom pikselu je tada dodijeljena vrijednost između 0 i 1 (postotak štete).
2. U drugom koraku se svakom pikselu dodjeljuje vrijednost maksimalne štete s obzirom na klasu namjene korištenja zemljišta iz Tablice 3.3.9 ovisno o tome nalazi li se piksel unutar ili izvan poligona građevina te se ta vrijednost množi s postotkom štete. Konačan rezultat je karta očekivane direktne štete za svaki scenarij.

Svaka karta direktne štete se integrira po površini (unutar obuhvata poplave) kako bi se dobila ukupna šteta (izražena u EUR) za svaki scenarij te se generiraju krivulje koje prikazuju ukupne direktne štete za različite vjerojatnosti.

KORAK 1



KORAK 2



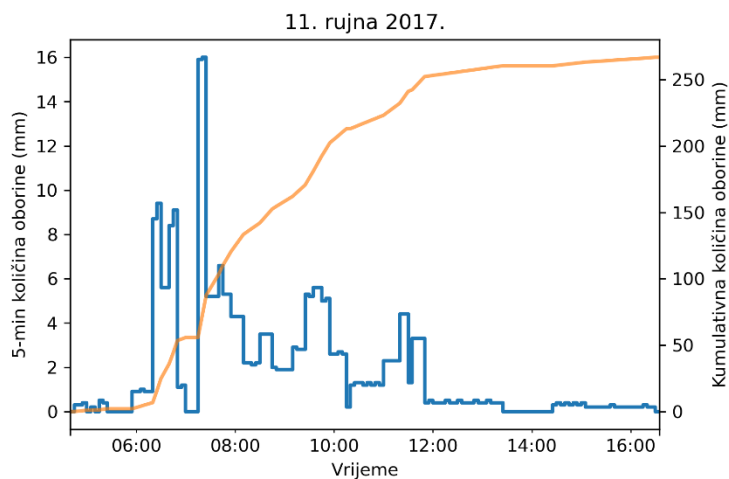
Slika 3.3.5 Shematski prikaz koncepta kvantitativne analize rizika – procjena direktnih šteta.

## 3.4 Rezultati analize pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar

### 3.4.1 Povijesne pluvijalne poplave u urbanom dijelu naselja Zadar

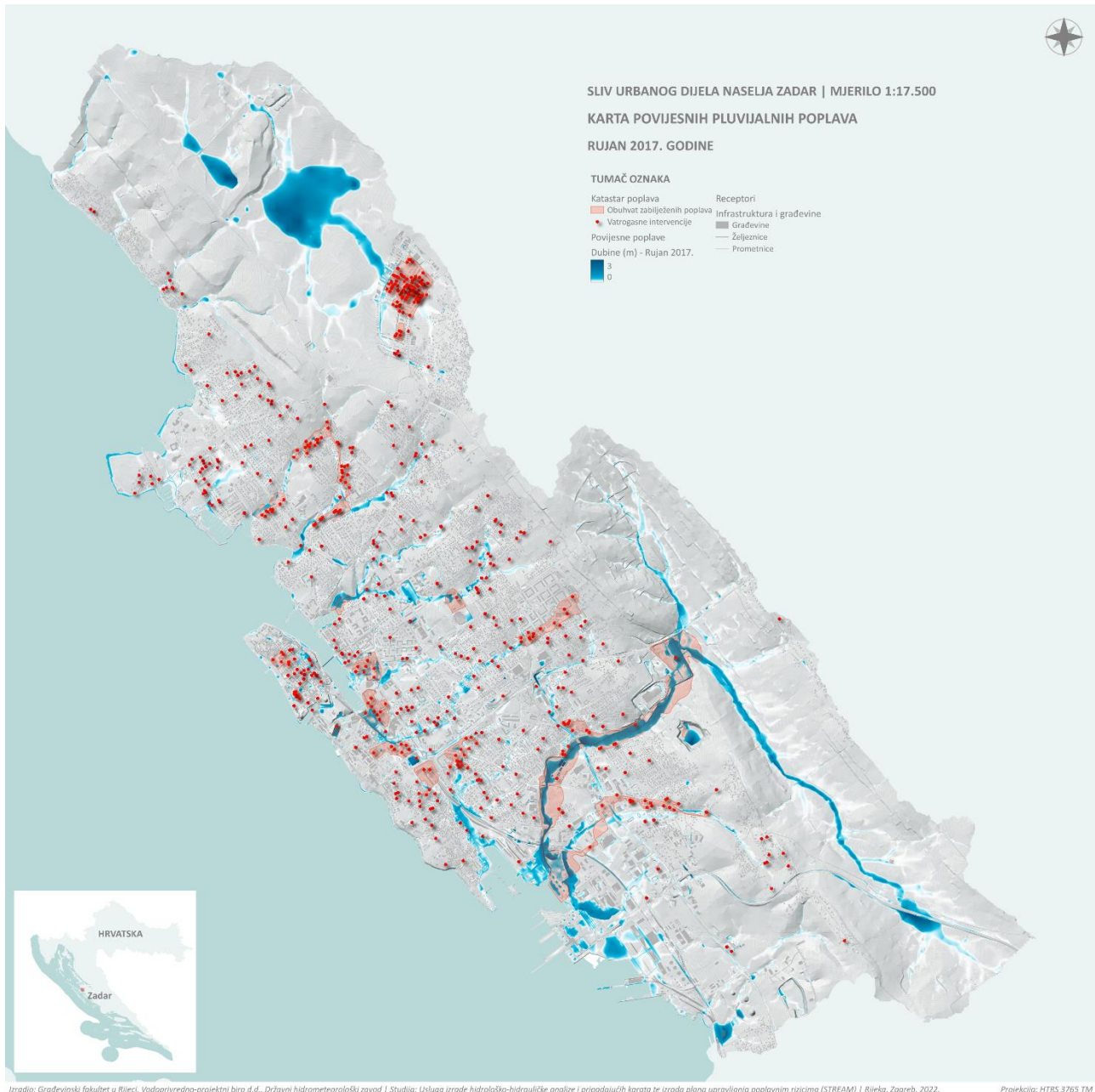
Analiza povijesnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar provedena je na osnovu katastra poplava (zabilježene poplavne površine i lokacije vatrogasnih intervencija) te modelske reanalize odabranog oborinskog događaja. Analizom oborina odabran je ekstremni događaja iz 11. rujna 2017. godine.

Dana **11. rujna 2017.** godine zabilježeno je 267 mm oborine na ombrografskoj postaji Zadar, dok je u samo jedan sat palo 80 mm oborine, u tri sata 161 mm oborine, a tijekom šest sati 250 mm oborine (Slika 3.4.1). Navedene količine imaju vjerojatnost pojave manju od 1%.



Slika 3.4.1 Trenutne 5-min i kumulativne količine oborine zabilježene 11. rujna 2017. godine na ombrografskoj postaji Zadar.

Karta dubina vode za oborinu iz rujna 2017. godine zajedno s lokacijama vatrogasnih intervencija i poligonima zabilježenih poplavljenih površina u Zadru prikazana je na Slici 3.4.2. Najveći broj intervencija nalazi se unutar urbaniziranog dijela naselja Zadar. Općenito se može zaključiti da su rezultati modelske reanalize u suglasju sa zabilježenim poplavnim površinama i lokacijama intervencija te da se izrađeni matematički model može smatrati dovoljno pouzdanim za daljnje analize opasnosti i rizika na pilot području Zadar.



Slika 3.4.2 Karta zabilježenih poplava – katastar poplava i modelska reanaliza poplave iz rujna 2017. godine - na pilot području Zadar.

Opis i posljedice poplava iz rujna 2017. godine preuzeti su iz Meteorološkog i hidrološkog biltena DHMZ-a (2022):

*„Jučerašnje nevrijeme bilo je samo uvod u rijetko viđenu kišu na području Zadra i šire okolice. U gradu je nestalo struje i vode, stvorile su se bujice, koje su teško oštetile groblje. Potok Ričina je podivljao, znatno je oštetio cestu prema luci Gaženica. Potop je bio «biblijskih razmjera», u malo više od tri sata palo je oko 250 litara kiše, nekoliko puta više od prosjeka za rujna. Kiša je padala tijekom cijelog dana. Zadarske prometnice su se doslovno pretvorile u rijeke, na Forumu je bilo pola metra vode. Poplava je bila i u bolnici, poplavljene su operacijske sale, sve aktivnosti u bolnici bile su otkazane. Prokišnjavała je sportska dvorana Krešimir Ćosić. Nastava u školama u gradu je otkazana, vrtići nisu radili. Voda se na izvorištima zamutila, pa je vodu iz vodovoda bilo potrebno prokuhavati. U prekidu je bila telefonija. Pod vodom su se u centru grada našli brojni automobili. Poluotokom se nije moglo niti hodati, voda je bila do koljena. Sav promet je bio u kaosu. Neke je automobile bujica vode nosila, pa su vozači morali biti spašavani, jer su se motori ugasili, a na nekim je mjestima razina vode došla do prozora automobila. Javni promet je stao, nitko nikuda. Voda se iz objekata izbacivala na sve načine, pumpama, metlama, kablovima. Sve je to bilo od male pomoći, jer se vodu nije imalo kuda izbaciti, i ona se ponovo vraćala, Sizifov posao. Prodavači u trgovinama su se popeli na klupe i tako čekali da se voda povuče. Podzemna garaža jednog trgovačkog centra bila je do vrha puna vode, tj. tri metara dubine. Svi su automobili u njoj uništeni. Voda je ušla i u prizemlje centra. Zaposlenici su poslani na prisilni godišnji odmor dok se zgrada ne sanira, s obzirom da su potopljene bile elektroinstalacije. Voda na prometnicama bila je dublja od 40 cm. Stanovnici Zadra i okolice nisu mogli iz kuća, čak su i vatrogasci stajali na krovovima kamiona. Taj vodeni pakao trajao je satima. Vatrogasci su primili oko 2000 poziva u pomoć. Stradala je i znanstvena knjižnica sa vrlo vrijednom građom, koja se poslije morala na poseban način sušiti. U dva sata je palo oko 1000 posto više kiše nego što sustav za odvodnju može podnijeti. Sustav je naime kapacitiran za 25 litara kiše na sat, a palo je oko 250 litara. Bujica je obustavila rad pročišćivača otpadnih voda. Na cijelom području je proglašeno izvanredno stanje. Pod vodom su bile crkve, arhivi u crkvama i knjižnicama. Zbog ove se kiše znatno podigla razina podzemnih voda, koje su se mjestimice izljevale, plaveći polja i sve u okolici. Nekoliko se građana u ovoj poplavi bavljalo plivajući po cestama i trgovima. Voda je prodrła u arheološki muzej. U jednom je vrtiću pod pritiskom vode pukla staklena stijena, voda je ušla u prostor do jednog metra visine, sav je inventar uništen. Za pogođene dijelove zadarske županije proglašeno je stanje elementarne nepogode. Ukupna šteta u cijeloj županiji se cijeni na oko milijardu kuna. Do početka listopada, ipak, prijavljeno je puno manje, 247 milijuna kuna štete.“*

### 3.4.2 Opasnost od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar

Procjena opasnosti od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar provedena je za tri scenarija, odnosno za malu, srednju i veliku vjerojatnost, koje odgovaraju vjerojatnosti godišnjeg premašenja od 1, 4 i 20 %. Karte opasnosti od pluvijalnih poplava prikazuju prostornu raspodjelu dubina, brzina i razine opasnosti za svaku navedenu vjerojatnost. Na Slikama 3.4.3, 3.4.4 i 3.4.5 prikazani su primjeri statičkih karata opasnosti za malu vjerojatnost pojavljivanja.

Iz danih prikaza može se okarakterizirati osnovni proces generiranja pluvijalnih poplava u slivu pilot područja Zadar te izdvojiti problematične lokacije. U južnoj dijelu pilot područja, po dubina i brzinama vode, ističe se **sliv Ričine i Kvandove jaruge**. Vodotok Ričina svojim većim dijelom protječe kroz urbano područje grada Zadra te djelomično služi kao recipijent oborinske vode iz sustava javne odvodnje. Najveći udio protoka Ričine dolazi sa podsliva Kvandove jaruge koje se u Ričinu spaja uz trgovački centar Supernova. Tijekom izgradnje trgovačkog centra, izvedeno je izmještanje vodotoka te djelomično natkrivanje kanala. Nakon ekstremne poplave iz rujna 2017. godine, provedene su detaljne hidrološke analize (Hidroprojekt-ing, 2018) te četiri faze građevinskih projekata (Institut IGH, 2018) s ciljem rekonstrukcije i regulacije korita Ričine kako bi se povećao njezin kapacitet.

Preostalo područje interesantno s gledišta opasnosti od poplava je **niz manjih podslivova u urbaniziranom priobalnom dijelu grada**. Prikazani podslivovi su naseljeni uz visoki stupanj urbanizacije, imaju riješen sustav odvodnje oborinskih voda (najčešće mješoviti sustav kanalizacije), bez izraženijih vodotoka niti prisutnih otvorenih elemenata odvodnje (kanali) ili cestovnih propusta. Iznimka je park Vruljica, gdje je izgrađen otvoreni kanal koji se nakon cestovnog propusta ulijeva u more u uvali Jazine. Unutar ovih slivova tečenje viška oborinskih voda (nakon što se prijeđe kapacitet sustava za odvodnju oborinskih voda) prati reljef terena, a glavni pravci koncentriranog toka vode određeni su prometnicama. U gornjem dijelu slivova na strmijim terenima moguća je pojava većih brzina vode (uz manju dubinu), dok se u nizvodnom dijelu slivova zbog reljefa terena ponegdje voda zadržava i akumulira te otežano istječe u more, što rezultira većim dubina vode u poplavljenom području i višim razinama opasnosti. Najveće dubine, brzine i razine vode prisutne su u slivu Ričine. Međutim i u manjim priobalnim podslivovima u urbaniziranom dijelu naselja Zadar prisutne se mikrolokacije velikih brzina vode, odnosno visokih razina opasnosti do poplava, koji su uglavnom vezani uz koncentrirane tokove ili prirodne depresije.



Izradio: Građevinski fakultet u Rijeci, Vodoprivredno-projektni biro d.d., Državni hidrometeorološki zavod | Studija: Usluga izrade hidrološko-hidrauličke analize i pripadajućih karata te izrada plana upravljanja poplovnim rizicima (STREAM) | Rijeka, Zagreb, 2022.

Projekcija: HTRS 3765 TM

Slika 3.4.3 Karta opasnosti od poplava – dubina vode - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.

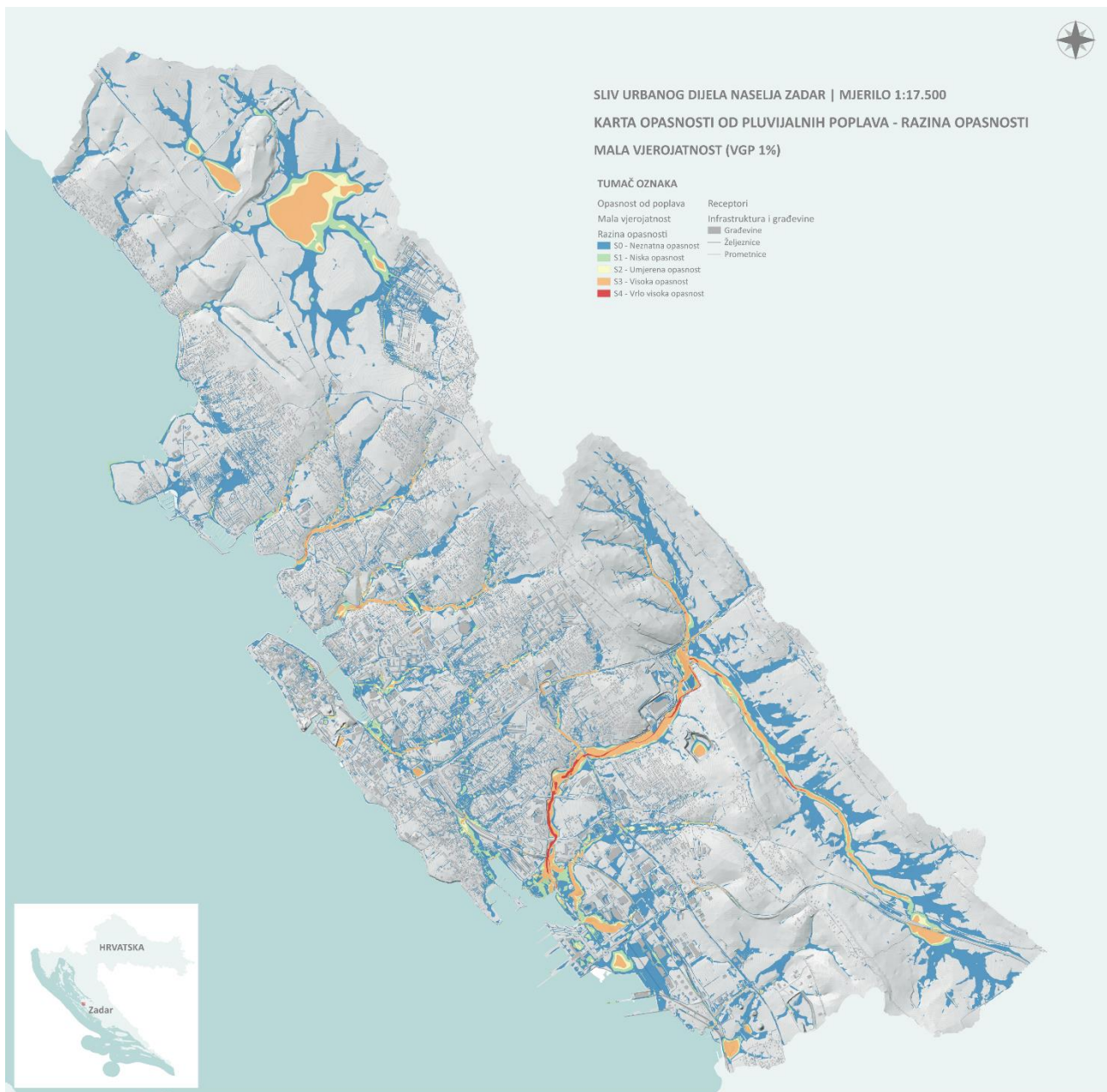




Izradio: Građevinski fakultet u Rijeci, Vodoprivredno-projektirno biro d.d., Državni hidrometeorološki zavod | Studija: Usluga izrade hidrološko-hidrauličke analize i pripadajućih karata te izrada plana upravljanja poplovnim rizicima (STREAM) | Rijeka, Zagreb, 2022.

Projekcija: HTRS 3765 TM

Slika 3.4.4 Karta opasnosti od poplava – brzina vode - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.

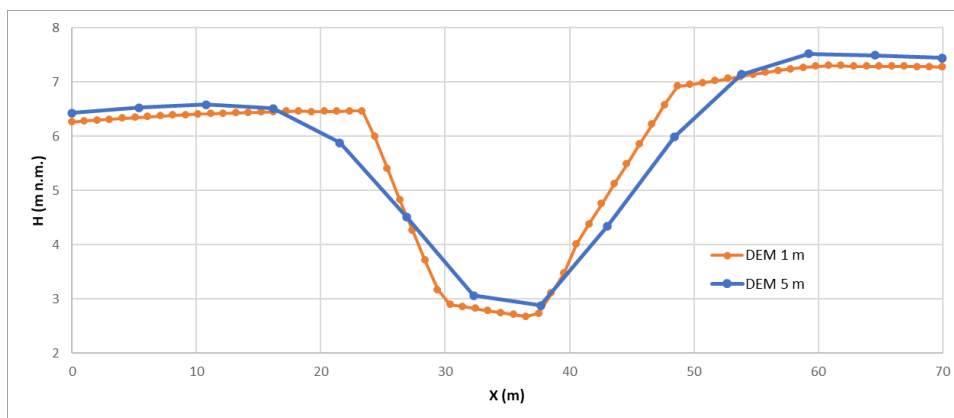


Slika 3.4.5 Karta opasnosti od poplava – razina opasnosti - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.

### 3.4.3 Usporedba rezultata na mezo i makro razini istraživanja

U nastavku je dana usporedba rezultata modelskih analiza, odnosno procjene opasnosti od poplava u urbanom dijelu naselja Zadar, na makro razini (Knjiga 2) i mezo razini (predmetna analiza). Osnovna razlika između navedene dvije analize je u detaljnosti podloga. Dok je na makro razini analiziran cjelokupni sliv koji zahvaća administrativne granice naselja Zadar, a korištene su prostorne podloge rezolucije 5 m, na mezo razini odabrano je uže područje (urbanizirani dio naselja Zadar), a korištene podloge imaju rezoluciju 1 m.

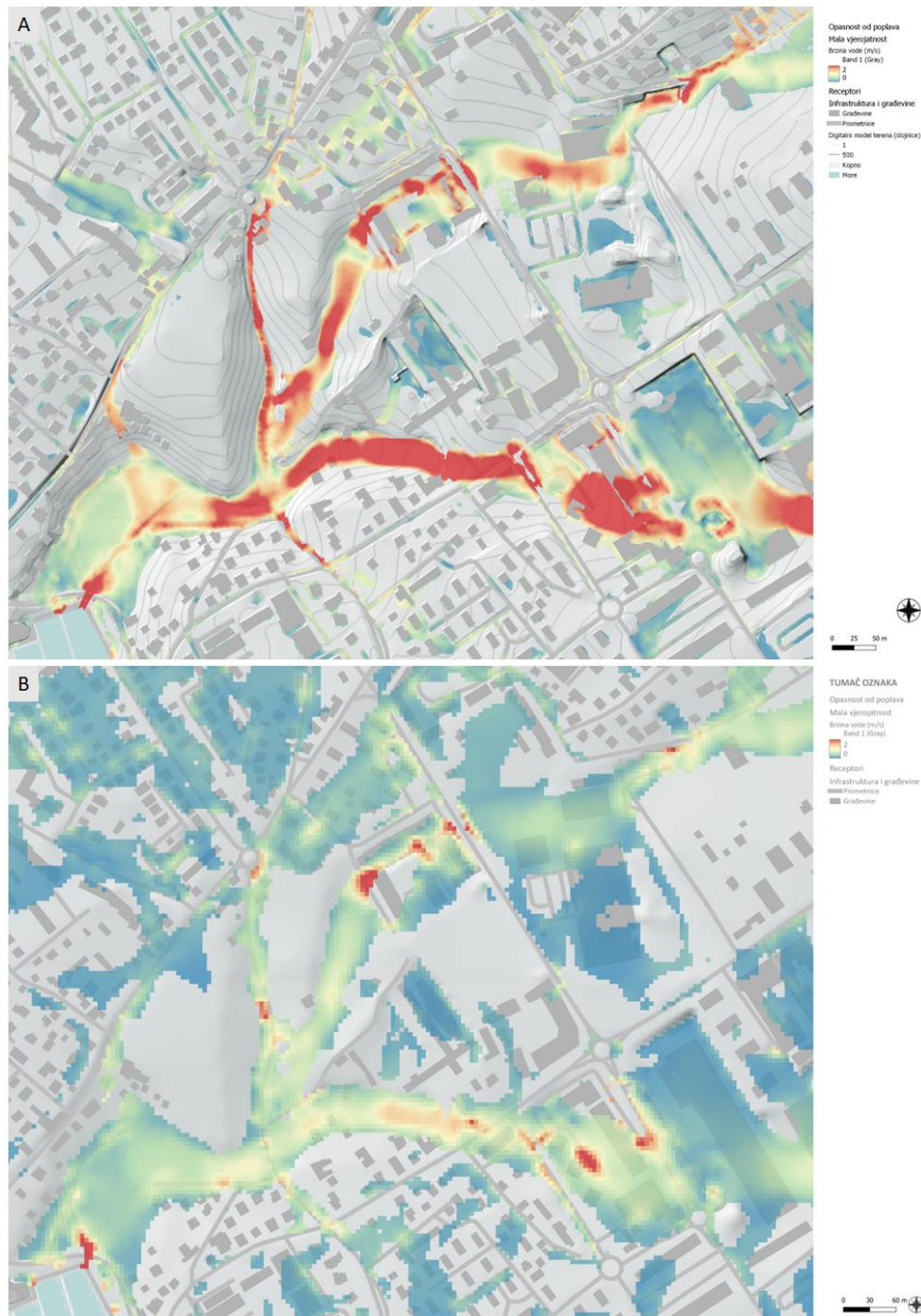
Na Slikama 3.4.7 – 3.4.9 dane su usporedbe rezultata dubine i brzine vode te razina opasnosti na izdvojenom dijelu sliva (dio podsliva Vruljica). Očekivano, rezultati na mezo razini više su rezolucije i veće preciznosti, zbog čega pružaju detaljniji uvid u prostornu raspodjelu opasnosti od poplava. U odnosu na makro razinu gdje su rezultati interpretirani u vidu identifikacije dijelova naselja koji su izloženi poplavi, na mezo razini se rezultati mogu interpretirati u smjeru identifikacije pojedinačnih objekata i dionica prometnica koje su izložene poplavama. Međutim, uz višu rezoluciju i veću preciznost, rezultati brzina vode i posljedično razine opasnosti daju kvalitativno drugačije rezultate, konkretnije primjetne su veće brzine i više razine opasnosti u odnosu na rezultate na makro razini (Slika 3.4.8 i 3.4.9). S hidrauličkog stajališta, veće vrijednosti brzina su opravdane, s obzirom da su u modelu terena više rezolucije prirodne depresije i kanali (duž kojih se javlja dominantno tečenje oborinskih voda) sličnog uzdužnog nagiba, ali užeg poprečnog presjeka, stoga za isti protok možemo očekivati više brzine toka (Slika 3.4.6).



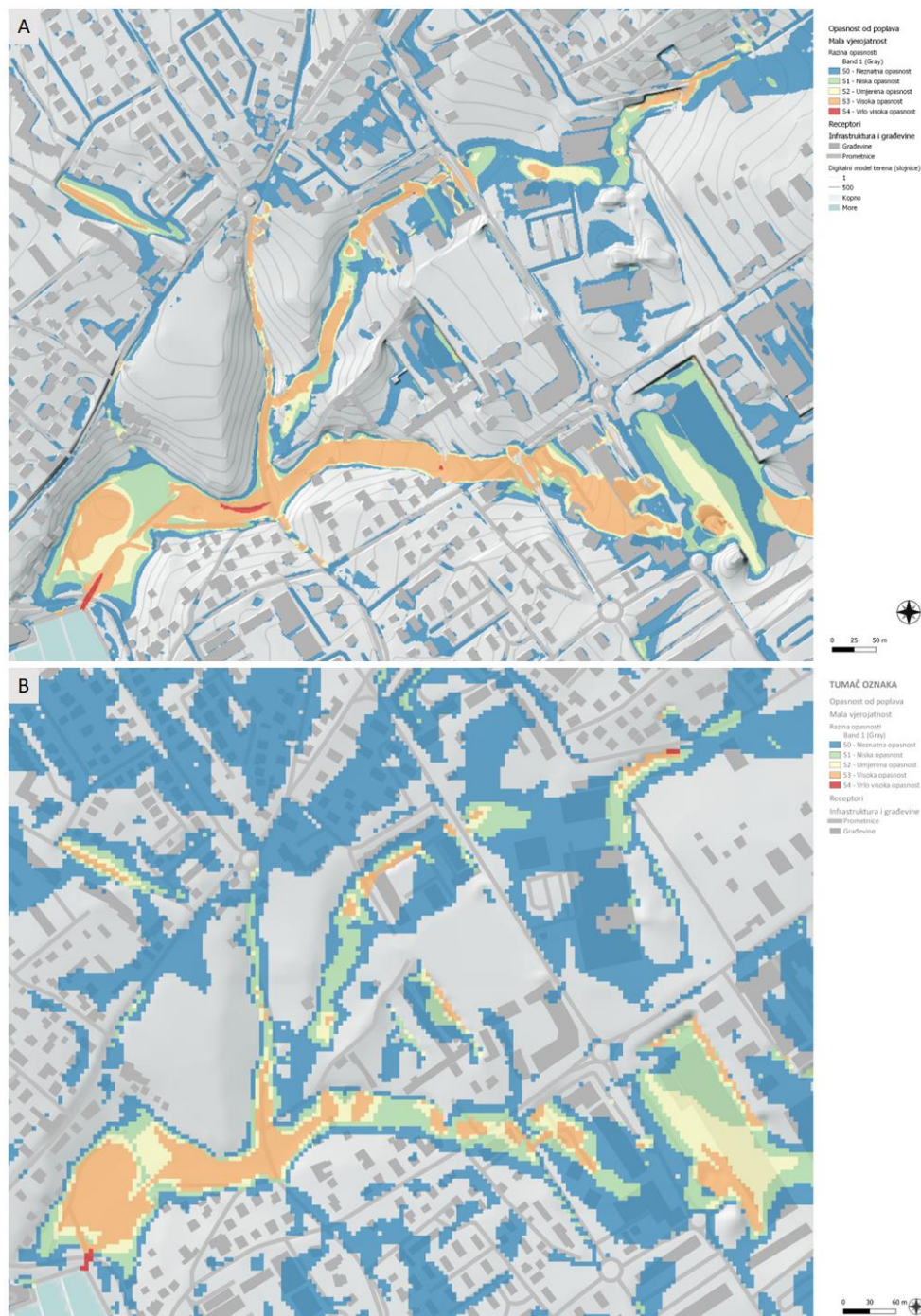
Slika 3.4.6 Poprečni presjek kanala Ričine, usporedba modela terena rezolucije 1 m (mezo razina) i 5 m (makro razina).



Slika 3.4.7 Usporedba rezultata dubine vode za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) makro razina (rezolucija 5 m).



Slika 3.4.8 Usporedba rezultata brzine vode za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) makro razina (rezolucija 5 m).



Slika 3.4.9 Usporedba rezultata razine opasnosti za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) makro razina (rezolucija 5 m).

### 3.4.4 Ranjivost na pluvijalne poplave u urbanom dijelu naselja Zadar

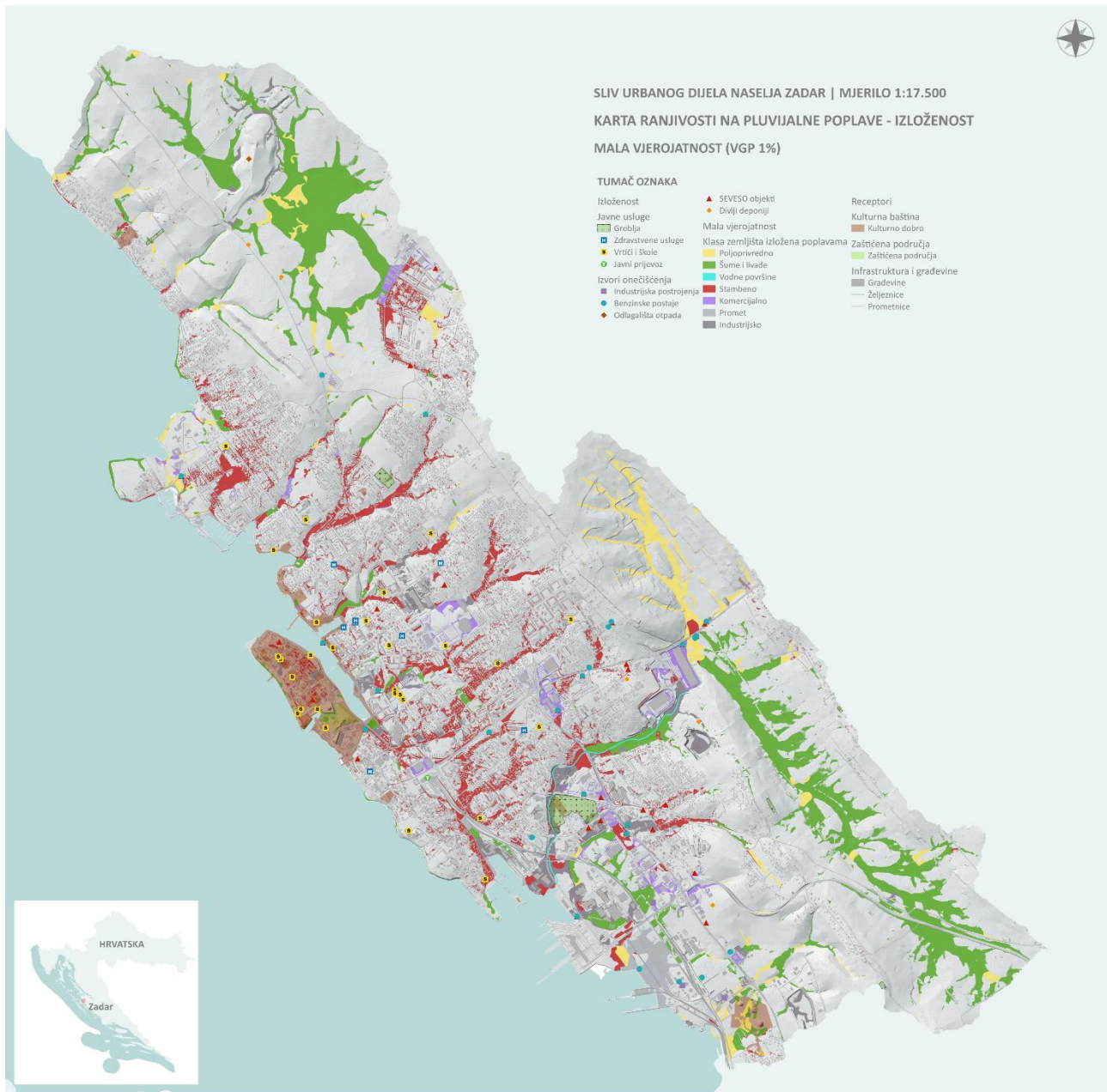
Ranjivost na pluvijalne poplave provedena je s ciljem određivanja rizika, što se prikazuje u sljedećem poglavlju, a u nastavku je zasebno izdvojena analiza izloženosti receptora poplavama. Pritom na kartama su prikazani poligoni namjene korištenja zemljišta unutar obuhvata poplava za svaku vjerojatnost te svi identificirani receptori iz kategorije javne usluge, potencijalni izvori onečišćenja, zaštićena područja i kulturna baština.

Na Slici 3.4.10 prikazana je statička karta ranjivosti, odnosno izloženosti za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar. Na Slici 3.4.11 prikazani su rezultati analize izloženosti u okviru čega su određene izložene površine poplavama po kategorijama namjene korištenja zemljišta za sve tri vjerojatnosti te dijagram udjela kategorija namjene korištenja zemljišta za malu vjerojatnost poplave.

Ukupna promatrana površina sliva urbanog dijela naselja Zadar iznosi 36 km<sup>2</sup>, a ukupno poplavljeno područje iznosi 4,1 km<sup>2</sup> (11,3 %) za veliku vjerojatnost, 5,5 km<sup>2</sup> (15,2 %) za srednju vjerojatnost i 7,3 km<sup>2</sup> (20,4 %) za malu vjerojatnost pojave. Iz danih prikaza može se primijetiti da je najveći udio poplavljenih površina ~37 % pod šumama i livadama, međutim čak 24% poplavljenog područja je stambene namjene, približno 16% je prometne infrastrukture, oko 10 % je poljoprivrednih površina, 9% industrijskih, dok je komercijalnih površina oko 4 %. Čak i za veliku vjerojatnost, može se očekivati plavljenje površine od 104 ha stambene namjene, 74,5 ha prometne infrastrukture, 40,3 ha industrijskih površina te 18,6 ha komercijalne namjene. U slivu Kvandove Jaruge najviše je poplavljenih šumskih površina, u gornjem slivu Ričine najviše je poplavljenih poljoprivrednih, dok je u priobalnim podslivovima Zadra najviše poplavljenih površina stambene i industrijske namjene.

Lokacije javnog prijevoza (autobusni kolodvor i pomorska luka) nalaze se unutar područja gdje je opasnost od poplava neznatna. Zdravstvene ustanove su izvan poplavljenog područja, s iznimkom opće bolnice koje za malu vjerojatnost ima nisku razinu rizika. Određeni broj vrtića (25) može biti izloženo poplavi, ali je opasnost od poplava neznatna, jednako kao i četiri osnovne i šest srednjih škola. Groblje u Zadru je izloženo visokoj razini opasnosti od poplava, što je i evidentirano 2017. godine.

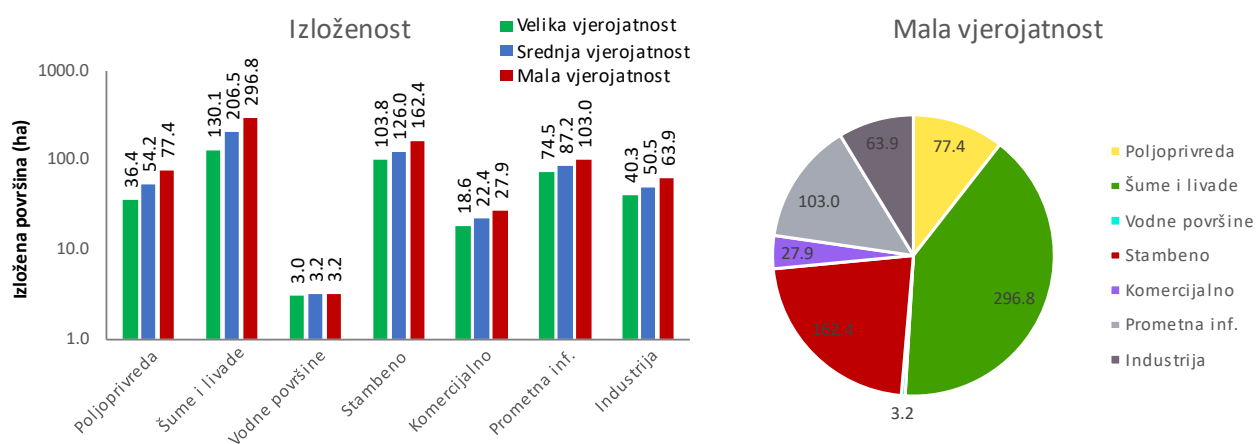
Od ukupno 31 benzinske postaje, njih 15 može biti izloženo poplavi, od toga s malom vjerojatnosti tri postaje mogu biti izložene niskoj opasnosti (BP Zadar Crno, BP Zadar Jadranska i skladište TTTR Gaženica), a dvije postaje umjerenom opasnosti od poplava (BP Zadar i BP Murvica Istok). Odlagalište otpada i divlji deponiji su izvan opasnosti od poplava.



Slika 3.4.10 Karta ranjivosti na poplave – izloženost - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.



Od ukupno 86 SEVESO objekata, njih 36 je izloženo poplava, a od toga šest lokacija je izloženo niskoj do srednjoj opasnosti od poplava (ovisno o vjerojatnosti pojave poplave), od toga su umjerenoj razini opasnosti izloženi PSC Zadar i Shell Zadar. Umjerenoj razini opasnosti izložen je i uređaj za pročišćavanje otpadnih voda. Poplavama je izložen veći broj pojedinačnih kulturnih dobara, arheoloških kulturnih dobara te kulturno-povijesna cjelina povijesne jezgre Zadra koji su smješteni na poluotoku te memorijalne građevine na groblju Zadar.

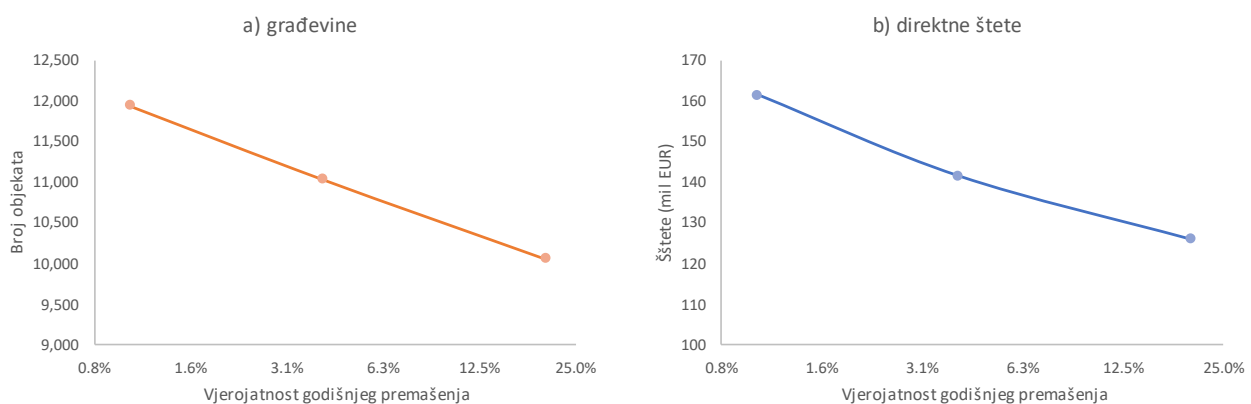


Slika 3.4.11 Rezultati izloženosti namjene korištenja zemljišta na pilot području Zadar

### 3.4.5 Rizik od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar

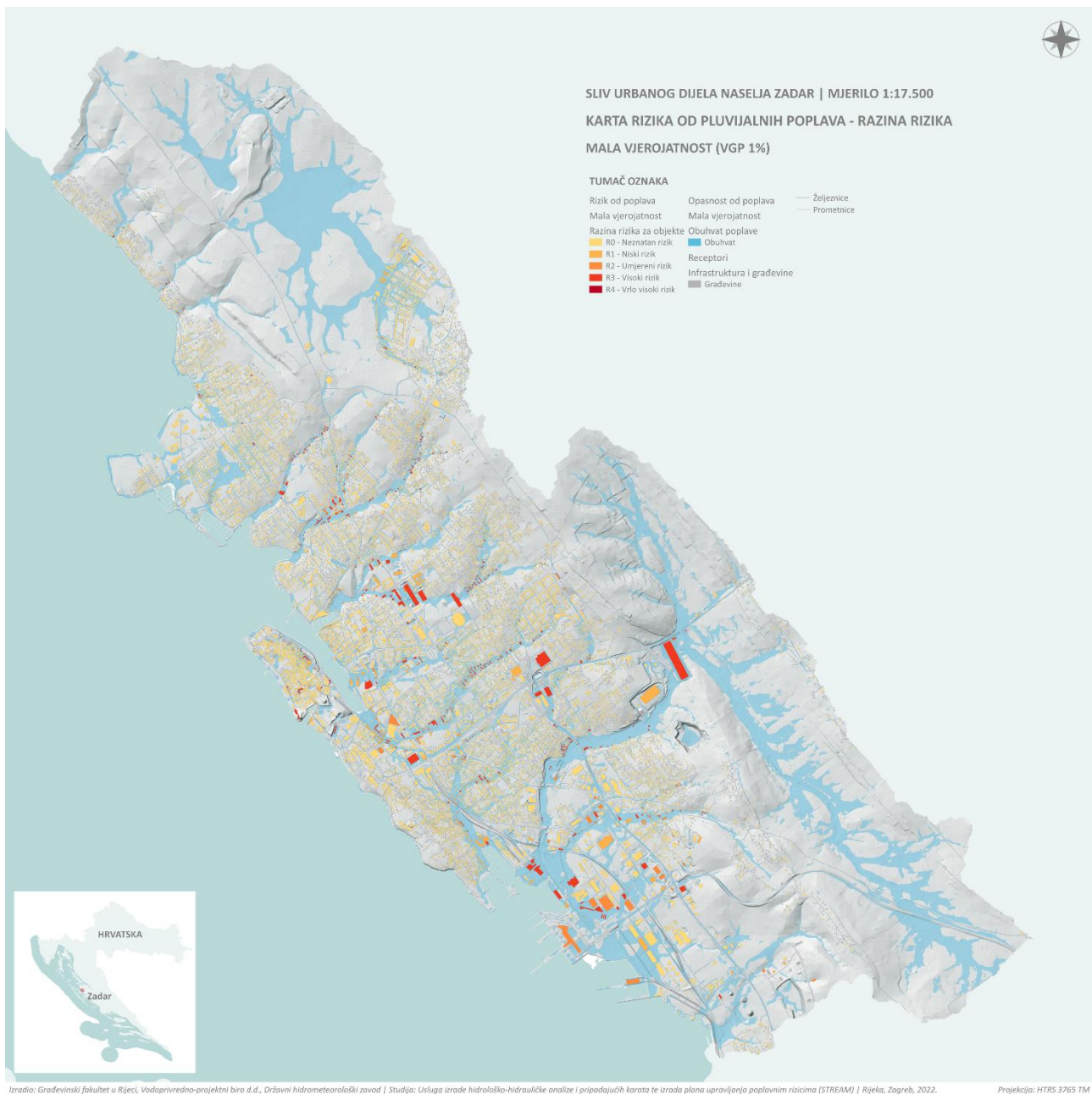
Na osnovu provedenih analiza opasnosti i ranjivosti identificiran je i rizik od poplava na pilot području Zadar. Rezultati kvantitativne analize rizika prikazani su na Slici 3.4.12 s procjenom vjerojatnosti poplavljenog broja građevina te iznos direktnih šteta od poplava. Broj poplavljenih građevina/objekata je u rasponu od 10.063 (VGP=20%) do 11.957 (VGP=1%). Iznos direktnih šteta kreće se u rasponu od 126,1 milijuna EUR (VGP=20%) do 161,6 milijuna eura (VGP=1%). Treba primijetiti da su ovo otprilike 27 % veći iznosi šteta u odnosu na analizu provedenu na makro razinu (Knjiga 2), što je jednim dijelom rezultat podloga više rezolucije i točnijih rezultata analize opasnosti od poplava, a drugim dijelom drugačijeg (preciznijeg) načina proračuna šteta u okviru kojeg su zasebno analizirane štete na objektima i zemljišta (a što je omogućeno upravno preciznijim podlogama).

Pored kvantitativne analize rizika u kojoj su povezane ukupne količine izloženih građevina s vjerojatnosti pojave pluvijalnih poplava, provedena je i kvalitativna analiza u okviru koje su procijenjene prethodno navedene količine za različite razine opasnosti prema tri vjerojatnosti te su im sukladno opasnostima pridodane i razine rizika. Najveći broj izloženih građevina pripada razini opasnosti R0 („neznan rizik“), dok je broj receptora koji su izloženi umjerenom ili visokom razini rizika (R2 i R3) za red veličine manji. Radi se otprilike o 648 objekata za malu vjerojatnost poplave (VGP=1%).



Slika 3.4.12 Rezultati kvantitativne analize rizika - krivulje koje prikazuju vjerojatnost: a) broja potencijalno poplavljenih građevina, b) direktnih šteta od poplava na pilot području Zadar.

Na Slici 3.4.13 prikazana je statička karta rizika od poplava koja prikazuje razinu rizika za građevine za malu vjerojatnost. Na Slici 3.4.14 prikazana je karta rizika od poplava s prostornom raspodjelom direktnih šteta po jedinici površine za malu vjerojatnost pojave.



Slika 3.4.13 Karta rizika od poplava – razina rizika za građevine - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.

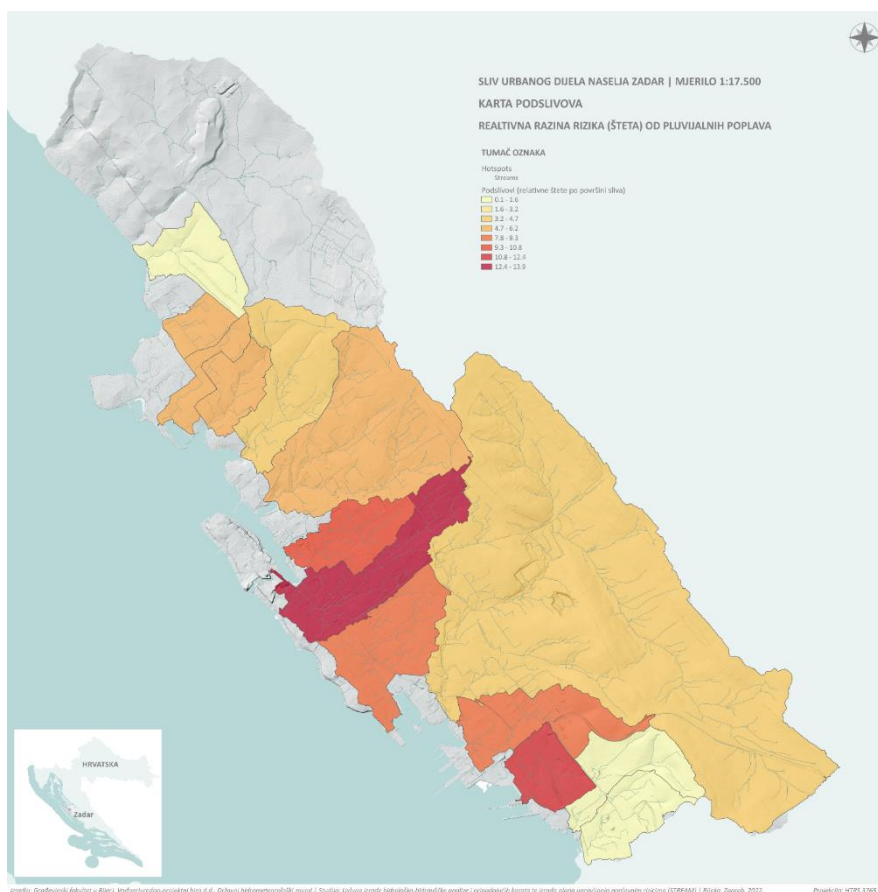


Slika 3.4.14 Karta rizika od poplava – direktne štete - za malu vjerojatnost u urbanom dijelu naselja Zadar.

### 3.4.6 Kritični podslivovi u urbanom dijelu naselja Zadar

S obzirom na provedene analize šteta od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar, prikazanih u prethodnom potpoglavlju, identificirani su i kritični podslivovi (tzv. “hotspots”) koji imaju višu razinu riziku u odnosu na preostale dijelove sliva. Pritom, umjesto kritičnih točaka, definirani su kritični podslivovi iz razloga što je problem pluvijalnih poplava **potrebno rješavati integralno na razini cijeloga podsliva** unutar kojeg se javljaju više razine rizika od poplava.

Unutar urbanog dijela naselja Zadar, višu razinu rizika s obzirom na štete za malu vjerojatnost pojavljivanja, imaju manji priobalni podslivovi koji gravitiraju naselju Zadar (Slika 3.4.15). Kritični su slivovi koju utječu u uvalu Jazine i Bregdeti te dva manja sliva koji gravitiraju uvali Gaženica. Također, kao kritični sliv se još može ocijeniti i sliv Vruljice.



Slika 3.4.15 Karta kritičnih podslivova (prema prosječnim štetama po površini podsliva) u urbanom dijelu naselja Zadar.

### 3.5 Karte pluvijalnih poplava za urbani dio naselja Zadar

Karte pluvijalnih poplava izrađene su u statičkom i dinamičkom formatu.

**Statičke karte** izrađene su kao PDF dokumenti u prikladnom mjerilu. Za predmetno područje izrađene su sljedeće statičke karte:

- **Karta povijesnih poplava** (za jednu odabranu poplavu s najvećim zabilježenim posljedicama ili najintenzivnijim oborinama)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – dubine vode** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – brzine vode** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – razine opasnosti** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta ranjivosti na pluvijalne poplave – izloženost** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta rizika od pluvijalnih poplava – razina rizika za građevine** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta rizika od pluvijalnih poplava – direktne štete** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta kritičnih podslivova**

Ukupno je za urbani dio naselja Zadar izrađeno 20 tematskih karta u PDF formatu.

**Dinamičke karte** izrađene su u GIS okruženju u mjerilu 1:2.000, a isporučuju se u obliku vektorskih i rasterskih datoteka. Popis i opis svih isporučenih datoteka po pilot području prikazan je u Tablici 3.5.1. Datoteke su prema razinama analiza raspoređene i sistematizirane u grupe slojeva. Razine analiza se sastoje od: podloga, katastra poplava, receptora, izloženosti, opasnosti, rizika i kritične podslivove. Uz svaku datoteke izrađeni su i priloženi prikladni stilovi za prikaz u QGIS sučelju.

Tablica 3.5.1 Popis elemenata dinamičkih karata pluvijalnih poplava (GIS baza podataka)

Mapa	Ime datoteke	Indikator	Vjerojatnost	Grupa QGIS sloja	Naziv QGIS sloja (opis)
\Exposure	<i>Catchment.shp</i>	Podloge			Sliv
\Exposure	<i>DEM_1m_clipped.tif</i>				Digitalni model terena (DMT)
\Cadastre	<i>Flooded_areas.shp</i>	Katastar poplava		Katastar poplava	Obuhvat zabilježenih poplava
\Cadastre	<i>Flood_interventions.shp</i>			Katastar poplava	Vatrogasne intervencije
\Historical	<i>Depth (Max)_[date]_clipped.tif</i>			Povijesne poplave	Dubine (m) - [date]
\Exposure	<i>Buildings.shp</i>	Receptori		Receptori- Infrastruktura i građevine	Građevine
\Exposure	<i>Roads.shp</i>				Prometnice
\Exposure	<i>Railroad.shp</i>			Željeznička pruga	
\Exposure	<i>Cultural_heritage.shp</i>			Receptori-Kulturna baština	Kulturno dobro
\Exposure	<i>Population.shp</i>			Receptori- Stanovništvo	Gustoća stanovnika
\Exposure	<i>LU_1m_new.tif</i>			Receptori	Namjena korištenja zemljišta
\Exposure	<i>LU_1m_new_modified.tif</i>			Receptori	Korištenje zemljišta (osnovno)
\Exposure	<i>Protected_areas.shp</i>			Receptori-Zaštićena područja	Zaštićena područja

\Exposure\Pollution	<i>ePRTR.shp</i>	Izloženost		Izloženost-Izvori onečišćenja	Industrijska postrojenja
\Exposure\Pollution	<i>Gas_stations.shp</i>				Benzinske postaje
\Exposure\Pollution	<i>Landfill.shp</i>				Odlagališta otpada
\Exposure\Pollution	<i>SEVESO.shp</i>				SEVESO objekti
\Exposure\Pollution	<i>Wild_dump_sites.shp</i>				Divlji deponij
\Exposure\Public_facilities	<i>Cemetery.shp</i>				Groblja
\Exposure\Public_facilities	<i>Health_facilities.shp</i>				Zdravstvene ustanove
\Exposure\Public_facilities	<i>Kindergarten_Schools.shp</i>				Vrtići i škole
\Exposure\Public_facilities	<i>Public_transport.shp</i>				Javni prijevoz
\Risk\Scenario1\5YR	<i>LU_flooded_5YR_modified.tif</i>				Velika
\Risk\Scenario1\25YR	<i>LU_flooded_25YR_modified.tif</i>	Srednja	Izloženost-Srednja vjerojatnost	Korištenje zemljišta	
\Risk\Scenario1\100YR	<i>LU_flooded_100YR_modified.tif</i>	Mala	Izloženost-Mala vjerojatnost	Korištenje zemljišta	
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>	Opasnost	Velika	Opasnost od poplava-Velika vjerojatnost	<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>D_V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>				Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Flood_extent_5yr.tif</i>				Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Flood_severity_5yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti

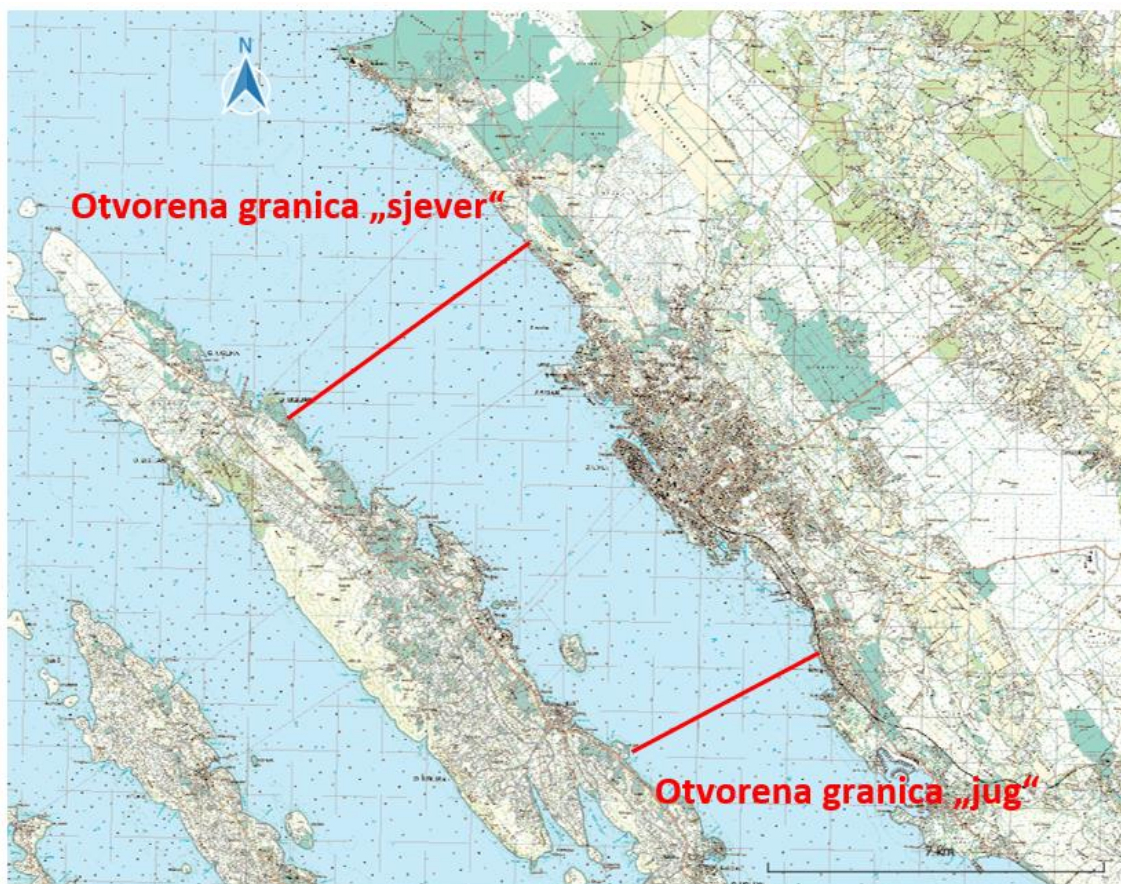


\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>				Brzina vode (m/s)
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>D_V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>		Srednja	Opasnost od poplava- Srednja vjerojatnost	Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Flood_extent_25yr.tif</i>				Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Flood_severity_25yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>				Brzina vode (m/s)
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>D_V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>		Mala	Opasnost od poplava- Mala vjerojatnost	Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Flood_extent_100yr.tif</i>				Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Flood_severity_100yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>				Brzina vode (m/s)
\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>				Razina rizika za građevine
\Risk\Scenario1\5YR	<i>Damages_percent_5yr.tif</i>		Velika	Rizik od poplava- Velika vjerojatnost	<i>(ne prikazuje se)</i>
\Risk\Scenario1\5YR	<i>Total_damages_5yr.tif</i>	Rizik			Direktne štete (EUR/m <sup>2</sup> )
\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>				Razina rizika za građevine
\Risk\Scenario1\25YR	<i>Damages_percent_25yr.tif</i>		Srednja	Rizik od poplava- Srednja vjerojatnost	<i>(ne prikazuje se)</i>
\Risk\Scenario1\25YR	<i>Total_damages_25yr.tif</i>				Direktne štete (EUR/m <sup>2</sup> )

\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>				Razina rizika za građevine ( <i>ne prikazuje se</i> )
\Risk\Scenario1\100YR	<i>Damages_percent_100yr.tif</i>			Mala	Rizik od poplava-Mala vjerojatnost
\Risk\Scenario1\100YR	<i>Total_damages_100yr.tif</i>				Direktne štete (EUR/m2)
\Hotspots	<i>Streams.shp</i>	Kritični podslivovi			Mreža kanala
\Hotspots	<i>podslivovi.shp</i>			Kritični podslivovi	Podslivovi – štete (EUR/m2)

## 4 Analiza opasnosti i rizika od poplava s mora u priobalnom dijelu naselja Zadar

U segmentu analize valnog generiranja i valnih deformacija za akvatorij grada Zadra, tretirani su scenariji vezani na postojeće stanje i u uvjetima potencijalnih klimatoloških promjena za 2100. godinu. Primjenom numeričkog modeliranja **valnog generiranja i valnih deformacija** dobivena su 2D polja značajnih valnih visina za predmetni akvatorij (Slika 4.1), pri čemu su za usvojeni smjer djelovanja vjetra i valova analizirane situacije postojećeg stanja izgrađenosti obale (2022.).



Slika 4.1. Akvatorij obuhvaćen prostornom domenom numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija

## 4.1 Uspostava numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija

### 4.1.1 Podaci o vjetru

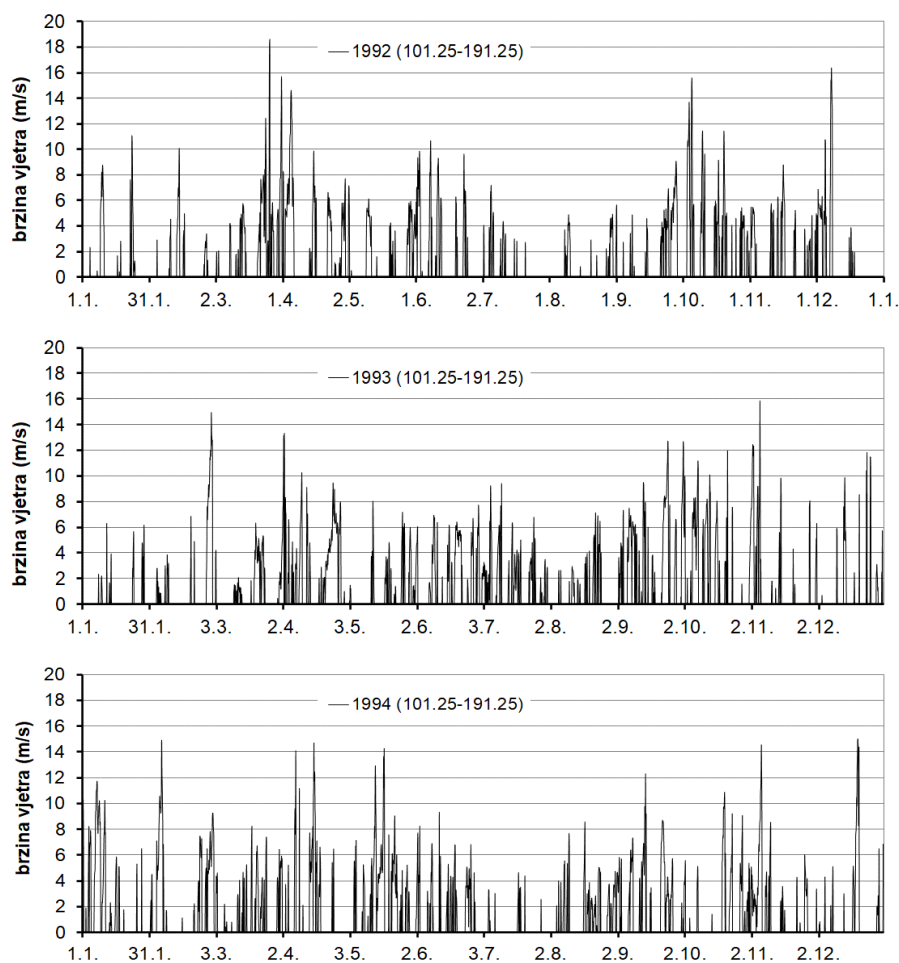
Za aktiviranje modela valne dinamike potrebni su podaci u vidu polja vjetrovnog djelovanja iznad analiziranog područja (atmosferski model). U Državnom hidrometeorološkom zavodu Hrvatske je trenutno operativno funkcionalan atmosferski model Aladin-Hr u hidrostatskoj verziji baziranoj na primitivnim jednadžbama sa numeričkom implementacijom razvijenom u kooperaciji sa nekoliko nacionalnih meteoroloških institucija. Model proizlazi iz globalnog ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) modela od Meteo-France (Courtier i sur., 1991.), sa kojime izmjenjuje i podatke o većini fizikalnih relevantnih parametara potrebnih za definiranje rubnih uvjeta (Cordoneanu i Geleyn, 1998.). Model Aladin koristi prostornu rezoluciju dostatnu za razlučivanje intenzivnih izmjena u smjerovima i intenzitetima prevladavajućih vjetrova na području Jadrana (Brzović i Strelec-Mahović, 1999.; Ivatek-Sahdan i Tudor, 2004.). Upravo izlazni skup podataka o brzinama i smjerovima vjetra iz modela Aladin pogodan je za numeričko spektralno modeliranje valne dinamike na području Jadrana.

Relevantni podaci o prognozi dugoročne vjetrovne klime za rubne uvjete na kontaktu sa atmosferom, za povratne periode od 5, 25 i 100 godina, dobiveni su temeljem statističke obrade ekstrahiranih rezultata o brzini vjetra na poziciji grada Zadra iz atmosferskog modela Aladin-HR za razdoblje 1992.-2001. (prostorna rezolucija 4km i vremenska rezolucija 3 sata).

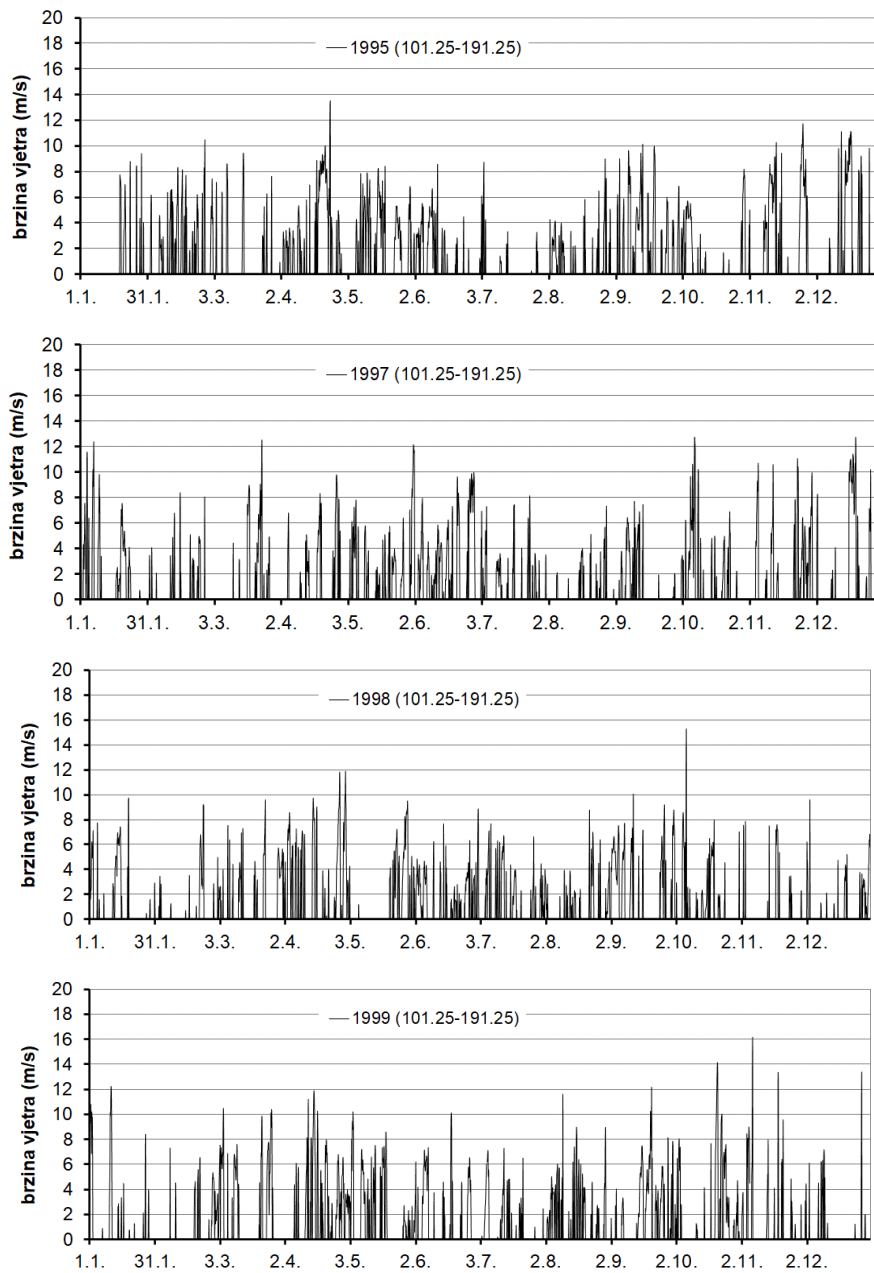
Obzirom na rezultate recentnih svjetskih istraživanja (Bonaldo i sur., 2020.; Benetazzo i sur., 2012.; Conte i Lionello, 2013.; Giorgi i Lionello, 2008., Lionello i sur., 2003.; Lionello i sur., 2012.; Marcos i sur., 2011.; Trenberth i sur., 2003.; Trincardi i sur. 2016.) može se konstatirati da u narednom razdoblju od 100 godina ne treba očekivati klimatske promjene u intenzitetu vjetra, a posljedično i u valnoj klimi. Stoga su proračunate spektralne karakteristike valova u dubokovodnom području, vezane uz povratna razdoblja 5, 25 i 100 godina, referentne i za sadašnje stanje i za buduće stanje (2100.) pod utjecajem klimatskih promjena. S druge strane, promjene razine mora uslijed klimatskih promjena uzet će se u obzir, a što će rezultirati sa promjenom polja valova, primarno u plitkovodnom i plavljenom području. Dakle, temeljem dobivenih rezultata numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija (polja značajnih valnih visina, vršnih perioda i incidentnog smjera valovanja), te

uvida u sadržaje postojećeg stanja obalne crte, prepoznat će se lokaliteti i mehanizmi mogućih ugroza uslijed valovanja bez i sa klimatološkim promjenama.

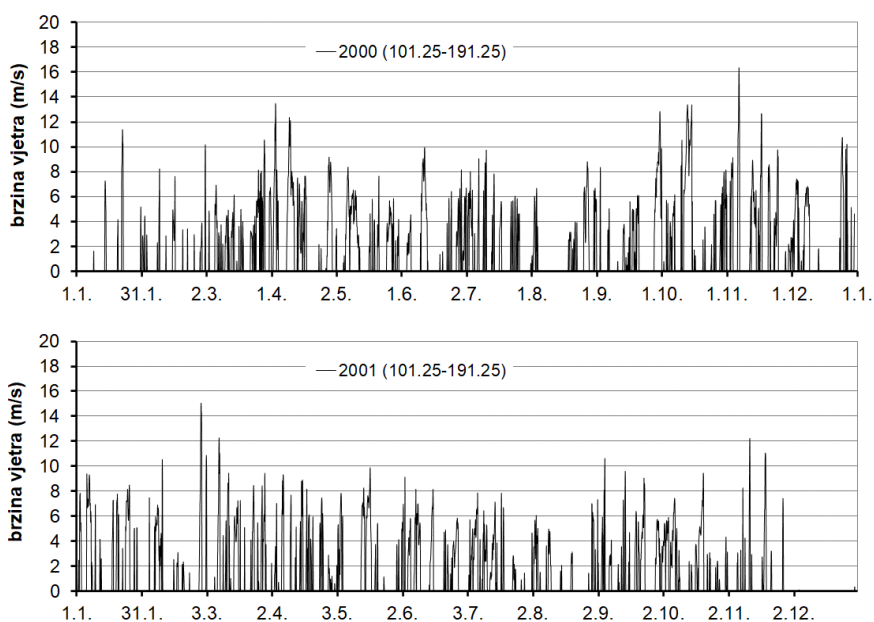
Kako je u fokusu ovog istraživanja kritični sektor djelovanja vjetra „juga“, za pripadni vjetrovni sektor usvojen je raspon smjerova vjetra od  $101.25^{\circ}$  do  $191.25^{\circ}$ . Na Slici 4.1.1 prikazane su ekstrahirane brzine vjetra iz modela Aladin – HR za navedeni sektor i za poziciju grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001. Maksimalne godišnje brzine vjetra za razdoblje 1992.-2001., prikazane su na Slici 4.1.2.



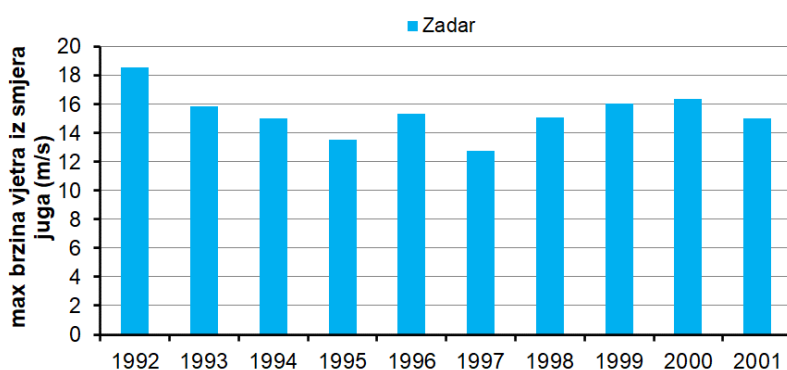
Slika 4.1.1. Ekstrahirane brzine vjetra iz modela Aladin – HR za sektor „juga“ ( $101.25^{\circ}$  -  $191.25^{\circ}$ ) za poziciju grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001.



Slika 4.1.2. Nastavak: Ekstrahirane brzine vjetra iz modela Aladin – HR za sektor “juga” (101.25<sup>0</sup> - 191.25<sup>0</sup>) za poziciju grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001.



Slika 4.1.3. Nastavak: Ekstrahirane brzine vjetra iz modela Aladin – HR za sektor “juga” (101.25<sup>0</sup> - 191.25<sup>0</sup>) za poziciju grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001.



Slika 4.1.4. Maksimalne godišnje brzine vjetra iz modela Aladin – HR za sektor “juga” (101.25<sup>0</sup> - 191.25<sup>0</sup>) i poziciju grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001.

Maksimalne godišnje brzine vjetra iz sektora “juga” tijekom razdoblja 1992.-2001. za poziciju grada Zadra, prikazane na Slici 4.1.2, predstavljaju statistički uzorak temeljem kojeg se provodi analiza vjerojatnosti pojave za povratne periode od 5, 25 i 100 godina. U analizi je korištena GEV (eng. *general extream value*) i troparametarska Weibull distribucija, a rezultati provedbe spomenutog postupka prikazani su u Tablici 4.1.1. Zaključno, lokalni model valnog generiranja i valnih deformacija, sa prostornom domenom prikazanom na Slici 4.1 (akvatorij grada Zadra), na kontaktu

mora i atmosfere forsirat će se homogenim i stacionarnim poljem vjetra sa brzinama prezentiranim u Tablici 4.1.1.

Tablica 4.1.1. Dugoročna prognoza brzine vjetra iz sektora “juga” na poziciji grada Zadra

Povratni period	Brzina vjetra (m/s) (WEIBULL)	Povratni period	Brzina vjetra (m/s) (GEV)
5	16,70	5	16,67
25	18,35	25	18,35
100	19,42	100	19,42

#### 4.1.2 Podaci o valovima

Obzirom da se valovi uzrokovani vjetrovima drugog kvadranta, primarno juga, generiraju na relativno dugom privjetrištu, na kojem postoji značajniji utjecaj nelinearnih interakcija u samom procesu generiranja, prvotno su prikupljeni i analizirani rezultati iz provedenih numeričkih simulacija valnog generiranja i valnih deformacija na prostornoj domeni koja obuhvaća cijeli jadranski bazen (Slika 4.1.5 ; Ocvirk, 2010.). Na Slici 4.1.5 prikazana je i primijenjena modelska prostorna diskretizacija s trokutnim ćelijama (nestrukturirana proračunska mreža). Rezultanta polja značajnih valnih visina iz numeričkih simulacija valnog generiranja tijekom razdoblja 1992.-2001. (Ocvirk, 2010.) koriste se za dugoročnu prognozu valnih parametara (povratni periodi 5, 25, i 100 godina) na poziciji otvorene granice lokalnog modela (Slika 4.1, akvatorij grada Zadra).

U okviru rezultata istraživanja Ocvirk (2010.) primijenjen je numerički spektralni model valnog generiranja i valnih deformacija Mike 21/SW, uz vjetrovno forsiranje sa poljem vjetra iz modela Aladin-HR sa prostornom rezolucijom 4km i vremenskom rezolucijom 3h. U korištenom modelu valnog generiranja i valnih deformacija (Ocvirk, 2010.) korištena je puna spektralna formulacija (Komen-a i sur., 1994.), a za spektralnu diskretizaciju frekvencijske domene korištena je logaritamska skala od minimalne frekvencije 0.05 Hz (valni period 20 s) do maksimalne frekvencije 0.95 Hz (valni period 1.05 s), kroz 32 diskretna koraka. Modelom su obuhvaćeni procesi valnog generiranja vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije i utjecaja pličine (Johnson, 2000. ; Janssen, 1992., 1998.), te disipacijskog procesa pri površinskim lomovima valova (eng. white capping). Korišteni su disipacijski koeficijenti s prostorno homogenim vrijednostima 2.5 i 0.5 (Lončar i sur., 2010.; 2013.). Član-funkcija izvora u jednadžbi očuvanja valnog djelovanja



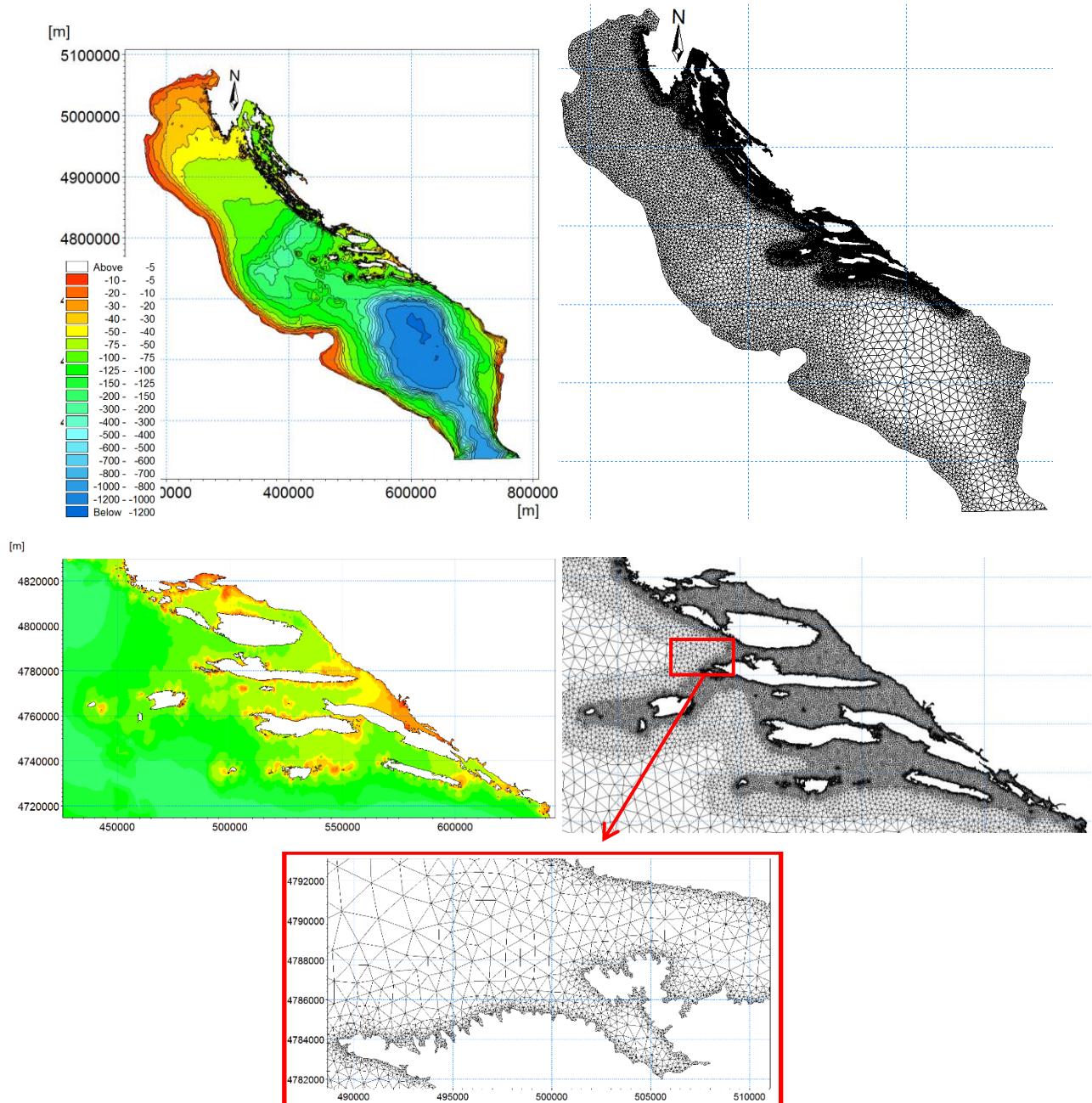
tretirana je na temelju 3. generacije u formulaciji opisa tog člana, a numerička integracija provedena je prema metodologiji prikazanoj u radovima Hercbach-a i Janssen-a (1999.).

U modelskoj domeni (Slika 4.1.5) nema otvorenih granica, a sve krute granice su potpuno apsorpcijske. Obzirom da je refleksija valova ima utjecaj samo u zoni vrlo bliskoj obali, usvajanje potpune apsorpcije valne energije na obalnoj crti neće utjecati na rezultate analiziranih procesa. Zanemarivanjem otvorene granice na Otrantu, unesena je pogreška u modelskom generiranju valova, osobito pri vjetrovima iz SE smjera. Obzirom na položenost obalne crte unesena pogreška je prihvatljivo mala te ima minoran utjecaj na modelske rezultate u području srednjeg i sjevernog Jadrana. Početni uvjeti definirani su s nultim valnim spektrom, odnosno s odsustvom inicijalnog valnog gibanja na cijelom modeliranom području.

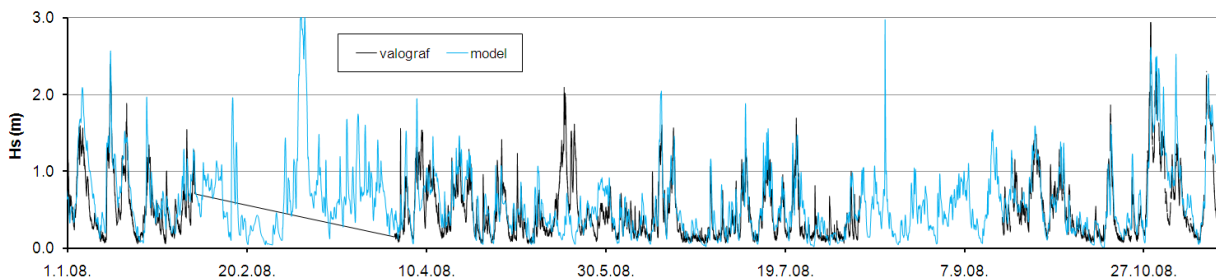
Za parametrizaciju modela valnog generiranja na području Jadrana (Slika 4.1.5) korišteni su rezultati mjerenja valne dinamike tijekom provedbe projekta *Program praćenja stanja Jadranskog mora* (Andročec i sur., 2009.). Mjerene su valne karakteristike na valografskoj postaji smještenoj u području otvorenog mora sjevernog Jadrana (platforma Ivana;  $\varphi = 44^{\circ} 44.5'N$ ,  $\lambda = 13^{\circ} 10.2'E$ ). Na Slici 4.1.6 prikazana je usporedba izmjerene i modelirane dinamike značajnih valnih visina za poziciju valografske postaje tijekom analiziranog razdoblja 1.1.2008. - 15.11.2008. Slika 4.1.7 prikazuje histogram greške (izmjerene  $H_s$  i modelirane  $H_s$ ) za isto razdoblje. Srednja greška modeliranih vrijednosti polusatno usrednjenih značajnih valnih visina na poziciji valografa u odnosu na izmjerene vrijednosti za razdoblje simulacije 1.1.2008.-15.11. 2008. iznosi  $AE = -0.064$  m, dok je korijen srednjeg kvadratnog odstupanja  $RMSE = 0.28$ .

Potrebno je skrenuti pažnju da je pri forsiranju modela korištena 3-satna pobuda iz prognostičkog atmosferskog modela Aladin-Hr, dok se valografskim zapisom osigurava polusatna rezolucija podataka. Prema tome, vjetrovni „pikovi“ na vremenskoj skali manjoj od 3 sata su filtrirani, odnosno nisu obuhvaćeni ulaznim podacima. U slučaju većih privjetrišta (otvoreno more pri djelovanju Juga) i pozicije valografa smještenog u sjevernom dijelu Jadrana spomenuti nedostatak izlaznih rezultata modela Aladin-Hr nije bitan. S druge strane, kod manjih privjetrišta u kojima je generiranje valova ograničeno duljinom privjetrišta a ne trajanjem djelovanja vjetra, korištenje tro-satne rezolucije podataka o vjetru može rezultirati s podbacivanjem modelskih rezultata značajnih valnih visina i valnih perioda. Ispravnost parametrizacije numeričkog modela Mike 21/SW i njegovih rezultata na području otvorenog mora verificirani su i usporedbom sa rezultatima prikazanim u radu Katalinić (2019.) za 4 točke (Sjeverni Jadran -  $44.5^{\circ}/14^{\circ}$ ; Srednji Jadran -  $43.5^{\circ}/15.5^{\circ}$ ; Južni Jadran –  $42.5^{\circ}/17^{\circ}$  i  $42.5^{\circ}/17.5^{\circ}$ ) iz baze podataka Fugro OCEANOR o površinskim valovima u Jadranskom moru za

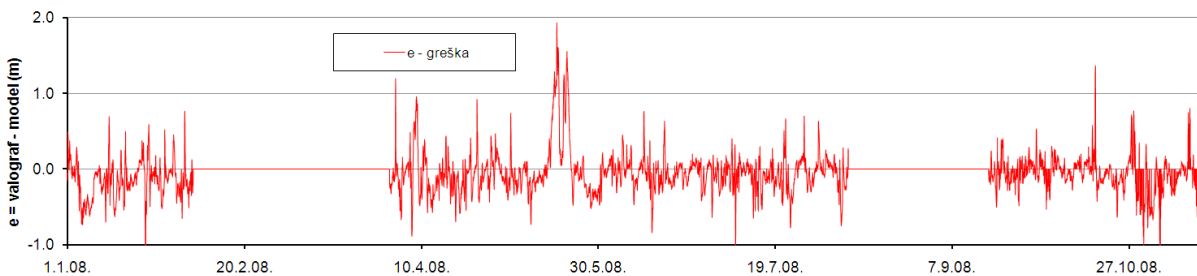
razdoblje 1992. - 2016. Usporedba rezultata Hs za navedene 4 lokacije prema Ocvirk (2010.) i Katalinić (2019.), za povratna razdoblja 5, 25 i 100 godina, prikazana je u Tablici 4.1.2.



Slika 4.1.5. Prostorna diskretizacija modelske domene regionalnog modela valnog generiranja i valnih deformacija (jadranski bazen) s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena na batimetrijskoj podlozi



Slika 4.1.6. Usporedba izmjenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina  $H_s$  na poziciji valografske postaje (platforma Ivana;  $\varphi=44^{\circ} 44.5'N$ ,  $\lambda=13^{\circ}10.2'E$ )

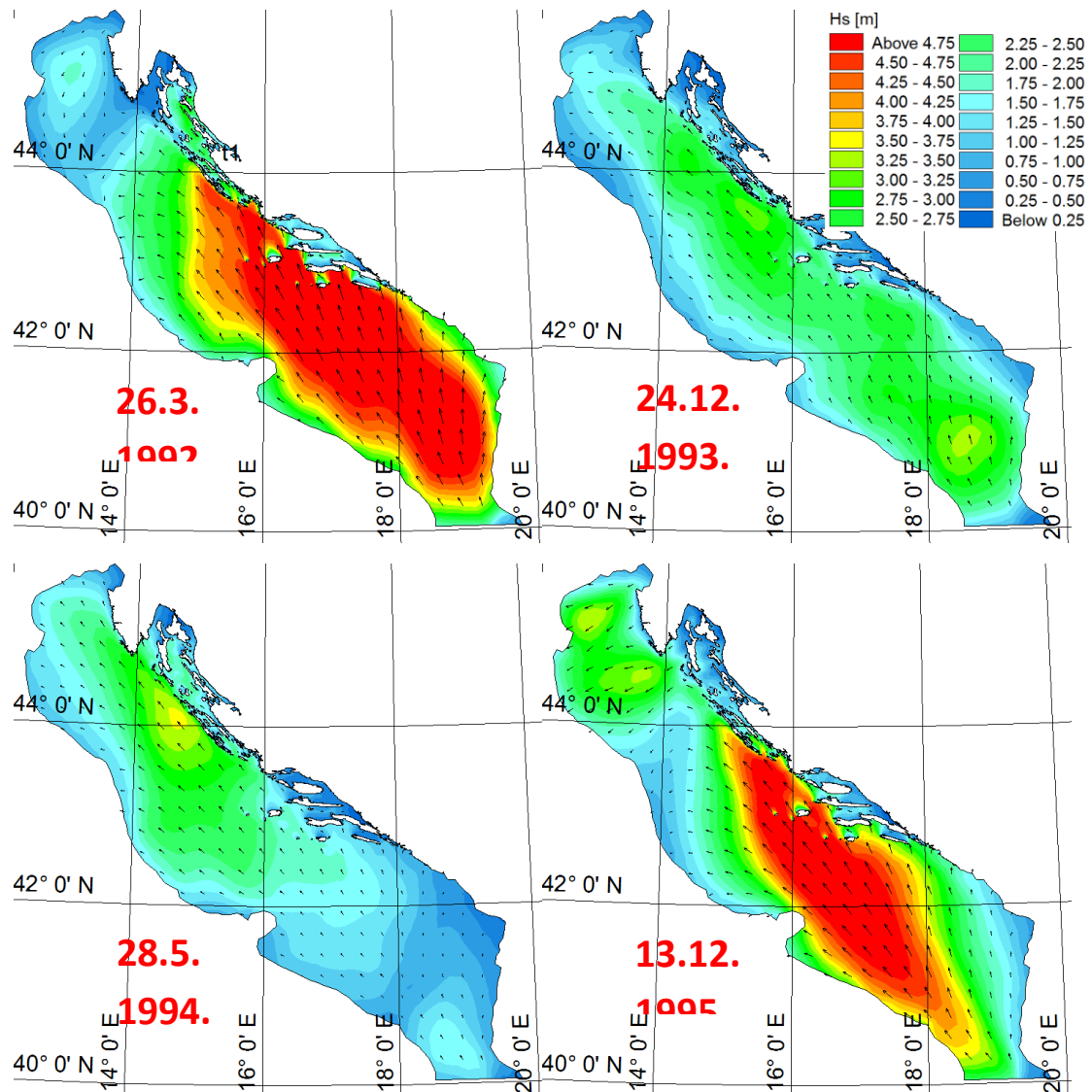


Slika 4.1.7. Histogram greške ( $e = \text{valograf} - \text{model}$ ) za modelirane vrijednosti značajnih valnih visina  $H_s$  na poziciji valografske postaje (platforma Ivana;  $\varphi=44^{\circ} 44.5'N$ ,  $\lambda=13^{\circ}10.2'E$ ) za provedenu numeričku simulaciju u 2008. godini

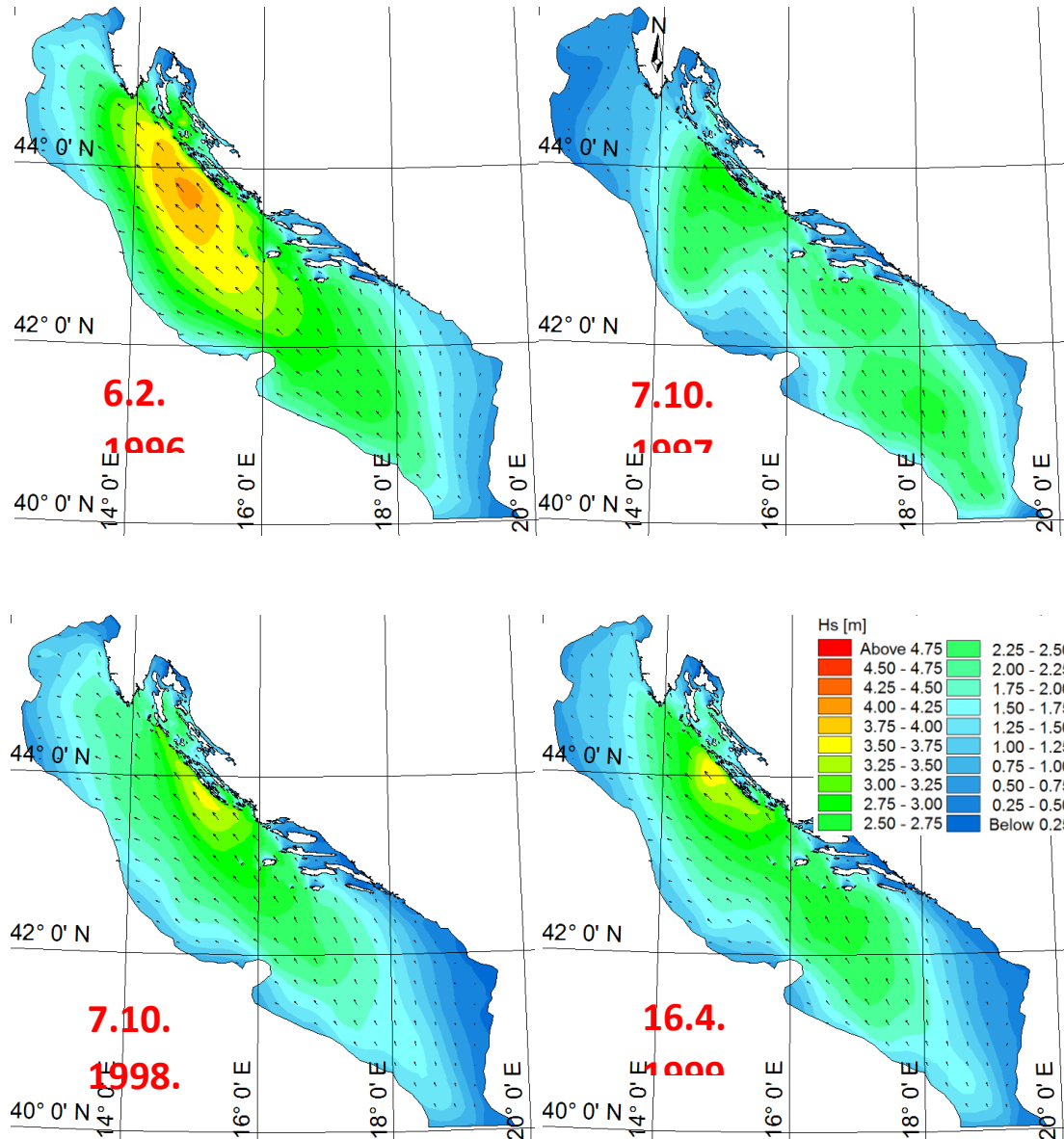
Tablica 4.1.2. Usporedba rezultata  $H_s$  za 4 lokacije prema Ocvirk (2010.) i Katalinić (2019.), za povratna razdoblja 5, 25 i 100 godina

	Lat (°)	Long (°)	PP = 5 g.	PP = 25 g.	PP = 100 g.
	<b>Hs (m)</b>				
Katalinić (2019.)	44,5	14,0	5,93	6,87	7,96
	43,5	15,5	5,72	6,59	7,61
	42,5	17,0	6,41	7,39	8,55
Ocvirk (2010.)	42,5	17,5	6,70	7,78	9,07
	44,5	14,0	4,92	6,48	7,82
	43,5	15,5	5,75	7,12	9,63
	42,5	17,0	5,22	7,18	9,52
	42,5	17,5	5,78	8,02	9,82

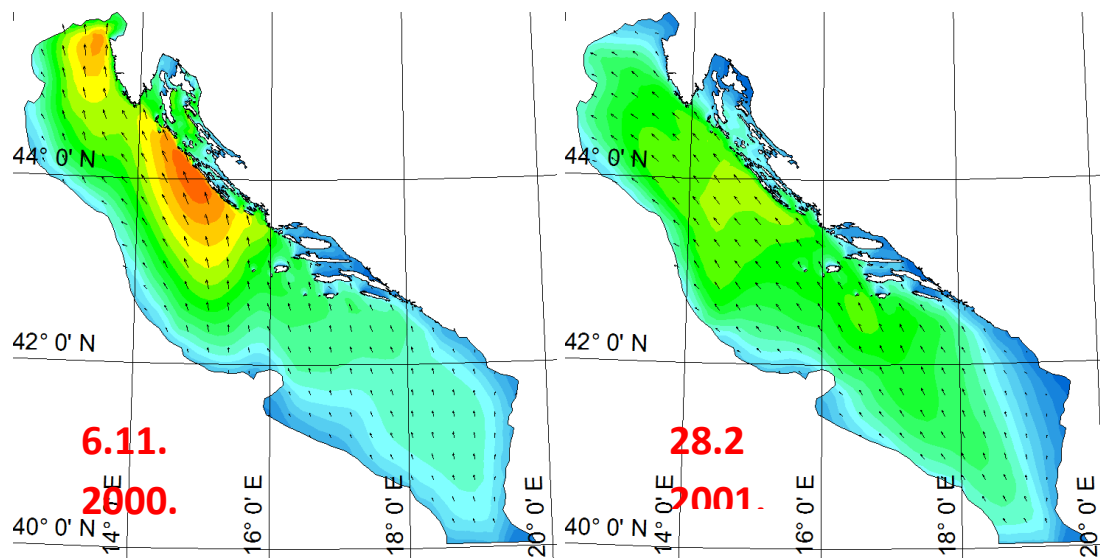
Za formiranje skupa relevantnih podataka o značajnim valnim visinama  $H_s$  na poziciji otvorenih granica modela valnog generiranja i valnih deformacija za akvatorij grada Zadra (Slika 4.1) odabrani su termini pojave maksimalnih godišnjih značajnih valnih visina pri djelovanju juga po godinama u razdoblju 1992.-2001. (Ocvirk, 2010.). Vrijednosti maksimalnih godišnjih značajnih valnih visina u akvatoriju grada Zadra za razdoblje 1992.-2001. prikazane su na Slikama 4.1.8 - 4.1.10.



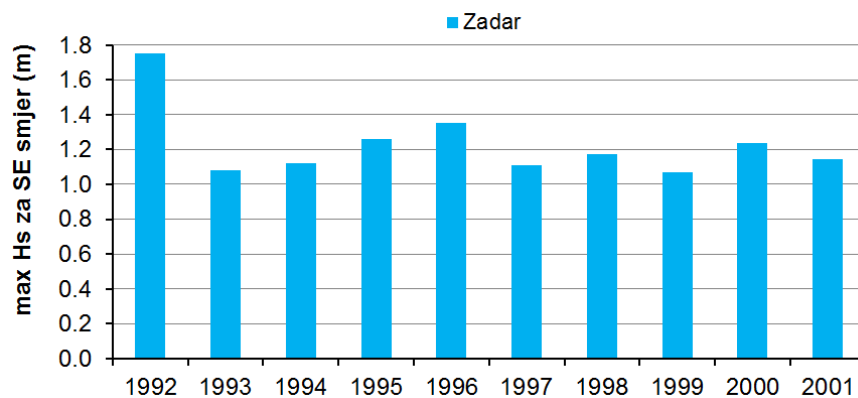
Slika 4.1.8. Polja značajnih valnih visina  $H_s$  u terminima pojave maksimalnih godišnjih značajnih valnih visina u akvatoriju grada Zadra (Ocvirk, 2010.)



Slika 4.1.9. Nastavak. Polja značajnih valnih visina  $H_s$  u terminima pojave maksimalnih godišnjih značajnih valnih visina u akvatoriju grada Zadra (Ocvirk, 2010.)



Slika 4.1.10. Nastavak. Polja značajnih valnih visina  $H_s$  u terminima pojave maksimalnih godišnjih značajnih valnih visina u akvatoriju grada Zadra (Ocvirk, 2010.)



Slika 4.1.11. Maksimalne godišnje značajne valne visine iz modela valnog generiranja i valnih deformacija (područje Jadrana) za poziciju akvatorija grada Zadra tijekom razdoblja 1992.-2001.

Maksimalne godišnje značajne valne visine tijekom razdoblja 1992.-2001. za poziciju grada Zadra, prikazane na Slici 4.1.11, predstavljaju statistički uzorak temeljem kojeg se provodi analiza vjerojatnosti pojave za povratne periode od 5, 25 i 100 godina. U analizi je korištena GEV distribucija, a rezultati provedbe spomenutog postupka prikazani su u Tablici 4.1.3. Zaključno, model valnog

generiranja i valnih deformacija, sa prostornom domenom prikazanom na Slici 4.1 (akvatorij grada Zadra), na otvorenoj granici "jug" (Slika 4.1) forsira se spektralnim valnim parametrima prikazanim u Tablici 4.1.3.

Potrebno je napomenuti da postoji elaborat vjetrovalne klime za dubokovodno područje ispred luke Gaženica (Hydroexpert, 2005.), u kojem su definirana spektralna valna obilježja za kritične sektore vjetrovnog i valnog djelovanja (Tablica 4.1.4). Te vrijednosti mogu komparativno poslužiti kao dodatna kontrola za vrijednosti valnih parametara dobivenih prethodno navedenom metodologijom (Tablica 4.1.3) za poziciju otvorene granice "jug" u lokalnom modelu akvatorija grada Zadra.

Tablica 4.1.3. Dugoročna prognoza značajnih valnih visina  $H_s$  i vršnih spektralnih perioda  $T_p$  za otvorenu granicu "jug" u modelu valnog generiranja i valnih deformacija (akvatorij grada Zadra)

Povratni period	$H_s$ (m) (GEV)	$T_p$ (s)
5	1,3	4,1
25	1,6	4,4
100	1,9	4,7

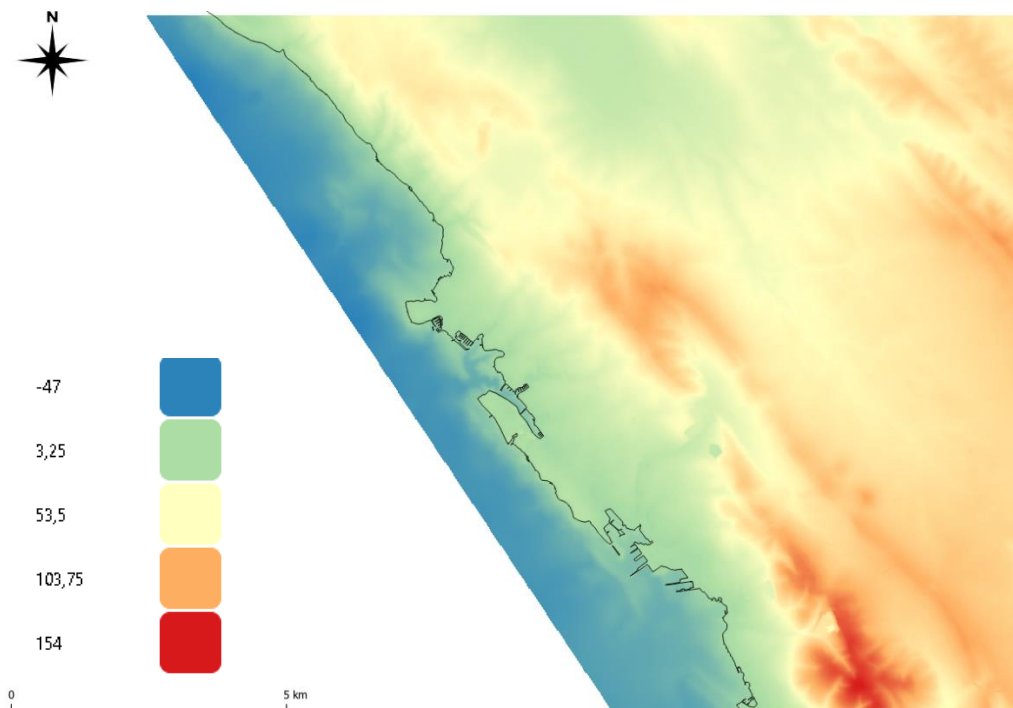
Tablica 4.1.4. Usporedba značajnih valnih visina  $H_s$  za SE incidentni smjer valovanja, dobivenih temeljem prezentirane metodologije u ovom radu i predočenih u elaboratu vjetrovalne klime za dubokovodno područje ispred luke Gaženica (Hydroexpert, 2005.)

$H_s$ (m) usvojena metodologija			$H_s$ (m) Hydroexpert, 2011.		
5 god.	20 god.	100 god.	5 god.	20 god.	100 god.
1,3	1,6	1,9	1,6	1,8	1,9

Kako se iz komparativnih rezultata prikazanih u Tablici 4.1.4 može vidjeti, vrijednost  $H_{SPP=100g}$  proračunata usvojenom metodologijom istovjetna je proračunatoj vrijednosti  $H_s$  u sklopu reference Hydroexpert (2005.).

### 4.1.3 Podaci o dubinama i visinama

Podaci o dubinama mora i visinama preuzeti su iz objedinjene rasterske podloge (dubine i visine zajedno) u rezoluciji 1m x 1m (Slika 4.1.12). Za potrebe modeliranja valnog generiranja i valnih deformacija iz prikazanog rastera (Slika 4.1.12) ekstrahirani su podaci koji pripadaju prostornom obuhvatu proračunske mreže (prostorne domene modela, Slika 4.1), dok su na preostalom dijelu proračunske mreže, na kojem nedostaju rasterski podaci, dodatno primijenjeni podaci o dubinama iz hidrografskih karata u mjerilu 1:10000. Temeljem navedenih podloga definirani su podaci o dubinama/visinama za svaki numerički čvor proračunske mreže, a kako je to i prikazano u sljedećem poglavlju.



Slika 4.1.12. Prikaz rasterskih podataka rezolucije 2m x 2m za dubinu mora i visinu terena u GIS sučelju (dobiveno od Naručitelja)

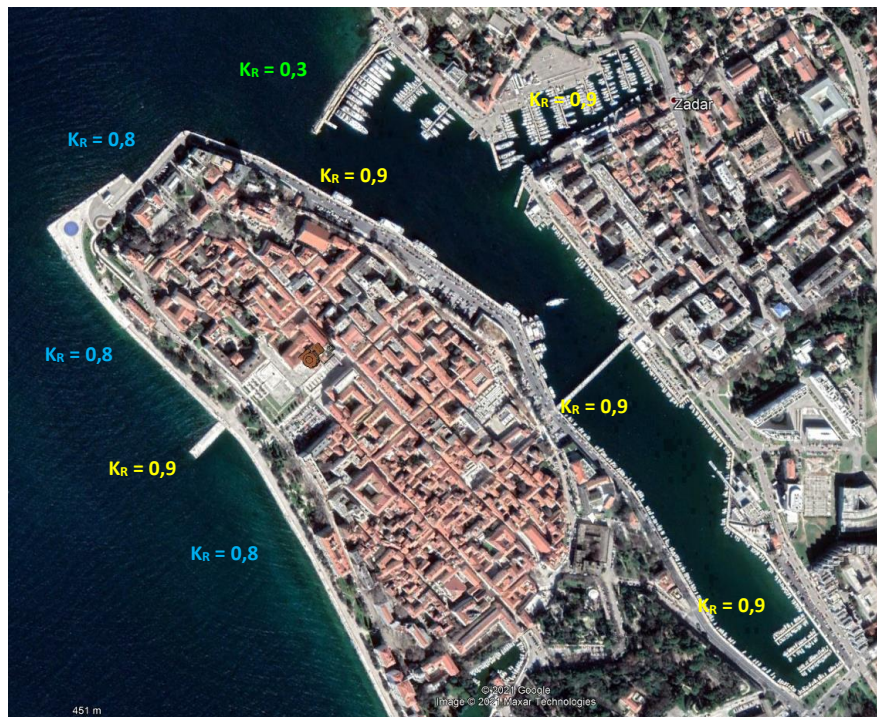


#### 4.1.4 Podaci o refleksijskim svojstvima obalne linije

Implementacija željenog stupnja refleksije od obalne crte i refleksije od lukobranskih konstrukcija u prostornoj domeni numeričkog modela definirana je sa odgovarajućim koeficijentima refleksije. Na Slici 4.1.13 dan je prikaz primijenjenih (usvojenih) refleksijskih svojstava obalne crte na lokacijama postojećih luka i marina. Preostali dio obalne crte, koji nije prikazan na Slici 4.1.13, tretiran je kao slabo reflektivan, s pripadnim koeficijentom refleksije  $K_R = 0,1$ , dok je sam rub modelske domene na mjestima nadmorskih visina  $> 0$  tretiran sa koeficijentom refleksije  $K_R = 0$ .



Slika 4.1.13. Refleksijsko-transmisijska svojstva uzduž obalne crte predmetnog akvatorija



Slika 4.1.14. Refleksijsko-transmisijska svojstva uzduž obalne crte predmetnog akvatorija

#### 4.1.5 Podaci o morskim razinama

Informacije o rezidualima morskih razina, u uvjetima 5, 25 i 100 godišnjeg povratnog perioda, preuzeti su iz projekta VEPAR-MORE (Tablica 4.1.5). Potrebno je napomenuti da će se uslijed promjene razine mora u scenariju klimatskih promjena (2100. godina) promijeniti doseg vala uzduž obalne crte, a što će se i analizirati u sklopu provedbe daljnjeg istraživanja (numeričke simulacije). Za numeričku simulaciju u uvjetima klimatskih promjena prema scenariju za 2100. godinu usvojit će se porast razine mora od 60 cm (Tablica 4.1.5), a što je najvjerojatniji scenarij sudeći po posljednjem IPCC izvješću (<https://podaac.jpl.nasa.gov/announcements/2021-08-09-Sea-level-projections-from-the-IPCC-6th-Assessment-Report>), kao i gornja granica prema Strategiji prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu. Deterministička komponenta plimnog signala iznosi +0,3 m.

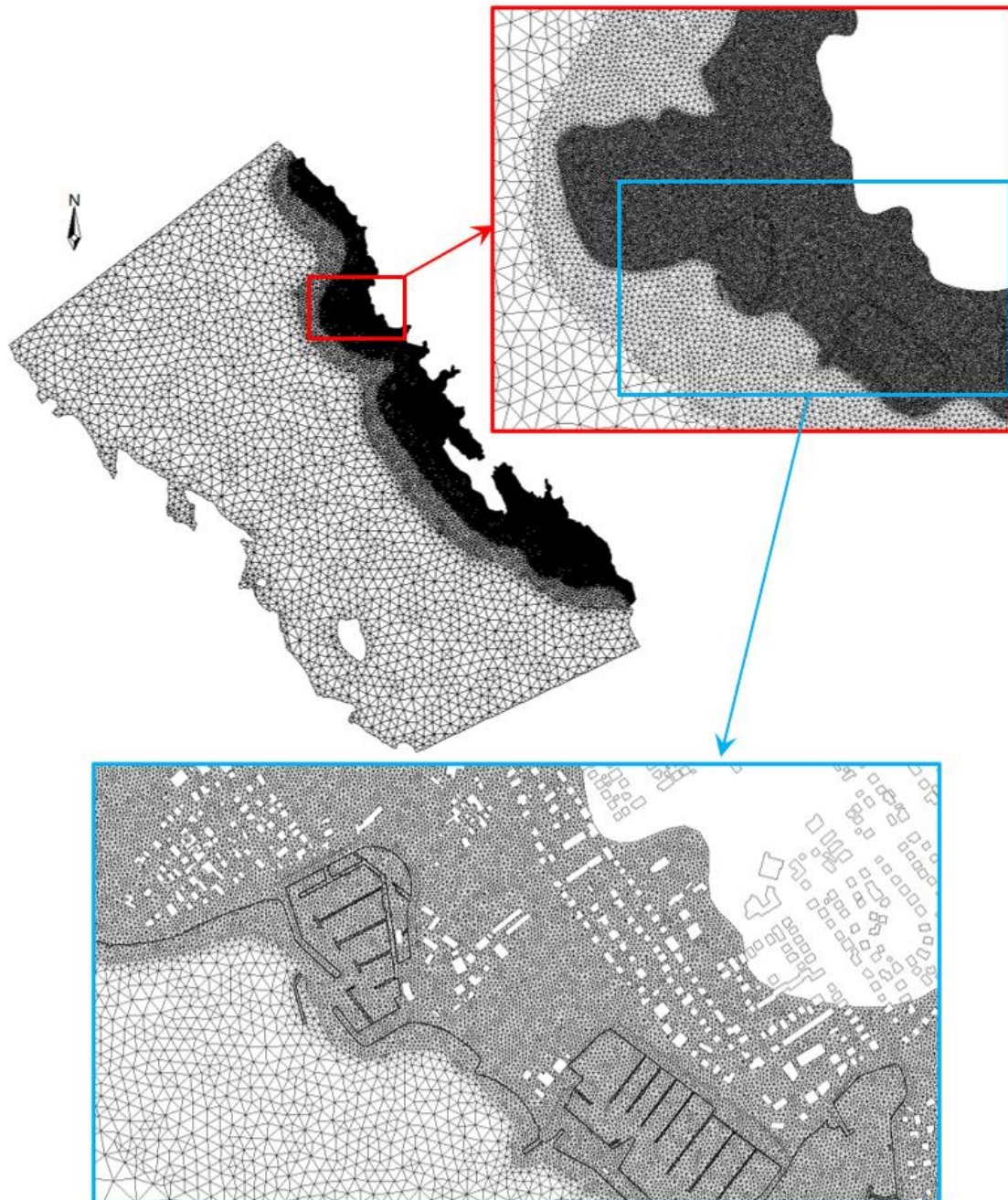
Tablica 4.1.5. Rezidualne razine mora za povratne periode od 5, 25 i 100 godina za lokaciju Zadar, sa i bez utjecaja klimatskih promjena

Razina mora - Zadar (cm)			
Period	5 godina	25 godina	100 godina
bez klim. promjena	70,1	82,5	93
sa klim. promjenama	130,1	142,5	153

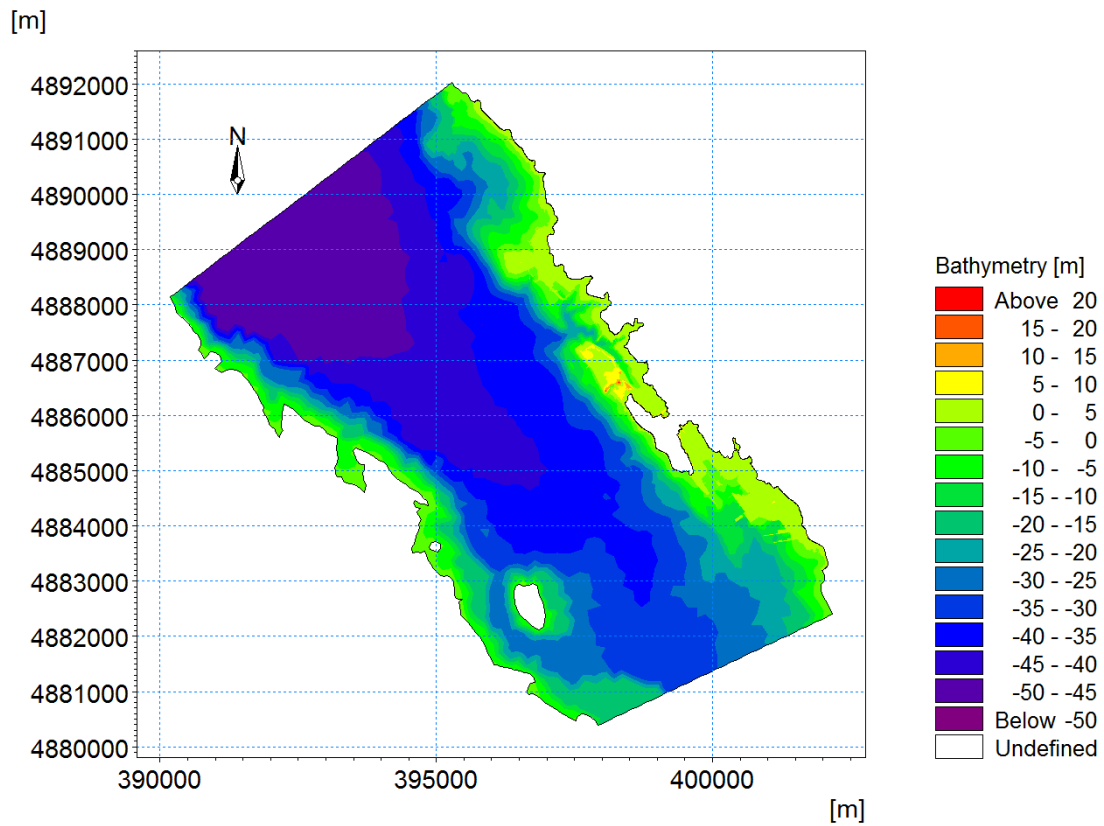
#### 4.1.6 Proračunska mreža

Proračunska mreža je varijabilnog prostornog koraka, od 200 m na većim dubinama do 2 m u području obalne linije i na kopnu (Slika 4.1.15). Proračunska mreža ima cca 180000 numeričkih čvorova (Napomena: potrebno najmanje 30 GB RAMa za provedbu simulacija, proračunsko vrijeme cca 30 sati sa Intel procesorom I9, 12 jezgri).

Na Slici 4.1.16 prikazana je prostorna domena numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija sa grafičkom interpretacijom primijenjenih podataka o dubinama mora i visinama terena.



Slika 4.1.15. Proračunska mreža na prostornoj domeni modela valnog generiranja i valnih deformacija za područje grada Zadra

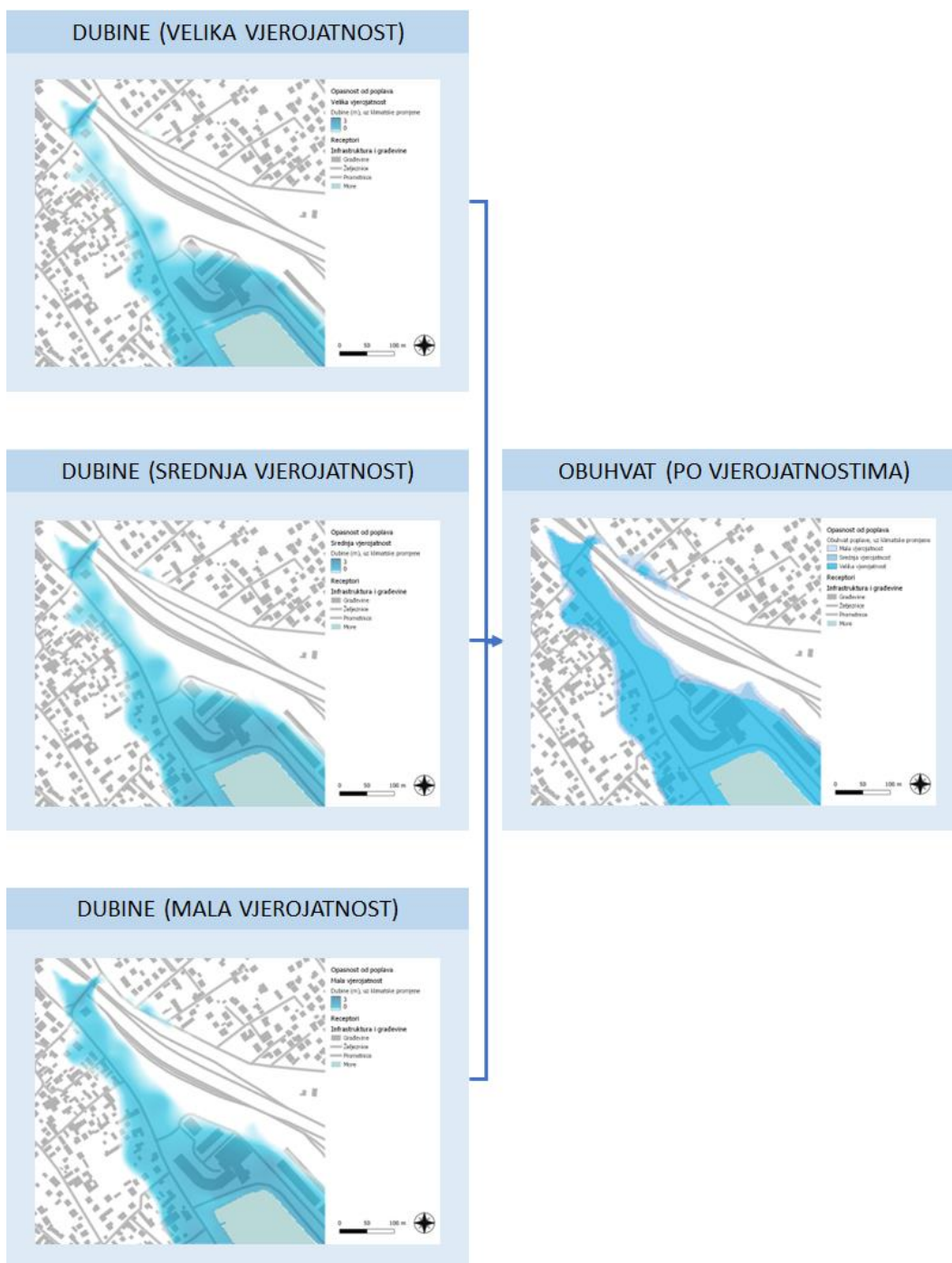


Slika 4.1.16. Prostorna domena modela valnog generiranja i valnih deformacija za područje grada Zadra

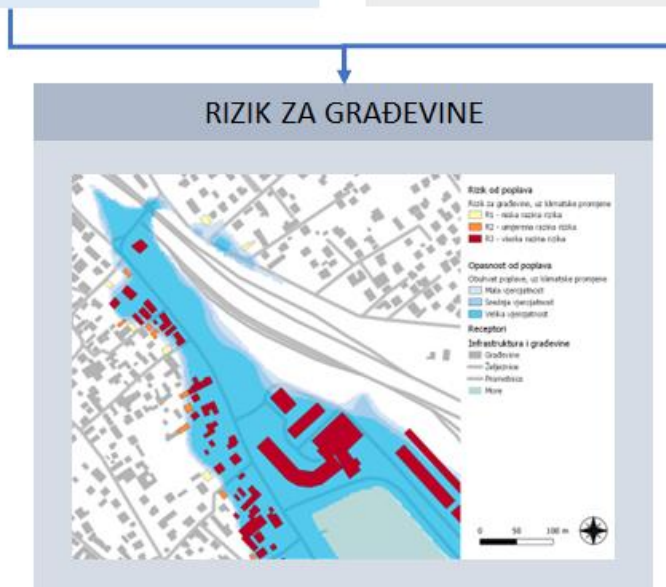
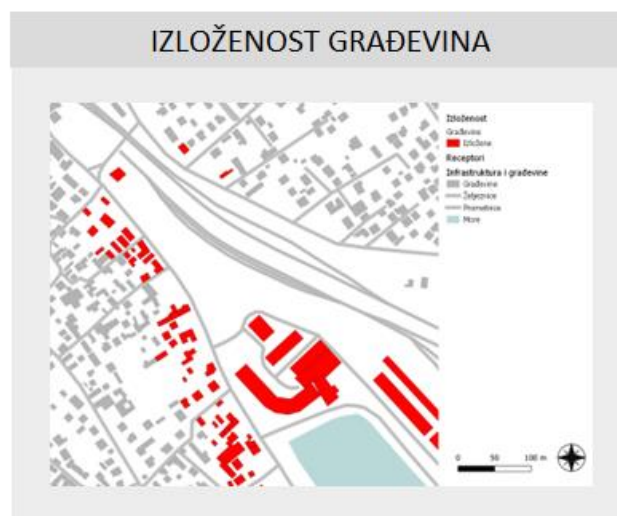
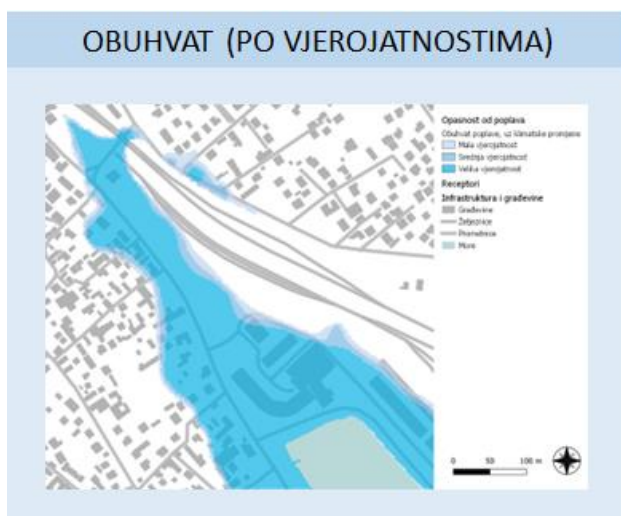
## 4.2 Metodologija analize opasnosti i rizika od poplava s mora

Metodologija procjene opasnosti i rizika od poplava s mora provodi se slično procjeni rizika od pluvijalnih poplava (opisano u poglavljima 3.2 i 3.3), međutim nekoliko je bitnih razlika koje su preuzete iz Studije upravljanja rizicima od poplava mora – VEPAR (Građevinski fakultet u Zagrebu, 2022.):

- Ukupno se analizira šest scenarija (za razliku od tri scenarija kod pluvijalnih poplava), pri čemu se pojava velika, srednje i mala vjerojatnosti visokih razina mora i valova zasebno promatra za današnju klimu i buduću klimu uz utjecaj klimatskih promjena.
- Analiza opasnosti provodi se samo za dubinu vode, s obzirom da su kod poplava s mora brzine vode zanemarive. Stoga se ne provodi niti analiza razine opasnosti, već se dubine vode za tri različite vjerojatnosti prikazuju kroz obuhvat poplave na istoj karti (Slika 4.2.1).
- Analiza rizika se provodi kroz procjenu razine rizika za građevine. Pritom se koristi drugačiji pristup nego kod pluvijalnih poplava. Naime, za razliku od pluvijalnih poplava gdje je razina rizika bila direktno vezana uz razinu opasnosti (uz zanemarivanje ranjivosti pojedinih receptora), u predmetnoj analizi se razina rizika veže uz obuhvat poplave i vjerojatnost njene pojave, pa se stoga visoka razina rizika pridružuje građevinama koje su izloženi poplavi velike vjerojatnosti, dok se niska razina rizika pridružuje građevinama koje su izložene poplavi mala vjerojatnosti (Slika 4.2.2).



Slika 4.2.1. Shematski prikaz koncepta analize opasnosti – dubine poplave i obuhvat poplave po vjerojatnostima.



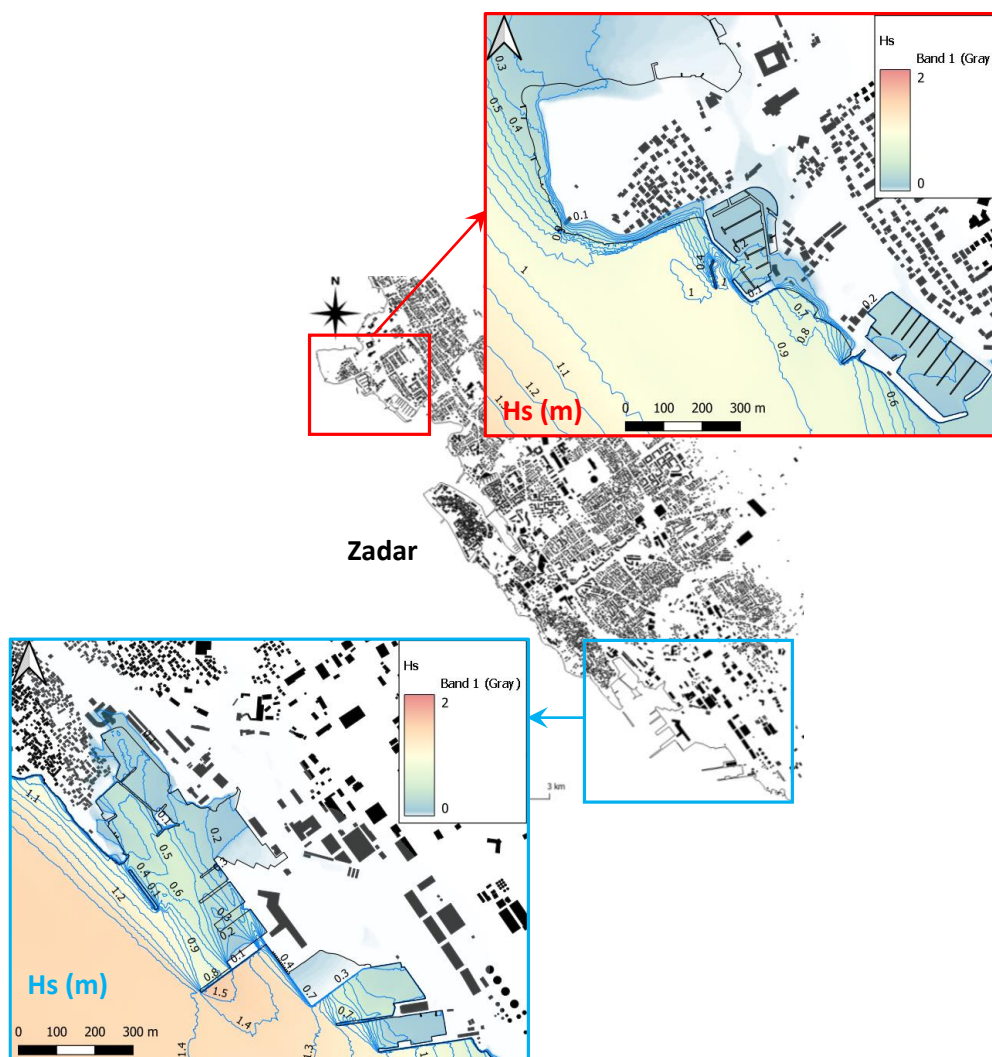
Slika 4.2.2. Shematski prikaz koncepta analize rizika za građevine procijenjenog prema izloženosti građevina obuhvatu poplave različite vjerojatnosti.



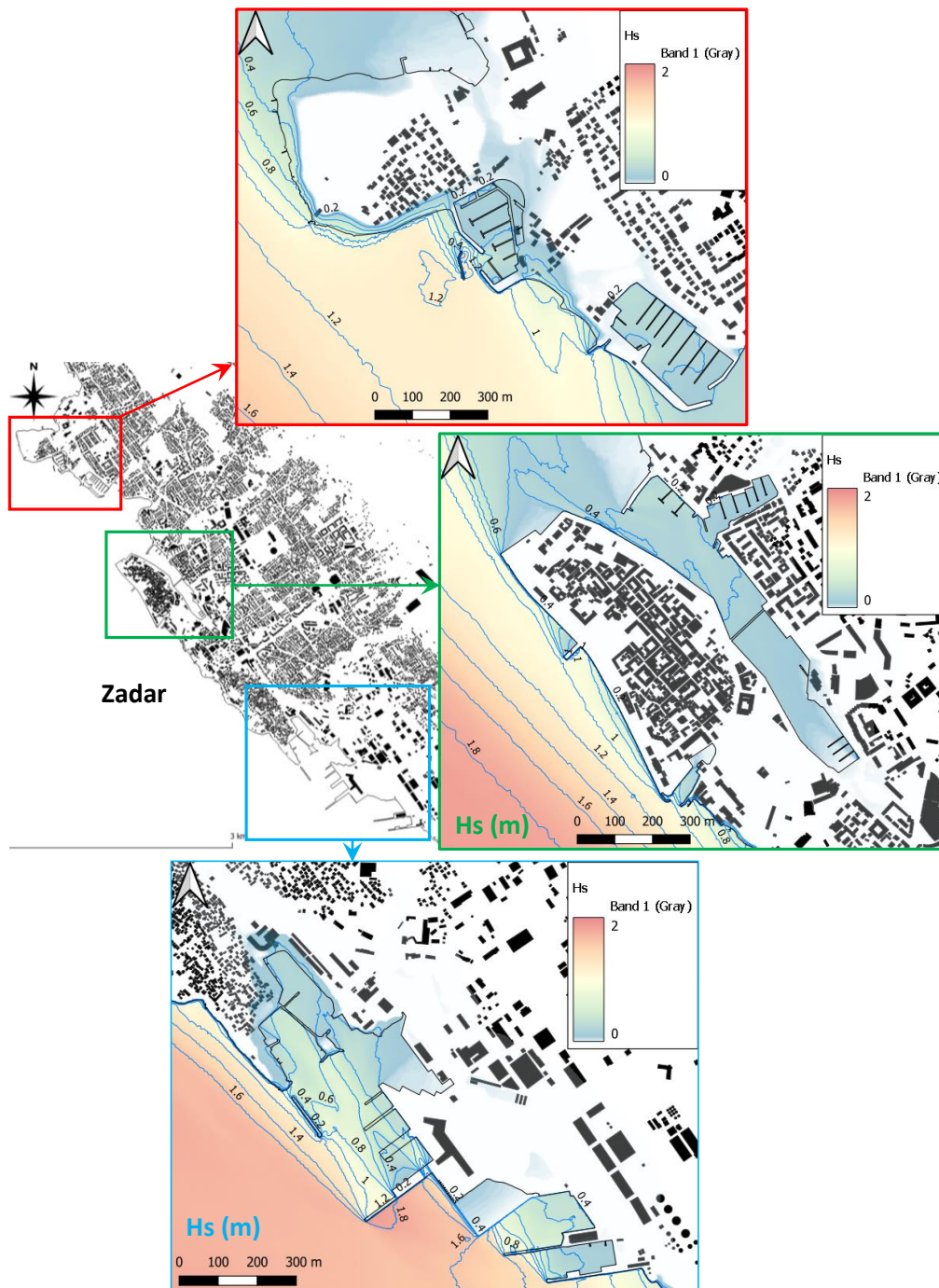
## 4.3 Rezultati numeričkih simulacija valnih deformacija

### 4.3.1 Značajne valne visine

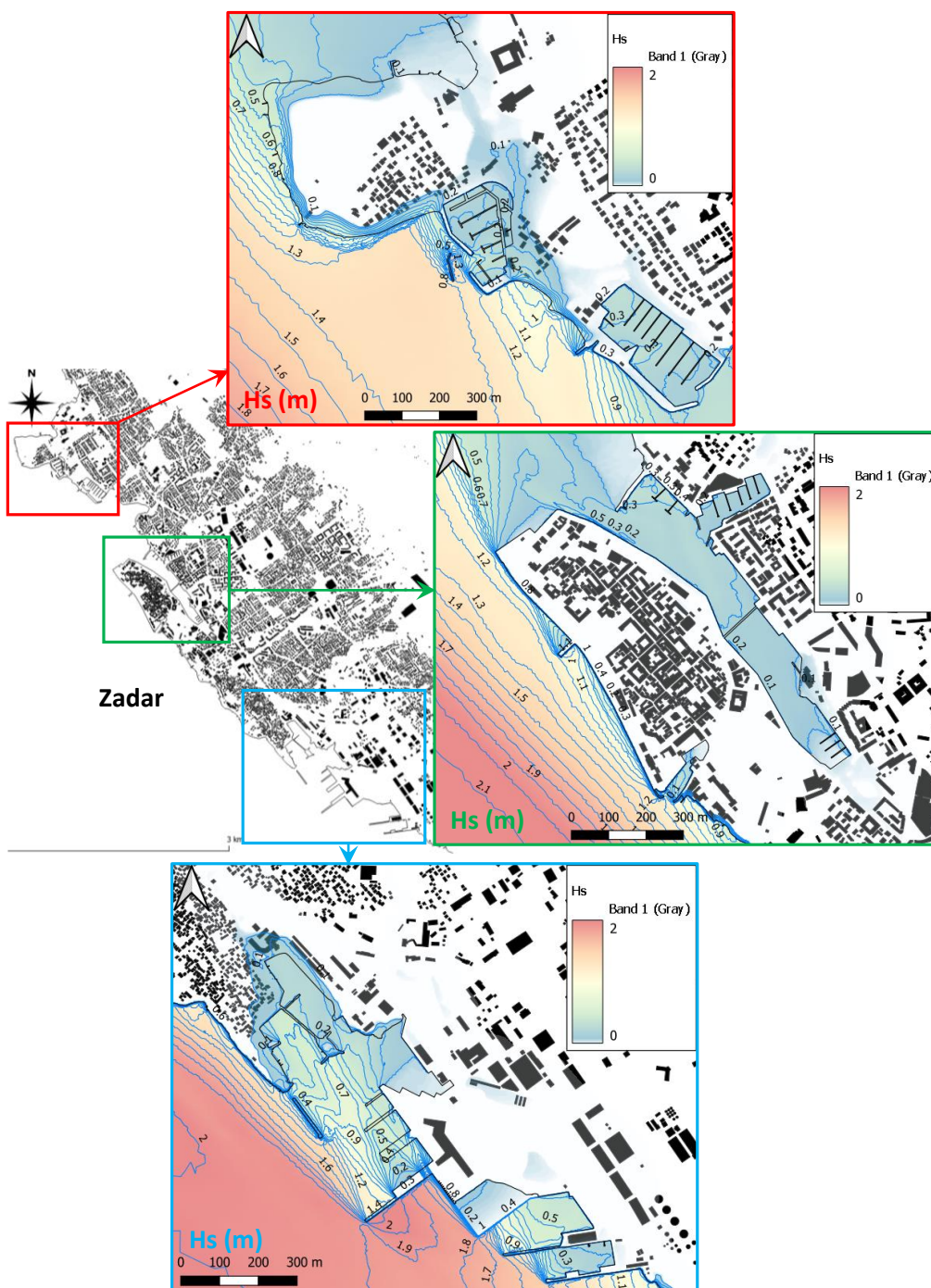
Na Slikama (3.1 – 4.3.6.) prikazani su rezultati provedene numeričkih simulacija u vidu polja značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) s pripadnim izolinijama za 6 analiziranih scenarija (PP = 5g., 25g. 100g., sa i bez doprinosa klimatskih promjena).



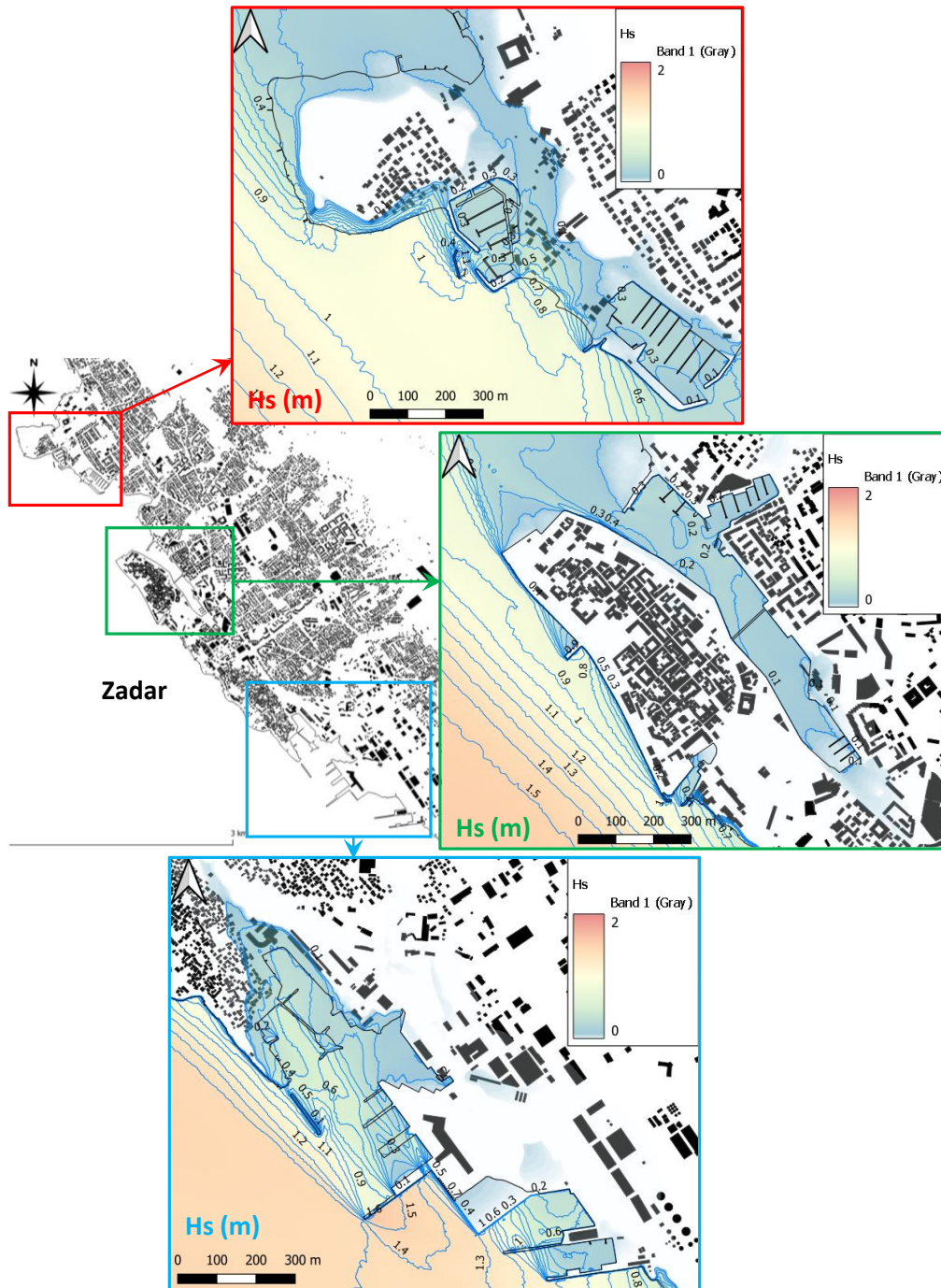
Slika 4.3.1. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 5g. bez utjecaja klimatskih promjena



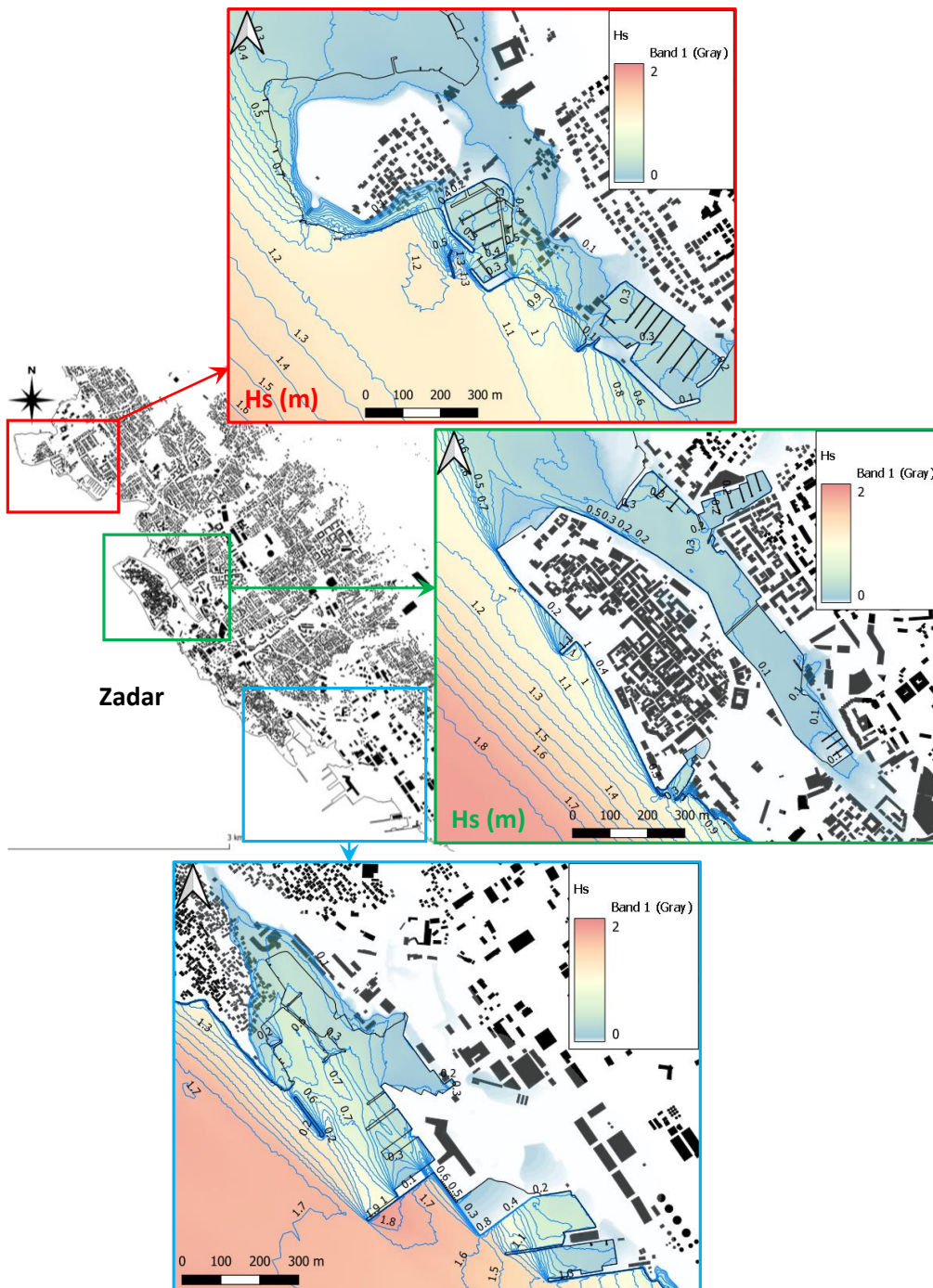
Slika 4.3.2. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 25g. bez utjecaja klimatskih promjena



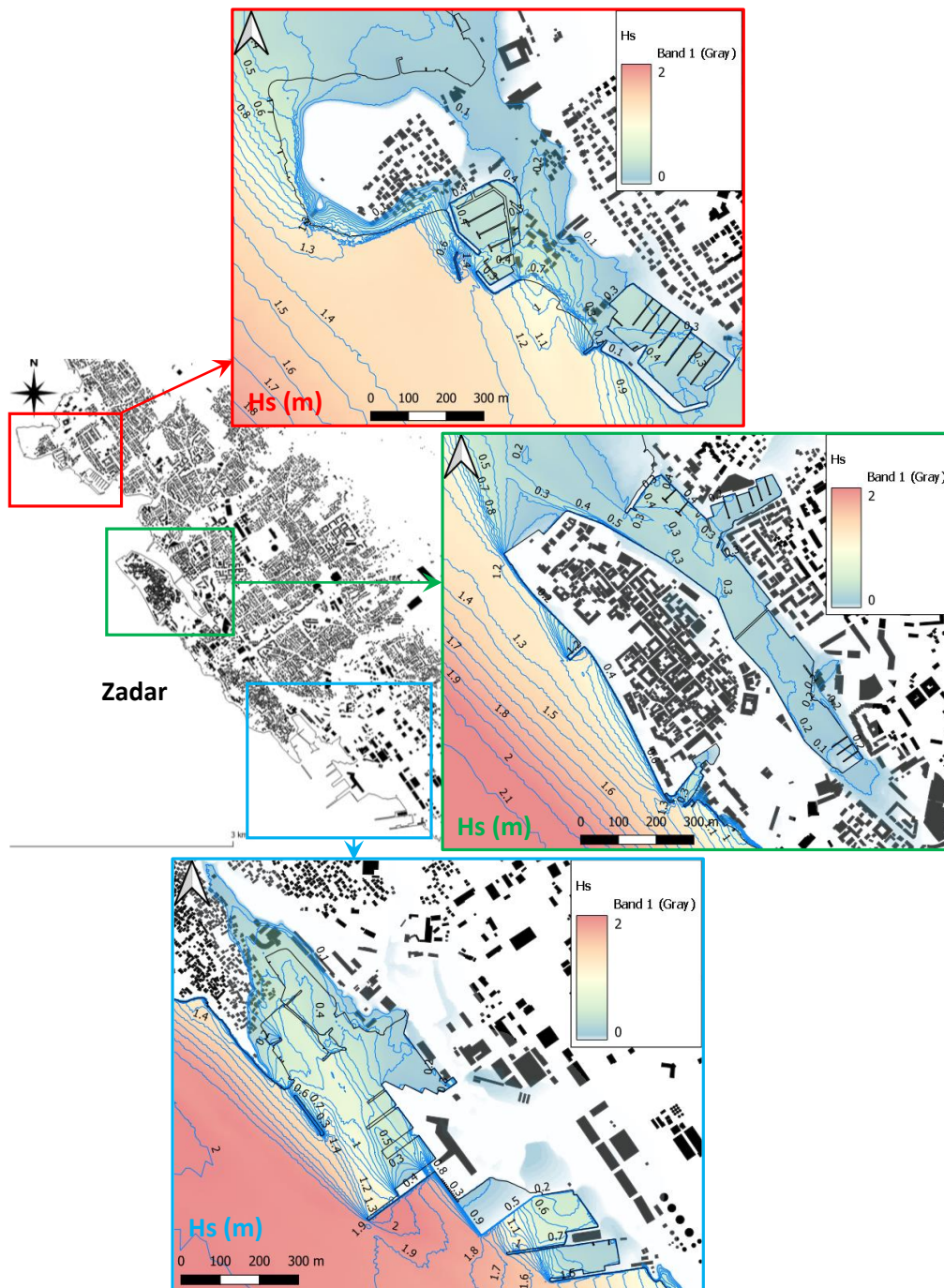
Slika 4.3.3. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 100g. bez utjecaja klimatskih promjena



Slika 4.3.4. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 5g. sa utjecajem klimatskih promjena



Slika 4.3.5. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 25g. sa utjecajem klimatskih promjena



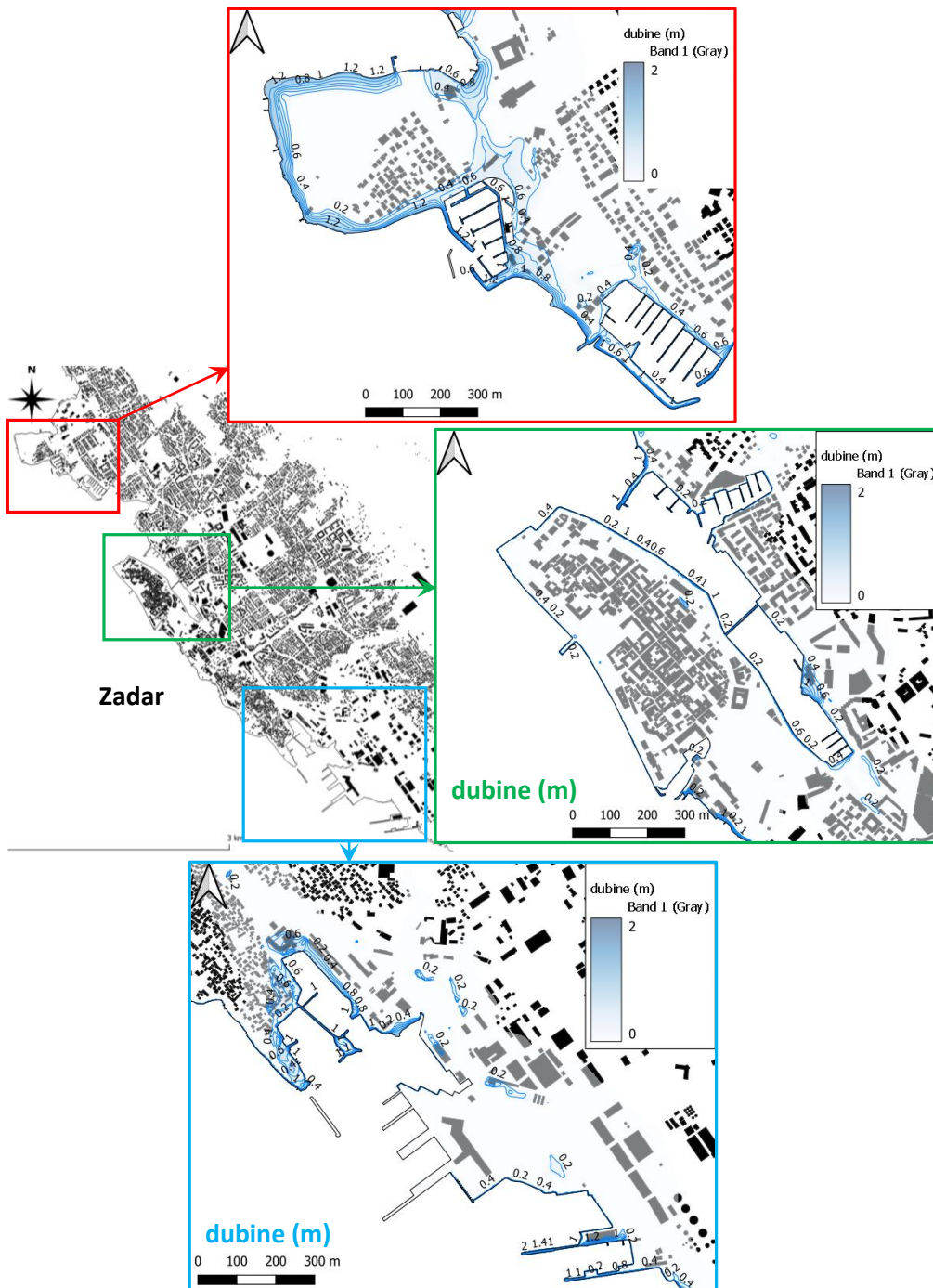
Slika 4.3.6. Polje značajnih valnih visina  $H_s$  (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 100g. sa utjecajem klimatskih promjena

### 4.3.2 Dubine plavljenja

Na Slikama (4.3.7 – 4.3.12.) prikazani su rezultati provedene numeričkih simulacija u vidu polja dubina mora (raster rezolucije 2m x 2m) s pripadnim izolinijama za 6 analiziranih scenarija (PP = 5g., 25g. 100g., sa i bez doprinosa klimatskih promjena).

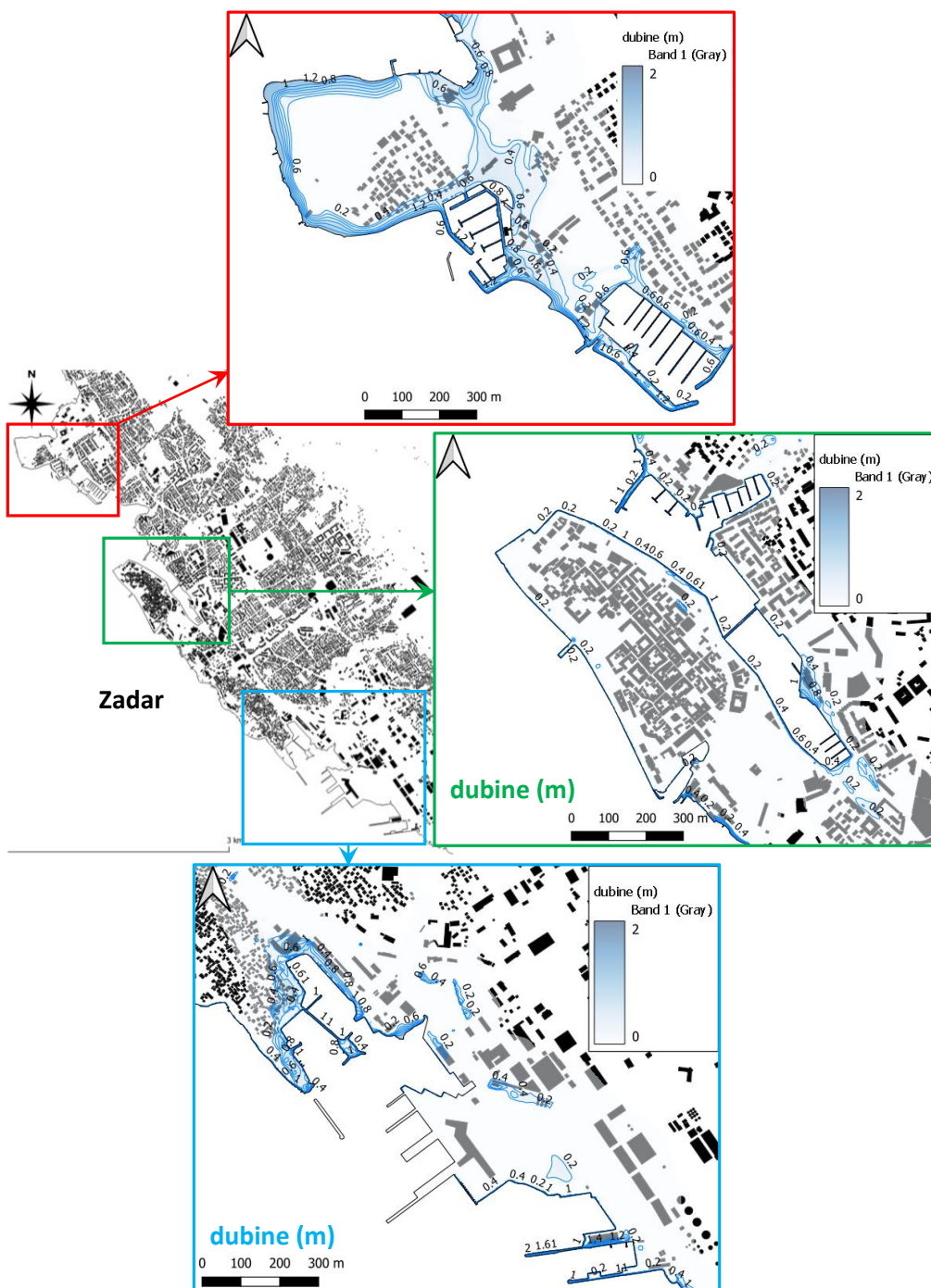


Slika 4.3.7. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 5g. bez utjecaja klimatskih promjena

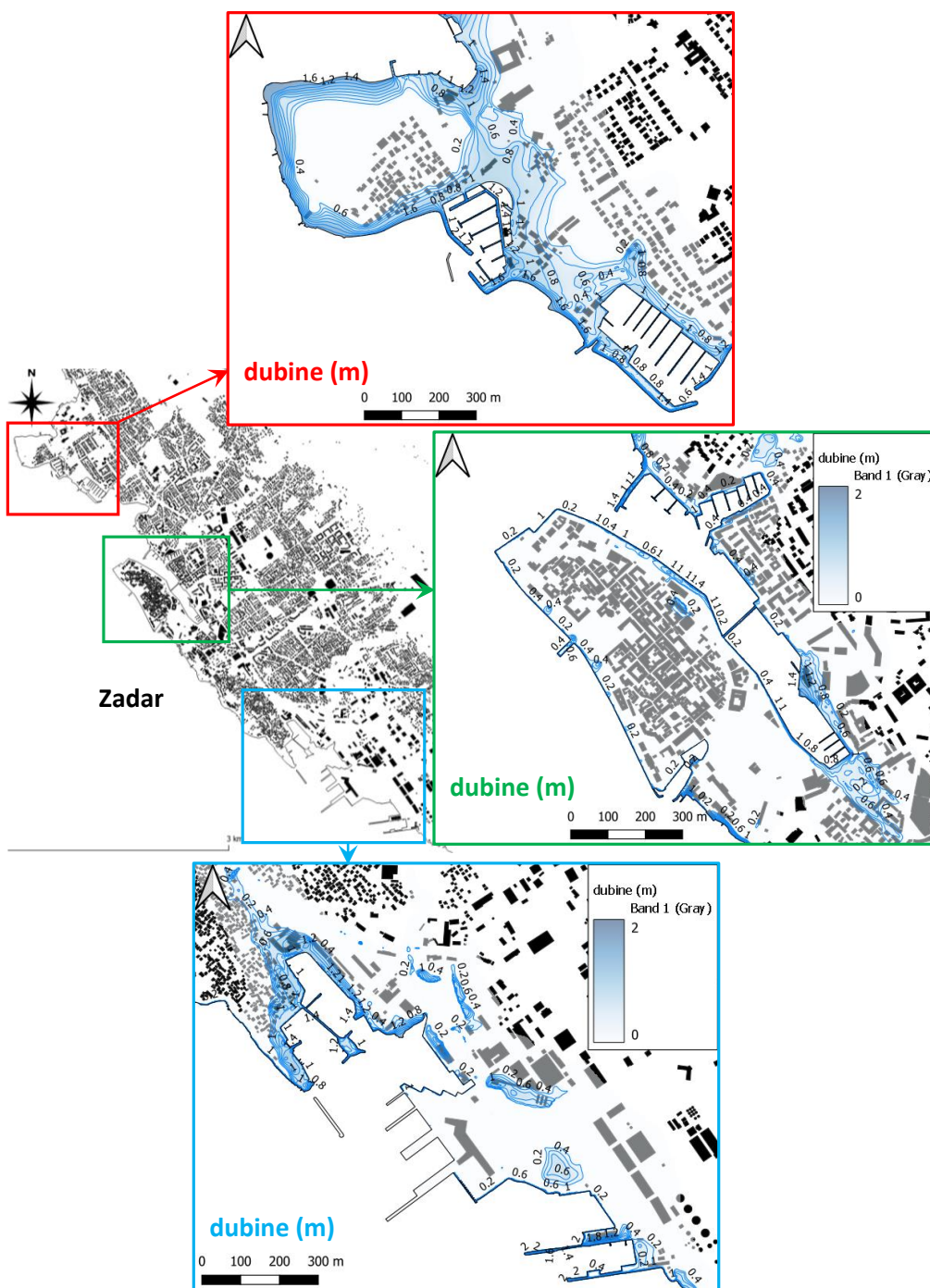


Slika 4.3.8. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 25g. bez utjecaja klimatskih promjena

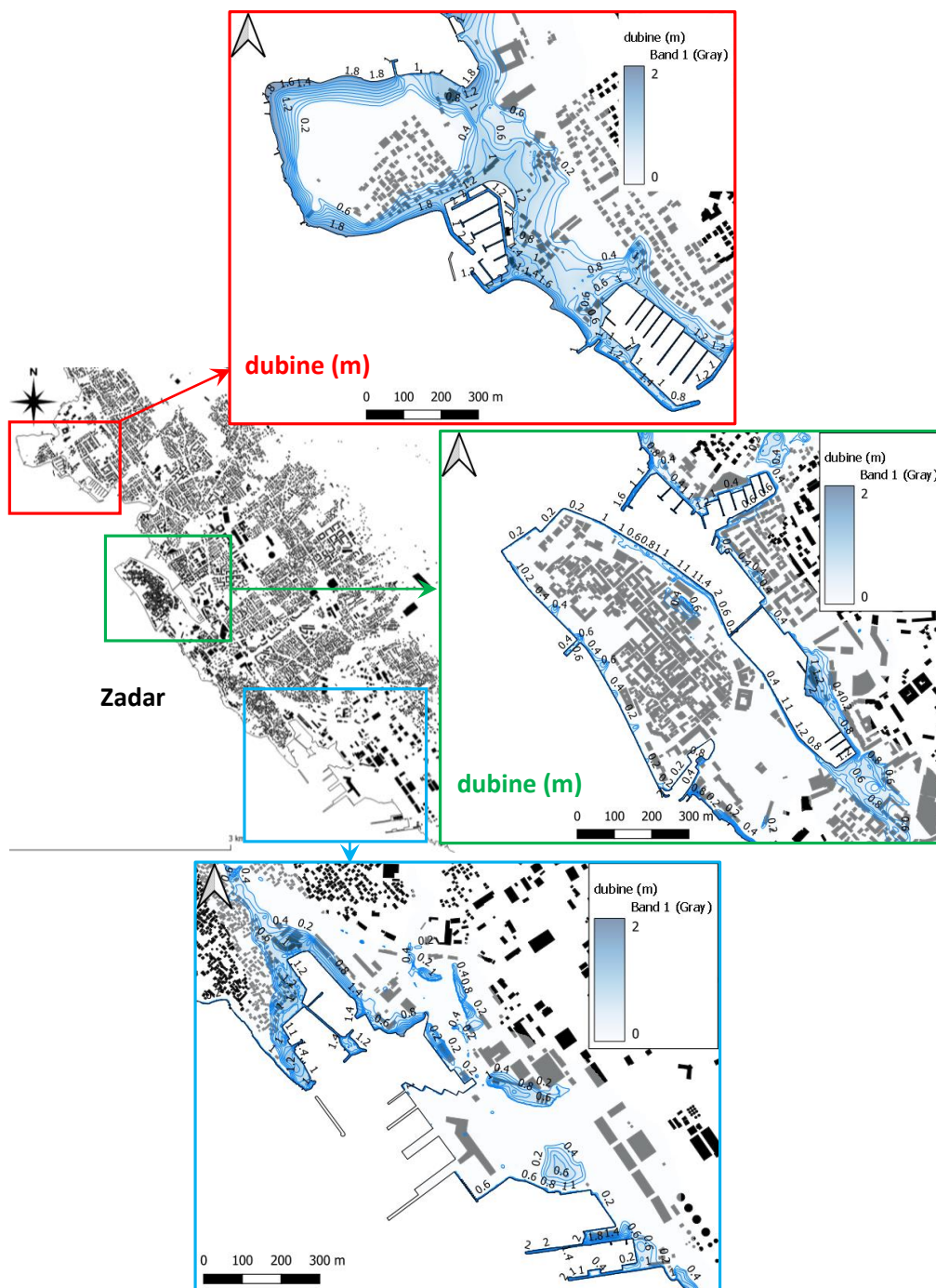




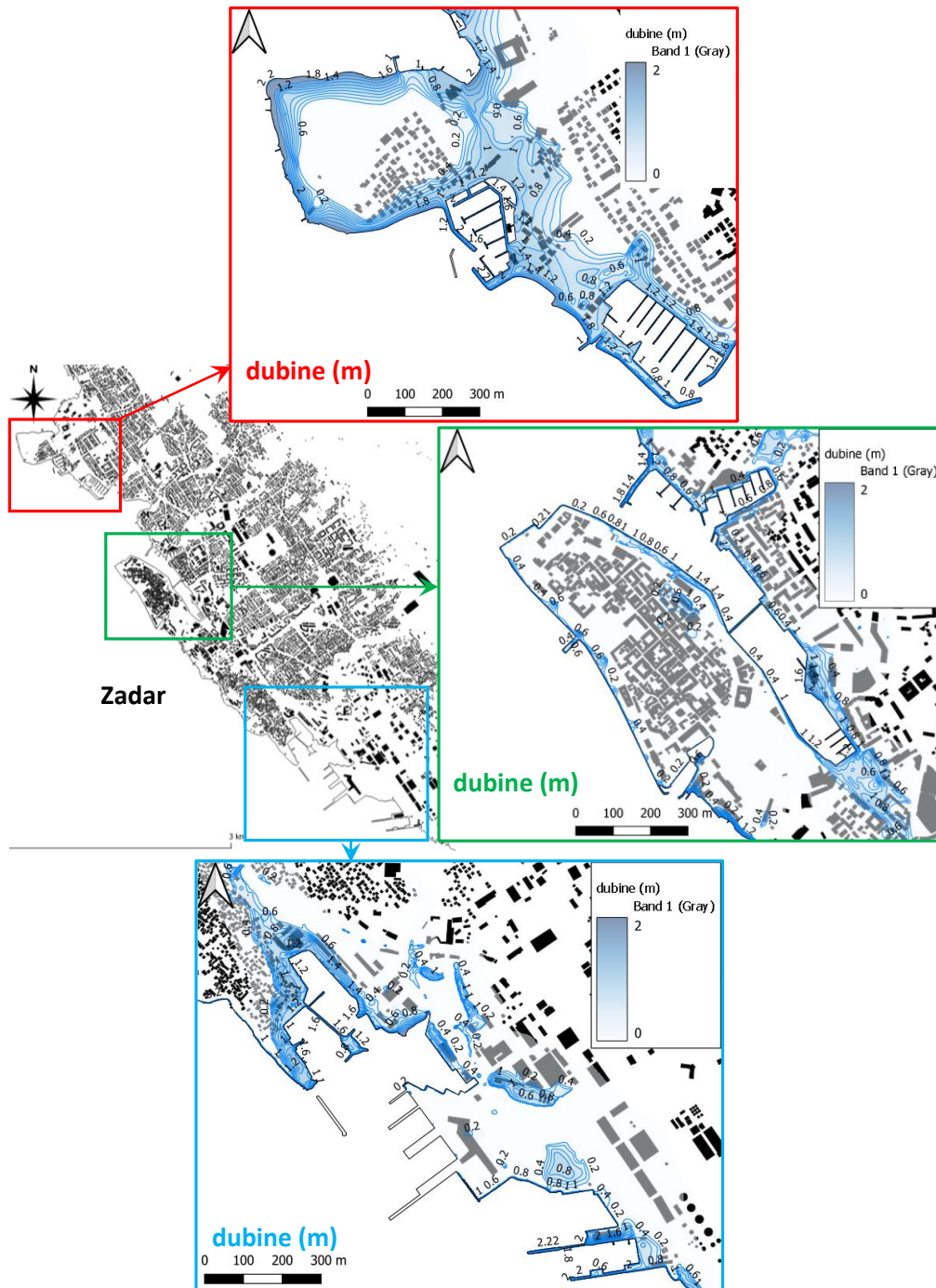
Slika 4.3.9. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 100g. bez utjecaja klimatskih promjena



Slika 4.3.10. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 5g. sa utjecajem klimatskih promjena



Slika 4.3.11. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 25g. sa utjecajem klimatskih promjena



Slika 4.3.12. Polje dubine mora (raster rezolucije 2m x 2m) sa pripadnim izolinijama za scenarij PP = 100g. sa utjecajem klimatskih promjena

## 4.4 Zaključak o modeliranju valnog generiranja i valnih deformacija

Temeljem rezultata proračuna valnog generiranja i valnih deformacija dobivene su sljedeće površine plavljenja obalnog pojasa (visine > od 0 m n.m. po HVR571) u 6 analiziranih scenarija (Tablica 4.4.1). Osim ukupne površine plavljenja  $A_{\text{PLAVLJENJA}}$ , u Tablici 4.4.1 prikazane su i parcijalne površine plavljenja po razredima nadmorske visine plavljenja  $z$ . Nadalje, za svaki od razreda nadmorske visine plavljenja  $z$  proračunate su i srednje značajne valne visine  $H_{\text{S-SR}}$  na pripadnoj površini plavljenja.

Tablica 4.4.1. Ukupne površine plavljenja i parcijalne površine plavljenja po razredima nadmorske visine plavljenja  $z$ , te srednje značajne valne visine za pripadne površine plavljenja

	PP (god.)	KP	$A_{\text{plavljenja}}$ (ha)	$A_{\text{plavljenja}}$ za $0\text{m} < z < 0,5\text{m}$ (ha)	$A_{\text{plavljenja}}$ za $0,5\text{m} < z < 1,0\text{m}$ (ha)	$A_{\text{plavljenja}}$ za $1,0\text{m} < z < 1,5\text{m}$ (ha)	$A_{\text{plavljenja}}$ za $1,5 < z < 2,0\text{m}$ (ha)
1	5	NE	40,4	12,4	27,0	1,0	0,1
2	25	NE	53,0	12,5	29,2	11,1	0,2
3	100	NE	61,2	12,6	29,5	18,9	0,2
4	5	DA	93,9	12,7	30,2	42,6	8,4
5	25	DA	106,0	12,7	30,4	43,0	20,2
6	100	DA	117,0	12,7	30,4	43,1	30,9
	PP (god.)	KP		$H_{\text{S-SR}}$ na $A_{\text{plavljenja}}$ za $0\text{m} < z < 0,5\text{m}$ (m)	$H_{\text{S-SR}}$ na $A_{\text{plavljenja}}$ za $0,5\text{m} < z < 1\text{m}$ (m)	$H_{\text{S-SR}}$ na $A_{\text{plavljenja}}$ za $1,0\text{m} < z < 1,5\text{m}$ (m)	$H_{\text{S-SR}}$ na $A_{\text{plavljenja}}$ za $1,5\text{m} < z < 2,0\text{m}$ (m)
1	5	NE		0,16	0,06	0,06	0,17
2	25	NE		0,20	0,09	0,03	0,21
3	100	NE		0,24	0,13	0,05	0,24
4	5	DA		0,24	0,18	0,08	0,04
5	25	DA		0,29	0,22	0,11	0,05
6	100	DA		0,33	0,25	0,14	0,06

## 4.5 Karte opasnosti i rizika od poplava s mora u Zadru

Karte poplava s mora izrađene su u statičkom i dinamičkom formatu.

**Statičke karte** izrađene su kao PDF dokumenti u prikladnom mjerilu. Za predmetno područje izrađene su sljedeće statičke karte:

- **Karta opasnosti od poplava mora – dubine vode** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost te zasebno za današnju klimu i buduću klimu uz očekivane klimatske promjene)
- **Karta rizika od poplava mora** (zasebno za današnju klimu i buduću klimu uz očekivane klimatske promjene)

Ukupno je izrađeno 8 tematskih karata u PDF formatu. Na Slikama 4.5.1 i 4.5.2 prikazane su karte opasnosti s dubinama vode za malu vjerojatnost pojave poplava s mora za današnju klimu i buduću klimu uz očekivane klimatske promjene (podizanje srednje razine mora). Pored prikazanih karata, još su izrađene karte opasnosti s dubinama vode za srednju i veliku vjerojatnost pojave. Na Slikama 4.5.3 i 4.5.4 prikazane su karte razine rizika za građevine za današnju klimu i buduću klimu uz očekivane klimatske promjene (podizanje srednje razine mora). Pored prikazanih karata, još su izrađene karte razine rizika za građevine za srednju i veliku vjerojatnost pojave.

**Dinamičke karte** izrađene su u GIS okruženju u mjerilu 1:2.000, a isporučuju se u obliku vektorskih i rasterskih datoteka. Popis i opis svih isporučenih datoteka po pilot području prikazan je u Tablici 4.5.1. Datoteke su prema razinama analiza raspoređene i sistematizirane u grupe slojeva. Uz svaku datoteke izrađeni su i priloženi prikladni stilovi za prikaz u QGIS sučelju.

Tablica 4.5.1 Popis elemenata dinamičkih karata poplava mora (GIS baza podataka)

Mapa	Ime datoteke	Indikator	Vjerojatnost	Grupa QGIS sloja	Naziv QGIS sloja (opis)
/Exposure	Buildings_sampled.shp	Receptori		Receptori - Infrastruktura i građevine	Građevine
/Hazard/Scenario0	Flood_extent_bezKP.tif	Opasnost	Sve	Opasnost od poplava	Obuhvat poplave, današnja klima
/Hazard/Scenario1	Flood_extent_saKP.tif				Obuhvat poplave, uz klimatske promjene
/Hazard/Scenario0/100YR	dubine_PP100_bezKP.tif		Mala	Opasnost od poplava - Mala vjerojatnost	Dubine (m), današnja klima
/Hazard/Scenario1/100YR	dubine_PP100_saKP.tif				Dubine (m), uz klimatske promjene
/Hazard/Scenario0/25YR	dubine_PP25_bezKP.tif		Srednja	Opasnost od poplava - Mala vjerojatnost	Dubine (m), današnja klima
/Hazard/Scenario1/25YR	dubine_PP25_saKP.tif				Dubine (m), uz klimatske promjene
/Hazard/Scenario0/5YR	dubine_PP5_bezKP.tif	Opasnost	Velika	Opasnost od poplava - Mala vjerojatnost	Dubine (m), današnja klima
/Hazard/Scenario1/5YR	dubine_PP5_saKP.tif				Dubine (m), uz klimatske promjene
/Exposure	Buildings_sampled.shp	Rizik	Sve	Rizik od poplava	Rizik za građevine, današnja klima
/Exposure	Buildings_sampled.shp				Rizik za građevine, uz klimatske promjene

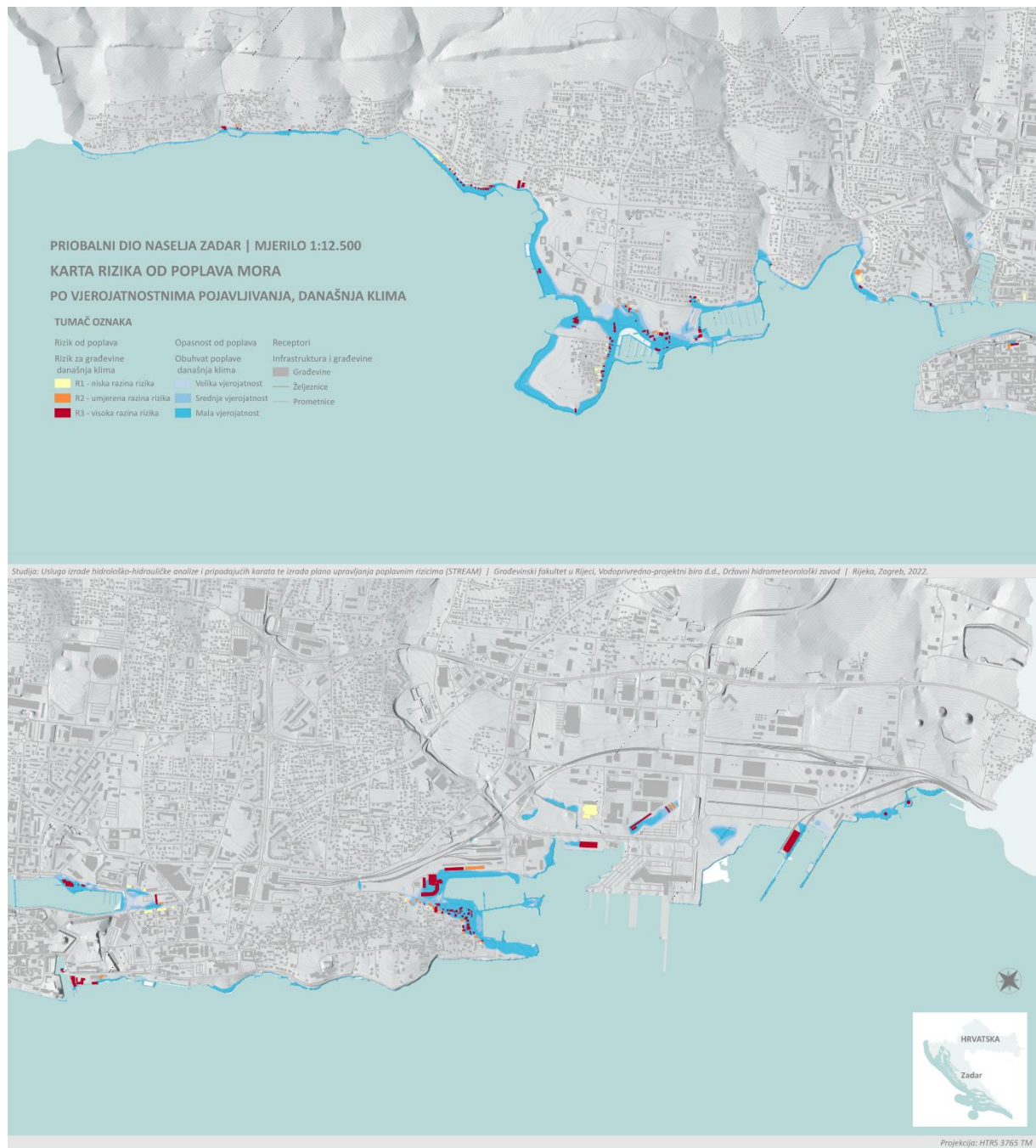


Slika 4.5.1. Karta opasnosti od poplava s mora za priobalni dio naselja Zadar – dubina vode za malu vjerojatnost pojavljivanje visokih razina mora i današnju klimu.

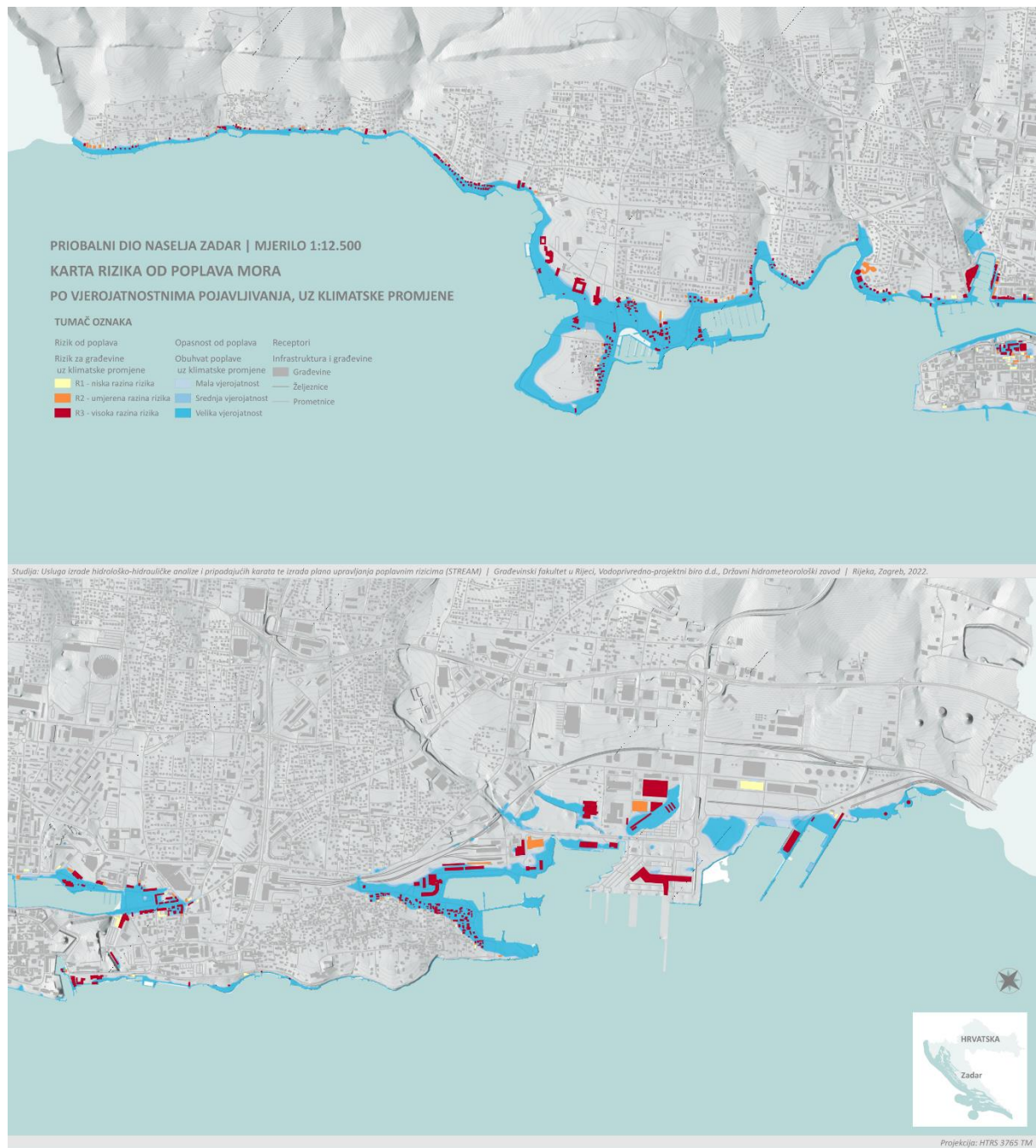




Slika 4.5.2. Karta opasnosti od poplava s mora za priobalni dio naselja Zadar – dubina vode za malu vjerojatnost pojavljivanja visokih razina mora uz klimatske promjene.



Slika 4.5.3. Karta rizika od poplava s mora za priobalni dio naselja Zadar – razina opasnosti za građevine za malu vjerojatnost pojavljivanje visokih razina mora i današnju klimu.



Slika 4.5.4. Karta rizika od poplava s mora za priobalni dio naselja Zadar – razina opasnosti za građevine za malu vjerojatnost pojavljivanja visokih razina mora uz klimatske promjene.

## 5 Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica

### 5.1 Metodologija analize opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica

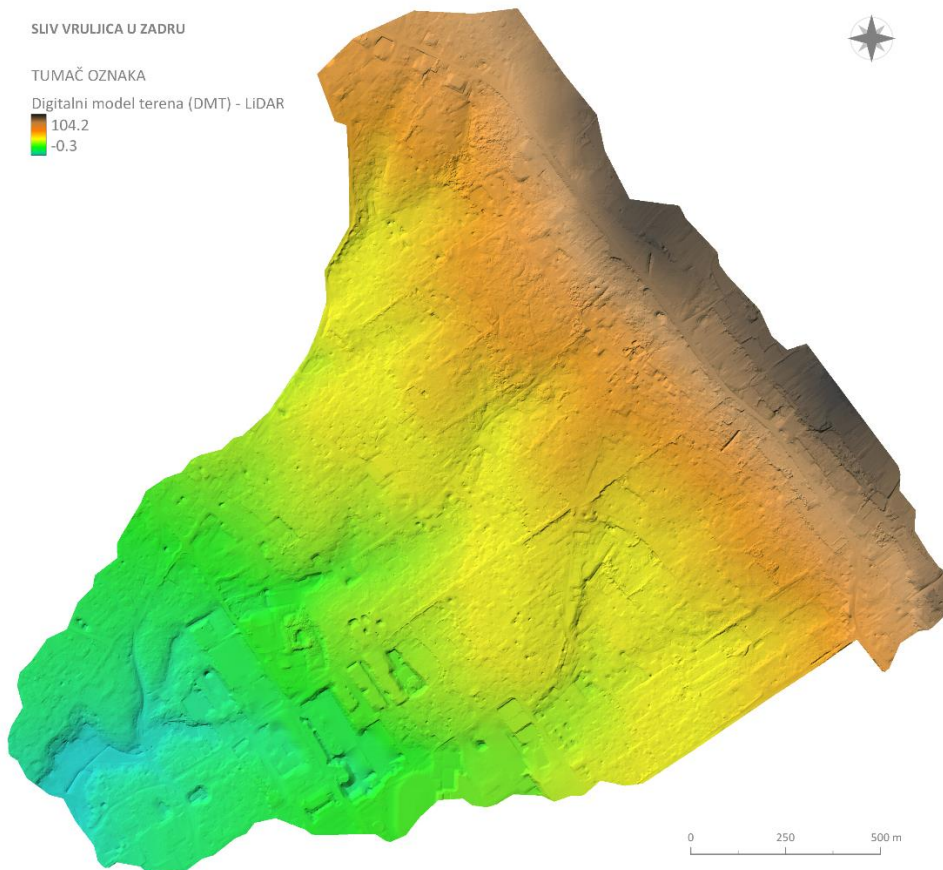
Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica (mikro razina detaljnosti) provedena je na jednak način kao i analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar (mezo razina detaljnosti), što je detaljno objašnjeno i prikazano u poglavlju 3. Jedina razlika u odnosu na analize prikazane u poglavlju 3 je obuhvat analize, korištena podloga vezana uz digitalni model reljefa te proračunska mreža hidrološko-hidrauličkog modela. Obuhvat predmetne analize je sliv Vruljica površine 3,1 km<sup>2</sup>, koji se nalazi u priobalnom dijelu Zadra te obuhvaća park Vruljicu te naselja Maslina, Plovanija, Bili Brig i Vidikovac. Obuhvat predmetnog sliva prikazan je na slici 5.1.1..



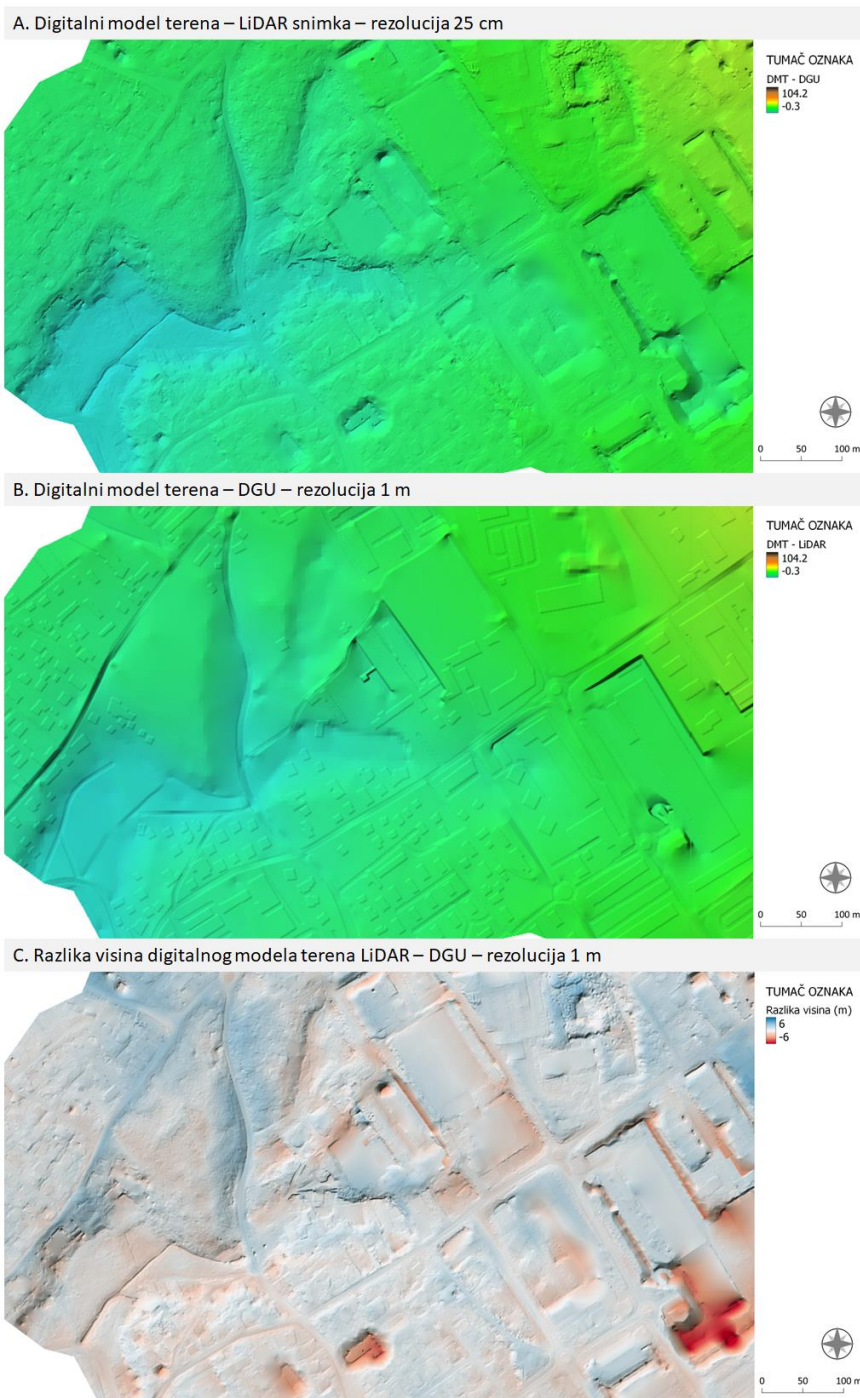
Slika 5.1.1. Obuhvat predmetne analize na mikro razini detaljnosti – sliv Vruljica.

Digitalni model reljefa za sliv Vruljca izradio je Naručitelj (Odjel za geografiju Sveučilišta u Zadru) interpolacijom LiDAR snimke. U tu svrhu provedeno je multisenzorsko (LiDAR, aerofotogrametrijsko) zračno snimanje dijela naselja Zadar s minimalnom gustoćom od 120 točaka/m<sup>2</sup>; ukupne točnost manje od 8 cm. Interpolirani digitalni model terena rezolucije je 25 cm i prikazan je na slici 5.1.2. Na slici 5.1.3 prikazuje se usporedba modela terena dobivenog iz LiDAR snimke s modelom terena dobivenim interpolacijom vektorskih podataka DGU, koji je korišten za mezo razinu detaljnosti (poglavlje 3). Razlike između visina ova dva model su primjetne, a dosežu na pojedinim lokacijama i do 3 m, pri čemu standardna devijacija razlike visina iznosi 0,78 m.

Matematički model za hidrološko-hidrauličke analize izrađen je u HEC-RAS računalnom programu prateći istovjetne postavke kao i u slučaju prethodne analize na mezo razini detaljnosti (opisano u poglavlju 3.2.3.) pri čemu je korištena gušća strukturirana proračunska mreža rezolucije 4 m.



Slika 5.1.2. Digitalni model terena rezolucije 25 cm – sliv Vruljica.



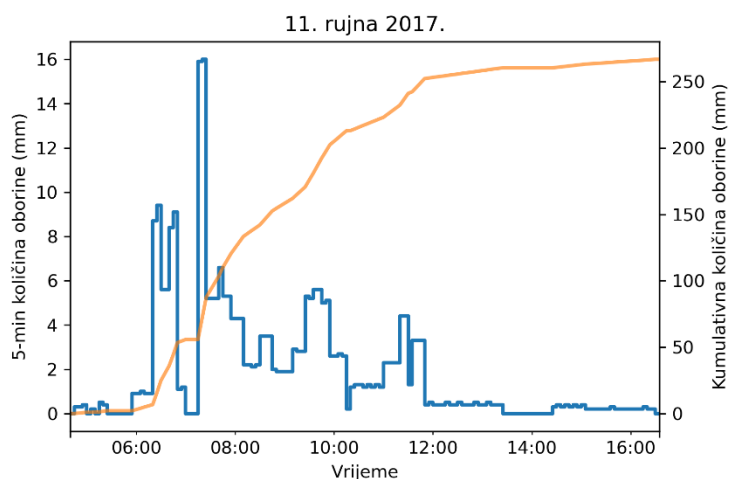
Slika 5.1.3. Usporedba visina iz digitalnog modela terena dobivenog na osnovu LiDAR snimke i Državne geodetske uprave (DGU) te njihove razlike.

## 5.2 Rezultati analize opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica

### 5.2.1 Povijesne pluvijalne poplave u slivu Vruljica

Analiza povijesnih poplava u slivu Vruljica provedena je na osnovu katastra poplava (zabilježene poplavne površine i lokacije vatrogasnih intervencija) te modelske reanalize odabranog oborinskog događaja. Analizom oborina odabran je ekstremni događaja iz 11. rujna 2017. godine.

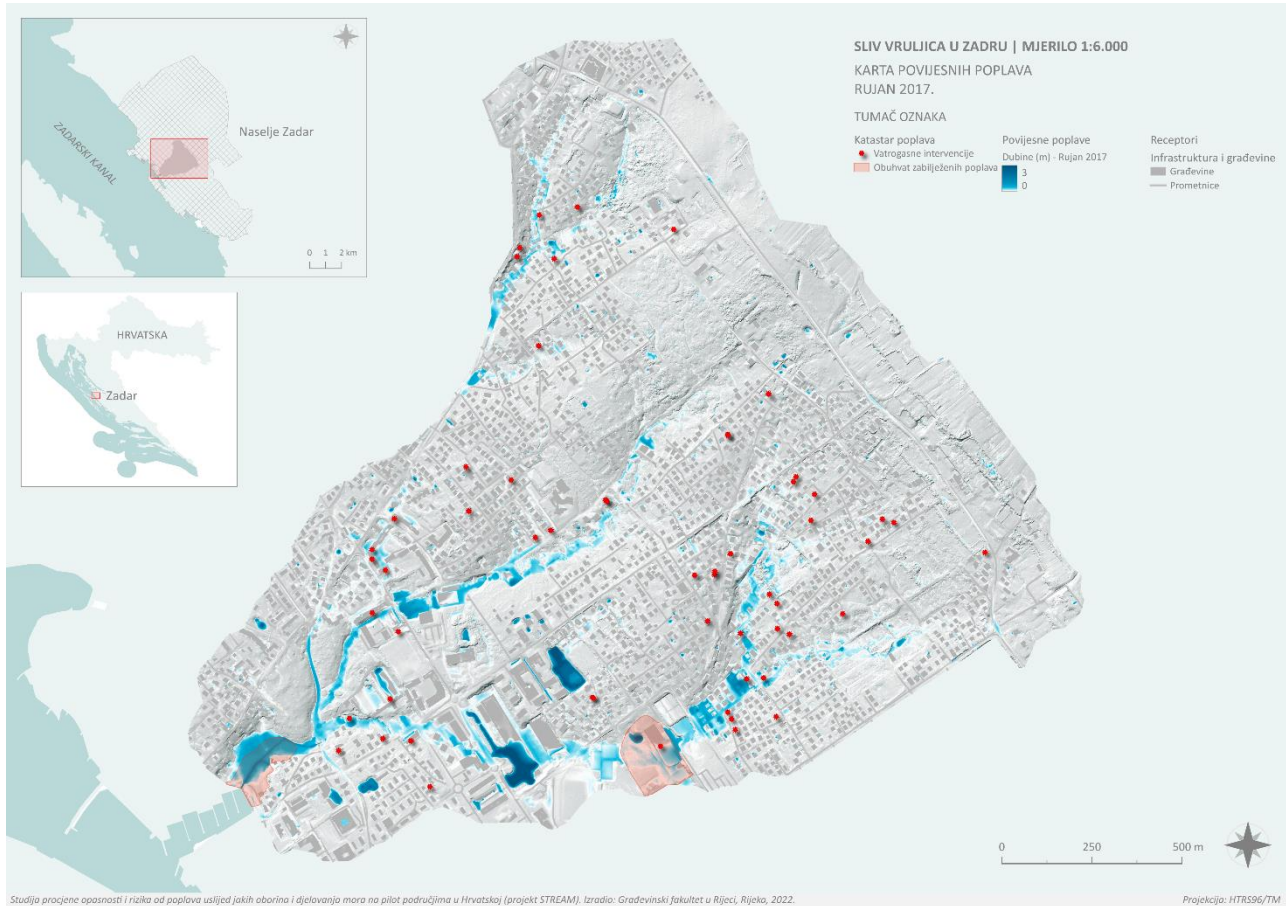
Dana **11. rujna 2017.** godine zabilježeno je 267 mm oborine na ombrografskoj postaji Zadar, dok je u samo jedan sat palo 80 mm oborine, u tri sata 161 mm oborine, a tijekom šest sati 250 mm oborine (Slika 5.2.1). Navedene količine imaju vjerojatnost pojave manju od 1%.



Slika 5.2.1 Trenutne 5-min i kumulativne količine oborine zabilježene 11. rujna 2017. godine na ombrografskoj postaji Zadar.

Karta dubina vode za oborinu iz rujna 2017. godine zajedno s lokacijama vatrogasnih intervencija i poligonima zabilježenih poplavljenih površina u Zadru prikazana je na Slici 5.2.2. Najveći broj intervencija nalazi se u blizini prirodnih depresija i jaraka, odnosno glavnih smjerova koncentracije površinskog toka. Dvije zabilježene lokacije šireg opsega poplave zabilježene su u parku Vruljica te u sportskom centru Višnjik, što prikazuju rezultati matematičkog modela. Općenito, izrađeni

matematički model može smatrati dovoljno pouzdanim za daljnje analize opasnosti i rizika na predmetnom slivu.



Slika 5.2.2 Karta povijesnih poplava – katastar poplava i modelska reanaliza poplave iz rujna 2017. godine – u slivu Vruljica.

## 5.2.2 Opasnost od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica

Procjena opasnosti od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar provedena je za tri scenarija, odnosno za malu, srednju i veliku vjerojatnost, koje odgovaraju vjerojatnosti godišnjeg premašenja od 1, 4 i 20 %. Karte opasnosti od pluvijalnih poplava prikazuju prostornu raspodjelu dubina, brzina i razine opasnosti za svaku navedenu vjerojatnost. Na Slikama 5.2.3, 5.2.4 i 5.2.5 prikazani su primjeri statičkih karata opasnosti za malu vjerojatnost pojavljivanja.





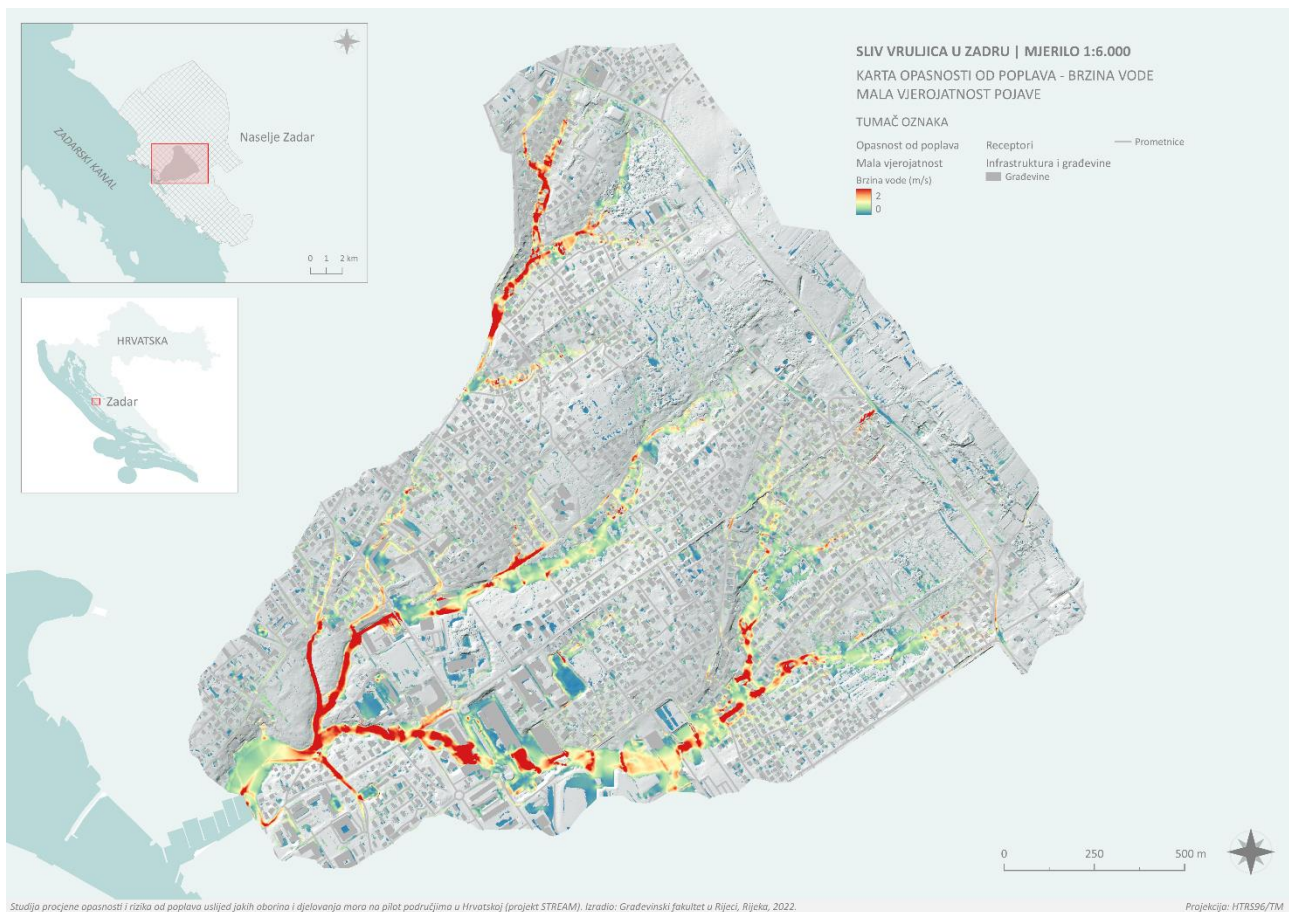
Slika 5.2.3 Karta opasnosti od poplava – dubina vode - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.

Iz danih prikaza može se okarakterizirati osnovni proces generiranja pluvijalnih poplava u slivu Vruljica te izdvojiti problematične lokacije. Predmetni sliv je naseljen uz visoki stupanj urbanizacije, ima djelomično riješen sustav odvodnje oborinskih voda (najčešće mješoviti sustav kanalizacije), bez prisutnih otvorenih elemenata odvodnje ili cestovnih propusta. Iznimka je park Vruljica, gdje je izgrađen otvoreni kanal koji se nakon cestovnog propusta ulijeva u more u marini Zadar.

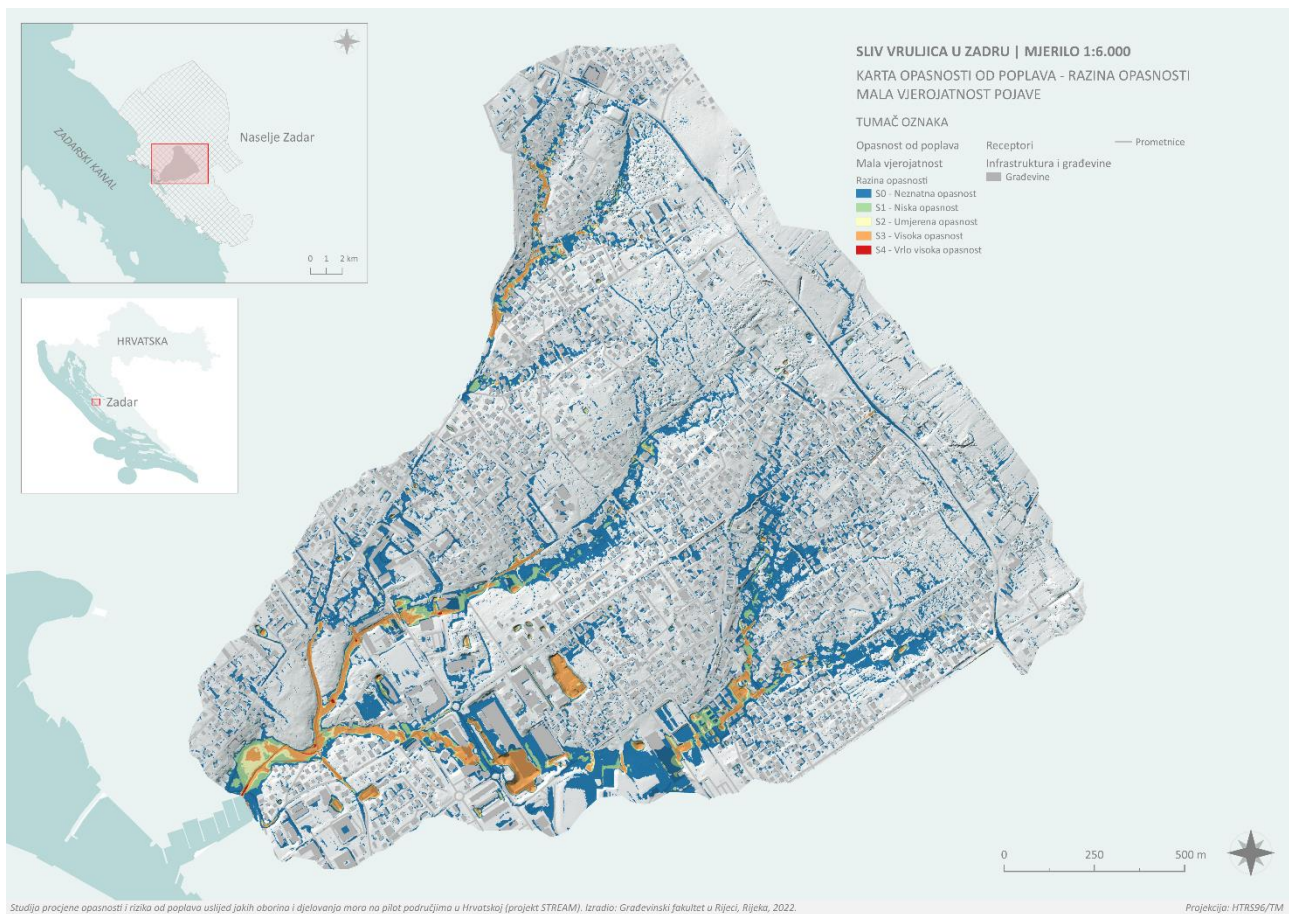
Smjer toka površinskih voda prati topografiju terena, od viših zona u sjeveroistočnom dijelu sliva do utoka u more na jugozapadnom dijelu sliva. Glavni pravci toka koncentrirani su duž osi dviju prirodnih depresija (jaruga), prva prolazi paralelno s ulicom Biskupa Juraja Dobrile od naselja Plovanija do naselja Maslina, dok druga prolazi od naselja Plovanija i Bili Brig do sportskog centra Višnjik. Obje jaruge završavaju u parku Vruljica gdje se sve površinske vode prikupljaju u otvoreni kanal trapeznog poprečnog presjeka. Iz parka Vruljica se putem cestovnog propusta sve površinske

vode ispuštaju u more. Treći smjer primjetan je duž ulice Put Bokanjca, pri čemu na uzvodnom dijelu sliva dio površinskih voda otječe u smjeru zapada, dok se manji dio voda transportira glavnom prometnicom do parka Vruljica. Upravo park Vruljica predstavlja područje izraženije akumulacije površinskih voda tijekom jakih oborina, što se prvenstveno može pripisati nedovoljnom protočnom kapacitetu cestovnog propusta, pogotovo tijekom visokih razina mora.

Maksimalne brzine vode javljaju se duž osi prirodnih depresija u nizvodnom dijelu sliva neposredno prije parka Vruljica, tu svakako treba navesti ulicu dr. Franje Tuđmana i ulicu Nikole Tesle (slika 5.2.4). Veće brzine su također primjetne i oko sportskog centra Višnjik u južnom dijelu sliva, te uzvodno duž ulice Put Bokanjca u sjevernom dijelu sliva. Najviše razine opasnosti vezane su prvenstveno uz pojavu visokih brzina vode (slika 5.2.5).



Slika 5.2.4 Karta opasnosti od poplava – brzina vode - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.

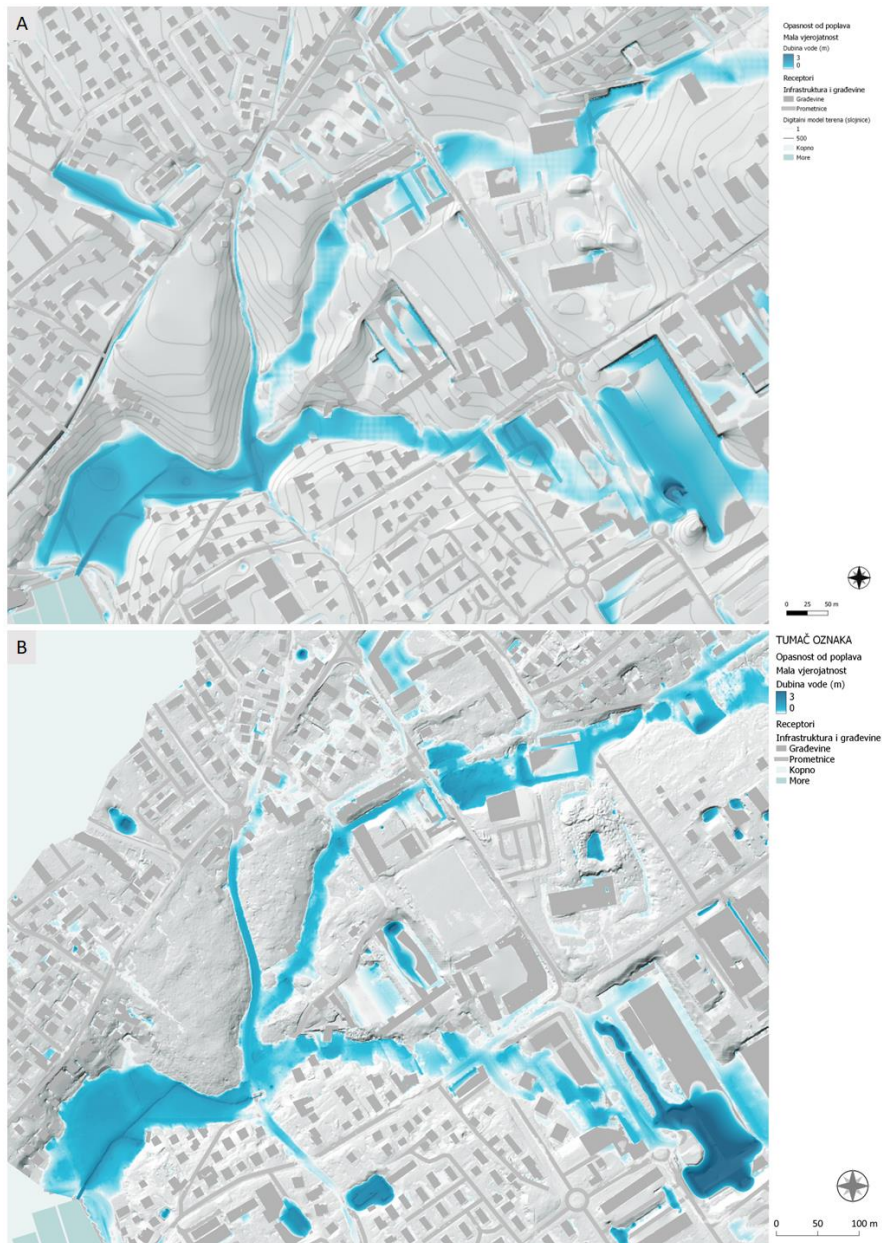


Slika 5.2.5 Karta opasnosti od poplava – razina opasnosti - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.

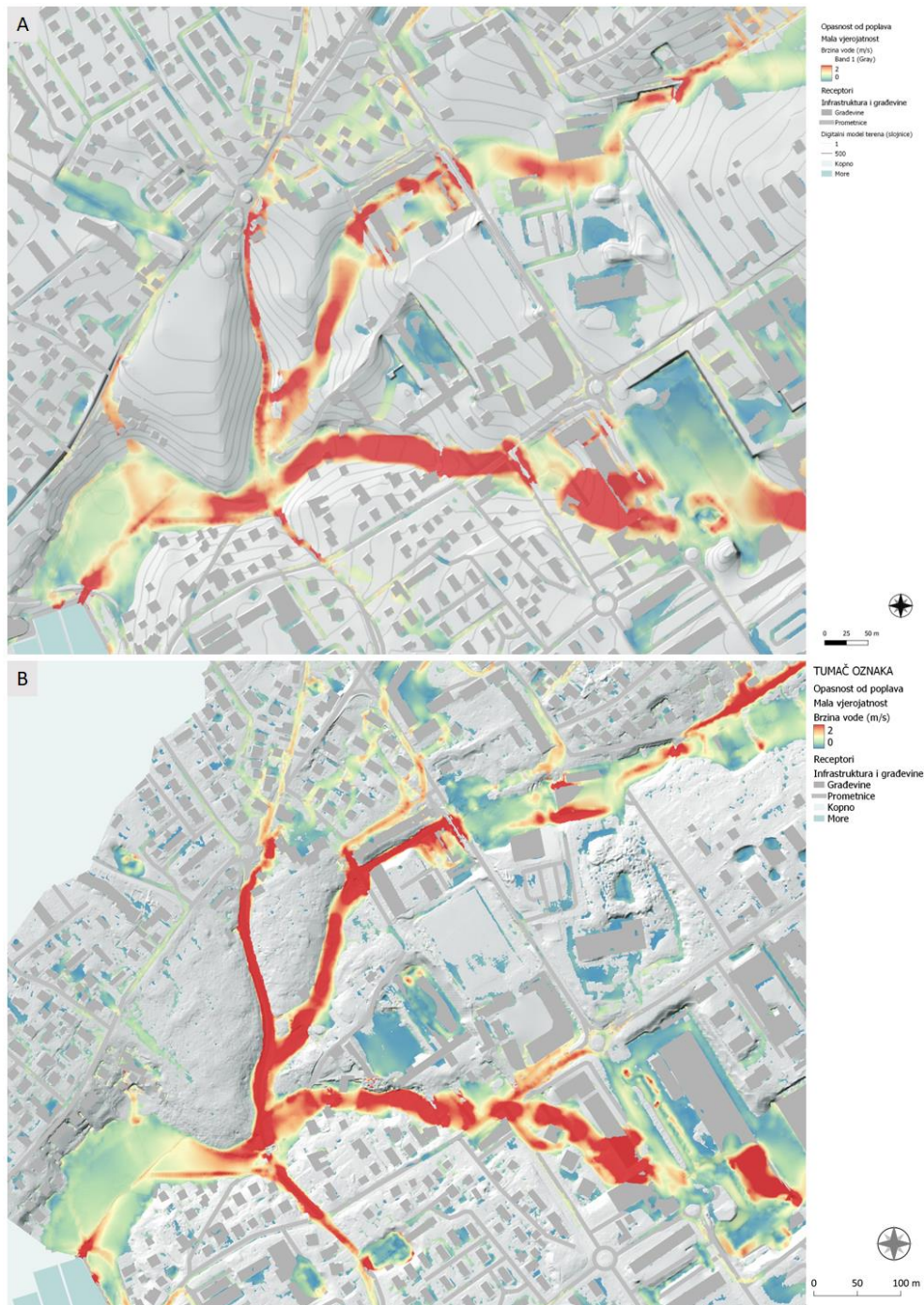
### 5.2.3 Usporedba rezultata na mikro i mezo razini istraživanja

U nastavku je dana usporedba rezultata modelskih analiza, odnosno procjene opasnosti od poplava u slivu Vruljica, na mezo razini (poglavlje 3) i mikro razini (predmetna analiza). Osnovna razlika između navedene dvije analize je u detaljnosti podloga i izvoru podataka o visinama terena. Dok je na mezo korišten digitalni model terena rezolucije 1 m dobiven interpolacijom vektorskih podataka od DGU-a, u predmetnoj analizi korišten je digitalni model terena rezolucije 25 cm dobiven interpolacijom LiDAR snimke (ALS). Na Slikama 5.2.6 – 5.2.8 dane su usporedbe rezultata dubine i brzine vode te razine opasnosti na izdvojenom dijelu sliva (dio podsliva Vruljica). Očekivano, rezultati na mikro razini više su rezolucije i veće preciznosti, zbog čega pružaju detaljniji uvid u prostornu raspodjelu opasnosti od poplava u odnosu na podloge korištene na mezo razini. Tek na mikro razini

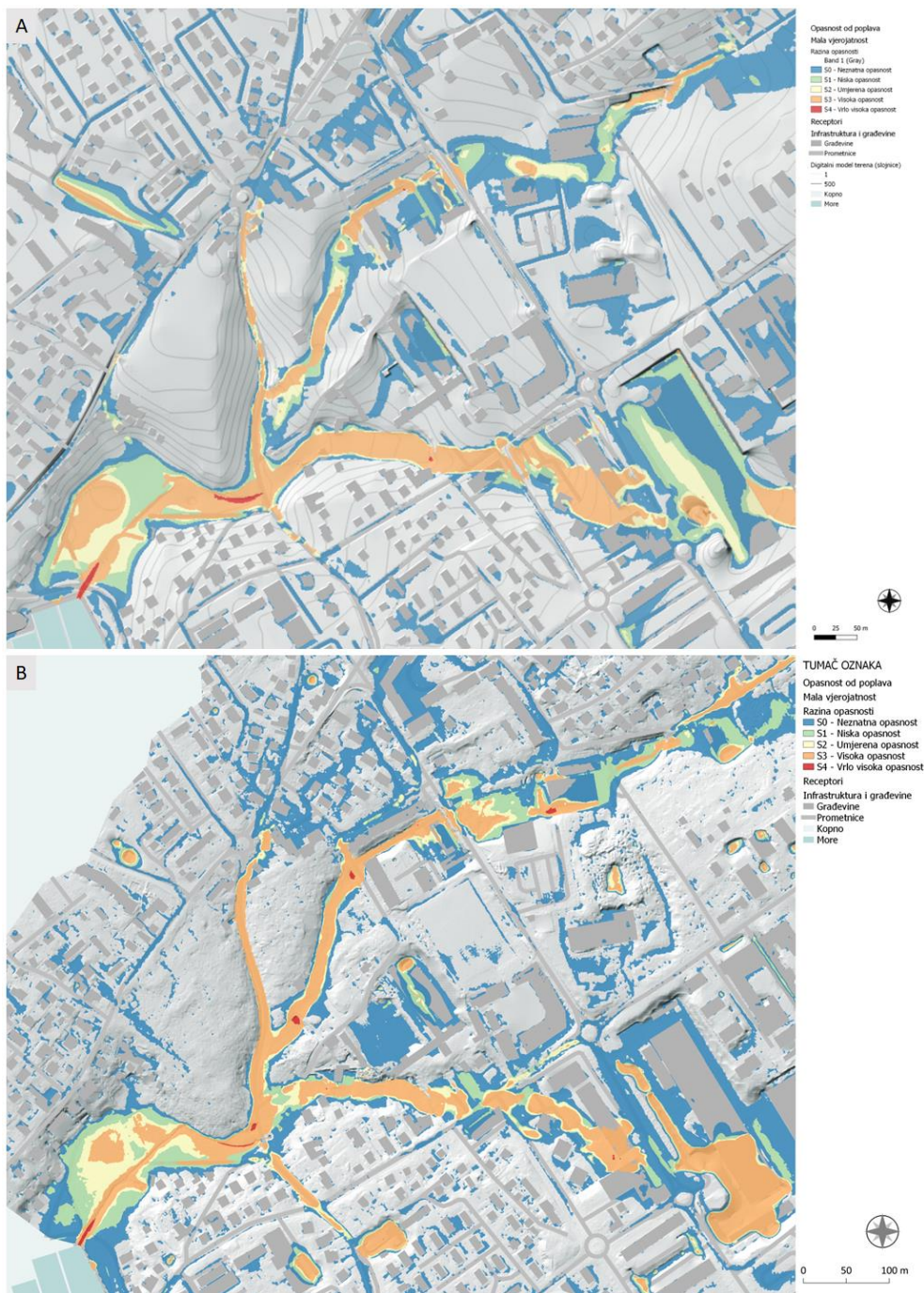
rezultati se mogu interpretirati u smjeru identifikacije pojedinačnih objekata i dionica prometnica koje su izložene poplavama. Rezultati dobiveni korištenjem LiDAR snimke imaju znatno višu razinu pouzdanosti i preciznosti, ne samo zbog više rezolucije, već i zbog realnijeg reljefa terena.



Slika 5.2.6 Usporedba rezultata dubine vode za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) mikro razina (rezolucija 25 cm).



Slika 5.2.7 Usporedba rezultata brzine vode za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) mikro razina (rezolucija 25 cm).

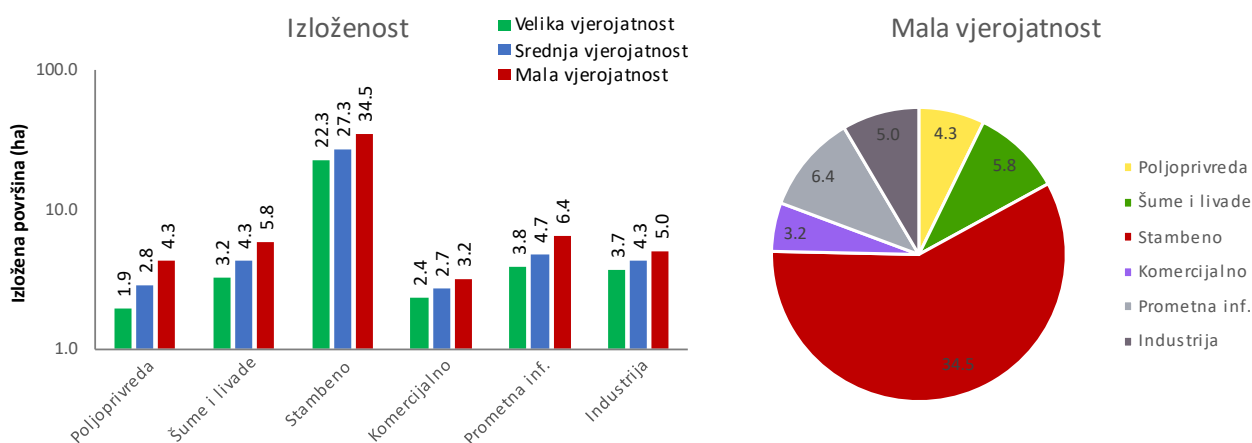


Slika 5.2.8 Usporedba rezultata razine opasnosti vode za malu vjerojatnost na dijelu sliva Vruljice: a) mezo razina (rezolucija 1 m), b) mikro razina (rezolucija 25 cm).

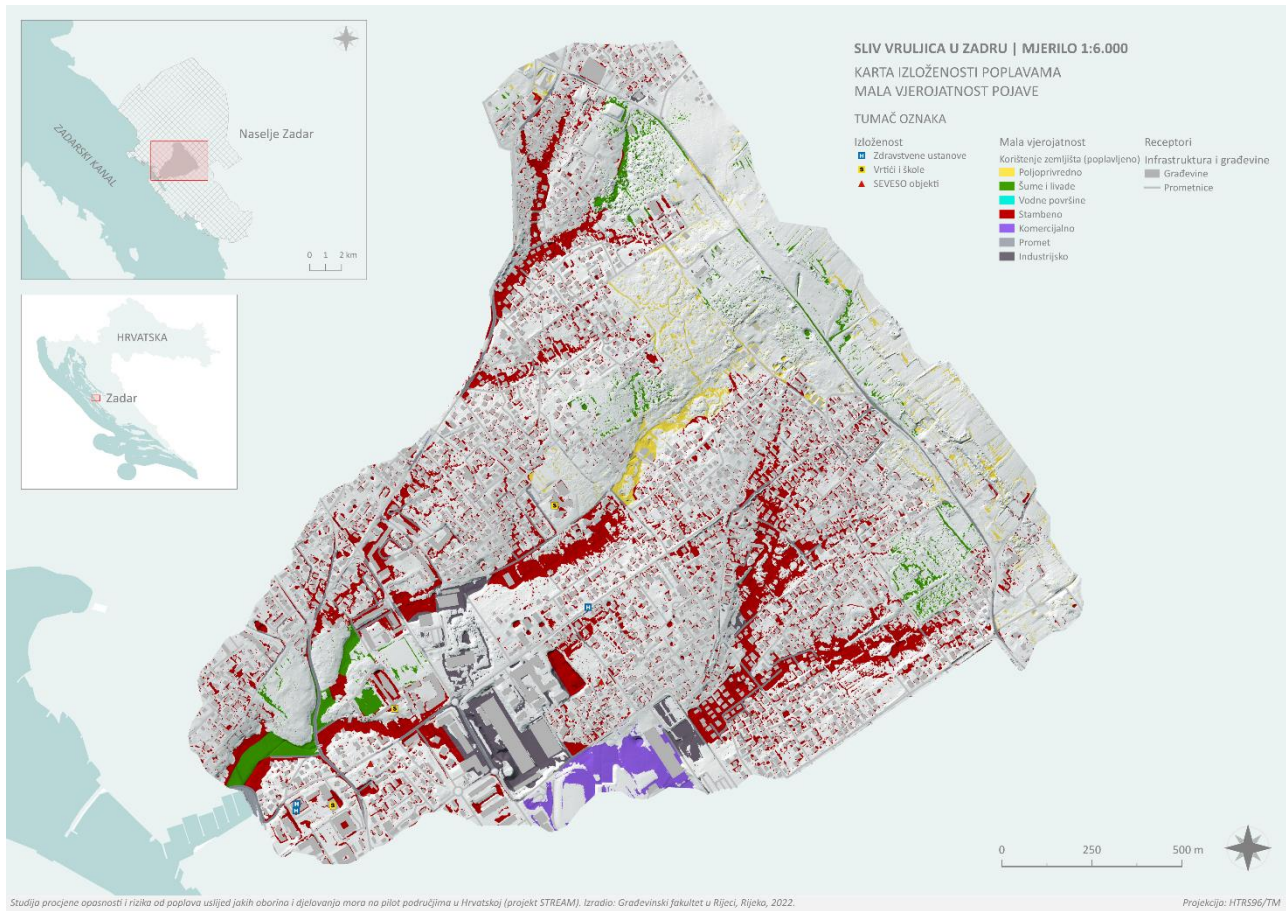
## 5.2.4 Ranjivost na pluvijalne poplave u slivu Vruljica

Ranjivost na pluvijalne poplave provedena je s ciljem određivanja rizika, što se prikazuje u sljedećem poglavlju, a u nastavku je zasebno izdvojena analiza izloženosti receptora poplavama. Pritom na kartama su prikazani poligoni namjene korištenja zemljišta unutar obuhvata poplava za svaku vjerojatnost te svi identificirani receptori iz kategorije javne usluge, potencijalni izvori onečišćenja, zaštićena područja i kulturna baština.

Ukupna promatrana površina sliva urbanog dijela naselja Zadar iznosi 3,1 km<sup>2</sup>, a ukupno poplavljeno područje iznosi 0,37 km<sup>2</sup> (12,2 %) za veliku vjerojatnost; 0,46 km<sup>2</sup> (14,9 %) za srednju vjerojatnost i 0,59 km<sup>2</sup> (19,1 %) za malu vjerojatnost pojave (Slika 5.2.9). Iz danih prikaza može se primijetiti da je najveći udio poplavljenih površina ~60 % stambene namjene. S velikom vjerojatnosti može se očekivati plavljenje površine od 22,3 ha stambene namjene, 3,8 ha prometne infrastrukture, 3,7 ha industrijskih površina te 2,1 ha komercijalne namjene. Na Slici 5.2.10 prikazana je statička karta ranjivosti, odnosno izloženosti za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.



Slika 5.2.9. Rezultati izloženosti poplavama prema namjeni korištenja zemljišta u slivu Vruljica.

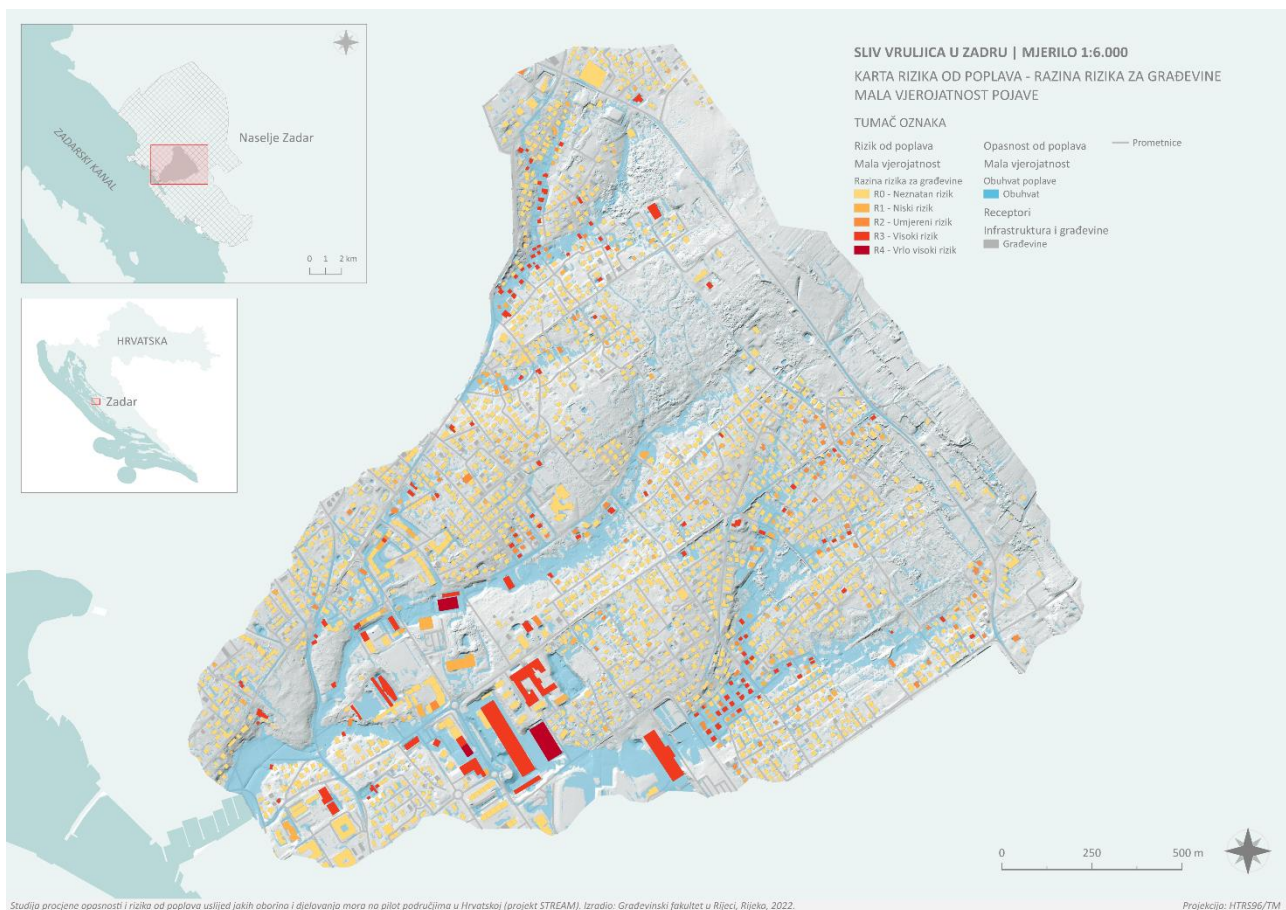


Slika 5.2.10. Karta ranjivosti na poplave – izloženost - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.

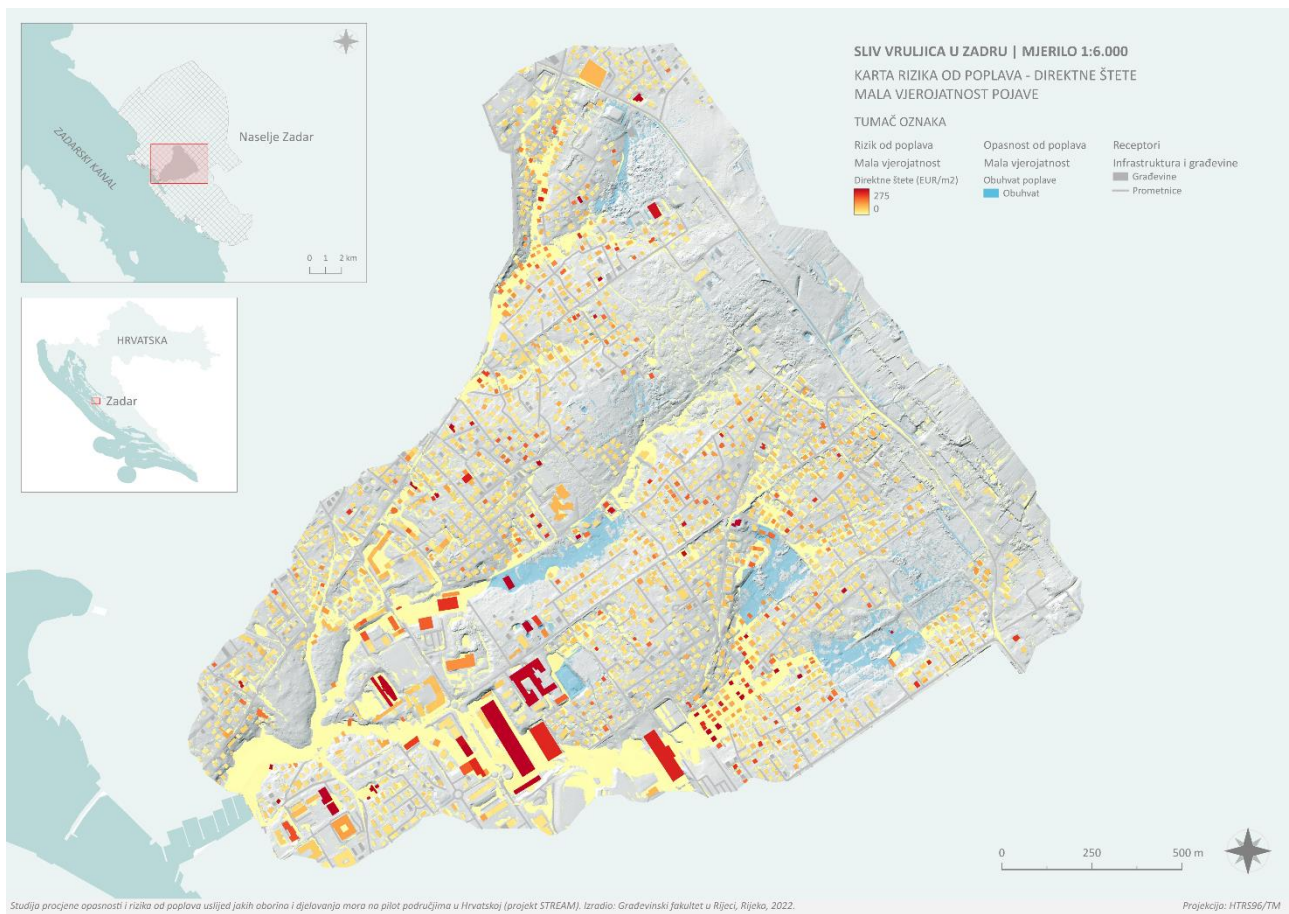


## 5.2.5 Rizik od pluvijalnih poplava na pilot području Zadar

Na osnovu provedenih analiza opasnosti i ranjivosti identificiran je i rizik od poplava na pilot području Zadar. Na Slici 5.2.11 dan je primjer karte rizika od poplava koja prikazuje razinu rizika za građevine za malu vjerojatnost. Na Slici 5.2.12 dan je drugi primjer karte rizika od poplava koja prikazuje prostornu raspodjelu direktnih šteta po jedini površine za malu vjerojatnost. Najvišu razinu rizika i najveće potencijalne štete imaju stambeni i poslovni objekti na križanju ulice Domovinskog rata i ulice Edvina Androvića; objekt gradskih bazena Zadar; Tehnička škola Zadar; te nekoliko manjih stambenih objekata.



Slika 5.2.11 Karta rizika od poplava – razina rizika za građevine - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.



Slika 5.2.12 Karta rizika od poplava – direktne štete - za malu vjerojatnost u slivu Vruljica.

## 5.3 Karte pluvijalnih poplava u slivu Vruljica

Karte pluvijalnih poplava izrađene su u statičkom i dinamičkom formatu.

**Statičke karte** izrađene su kao PDF dokumenti u mjerilu prikladnom A2 formatu papira. Za predmetno područje izrađene su sljedeće statičke karte:

- **Karta povijesnih poplava** (za jednu odabranu poplavu s najvećim zabilježenim posljedicama ili najintenzivnijim oborinama)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – dubine vode** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – brzine vode** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta opasnosti od pluvijalnih poplava – razine opasnosti** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta ranjivosti na pluvijalne poplave – izloženost** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta rizika od pluvijalnih poplava – razina rizika za građevine** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)
- **Karta rizika od pluvijalnih poplava – direktne štete** (zasebno za malu, srednju i veliku vjerojatnost)

Ukupno je za sliv Vruljica izrađeno 19 tematskih karta u PDF formatu.

**Dinamičke karte** izrađene su u GIS okruženju u mjerilu 1:2.000, a isporučuju se u obliku vektorskih i rasterskih datoteka. Popis i opis svih isporučenih datoteka po pilot području prikazan je u Tablici 5.3.1. Datoteke su prema razinama analiza raspoređene i sistematizirane u grupe slojeva. Razine analiza se sastoje od: podloga, katastra poplava, receptora, izloženosti, opasnosti, rizika i kritične podslivove. Uz svaku datoteke izrađeni su i priloženi prikladni stilovi za prikaz u QGIS sučelju.

Tablica 5.3.1 Popis elemenata dinamičkih karata pluvijalnih poplava (GIS baza podataka)

Mapa	Ime datoteke	Indikator	Vjerojatnost	Grupa QGIS sloja	Naziv QGIS sloja (opis)
\Exposure	<i>Catchment.shp</i>	Podloge			Sliv
\Exposure	<i>DEM_25cm_clipped.tif</i>				Digitalni model terena (DMT)
\Cadastre	<i>Flooded_areas.shp</i>	Katastar poplava		Katastar poplava	Obuhvat zabilježenih poplava
\Cadastre	<i>Flood_interventions.shp</i>				Vatrogasne intervencije
\Historical	<i>Depth (Max)_[date]_clipped.tif</i>			Povijesne poplave	Dubine (m) - [date]
\Exposure	<i>Buildings.shp</i>	Receptori		Receptori- Infrastruktura i građevine	Građevine
\Exposure	<i>Roads.shp</i>				Prometnice
\Exposure	<i>Railroad.shp</i>				Željeznička pruga
\Exposure	<i>Population.shp</i>				Gustoća stanovnika
\Exposure	<i>LU_25cm.tif</i>				Namjena korištenja zemljišta
\Exposure	<i>LU_1m__modified.tif</i>				Korištenje zemljišta (osnovno)
\Exposure\Pollution	<i>SEVESO.shp</i>	Izloženost		Izloženost-Izvori onečišćenja	SEVESO objekti
\Exposure\Public_facilities	<i>Health_facilities.shp</i>	Izloženost		Izloženost-Javne usluge	Zdravstvene ustanove

\Exposure\Public_facilities	<i>Kindergarten_Schools.shp</i>				Vrtići i škole
\Risk\Scenario1\5YR	<i>LU_flooded_5YR_modified.tif</i>	Izloženost	Velika	Izloženost-Velika vjerojatnost	Korištenje zemljišta
\Risk\Scenario1\25YR	<i>LU_flooded_25YR_modified.tif</i>		Srednja	Izloženost-Srednja vjerojatnost	Korištenje zemljišta
\Risk\Scenario1\100YR	<i>LU_flooded_100YR_modified.tif</i>		Mala	Izloženost-Mala vjerojatnost	Korištenje zemljišta
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>	Opasnost	Velika	Opasnost od poplava-Velika vjerojatnost	<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>D_V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>				Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Flood_extent_5yr.tif</i>				Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Flood_severity_5yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti
\Hazard\Scenario1\5YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>		Brzina vode (m/s)		
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>		Srednja	Opasnost od poplava-Srednja vjerojatnost	<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>D_V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>				Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Flood_extent_25yr.tif</i>				Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Flood_severity_25yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti
\Hazard\Scenario1\25YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>	Brzina vode (m/s)			
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>D_V (Max)_clipped.tif</i>	Mala		<i>(ne prikazuje se)</i>	

\Hazard\Scenario1\100YR	<i>D_ V^2 (Max)_clipped.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Depth (Max)_clipped.tif</i>				Dubina vode (m)
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Flood_extent_100yr.tif</i>			Opasnost od poplava- Mala vjerojatnost	Obuhvat poplave
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Flood_severity_100yr_clipped.tif</i>				Razina opasnosti
\Hazard\Scenario1\100YR	<i>Velocity (Max)_clipped.tif</i>				Brzina vode (m/s)
\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>	Rizik	Velika	Rizik od poplava- Velika vjerojatnost	Razina rizika za građevine
\Risk\Scenario1\5YR	<i>Damages_percent_5yr.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Risk\Scenario1\5YR	<i>Total_damages_5yr.tif</i>				Direktne štete (EUR/m2)
\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>		Srednja	Rizik od poplava- Srednja vjerojatnost	Razina rizika za građevine
\Risk\Scenario1\25YR	<i>Damages_percent_25yr.tif</i>				<i>(ne prikazuje se)</i>
\Risk\Scenario1\25YR	<i>Total_damages_25yr.tif</i>				Direktne štete (EUR/m2)
\Exposure	<i>Buildings_sampled.shp</i>	Mala	Rizik od poplava-Mala vjerojatnost	Razina rizika za građevine	
\Risk\Scenario1\100YR	<i>Damages_percent_100yr.tif</i>			<i>(ne prikazuje se)</i>	
\Risk\Scenario1\100YR	<i>Total_damages_100yr.tif</i>			Direktne štete (EUR/m2)	

## 6 Statistička analiza složenih poplava u Zadru i utjecaj klimatskih promjena

### 6.1 Analiza vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina u Zadru

U obalnim gradovima poplave mogu biti posljedica različitih uzroka kao što su jake oborine, ali i visoke razine mora. Kako bi se pouzdano procijenio sveukupni rizik od poplava, nužno je ispravno kvantificirati vjerojatnost pojave takvih događaja. U prethodnim analizama pojave visokih razine mora i jakih oborina te njihovo djelovanje u vidu poplava analizirane su zasebno. Međutim, pluvijalne poplave i poplave s mora mogu se javiti u isto vrijeme, stoga je neophodno istražiti međusobnu ovisnost ovih dvaju pojava te kvantificirati vjerojatnost njihove zajedničke pojave.

Za početak se daje pregled korištene metodologije, a potom rezultati sezonske analize međusobne ovisnost (korelacije) među navedenih veličinama, potencijala njihove zajedničke pojave te statističke analize bivarijantne vjerojatnosti zajedničkog djelovanja visokih razina mora i jakih oborina. U nastavku rada se za istodobnu pojavu dvaju izvora poplava koristi pojam supojava (eng. *co-occurrence*).

#### 6.1.1 Metodologija provedenih statističkih analiza

Analiza supojave visokih razina mora i jakih oborina na području Zadra provedena je u skladu s metodologijom iz nekoliko recentnih radova (Couasnon i sur., 2022.; Tootoonchi i sur., 2021.; Sadegh i sur., 2018; Salvadori i sur., 2015.). Analiza je provedena na nizu rezidualnih razina mora iz Copernicus baze podataka te nizu ombrografskih podataka s postaje Zadar, oboje za period od 30 godina (1990. – 2019.). Pritom, provedene su dvije analize, prvo je analizirana korelacija među navedenim veličinama, nakon toga je analiziran potencijal supojave, a potom je i kvantificirana bivarijantna vjerojatnost zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina. U okviru predmetnih analiza jake oborine promatrane su za četiri različita trajanja (1, 3, 6 i 24 sata).

### **Potencijal supojave i korelacija visokih razina mora i jakih oborina**

Analiza potencijala supojave visokih razina mora i jakih oborina provedena je u skladu s recentnim radom autora Couasnon i sur. (2022.), u okviru kojeg je predložena metodologija za sezonsku analizu međusobne ovisnosti i potencijala supojave visokih razina mora i jakih oborina.

Predložena metodologija analize vremenske serije visokih razina mora i jakih oborina sastoji se od sljedećih koraka (Couasnon i sur., 2022.):

- Proračunate su maksimalne mjesečne vrijednosti za razinu mora te oborinu trajanja 1, 3, 6, i 24 sata.
- Na nizu mjesečnih maksimuma provedena je provjera autokorelacije koristeći modificiran Mann-Kendall test.
- Na nizu mjesečnih maksimuma provedena je provjera stacionarnosti te je uklonjen linearni trend u slučaju da je niz nestacionaran.
- Uklonjeni su mjesečni maksimumi za one mjesece kada nije zabilježena oborina.
- Međusobna ovisnost između mjesečnih maksimuma razine mora i oborine procijenjena je pomoću Pearsonovog, Spearmanovog i Kendallovog koeficijenta korelacije, pri čemu je procijenjena i statistička značajnost sva tri koeficijenta korelacije pomoću p-vrijednosti.
- Za svaki par mjesečnih maksimuma razine mora i jakih oborina procijenjen je potencijal supojave. Ako su događaji razmaknuti za manje od jednoga dana, smatra se da su se zabilježeni maksimumi pojavili istodobno. Također je određen 95% prag značajnosti za broj supojava po mjesecima kako bi se mogao ocijeniti potencijal supojave za svaki mjesec.

### **Bivarijantna vjerojatnost zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina**

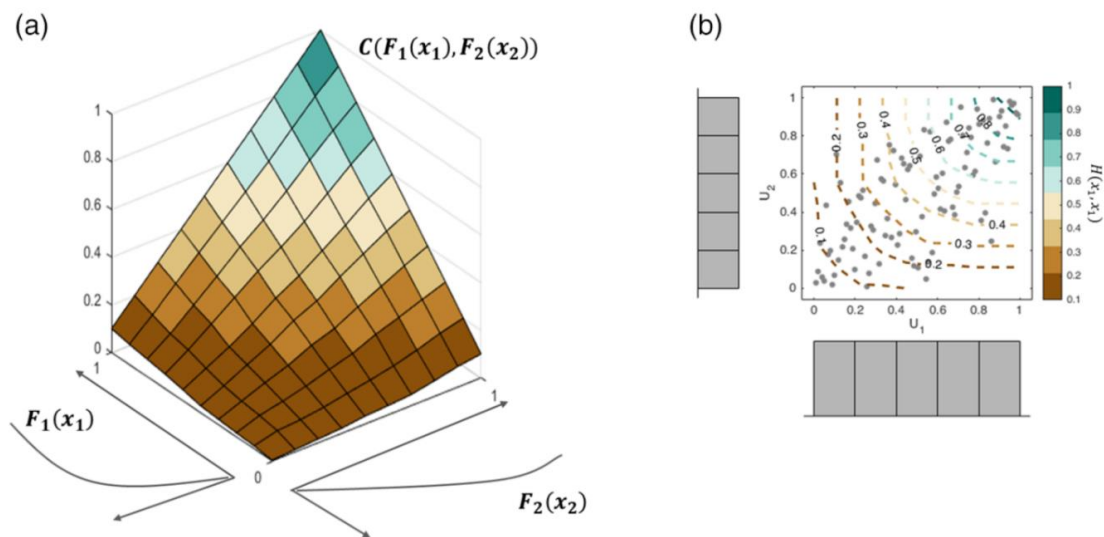
Bivarijantna vjerojatnost zajedničke pojave (eng. *joint probability*) visokih razina mora i jakih oborina određena je pomoću tzv. kopula (eng. *copula*). Kopule su funkcije koje objedinjavaju više univarijantnih marginalnih kumulativnih funkcija vjerojatnosti u zajedničku viševarijantnu kumulativnu funkciju zajedničke vjerojatnosti. U hidrologiji su ove funkcije često korištene za procjenu poplava uslijed više različitih uzroka, kao što su visoke razine mora, visoki protoci, jake oborine, itd. (Graler i sur., 2013.; Tootoonchi i sur., 2021.).

Predložena metodologija za analizu bivarijantne vjerojatnosti kombinacija je nekoliko recentnih radova koji su prilagođeni u svrhu predmetne analize (Couasnon i sur., 2022.; Tootoonchi i sur., 2021.; Sadegh i sur., 2018; Salvadori i sur., 2015.), a sastoji se od sljedećih koraka:

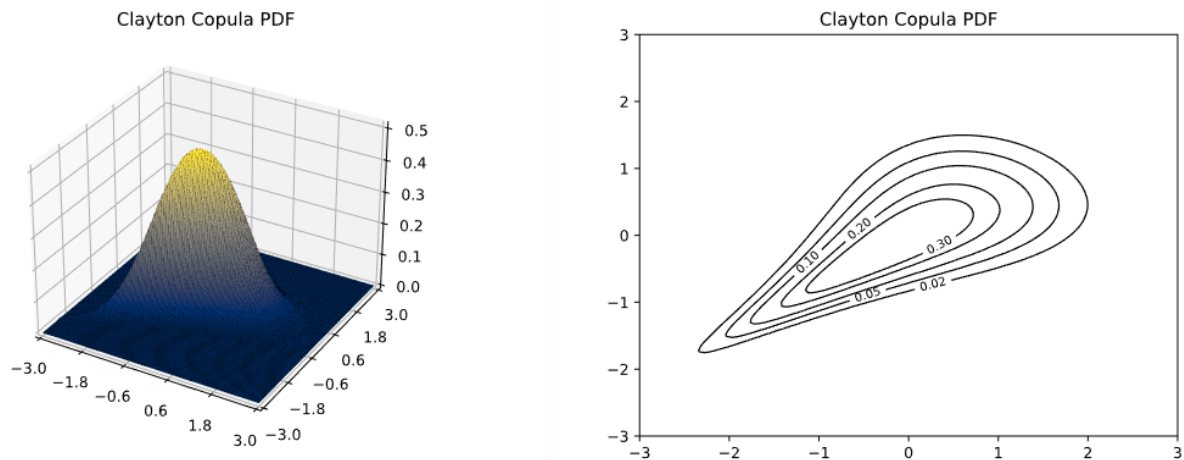


- Bivarijantna vjerojatnost zajedničke pojave određena je za sve mjesečne maksimume iz prethodnog koraka (nakon što su provedene analize autokorelacije i stacionarnosti te uklonjeni podaci bez oborina).
- Za mjesečne maksimume visokih razina mora i jakih oborina zasebno je određena univarijantna marginalna distribucija vjerojatnosti. Pritom je razmatrano 30 različitih distribucija, a najbolja je određena pomoću statističkih mjera AIC i BIC.
- Na osnovu marginalnih distribucija određena je bivarijantna distribucija pomoću kopula koristeći *pycop* računalni paket (Nicolas, 2022.), pri čemu su razmatrane arhimedove kopule Clayton, Gumbel, Frank, Joe, Galambos, BB1, BB2, FGM, Plackett i njihove rotacije. Procjena parametara kopule provedena je prema metodi Maximum Likelihood Estimation (MLE), a odabir najbolje kopule proveden je prema AIC i BIC statističkim mjerama.
- Navedeni koraci provedeni su zasebno za jake oborine trajanja 1, 3, 6 i 24 sata.
- Nakon što je kopula prilagođena podacima, moguće je provesti stohastičku simulaciju proizvoljnog trajanja kako bi se odredili parovi maksimalnih razina mora i jakih oborina za traženu zajedničku vjerojatnost (povratno razdoblje).

Na Slici 6.1.1 prikazan je primjer empirijske kopule i pripadajuća funkcija kumulativne vjerojatnosti, na Slici 6.1.2. primjer Claytonove bivarijantne kopule i pripadajuća funkcija gustoće vjerojatnosti.



Slika 6.1.1. Primjer empirijske bivarijantne kopule prikazane kao: a) 3D ploha i b) 2D površina sa izolinjama kumulativne vjerojatnosti. Funkcije  $F_1$  i  $F_2$  označavaju marginalne distribucije varijabli  $x_1$  i  $x_2$ , čije je međusobno ovisnost modelirana kopulom  $C$  (Tootoonchi i sur., 2021.).



Slika 6.1.2. Primjer Claytonove bivarijantne kopule prikazane kao: a) 3D ploha gustoće vjerojatnosti i b) 2D površina s izolinijama gustoće vjerojatnosti. (Nicolas, 2022.).

## 6.1.2 Rezultati sezonske analize supojave visokih razina mora i jakih oborina

U Tablici 6.1.1 dani su rezultati korelacije mjesečnih maksimuma sa statističkom ocjenom značajnosti. Iz prikazanih rezultata, može se zaključiti da je korelacija statistički značajna za sva trajanja oborine te da je korelacija pozitivna, iako vrlo slaba. Najsnažnija korelacija primijećena je između visokih razina mora i 24-satne oborine, međutim rezultati su vrlo slični neovisno o trajanju oborine.

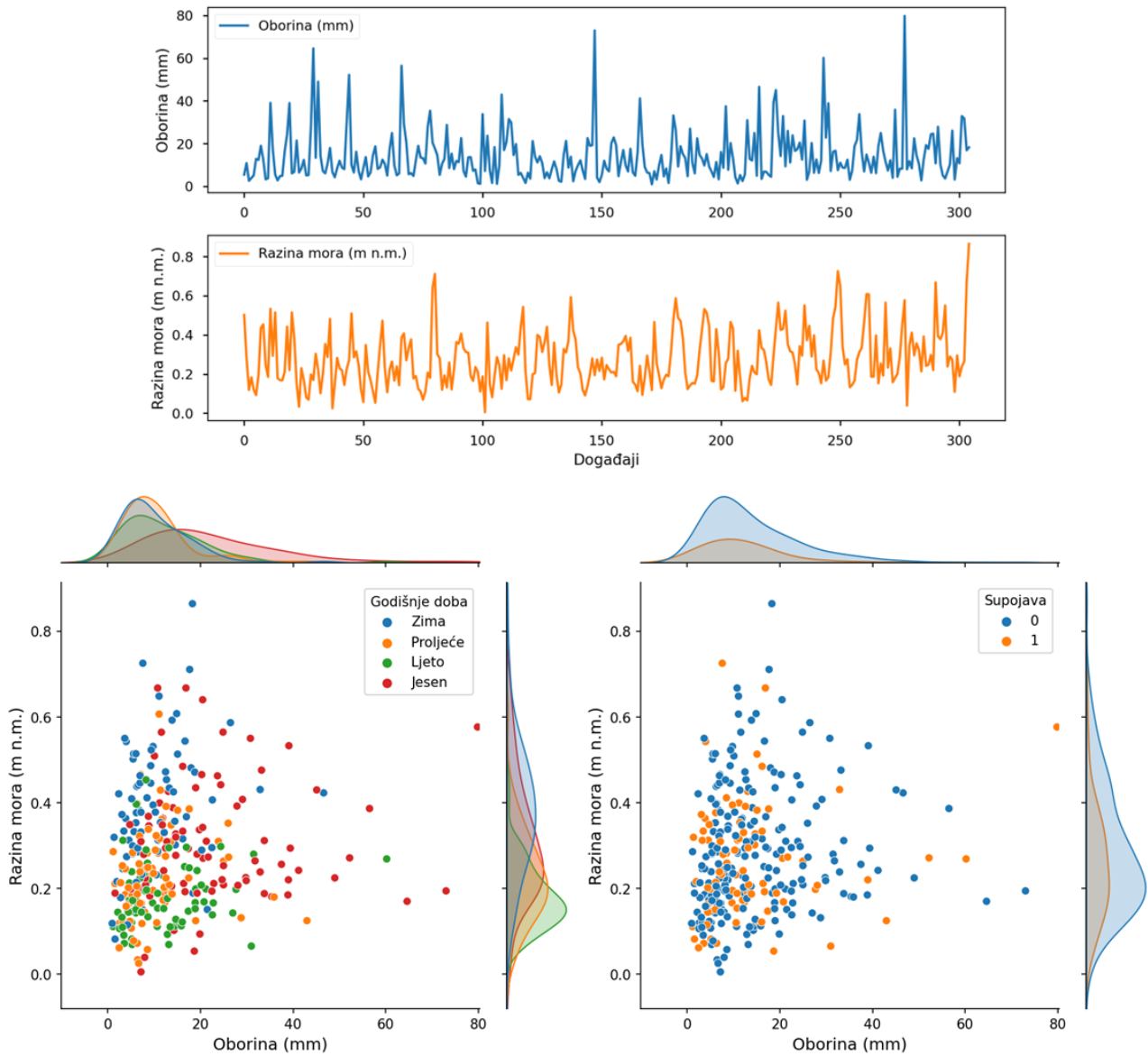
Na Slikama 6.1.3 - 6.1.6 prikazani su vremenski nizovi i rezultati korelacije mjesečnih maksimuma visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1, 3, 6, i 24 sata, pri čemu su naglašene sezonske razlike i broj supojava mjesečnih maksimuma. Iz danih prikaza može se zaključiti da pozitivna korelacija postoji, ali je vrlo slaba i postaje primjetno raspršena za ekstremne vrijednosti. Maksimumi obje veličine najčešće se javljaju u jesen i zimu, dok se najmanje vrijednosti javljaju u ljeti. Od svih zabilježenih mjesečnih maksimuma, približno je četvrtina supojava, za 24-satno trajanje oborine zabilježeno je 97 supojava od 360 događaja, dok je za 1-satno trajanje oborine zabilježeno 85 supojava. Pritom treba napomenuti da su iz prikaza (a također i iz daljnjih analiza) uklonjeni oni mjeseci u kojim nije zabilježena oborina.

Tablica 6.1.1. Statistička analiza korelacije između mjesečnih maksimuma visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1, 3, 6, i 24 sata.

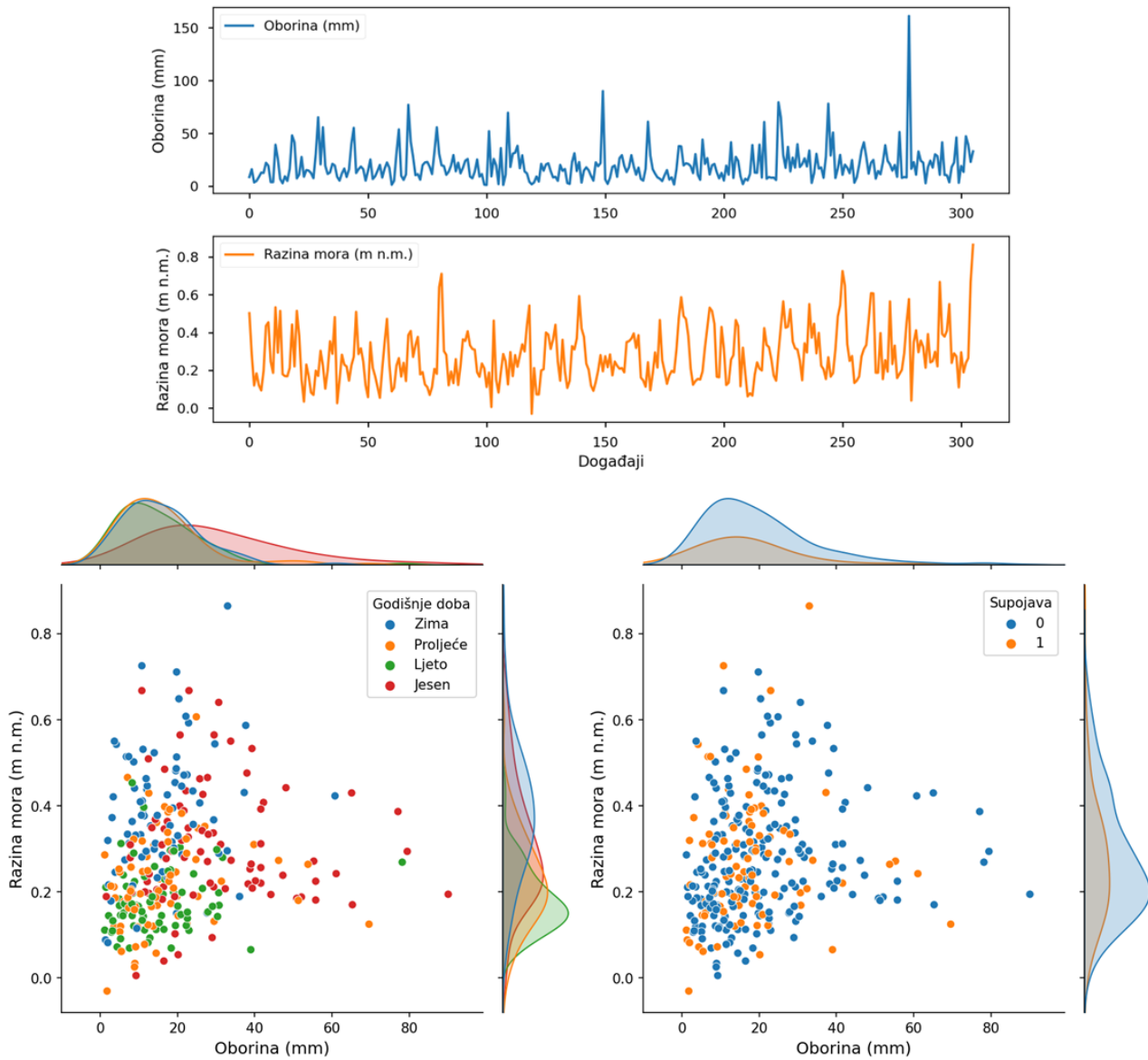
Mjera korelacije	Koeficijent korelacije	$p$ vrijednost	Značajno na 5%?
<b>Mjesečni maksimumi visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1 sat</b>			
Kendall rank	0.191	0	Da
Spearman's rank-order	0.284	0	Da
Pearson product-moment	0.199	0.000144	Da
<b>Mjesečni maksimumi visokih razina mora i jakih oborina trajanja 3 sata</b>			
Kendall rank	0.213	0	Da
Spearman's rank-order	0.317	0	Da
Pearson product-moment	0.232	0.000008	Da
<b>Mjesečni maksimumi visokih razina mora i jakih oborina trajanja 6 sati</b>			
Kendall rank	0.224	0	Da
Spearman's rank-order	0.335	0	Da
Pearson product-moment	0.238	0.000005	Da
<b>Mjesečni maksimumi visokih razina mora i jakih oborina trajanja 24 sata</b>			
Kendall rank	0.235	0	Da
Spearman's rank-order	0.349	0	Da
Pearson product-moment	0.266	0	Da

Na Slici 6.1.7 dan je prikaz unutargodišnje raspodjele mjesečnih maksimuma visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1, 3, 6 i 24 sata te broja supojava po mjesecima. Iz danih se prikaza može primijetiti da se najveće vrijednosti maksimalnih oborina javljaju krajem ljeta i tijekom jeseni (rujan do studeni), dok se najviše vrijednosti maksimalnih razina mora javljaju krajem jeseni i tijekom zime (studeni do veljača). Broj supojava varira od 4 do 12 (u nizu od 30 godina), pri čemu je najveći broj supojava zabilježen tijekom siječnja i veljače. Za sva trajanja oborine, broj supojava je iznad praga pouzdanosti i stoga se može ocijeniti kao statistički značajan.

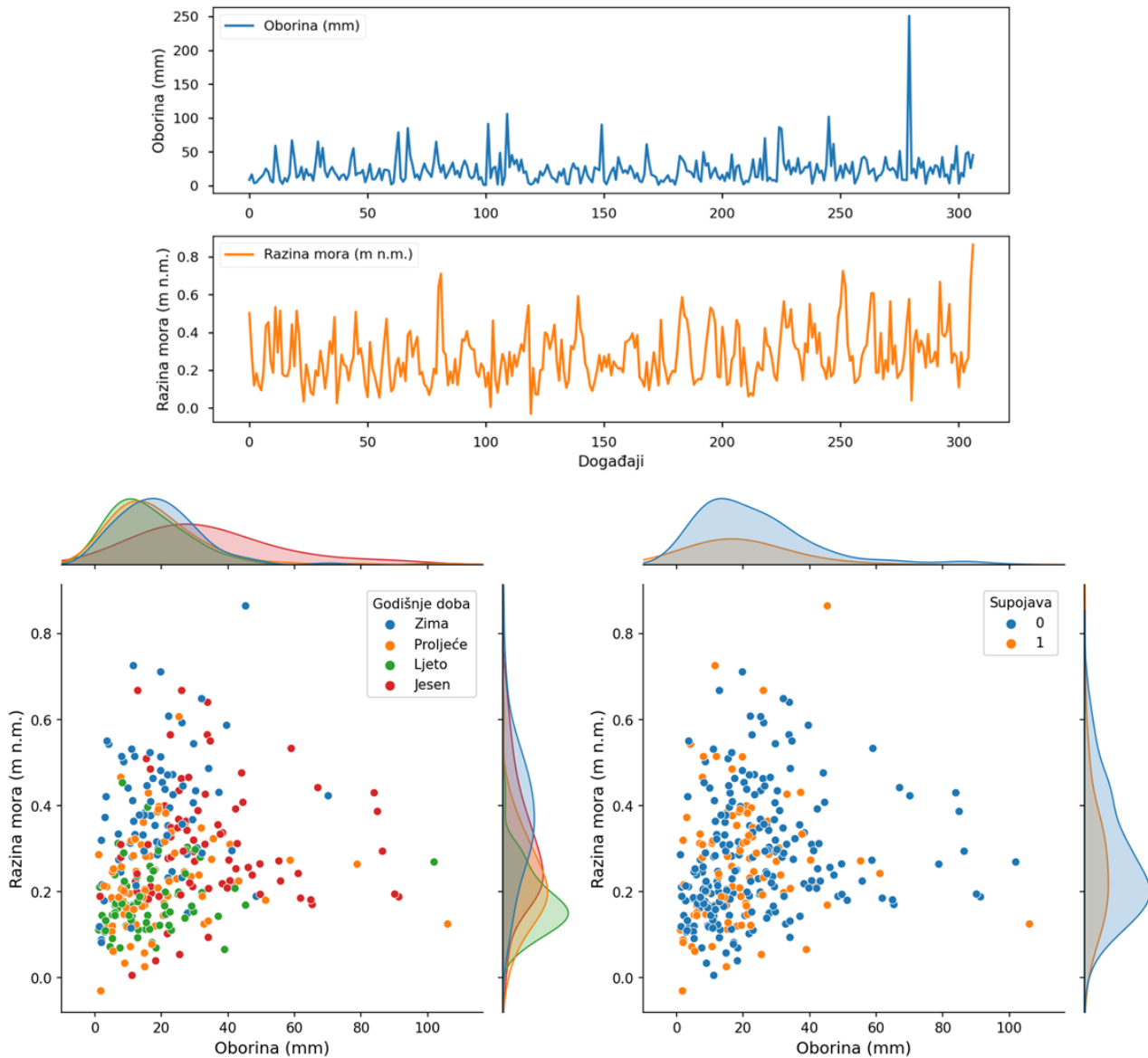
**Zaključno, na području Zadra postoji međusobna ovisnost između visokih razina mora i jakih oborina te je stoga potrebno provesti bivarijantu analizu vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina.**



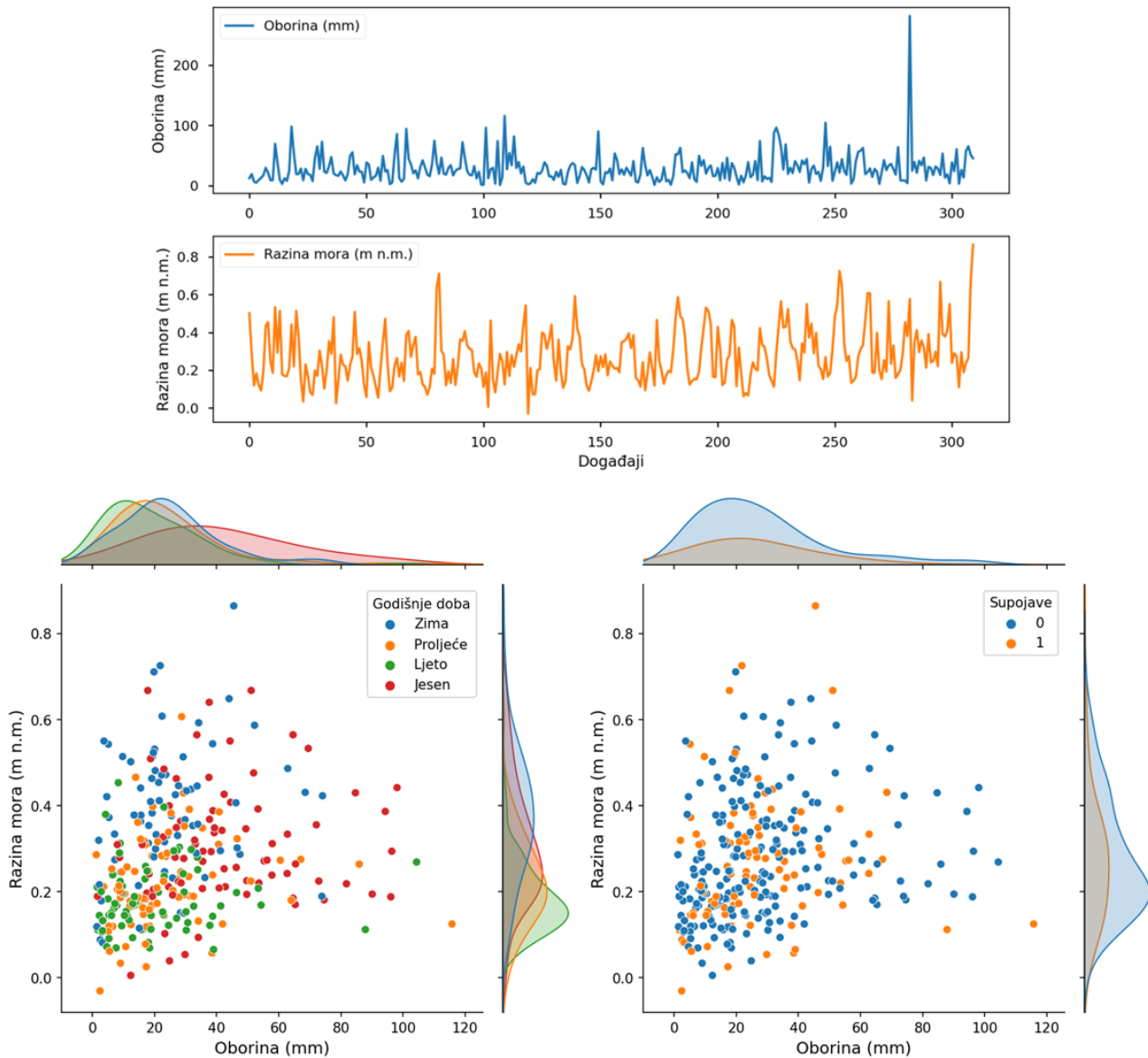
Slika 6.1.3. Vremenske serije i korelacije mjesečnih maksimuma visokih razina mora i **1-satnih** oborina.



Slika 6.1.4. Vremenske serije i korelacije mjesečnih maksimuma visokih razina mora i **3-satnih** oborina.

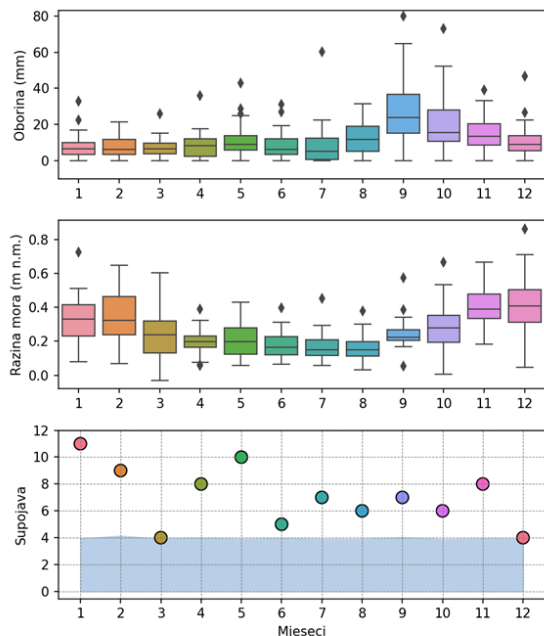


Slika 6.1.5. Vremenske serije i korelacije mjesečnih maksimuma visokih razina mora i 6-satnih oborina.

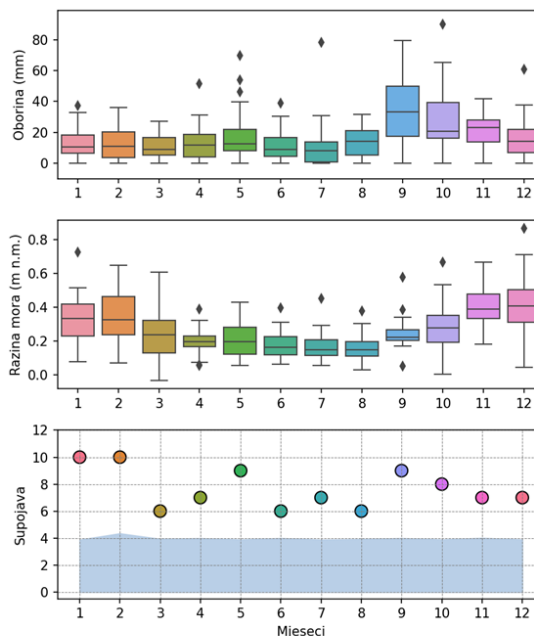


Slika 6.1.6. Vremenske serije i korelacije mjesečnih maksimuma visokih razina mora i **24-satnih** oborina.

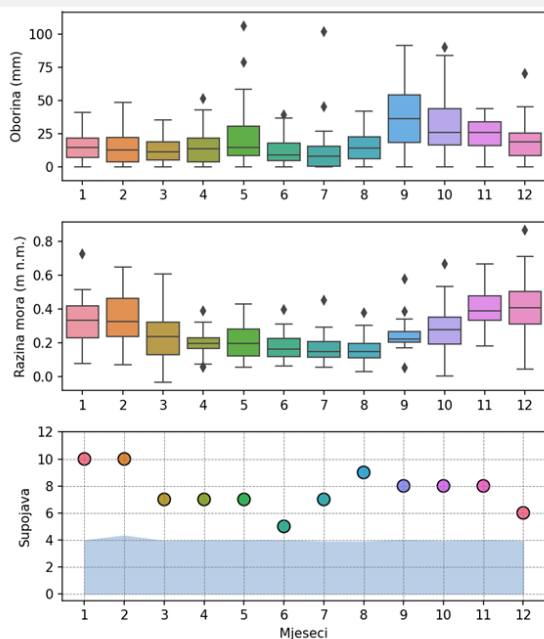
a) Mjesečni maksimumi visokih razina mora i 1-satnih oborina



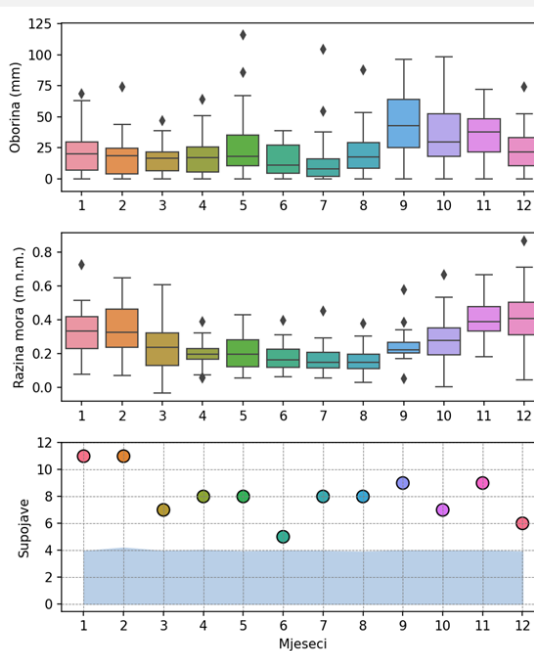
b) Mjesečni maksimumi visokih razina mora i 3-satnih oborina



c) Mjesečni maksimumi visokih razina mora i 6-satnih oborina



d) Mjesečni maksimumi visokih razina mora i 24-satnih oborina



Slika 6.1.7. Unutargodišnja (po mjesecima) raspodjela mjesečnih maksimuma visokih razina mora i: a) 1-satnih oborina, b) 3-satnih oborina, c) 6-satnih oborina, d) 24-satnih oborina, s prikazom brojem supojava.



### 6.1.3 Rezultati vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina

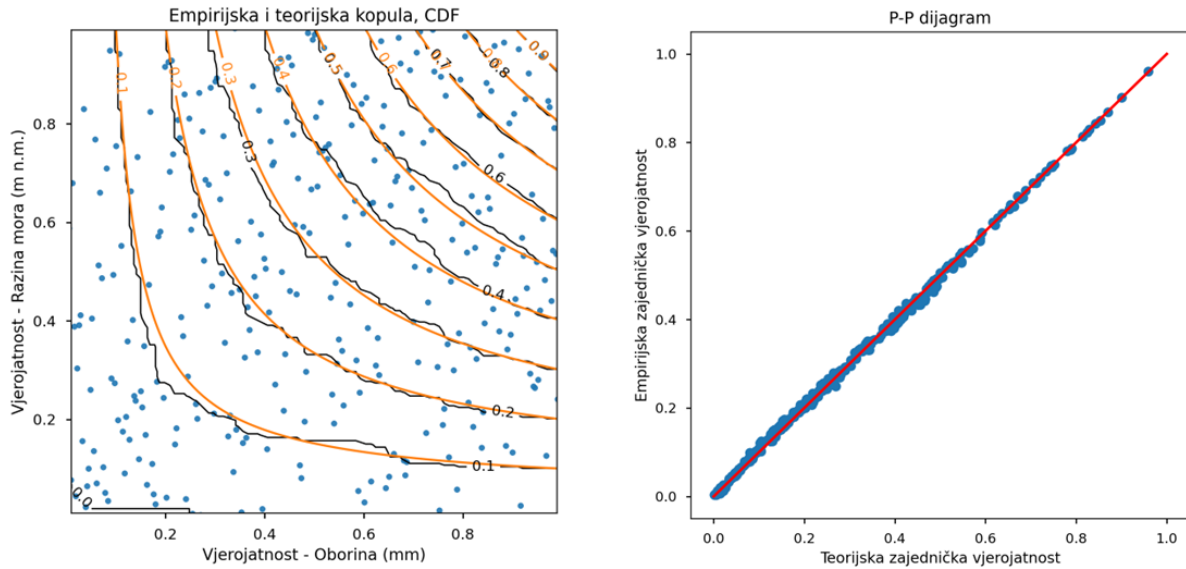
Na Slikama 6.1.8 do 6.1.11. prikazani su rezultati prilagodbe empirijske i teorijske kopule na parove visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1, 3, 6 i 24 sata. U sva četiri slučaja odabrana je Claytonova kopula.

Na Slikama 6.1.12 do 6.1.15 prikazani su rezultati vjerojatnosti zajedničke pojave visokih razina mora i jakih oborina trajanja 1, 3, 6 i 24 sata prema odabranoj kopuli s prikazom marginalnih distribucija. Pritom su vjerojatnosti iskazane kao povratni periodi za tzv. AND scenarij, koji označava istovremenu pojavu visokih razina mora i jakih oborina. Iz prikazanih vjerojatnosti moguće je uzorkovati neograničen broj parova visokih razina mora i oborina koji odgovaraju traženom povratnom periodu.

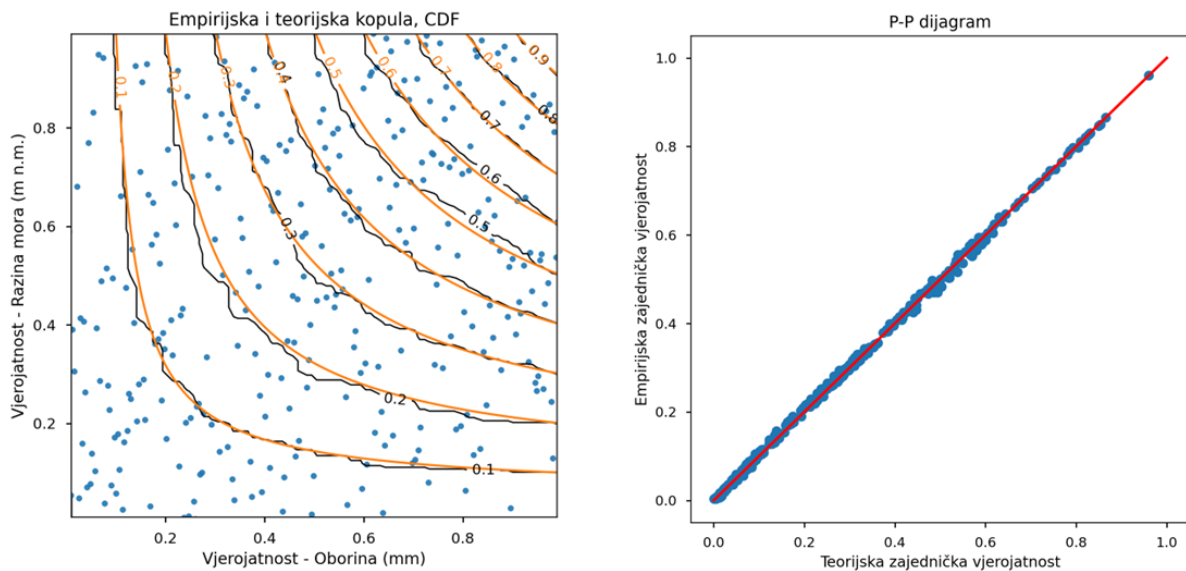
U Tablici 6.1.2. dan je prikaz statističke analize univarijantne vjerojatnosti pojave visoke razine mora i oborina trajanja 1, 3, 6, 12 i 24 sata za ekstremnu epizodu iz rujna 2017. godine. Rezidualna razina mora iznosila je 0,58 m što odgovara povratnom periodu od 2,4 godine. Maksimalna 1-satna oborina iznosila je 79,8 mm što odgovara povratnom periodu od 27,6 godine, međutim njihova zajednička pojava je znatno rjeđe prirode i odgovara povratnom periodu od 551,7 godina. Najekstremnija situacija unutar tog događaja je 12-satna oborina, koja je iznosila 266,9 mm, što odgovara povratnom periodu 287,8 godina, odnosno blizu 5000 godina gledajući vjerojatnost istovremene pojave takve količine oborine i visoke razine mora.

Tablica 6.1.2. Statistička analiza univarijantne (marginalne) vjerojatnosti i bivarijantne (zajedničke) vjerojatnosti pojave razine mora i oborine za događaj iz rujna 2017. godine.

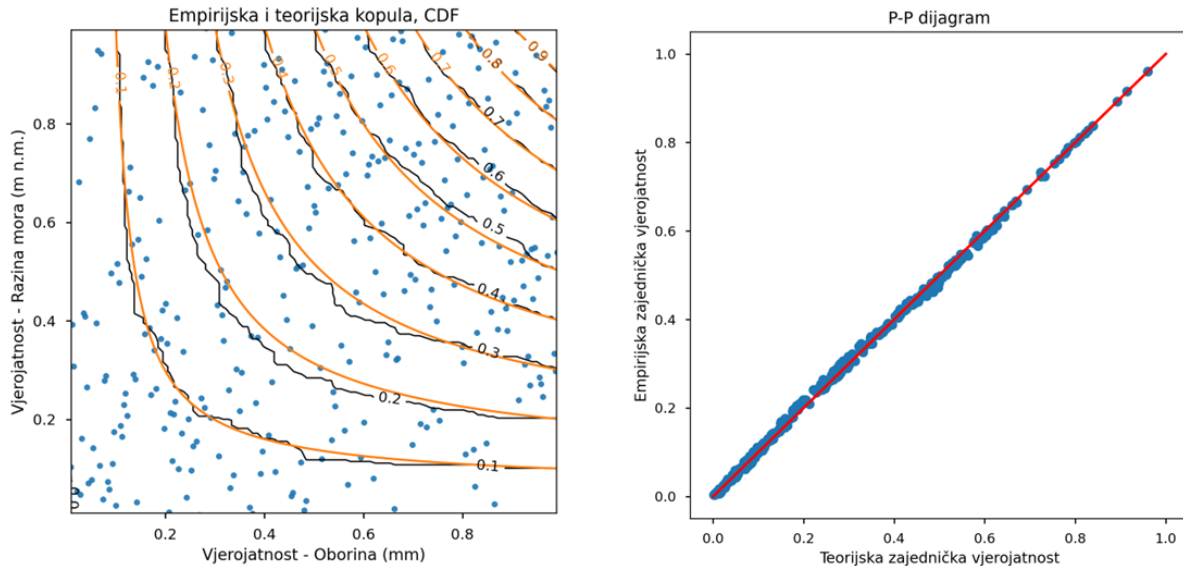
Oborina (mm)	Trajanje oborine (h)	Razina mora (m)	Marginalna vjerojatnost (god)		Zajednička vjerojatnost (god)
			Oborina	Razina mora	Oborine + razina mora
79,8	1	0,58	27,6	2,4	551,7
161,2	3	0,58	74,2	2,4	1327,3
250,7	6	0,58	217,5	2,4	3763,0
266,9	12	0,58	287,8	2,4	4919,6
281,8	24	0,58	175,7	2,4	3056,0



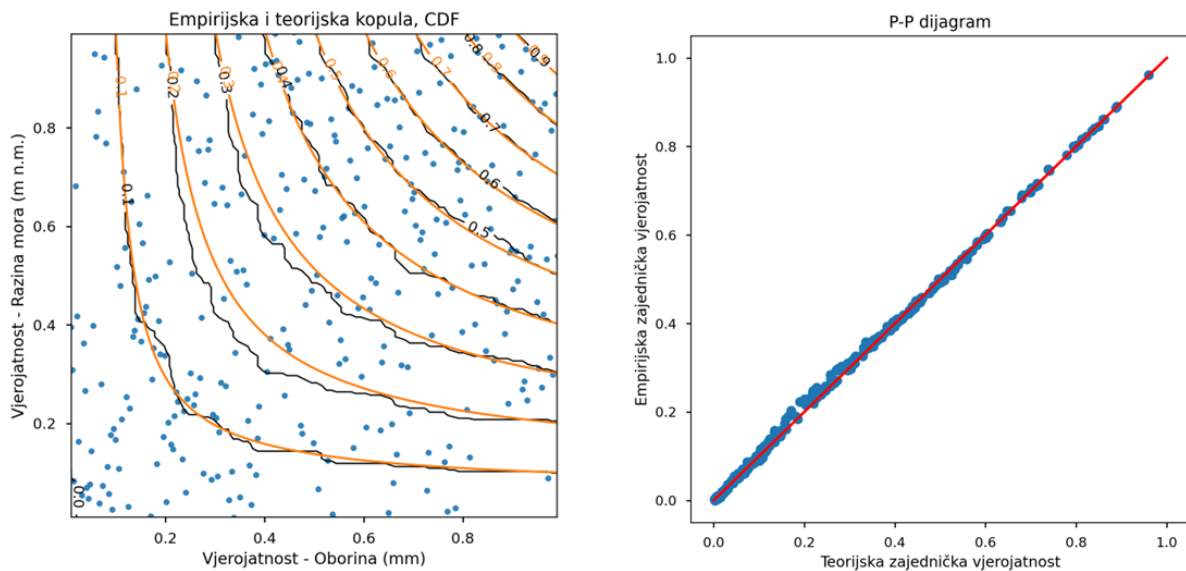
Slika 6.1.8. Usporedba empirijske i teorijske kopule za zajedničku vjerojatnost visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 1 sat**, lijevi panel prikazuju kumulativnu funkciju vjerojatnosti, a desni panel P-P dijagram.



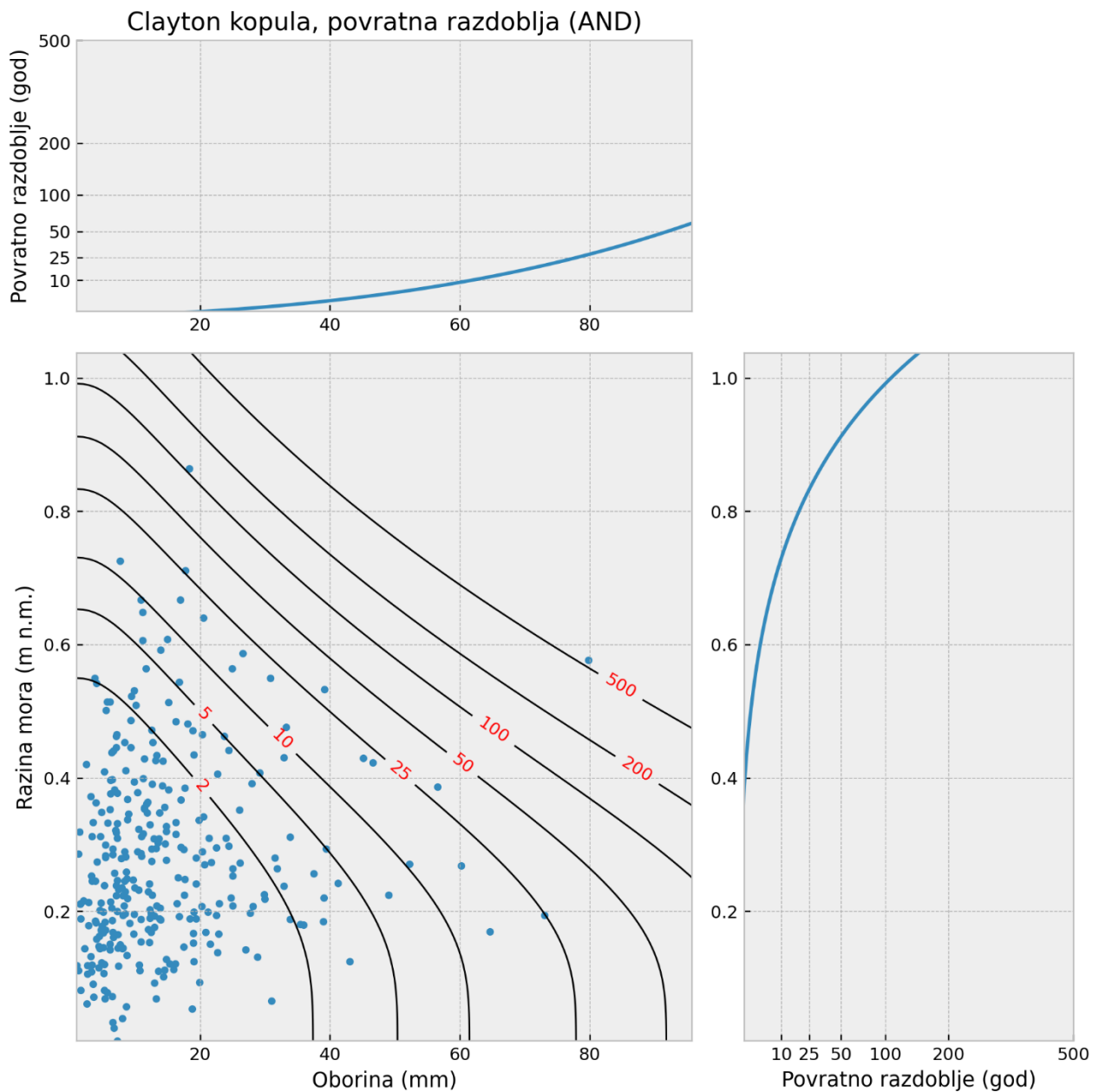
Slika 6.1.9. Usporedba empirijske i teorijske kopule za zajedničku vjerojatnost visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 3 sata**, lijevi panel prikazuju kumulativnu funkciju vjerojatnosti, a desni panel P-P dijagram.



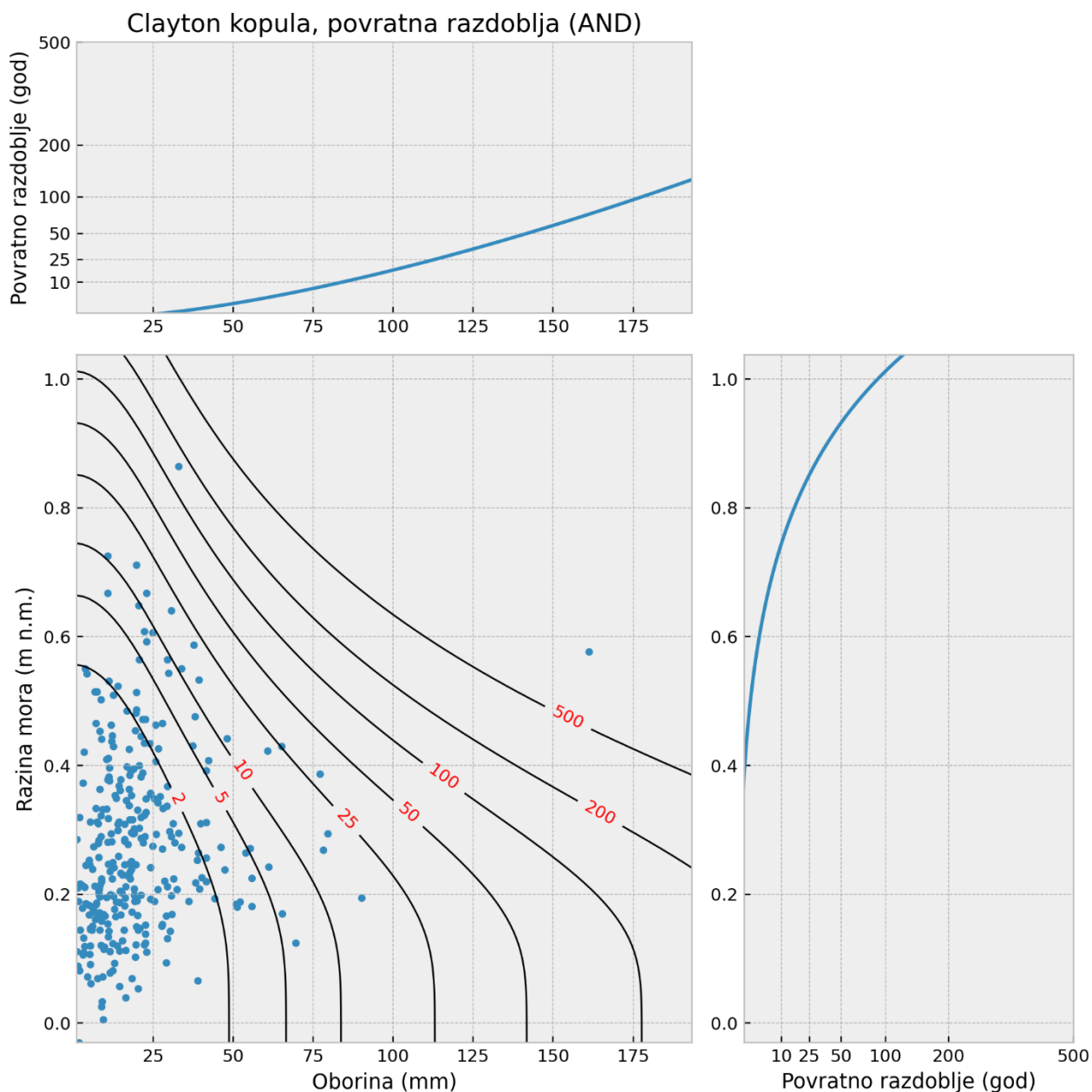
Slika 6.1.10. Usporedba empirijske i teorijske kopule za zajedničku vjerojatnost visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 6 sati**, lijevi panel prikazuju kumulativnu funkciju vjerojatnosti, a desni panel P-P dijagram.



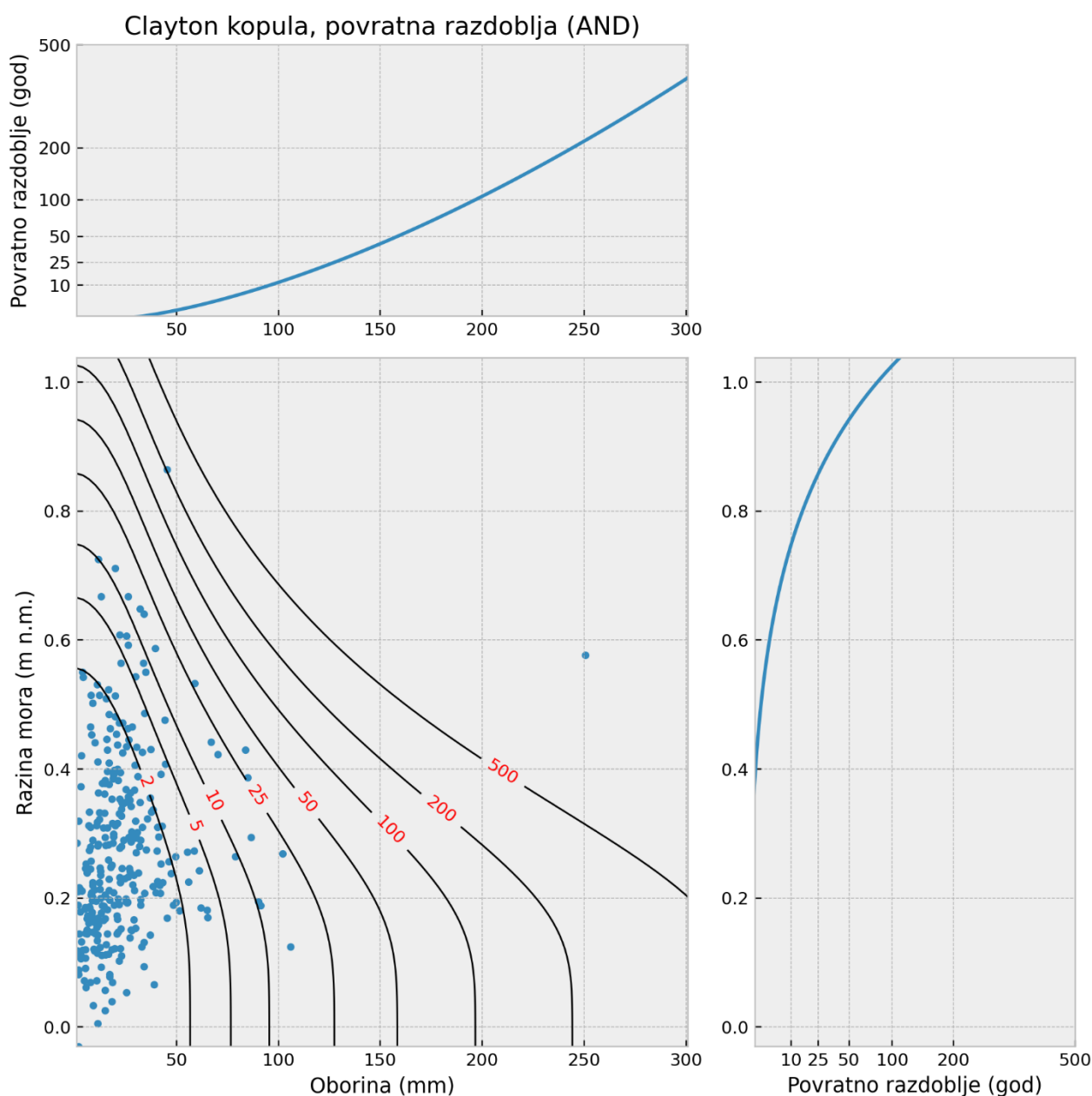
Slika 6.1.11. Usporedba empirijske i teorijske kopule za zajedničku vjerojatnost razina mora i jakih oborina **trajanja 24 sata**, lijevi panel prikazuje kumulativnu funkciju vjerojatnosti, a desni panel P-P dijagram.



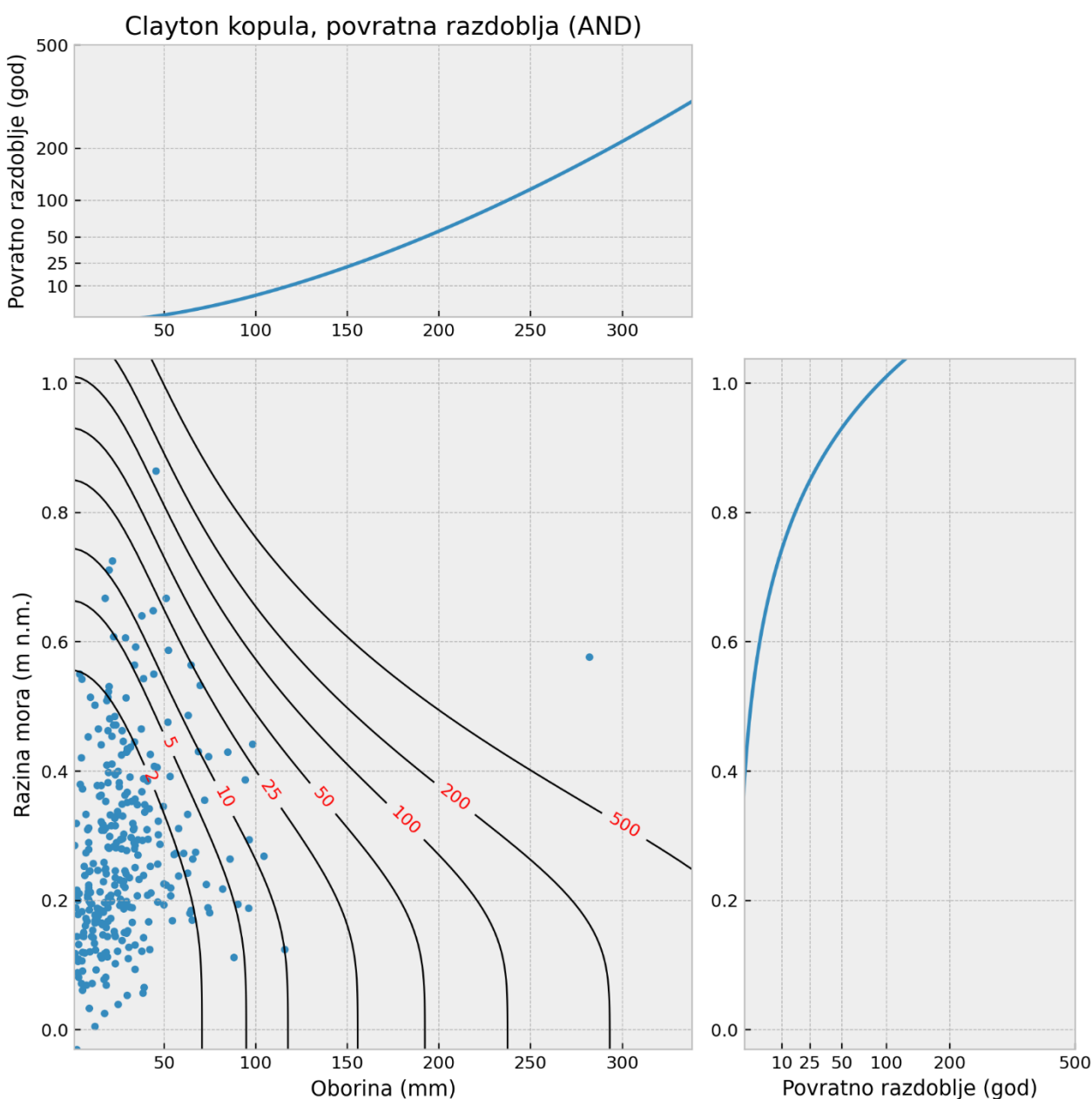
Slika 6.1.12. Vjerojatnost pojave visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 1 sat**: bivarijantna zajednička vjerojatnost (scenarij AND) i univarijantne marginalne vjerojatnosti. Izolinije prikazuju povratne periode u godinama. Točke prikazuju parove zabilježenih mjesečnih maksimalnih vrijednosti u periodu od 1990. – 2019.



Slika 6.1.13. Vjerojatnost pojave visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 3 sata**: bivarijantna zajednička vjerojatnost (scenarij AND) i univarijantne marginalne vjerojatnosti. Izolinije prikazuju povratne periode u godinama. Točke prikazuju parove zabilježenih mjesečnih maksimalnih vrijednosti u periodu od 1990. – 2019.



Slika 6.1.14. Vjerojatnost pojave visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 6 sati**: bivarijantna zajednička vjerojatnost (scenarij AND) i univarijantne marginalne vjerojatnosti. Izolinije prikazuju povratne periode u godinama. Točke prikazuju parove zabilježenih mjesečnih maksimalnih vrijednosti u periodu od 1990. – 2019.



Slika 6.1.15. Vjerojatnost pojave visokih razina mora i jakih oborina **trajanja 24 sata**: bivarijantna zajednička vjerojatnost (scenarij AND) i univarijantne marginalne vjerojatnosti. Izolinije prikazuju povratne periode u godinama. Točke prikazuju parove zabilježenih mjesečnih maksimalnih vrijednosti u periodu od 1990. – 2019.

## 6.2 Sistematizacija saznanja o utjecajima klimatskih promjena na intenzitet oborina

Usljed opaženih klimatskih promjena i globalnog zagrijavanja znanstvena zajednica je prepoznala mogućnost jačanja utjecaja kratkotrajnih jakih oborina na pojavu poplava.

Čest koncept kojim se povezuje utjecaj porasta temperature na intenzitet oborine uključuje primjenu Clausius-Clapeyronove jednadžbe koja povezuje promjenu ravnotežnog tlaka vodene pare pri zasićenju s promjenom temperature zraka. Pretpostavka je da će veza između intenziteta oborine i temperature zraka biti bliska vezi ravnotežnog tlaka vodene pare pri zasićenju i temperature zraka jer dostupna vodena para utječe na mogućnost kondenzacije te formiranja oblačnih sustava iz kojih će se razviti intenzivni oborinski događaji. Naravno, osnovna svrha primjene ovog koncepta je omogućiti sažimanje velikog broja raznovrsnih vremenskih situacija koje će ovisiti i o svim drugim faktorima i procesima koji se javljaju u formiranju oblaka iz vodene pare a zatim i oborine iz oblaka i oblačnih sustava. Lokalni procesi kod kojih postoji značajno razumijevanje dodatnog pojačanja početnog utjecaja porasta temperature na porast intenziteta oborine uključuju oslobađanje latentne topline i prateći razvoj konvektivnih sustava, utjecaj topografije na jačanje konvektivne nestabilnosti te utjecaj konvergencije u atmosferskom strujanju a koja omogućava dodatan izvor vodene pare za razvoj oblačnih i oborinskih sustava.

Navedeni tip analiza u smislu skaliranja u ovisnosti o promjeni temperature općenito upućuje na zaključak u kojem intenzivne količine oborine s dužim vremenskim trajanjem (reda veličine jednog dana i dulje) prate skaliranje koje proizlazi iz Clausius-Clapeyronove jednadžbe te iznosi između 6 % i 7 % porasta u intenzitetu takvih oborinskih događaja za svaki porast temperature od 1 °C. Ovaj općeniti rezultat može dodatno ovisiti o utjecaju atmosferskog strujanja i specifičnostima pojedine geografske regije te je prisutna značajna promjenjivost ovisno o lokaciji i tipu mjerenja odnosno tipu korištenih modela. Ipak, intenziteti vrlo rijetkih dnevnih količina oborine a posebno intenziteti kratkotrajnih (satni i minutni intenziteti) jakih oborina mogu biti i dvostruko osjetljiviji na porast temperature zraka te dosežati između 12 % i 14 % porasta u intenzitetu za svaki porast temperature od 1 °C. Uzevši u obzir mogućnost porasta globalne temperature zraka do kraja 21. stoljeća preko 2 °C, porast u intenzitetu dnevnih, satnih i minutnih oborinskih intenziteta ima potencijal vrlo značajnog porasta. Ovdje je potrebno razlikovati promjenu temperature vezanu uz globalno zagrijavanje, u odnosu na promjene temperature koje se događaju na nekoj lokaciji unutar dana ili

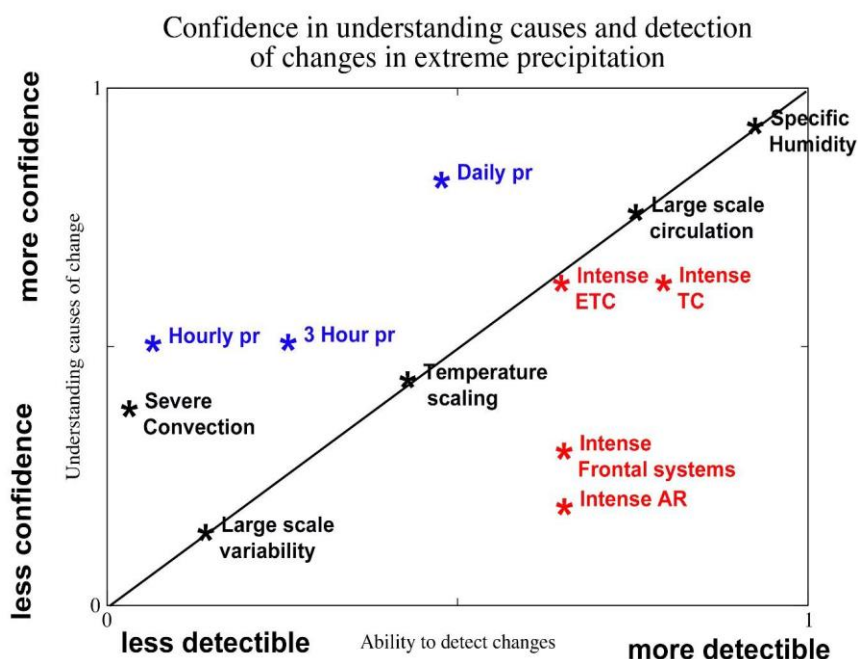


godine no za očekivati je da će skaliranje koje dovodi do porasta u intenzitetu jakih oborina biti blisko u oba slučaja.

Utjecaj globalnog zagrijavanja na intenzivne oborinske događaje moguće je istražiti za razdoblja povijesne i sadašnje klime (koristeći dostupna mjerenja i klimatske modele) te buduće klime (koristeći klimatske modele u idealiziranim simulacijama ili projekcijama uz pretpostavke različitih scenarija emisija i koncentracija stakleničkih plinova). U smislu korištenja radarskih i staničnih mjerenja potrebno je osigurati dovoljno duge i homogene nizove i polja koji omogućavaju razdvajanje dugotrajnih klimatskih promjena od prirodne promjenjivosti. U smislu korištenja klimatskih modela visoke rezolucije, rana istraživanja su bila opterećena korištenjem jednog ili manjeg broja klimatskih modela (što dovodi do ovisnosti rezultata o postavljenim pretpostavkama u istim modelima) te relativno kraćih razdoblja simulacija od 10-ak godina. Razvojem regionalnih klimatskih modela, a kasnije i klimatskih modela visoke rezolucije te jačanjem potrebnih računalnih kapaciteta novije generacije klimatskih simulacija i projekcija uključuju veći broj korištenih klimatskih modela (tzv. ansambli simulacija od kojih je za izdvojiti [CORDEX Flagship Pilot Study Convection](#); Coppola i sur. 2020) i dulja trajanja simuliranih povijesnih, sadašnjih i budućih razdoblja. S obzirom na rastući broj radova koji koriste rezultate klimatskih modela, potrebno je naglasiti razliku između tzv. regionalnih klimatskih modela (eng. Regional Climate Models) i klimatskih modela visoke rezolucije (eng. Convection-Permitting Climate Models). Tipični regionalni klimatski modeli koriste prostornu mrežu modela na rezoluciji između 10 km i 50 km te parametriziraju procese vezane za duboku konvekciju (u praksi, koriste poluempirijske izraze koji povezuju neka svojstva oblačnih sustava koji se javljaju pri dubokoj konvekciji s atmosferskim varijablama koje su direktno simulirane a na temelju statističkih veza proizašlih iz analiza motrenja istih veličina). S druge strane, nove generacije klimatskih modela visoke rezolucije koriste prostorne rezolucije između 1 km i 4 km te izravno simuliraju procese vezane za duboku konvekciju tj. ne koriste parametrizacije za ovaj tip procesa. U dugoročnom razvoju klimatskih modela potrebno je adresirati i sve ostale procese koji se zbog malih prostornih dimenzija moraju i dalje parametrizirati (plitka konvekcija, turbulentno miješanje itd).

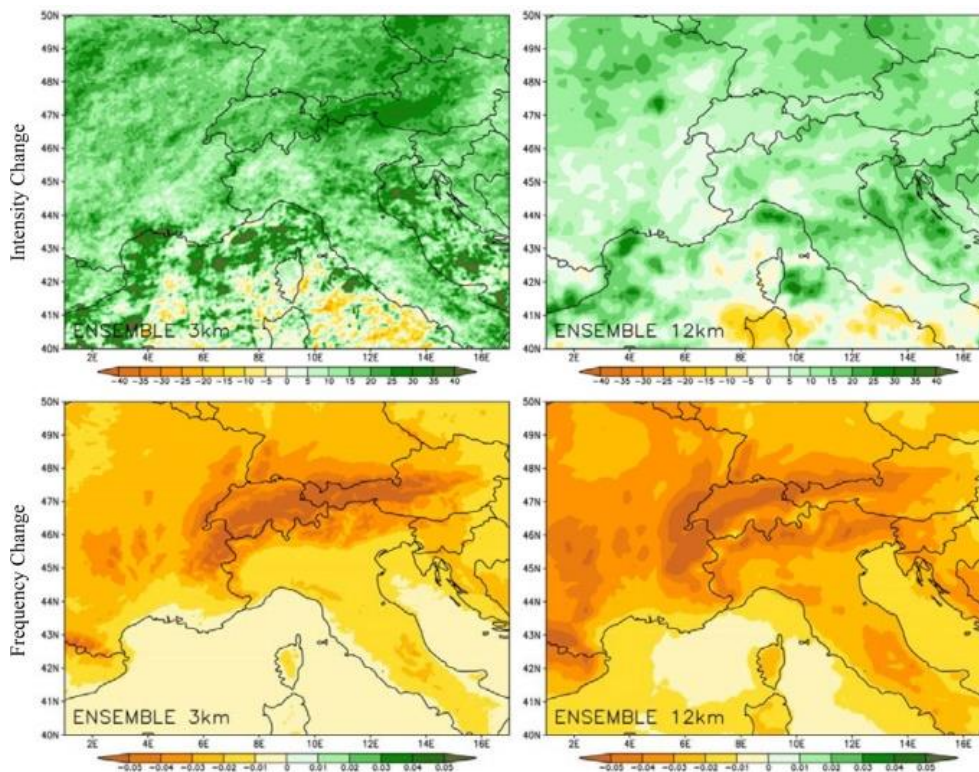
Objedinjujući različite izvore informacija i mogućnosti analiza moguće je ugrubo sažeti koliko kvalitetno možemo detektirati pojedinačne vremenske pojave koje dovode do intenzivnih oborina i s njima povezane varijable u odnosu na trenutačan nivo razumijevanja izvora i mehanizama tih istih promjena (Slika 6.1.1). Na primjer, u slučaju analiza satnih intenziteta jakih oborina imamo trenutno ograničene mogućnosti detekcije promjena no nešto veći stupanj pouzdanosti u razumijevanju

procesa koji dovode do promjena kada je ona detektirana. Ranije navedeni primjer primjenjivosti Clausius-Clapeyronovog skaliranja je u središtu ovakvog prikaza, s osrednjim mogućnostima u oba aspekta (detekcija promjene i razumijevanje promjene). Određena ograničenja u primjeni Clausius-Clapeyronovog skaliranja dokumentirana su u npr. Drobinski i sur. (2018) u kojem je analizirana izmjerena i modelirana veza između dnevne temperatura zraka i satnih količina oborine na području Sredozemlja, uključujući i mjerenja na lokaciji Split-Marjan. Konkretna odstupanja od uobičajenog skaliranja su detektirana za visoke temperature zraka u smislu negativne promjene u intenzitetu. Ova zamjena i iznosa i predznaka se često objašnjava kao posljedica ograničene dostupne količine vlage što može biti relativno čest slučaj na području Sredozemlja u razdoblju dugih toplinskih valova i suša. Kao zadnji primjer, promjene specifične vlažnosti zraka današnji sustavi za motrenja i modeliranja mogu izvrsno detektirati, a postoji i jasan fizikalni i analitički okvir koji ovakav tip promjena može uspješno interpretirati.



Slika 6.2.1. Mogućnost detekcije promjena (x-os) i stupanj pouzdanosti u razumijevanju mehanizma promjena (y-os) za različite procese koji dovode do utjecaja klimatskih promjena na značajke pojave jakih oborina, uključujući i kratkotrajne. Slika preuzeta za potrebe ovog izvješća iz Fowler i sur. (2021a).

Slika 6.1.2 prikazuje rezultate projekcija za klimatske simulacije iz Pichelli i sur. (2021) za alpsko područje te sadržava veći dio Hrvatske u domeni simulacija i analiza. Za uočiti je povećanje intenziteta satnih količina oborine i smanjenje učestalosti takvih događaja u razdoblju do kraja 21. stoljeća u odnosu na sadašnju klimu. Osim određenih prostornih varijacija u amplitudi relativnih promjena, za uočiti su intenzivnije promjene u klimatskim modelima visoke rezolucije što dodatno ukazuje na važnost njihovog daljnjeg razvoja s velikim potencijalom primjene. Određeno ograničenje metodologije u Pichelli i sur. (2021) je primjena scenarija značajnog povećanja emisija i koncentracija stakleničkih plinova RCP8.5, s obzirom da je trenutna putanja stvarnih emisija ipak bliža nešto umjerenijem scenariju RCP4.5. Također, prikazane rezultate je potrebno pažljivo interpretirati zbog izražene prostorne varijabilnosti te je prikladno dovoditi zaključke samo za čitavu prikazanu domenu ili određene veće pod domene.



Slika 6.2.2. Relativna promjena u srednjaku ansambla modela u razdoblju 2090.-2099. u odnosu na razdoblje 1996.-2005. za ljetne indekse satne oborine i scenarij RCP8.5. Prvi red: promjena intenziteta, drugi red: promjena učestalosti. Prvi stupac: klimatski modeli visoke rezolucije, desni stupac: regionalni klimatski modeli koji su izvor rubnih uvjeta za klimatske modele visoke rezolucije. Slika preuzeta i modificirana (zadržana 4 panela od ukupno 6) za potrebe ovog izvješća iz Pichelli i sur. (2021).

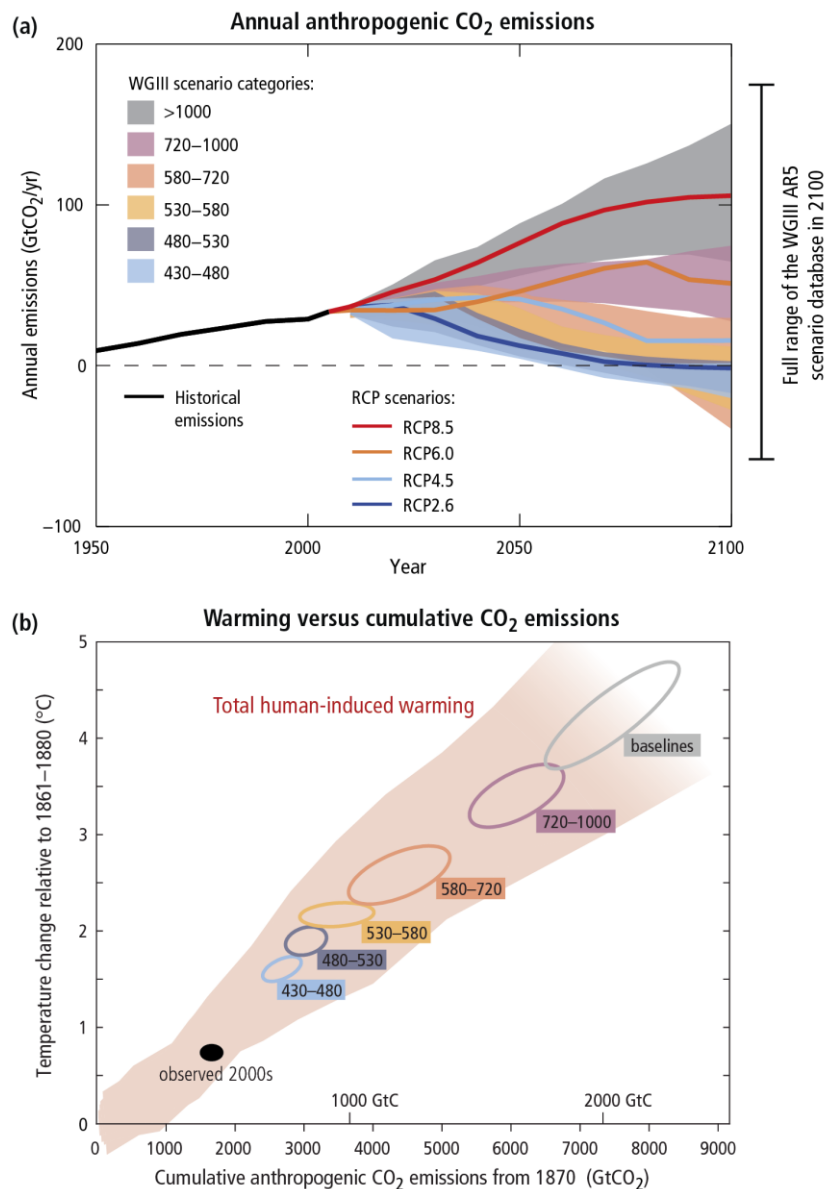
Preporuke za jačanje postojećih i razvoj budućih smjerova istraživanja uključuju daljnje korištenje i razvoj klimatskih modela na rezolucijama koje direktno simuliraju duboku konvekciju (tipičnih prostornih rezolucija u modelima od 1 km do 4 km) i jačanje metoda za detekciju i atribuciju utjecaja klimatskih promjena na vremenske pojave kratkotrajnih jakih oborina. Također, potrebno je uložiti značajne napore u detaljnijem razumijevanju na koji način globalno zagrijavanje utječe na atmosfersku cirkulaciju na sinoptičkoj skali, dinamiku konvektivnih oluja te stabilnost atmosfere, tj. atmosferske procese koji mogu modificirati osnovnu termodinamičku vezu između promjena u temperaturi zraka i promjena u intenzitetu kratkotrajnih jakih oborina. U smislu analiza mjerenih kratkotrajnih jakih oborina, usporedba različitih studija je otežana različitim metodologijama koje sadrže varijacije u pristupima kontroli kvalitete podataka, duljini dostupnih mjerenja, fizikalnim veličinama koje su analizirane, različitostima u primijenjenim statističkim metodama itd., a koje je potrebno i moguće uskladiti kako bi se dobila jasnija regionalna i globalna slika. Konačno, utjecaj klimatskih promjena na značajke pojave kratkotrajnih jakih oborina je potrebno usporedno analizirati i u odnosu na druge procese koji mogu utjecati na iste proces (npr. urbanizacija koja mijenja tip podloge i može lokalno pojačati intenzitet oluja, površinsko otjecanje i povećati vjerojatnost poplave; Fowler i sur., 2021b).

## 6.3 Sistematizacija saznanja o utjecajima klimatskih promjena na podizanje razine mora

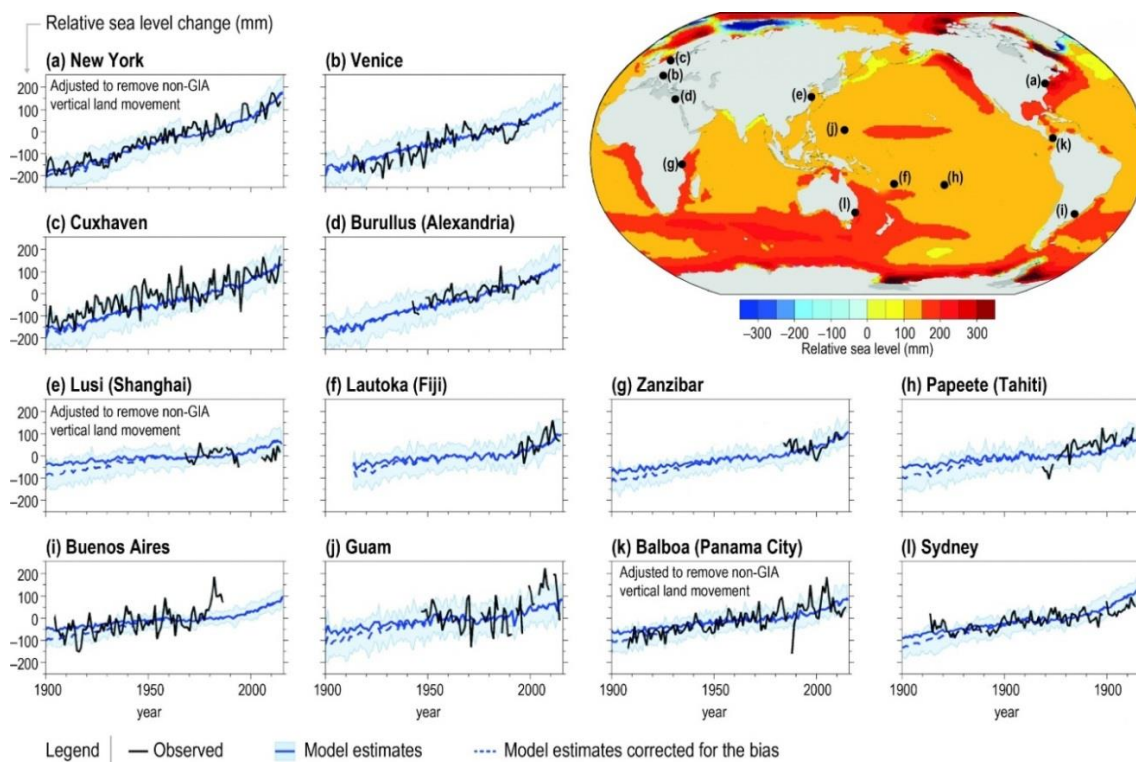
Za procjenu utjecaja klimatskih promjena na ekstremno visoke razine mora duž jadranske obale moguće je koristiti rezultate numeričkih klimatoloških oceanografskih modela za područje Jadranskog mora koji daju procjenu porasta visine mora. Odabrani relevantan srednji modelirani porast razine mora (srednja vrijednost porasta razine mora u promatranom razdoblju) nadodaje se na prethodno izračunate raspodjele ekstremnih razina mora, te se time dobivaju očekivane ekstremne razine mora u budućem razdoblju, uz uvažene klimatske promjene. Tijekom posljednjih 120 godina bilježi se kontinuiran rast razine mora na globalnoj razini, uz ubrzavanje rasta tijekom posljednjih nekoliko desetljeća. Oppenheimer i sur. (2019.) navode da je srednji porast razine mora tijekom 1901-1990. godine iznosi 1.4 mm/godina, tijekom 1970-2015. je iznosio 2.1 mm/godina, tijekom 1993-2015. je iznosio 3.2 mm/godina, a tijekom 2006-2015. čak 3.6 mm/godina. Procjena porasta bazirana je na mareografskim i satelitskim (od 1993) mjerenjima. Dominantan uzrok porasta razine mora trenutno je topljenje ledenjaka i ledenih pokrova (grenlandski i antarktički ledeni pokrov), a nešto manje širenje volumena uslijed zagrijavanja oceana. Očekivani daljnji porast razine mora uvelike će ovisiti o emisiji stakleničkih plinova odnosno o njihovoj budućoj koncentraciji u atmosferi (eng. *representative concentration pathway*). Tradicionalno se prognozira porast razine mora (i druge klimatske promjene) za četiri scenarija buduće koncentracije stakleničkih plinova: RCP2.6 (smanjenje emisije stakleničkih plinova, počevši od 2020. do 2100. – s dolaskom na nulu 2100. godine), RCP4.5 (smanjenje emisije stakleničkih plinova počevši od 2040), RCP6.0 (smanjenje emisije stakleničkih plinova počevši od 2080) i RCP8.5 (povećanje emisije stakleničkih plinova) (Slika 6.3.1).

Na Slici 6.3.2 prikazan je zabilježeni i modelirani porast razine mora diljem svjetskih oceana i mora za razdoblja od 1900 do 2015. godine (Oppenheimer i sur., 2019.). Na Slici 6.3.3 prikazana je prognozirana relativna promjena razine mora za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5, kao i pripadni intervali pouzdanosti. Na Slici 6.3.3 prikazana je regionalna razdioba relativne promjene razine mora za dva perioda: 2046.-2065., i 2081.-2100., i za tri emisijska scenarija: RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 (Oppenheimer i sur., 2019.). Evidentno je da se na području Jadrana očekuje srednji porast razine mora u iznosu od 20 do 80 cm do kraja 21. stoljeća. Uslijed očekivanog porasta razine mora, ekstremno visoke razine mora će postati puno učestalije. Očekuje se da će se ekstremne razine mora s povratnim periodom od 100 godina do kraja 21. stoljeća povećati za 50-90 cm, te da će se epizode

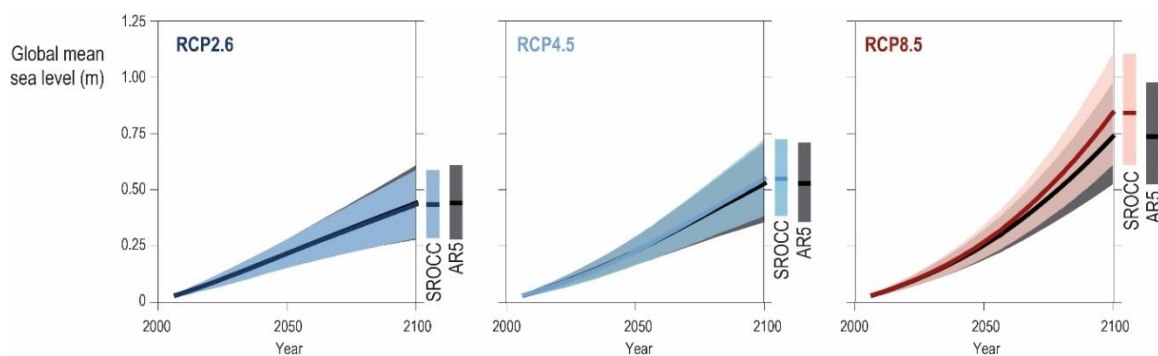
ekstremnih razina mora koje trenutno imaju povratni period od 100 godine, do 2100. godine, imati povratni period od svega 3 godine (Vousdoukas i sur., 2017.). Prema Strategiji prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu procjene rasta srednje razine mora na hrvatskoj obali kreću se u rasponu od 0,32 do 0,65 m do 2100. godine.



Slika 6.3.1. Koncentracija CO<sub>2</sub> u atmosferi u ovisnosti o scenariju emisije stakleničkih plinova (IPCC, 2014.)



Slika 6.3.2. Vremenski nizovi izmjereno i modelirano porasta razine mora na niz mareografskih postaja (uključena i Venecija); te modelirana globalna distribucija relativne promjene razine mora, sve za razdoblje 1900-2015. (Oppenheimer i sur., 2019)



Slika 6.3.3. Globalni porast razine mora (srednjak i intervali pouzdanosti) za tri klimatska scenarija. (Oppenheimer i sur., 2019)

## 7 Analiza složenih poplava u slivu Vruljica u Zadru

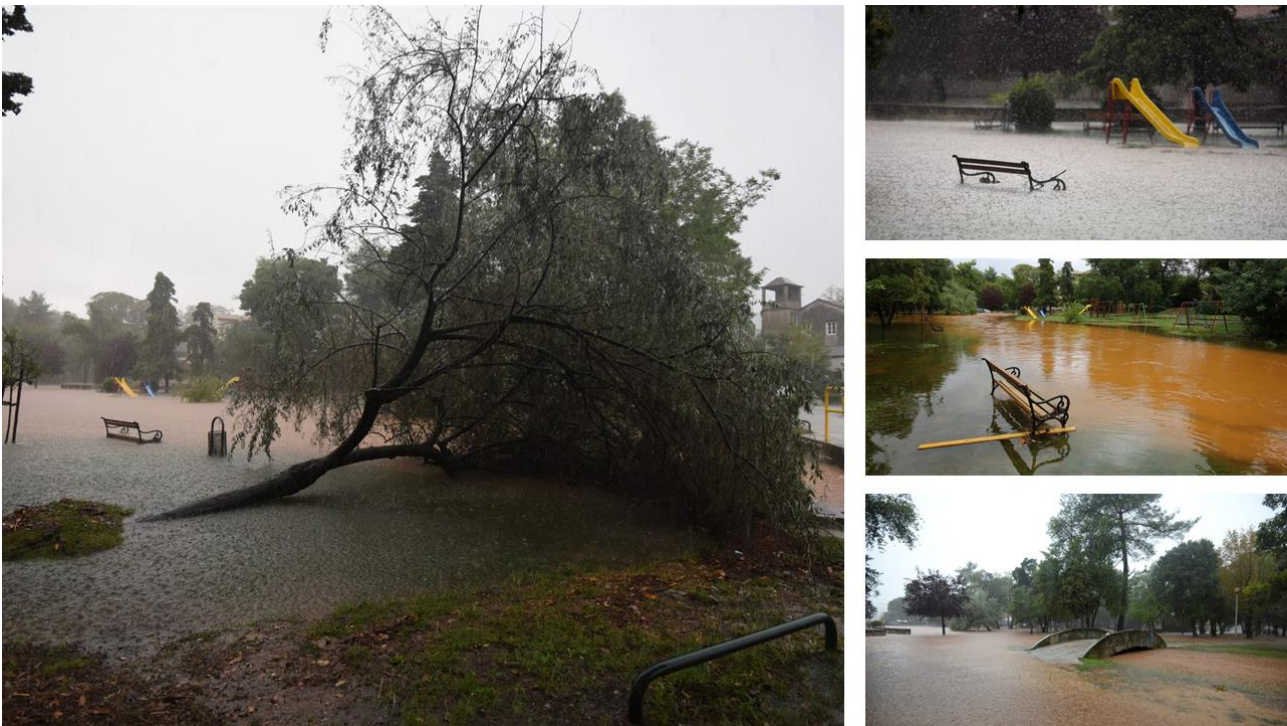
### 7.1 Metodologija analize složenih poplava u slivu Vruljica

Analiza složenih poplava uslijed kombiniranog djelovanja visokih razina mora i jakih oborina provodi se u slivu Vruljica u Zadru. U priobalnom dijelu sliva Vruljica nalazi se park Vruljica gdje su povijesno zabilježene značajne poplave od supojave visokih razina mora i jakih oborina. Iz tog je razloga ovo područje izdvojeno kao predmet navedenih analiza. Na Slici 7.1.1 prikazane su granice sliva Vruljica te šire područje parka Vruljica (označno kao zona A) u kojemu se analiziraju složene poplave. Na Slici 7.1.2 prikazano je nekoliko fotografija parka Vruljica tijekom i nakon poplava.



Slika 7.1.1. Granice sliva Vruljica te šire područje parka Vruljica (označno kao zona A)





Slika 7.1.2. Fotografije parka Vruljica tijekom i nakon poplave 2017. godine (preuzeto iz online izvora).

Park Vruljica veličine je 5 ha, a kroz njega prolazi kanal koji prikuplja sve površinske vode sa pripadajućeg sliva. Kanal je trapeznog oblika i obložen je prirodnim kamenom. Točne dimenzije poprečnog presjeka kanala nisu poznate, ali okvirno se radi o širini dna kanala od oko 1 m u uzvodnom dijelu parka do 2 m u nizvodnom dijelu parka, s nagibom bočnih stranica kanala 1:2. U parku je prisutno više manjih povremenih izvora, a najveći izvor se nalazi u središnjem dijelu parka ispod ugostiteljskog objekta. Ovaj izvor preljeva se putem kratkog pritoka direktno u glavni kanal. Na najnižvodnijem dijelu parka nalazi se cestovni propust kroz koji se površinske vode ispuštaju u more u marini Zadar. Na ovaj način omogućena je kontinuirana komunikacija s morem što znači da je šire područje parka Vruljica podjednako izloženo djelovanju mora i dotoka površinskih voda s uzvodnog dijela sliva.

U okviru projekta STREAM u parku Vruljica instalirana su tri mjerna uređaja – radarske hidrološke postaje koje kontinuirano mjere dubinu i brzinu vode – te jedan mjerni uređaj u marini Zadar (Slika 7.1.3). Nažalost tijekom trajanja predmetne studije nisu zabilježeni ekstremni poplavni događaji, niti oborinski niti oceanografski, pa nije provedena direktna kalibracija modela, ali će instalirani uređaji omogućiti buduće analize i bolje razumijevanje poplavnih događaja na ovoj lokaciji.

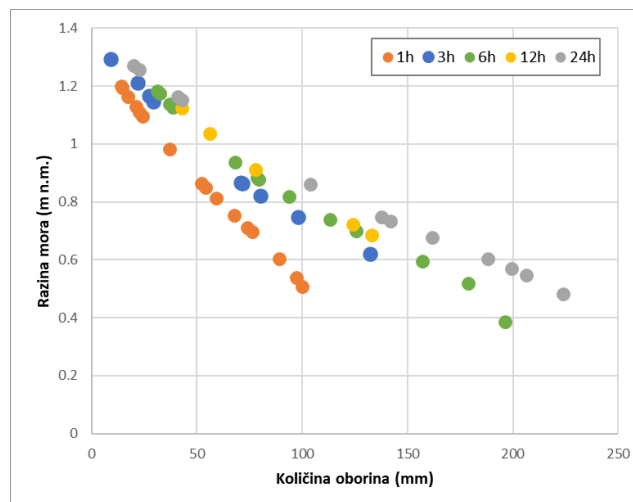


Slika 7.1.3. Park Vruljica s izdvojenim lokacijama hidrauličkih građevina i instaliranih mjernih uređaja.

Analiza složenih poplava provedena je u tri koraka, odnosno kroz tri zasebne analize:

- Prvo je izrađen **model dinamike mora** kako bi se za različite kombinacije razina mora i brzine vjetra proračunale deformacije morskih valova te odredila lokalna razina mora neposredno ispred parka Vruljica.
- Potom je izrađen **hidrološki model sliva Vruljica** kako bi se za svaku razmatranu oborinu definirao hidrogram površinskih voda koje dotječu u park Vruljica.
- Na temelju prethodne dvije analize izrađen je **2D hidraulički model parka Vruljica** putem kojeg je simulirano istodobno djelovanje mora (s jugozapada) te dotoka površinskih voda s uzvodnog dijela sliva (sa sjeveroistoka).

Scenariji složenih poplava su definirani za malu vjerojatnost pojavljivanja (100-godišnje povratno razdoblje) te za različite kombinacije visokih razina mora i jakih oborina koje su dobivene uzrokovanjem bivarijantne zajedničke vjerojatnosti (prikazano u poglavlju 5.1). Na Slici 7.1.4 prikazani su parovi visokih razina mora i jakih oborina različitog trajanja za koje su provedene predmetne simulacije. Treba napomenuti da razine mora prikazane u poglavlju 5.1. odgovaraju rezidualima ekstremnih razina mora (atmosferski doprinos), stoga je vrijednostima iz poglavlja 5.1. pridodana deterministička komponenta plimnog signala koja iznosi 30 cm. Također je razmatrana i promjena srednje razine mora uslijed klimatskih promjena, stoga je za scenarij „uz klimatske promjene“ usvojen porast srednje razine mora od 60 cm, što je najvjerojatniji scenarij prema posljednjem IPCC izvješću, kao i prema Strategiji prilagodbe klimatskim promjenama.



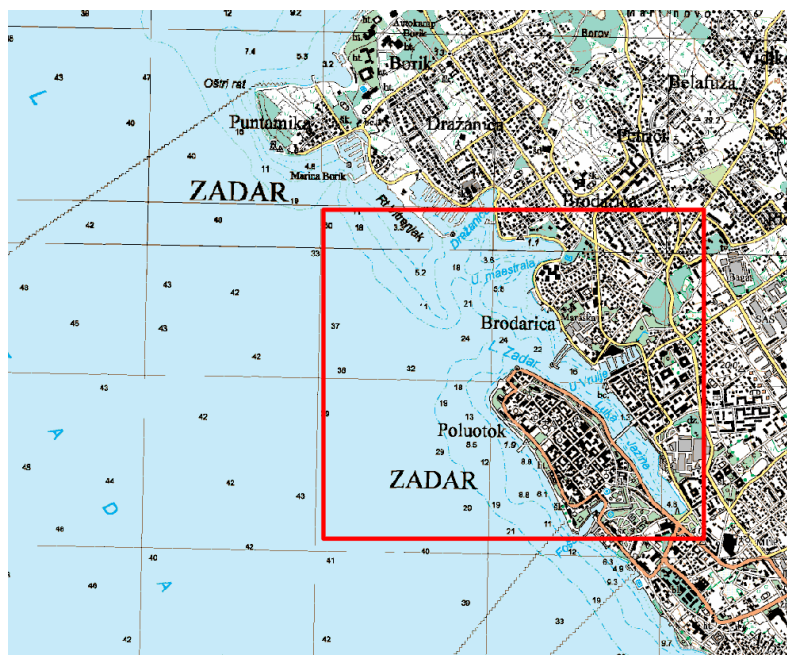
Slika 7.1.4. Kombinacije istodobnog djelovanja jakih oborina i visokih razina mora na području Zadra za povratno razdoblje 100 godina i različita trajanja oborina.

## 7.2 Uspostava modela složenih poplava u slivu Vruljica

### 7.2.1 Model dinamike mora ispred uvala Vruljica

Numerička analiza valnih deformacija u luci Zadar i uvali marine Zadar ispred Vruljice provedena je za vjetrovne valove iz SE i SW smjera povratnog perioda 25 i 100 godina, za sadašnje i buduće razine mora. Za provedbu analize valovanja korišten je programski paket Simulating Waves Nearshore (SWAN) Cycle III. SWAN je numerički model treće generacije koji se temelji na Eulerovoj formulaciji ravnotežne jednadžbe spektralnog djelovanja valova. Model omogućuje proračun propagacije valova u priobalnim područjima te uključuje većinu relevantnih fizikalnih procesa, kao što su: generiranje vjetrovnih valova, propagacija valova u vremenskoj i prostornoj domeni, oplićavanje valova, refrakciju valova uzrokovanu morskim strujama i dubinom, lom valova uslijed promjene dubine, trenje s dnom, te transmisiju i refleksiju valova, te difrakciju valova u plitkom području.

Digitalni model terena podmorja (batimetrija) izrađena je na temelju digitalnog modela visina izrađenog u okviru predmetne studije (vidi poglavlje 4). Numeričke simulacije provedene su za domenu šireg akvatorija luke Zadar. Veličina prostorne domene je 2200 x 1900 m, prostorni korak  $\Delta x = 5 \text{ m}$  i  $\Delta y = 5 \text{ m}$  (Slika 7.2.1).



Slika 7.2.1. Prostorna domena numeričkih simulacija šireg akvatorija luke Zadar

Numeričke simulacije valovanja u luci Zadar provedene su s pretpostavljenim parametrima refleksije valova obale koji su prikazani na Slici 7.2.2. Vertikalni dijelovi obale simulirani su s koeficijentom refleksije 0,90, dok su sektori obale s kamenom oblogom simulirani s koeficijentom refleksije 0,50. Gat marine Zadar na ulasku u uvalu Vruja simuliran je s koeficijentom refleksije 0,50 i koeficijentom transmisije valova 0,50 (Slika 7.2.2, žuta boja). Utjecaj ostalih gatova u uvali marine Zadar nije simuliran zbog značajne transmisije valova ispod njihove konstrukcije. Lukobran na ulazu u luku Zadar izgrađen je od oštrobridnog lomljenog kamena, te je simuliran koeficijentom refleksije valova 0,50.



Slika 7.2.2. Koeficijenti refleksije i transmisije valova numeričkih simulacija

Numeričke simulacije valovanja u luci Zadar provedene su za vjetrovne valove iz SE (jugo) i SW (garbin) smjera, pošto se radi o najnepovoljnijim smjerovima valovanja za luku Zadar i uvalu marine Zadar. Numeričke simulacije su provedene za uniformno polje vjetra povratnog perioda 25 i 100 godina (Poglavlje 4.1.1). Parametri valova rubnih uvjetima modela numeričkih simulacija preuzeti su iz rezultata modela šireg akvatorija (Poglavlje 4.3).

Tablica 7.2.1. Parametri polja vjetra i valova rubnih uvjeta numeričkih simulacija valova

Smjer	PP	Vjetar		Val	
		w (m/s)	DIR ( °)	H <sub>s</sub> (m)	DIR ( °)
SW	25	16,0	225	0,96	225
SW	100	17,0	225	1,11	225
SE	25	18,4	135	1,60	135
SE	100	19,4	135	1,90	135

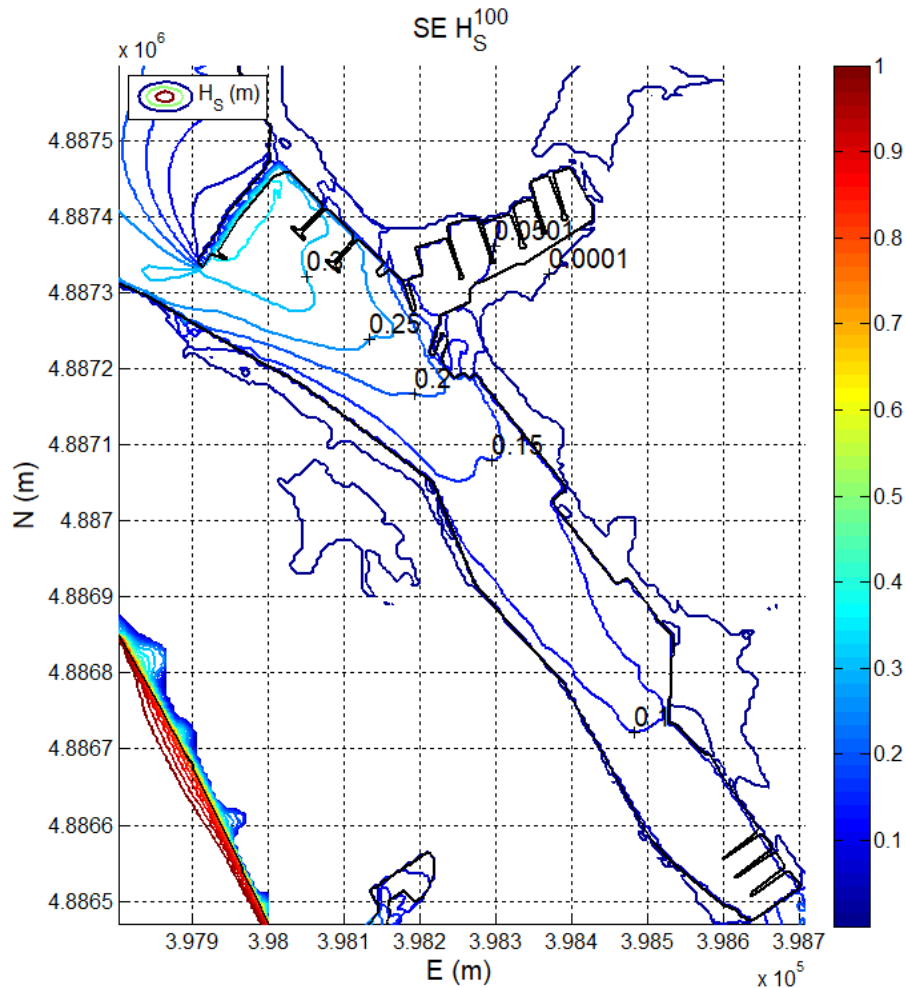
Numeričke simulacije valovanja provedene za morske razine bez utjecaja predviđenih klimatskih promjene (BKP) i sa utjecajem klimatskih promjena (KP) za 25 i 100 godišnji povratni period (Tablica 7.2.1). Mjerodavne vrijednosti morske razine preuzete su iz Poglavlja 4.1.5, a prikazane su u Tablici 7.2.2.

Tablica 7.2.2. Morske razine numeričkih simulacija valova bez utjecaja predviđenih klimatskih promjene (BKP) i sa utjecajem klimatskih promjena (KP)

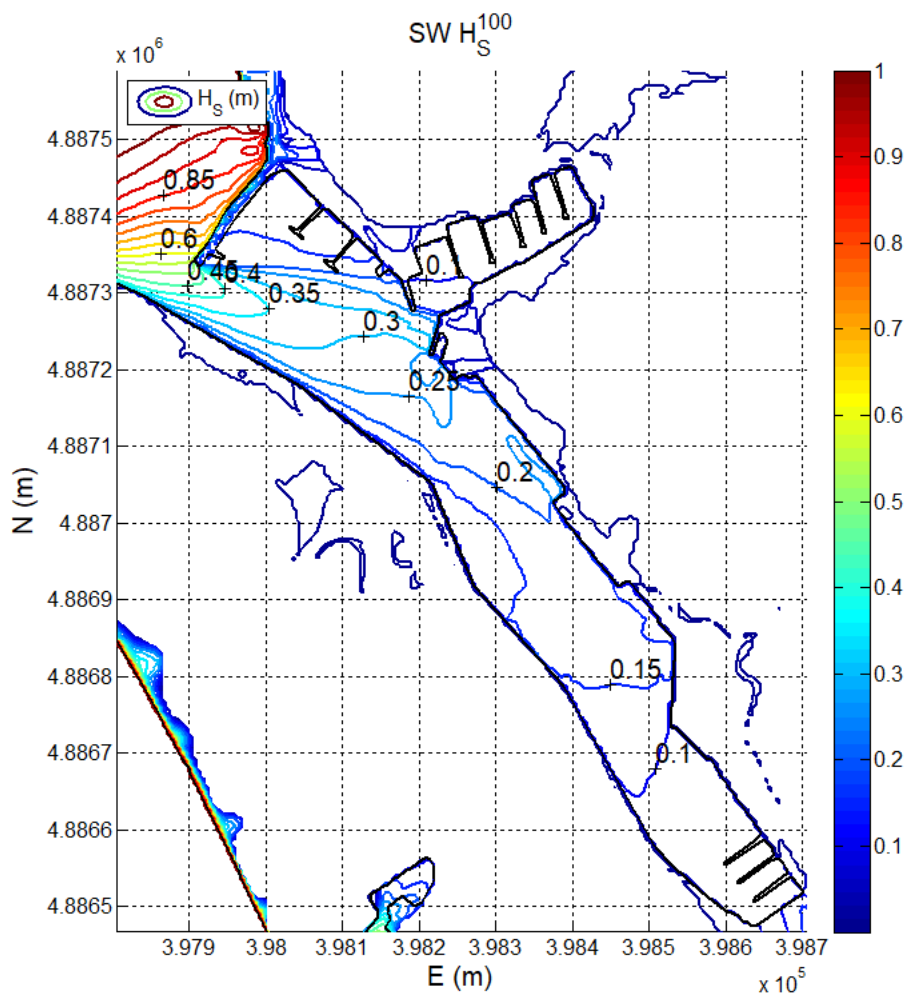
Morske razine		
PP	Scenarij	(m n.m.)
25	BKP	+1,13
100	BKP	+1,23
25	KP	+1,73
100	KP	+1,83

Numeričke simulacije valovanja luke Zadar provedene su za kombinacije valovanja iz smjera SE i SW, 25 i 100 godišnjeg povratnog perioda, sa mjerodavnim razinama mora sa i bez predviđenih klimatskih promjena 25 i 100 godišnjeg povratnog perioda. Provedeno je 16 numeričkih simulacija različitih varijacija vjetrovnih valova i razina mora.

Na Slikama 7.2.3 i 7.2.4 prikazani su rezultati numeričkih simulacija značajnih valnih visina 100 godišnjeg povratnog perioda iz smjera SW i SE za morske razine u slučaju predviđenih klimatskih promjena 100 godišnjeg povratnog perioda.



Slika 7.2.3. Značajne valne visine, SE smjer 100-god. povratni period, morska razina +1,83 m nm.

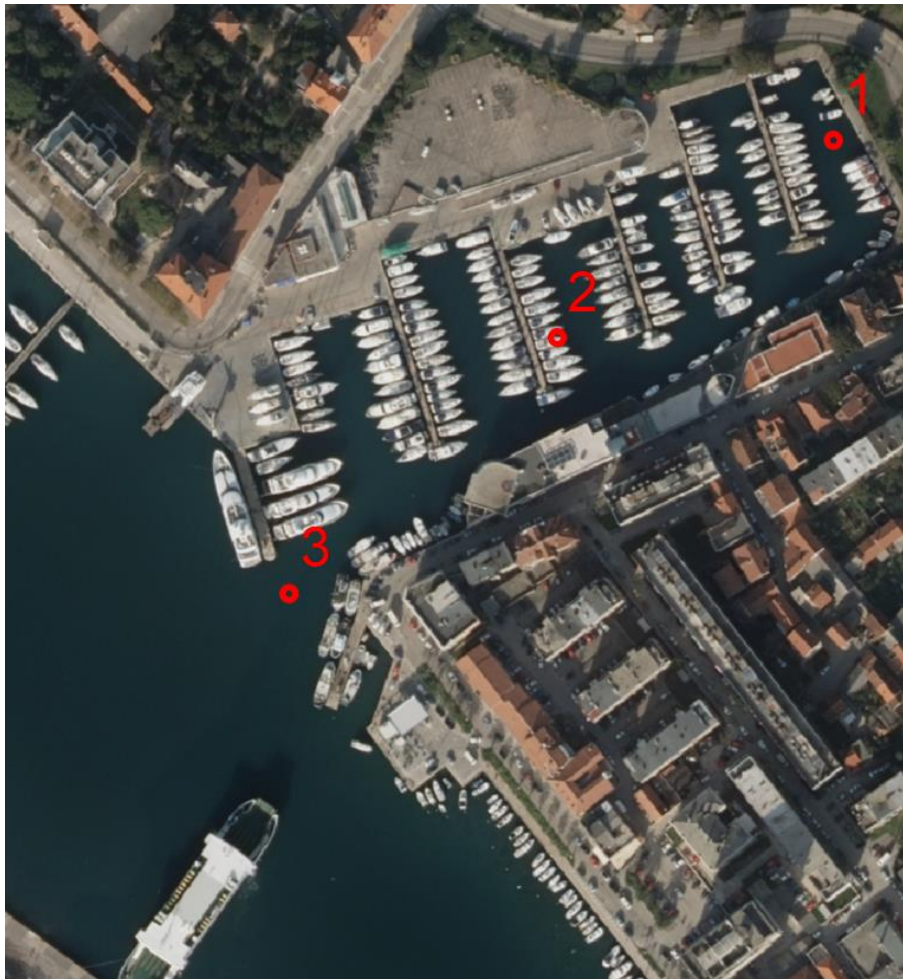


Slika 7.2.4. Značajne valne visine, SW smjer 100-god. povratni period, morska razina +1,83 m nm.

Akvatorij luke Zadar dobro je zaštićen od djelovanja valova za sadašnje i buduće stanje, što je potvrđeno rezultatima numeričkih deformacija valova ekstremnih događaja za predviđene ekstremne morske razine. Uvala marine Zadar dodatno je zaštićena od djelovanja valova, te su u njezinom akvatoriju visine valova manje od 10 cm, također ne očekuju se povećanja razine mora u dnu marine Zadar u odnosu na razine mora u kanalu Zadar.



Rezultati numeričkih simulacija valovanja prikazani su za 3 točke u uvali marine Zadar (Slika 7.2.5) u Tablici 7.2.3. Značajne visine valova u dnu uvale Vruja (točka 1) su manje od 10 cm za sve provedene kombinacije numeričkih simulacija valovanja. Na ulazu u uvalu Vruja (točka 3) značajne visine valne visine su manje od 30 cm.



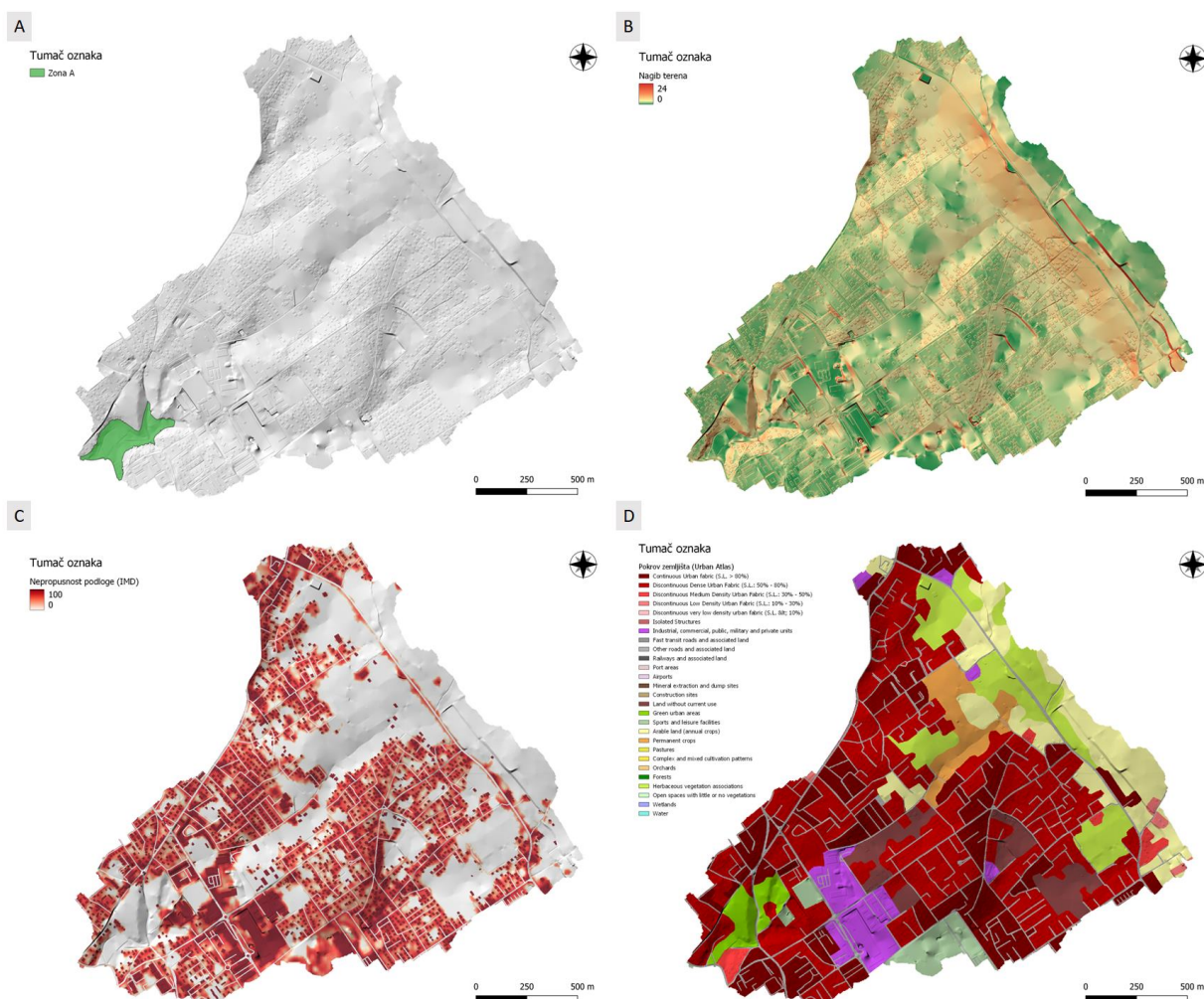
Slika 7.2.5. Točke prikaza rezultata numeričkih simulacija u uvali marine Zadar.

Tablica 7.2.3. Ulazni parametri i rezultati numeričkih simulacija valovanja

Vjetrovni valovi						Morska razina			Analizirane točke					
Smj.	PP	Vjetar		Val		MR			1		2		3	
		w (m/s)	DIR (°)	H <sub>s</sub> (m)	DIR (°)	PP		(m nm)	H <sub>s</sub> (m)	d (m)	H <sub>s</sub> (m)	d (m)	H <sub>s</sub> (m)	d (m)
SW	25	16,0	225	0,96	225	100	BKP	1,23	0,05	5,39	0,06	7,34	0,24	8,21
SW	100	17,0	225	1,11	225	100	BKP	1,23	0,08	5,39	0,09	7,34	0,28	8,21
SW	25	16,0	225	0,96	225	25	BKP	1,13	0,06	5,28	0,07	7,24	0,24	8,11
SW	100	17,0	225	1,11	225	25	BKP	1,13	0,08	5,29	0,09	7,24	0,28	8,11
SW	25	16,0	225	0,96	225	100	KP	1,83	0,06	5,99	0,06	7,94	0,24	8,81
SW	100	17,0	225	1,11	225	100	KP	1,83	0,07	5,99	0,08	7,94	0,28	8,81
SW	25	16,0	225	0,96	225	25	KP	1,73	0,06	5,89	0,07	7,84	0,24	8,71
SW	100	17,0	225	1,11	225	25	KP	1,73	0,08	5,89	0,08	7,84	0,28	8,71
SE	25	18,4	135	1,60	135	100	BKP	1,23	0,03	5,38	0,04	7,34	0,13	8,21
SE	100	19,4	135	1,90	135	100	BKP	1,23	0,03	5,38	0,05	7,34	0,16	8,21
SE	25	18,4	135	1,60	135	25	BKP	1,13	0,03	5,28	0,04	7,24	0,13	8,11
SE	100	19,4	135	1,90	135	25	BKP	1,13	0,03	5,28	0,05	7,24	0,16	8,11
SE	25	18,4	135	1,60	135	100	KP	1,83	0,03	5,98	0,04	7,94	0,14	8,81
SE	100	19,4	135	1,90	135	100	KP	1,83	0,03	5,98	0,05	7,94	0,17	8,81
SE	25	18,4	135	1,60	135	25	KP	1,73	0,03	5,88	0,04	7,84	0,14	8,71
SE	100	19,4	135	1,90	135	25	KP	1,73	0,03	5,88	0,05	7,84	0,17	8,81

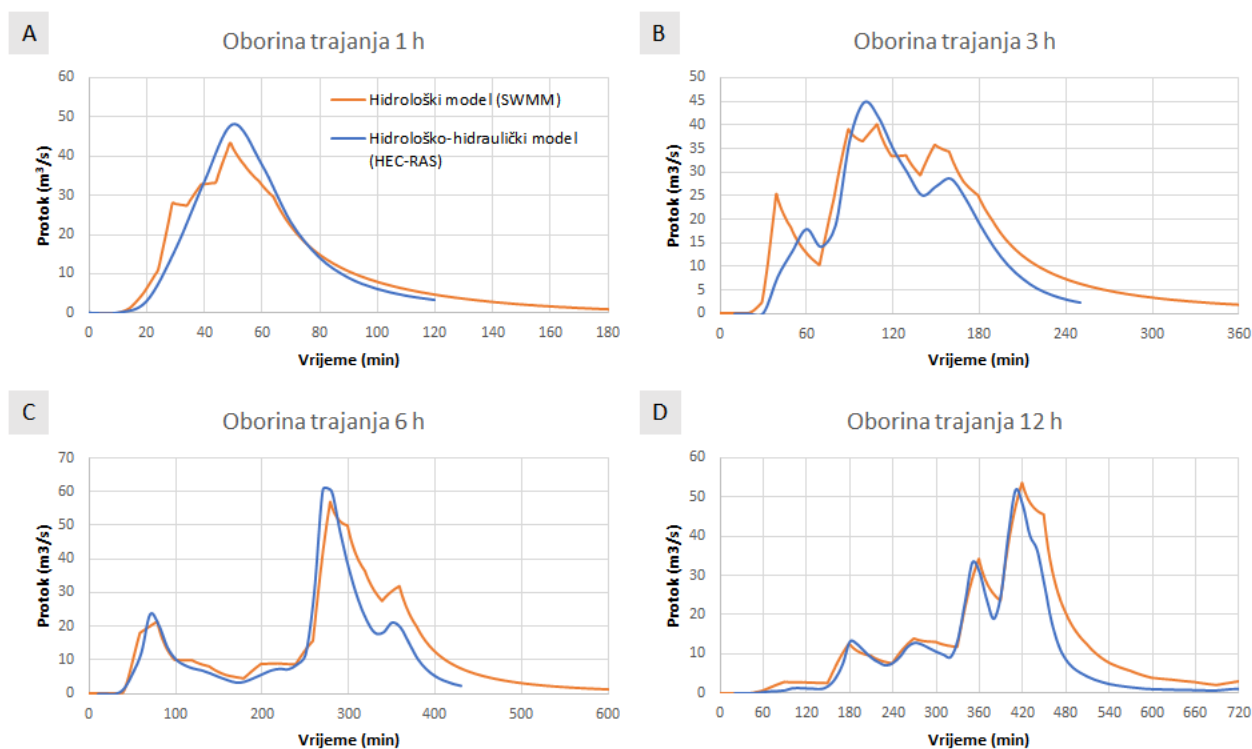
## 7.2.2 Hidrološki model sliva Vruljica

Hidrološki model sliva Vruljice izrađen je u SWMM računalnom programu. GIS analizom je određena površina sliva, nagib sliva, udio nepropusnih površina te hrapavost i prosječni CN broj koji su određeni iz karte pokrova zemljišta prema metodologiji opisanoj u Poglavlju 3.2. Digitalni model terena te raspodjela navedenih parametara po slivu prikazana je na Slici 7.2.6.



Slika 7.2.6. Sliv Vruljice: a) digitalni model terena, b) nagibi terena, c) gustoća nepropusnih površina, d) karta pokrova zemljišta (Urban Atlas).

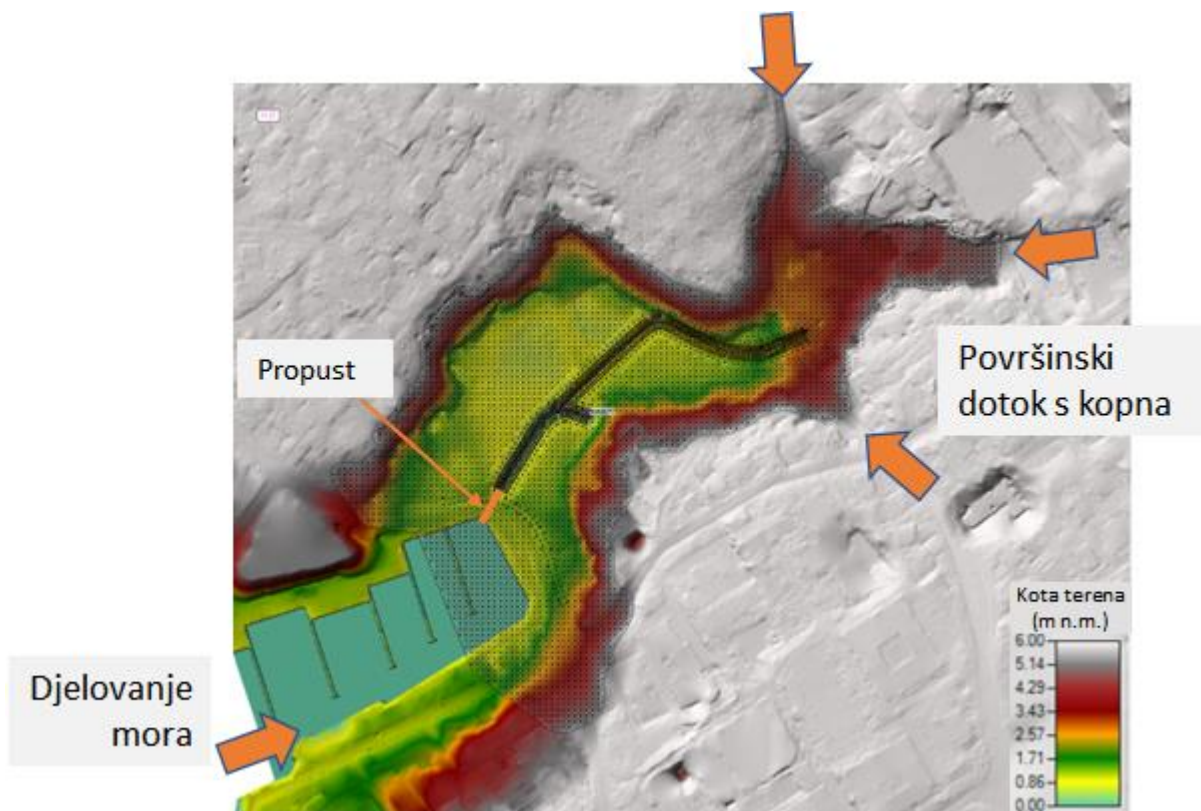
Hidrološki model u SWMM programu izrađen je kao sveden model (eng. *Lumped*), a parametri dobiveni GIS analizom (prvenstveno hrapavost i nagib terena) su kalibrirani usporedbom s protocima dobivenim iz 2D hidrološko-hidrauličkog modela izrađenog u okviru analize opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica (Poglavlje 5). Sliv je površine 3,1 km<sup>2</sup>, prosječnog nagiba 6,3 %, s 40,7 % nepropusnih površina. Na Slici 7.2.7 prikazana je usporedba protoka dobivenih nakon kalibracije hidrološkog modela i 2D hidrološko-hidrauličkog modela za oborine različitog trajanja i povratnog razdoblja 100 godina. Iz danih prikaza se može zaključiti kako je hidrološki model dovoljno precizan za predmetne analize (vrlo slične vrijednosti vršnih protoka i ukupnih volumena), odnosno za generiranje hidrograma otjecanja sa sliva Vruljica za različite oborine prikazane na Slici 7.1.4. Hidrogrami generirani hidrološkim modelom koristit će se kao ulazni podaci (rubni uvjet) u hidraulički model složenih poplava u parku Vruljica.



Slika 7.2.7. Usporedba rezultata otjecanja oborinskih voda sa sliva Vruljica kalibriranim hidrološkim modelom izrađenim u SWMM računalnom programu te 2D hidrološko-hidrauličkim modelom izrađenim u HEC-RAS računalnom programu.

### 7.2.3 Hidraulički model parka Vruljica

Dvodimenzionalni hidraulički model izrađen je u HEC-RAS 6.2. računalnom programu (Brunner, 2021.). Glavni detalji vezani uz uspostavu modela opisani su prethodno u Poglavlju 3.2.3. Prostorna domena obuhvaća šire područje parka Vruljice, odnosno dio sliva Vruljice s nadmorskim visinama ispod kote +5,0 m n. m. Proračunska mreža definirana je unutar domene modela, korištena je strukturirana pravokutna mreža širine 4,0 m, koja je modificirana uzduž osi kanala s širinom od 2,0 m (Slika 7.2.8). Komunikacija između kanala i mora definirana je odgovarajućim hidrauličkim elementom (propustom). Osnovne prostorne podloge, uključujući kartu CN brojeva, kartu nepropusnosti podloge i kartu hrapavosti direktno su implementirani u matematički model HEC-RAS na temelju prostornih podloga prikazanih u Poglavlju 3.2.1. Za razliku od modela na mezo razini, u ovom slučaju korišten je digitalni model terena visoke rezolucije (0,5 m) dobiven geodetskom izmjerom terena, odnosno primjenom LiDAR tehnologije.



Slika 7.2.8. Model terena i proračunska mreža model parka Vruljica u HEC-RAS računalom programu.

U okviru modela definirana su dva rubna uvjeta na granicama domene (linijski rubni uvjeti):

- Na sjeveroistočnoj (kopненоj) granici domene zadan je hidrogram dobiven iz hidrološkog modela (prikazano uz prethodnom potpoglavlju).
- Na jugozapadnoj (morskoj) granici domene zadana je visoka razina mora (vidi sliku 7.1.4).

U svrhu numeričke analize toka vode korišten je nestacionarni 2D proračun te sustav jednadžbi opisan metodom dinamičkog vala (eng. *Shallow Water Equations*) uz vremenski promjenjiv vremenski korak. Za implicitni proračun korišten je parametar  $\theta = 1,0$ , a za rješavanje matrica korišten je PARDISO algoritam (Brunner, 2021). Vremenski korak dinamički se računa s obzirom na CFL broj u rasponu od 0,8 do 2,0. Ukupno je provedeno 56 računalnih simulacije za različite kombinacije razina mora i jakih oborina (različitog trajanja).

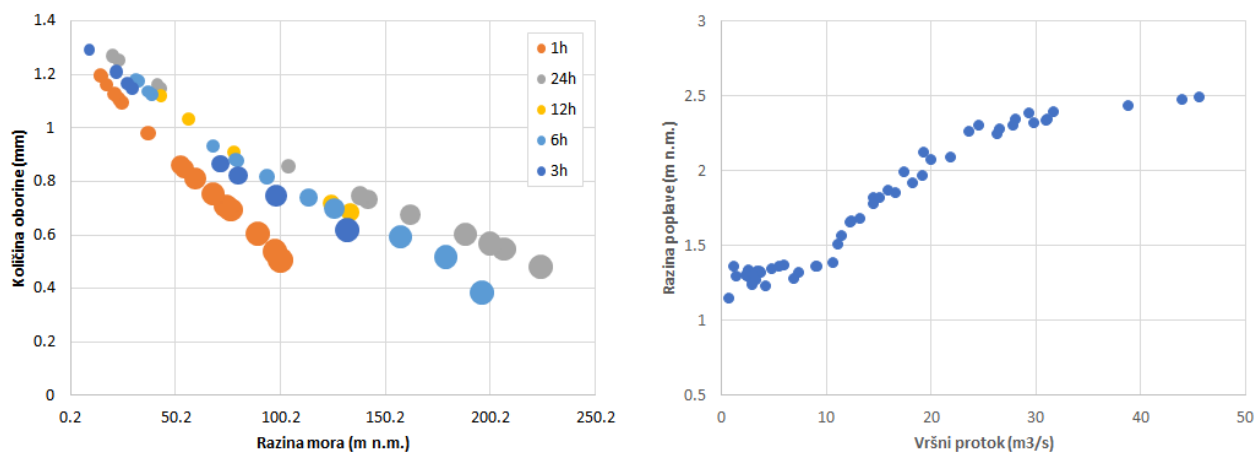
### 7.3 Rezultati analize složenih poplava u slivu Vruljica

Ukupno je provedeno 56 simulacija za scenarij „sadašnja klima“ i 56 simulacija za scenarij „uz klimatske promjene“. Svaka simulacija definirana je različitom kombinacijom visoke razine mora i jake oborine, odnosno hidrograma otjecanja površinskih voda. Maksimalne razine plavljenja parka Vruljica za svaku kombinaciju razine mora i količine oborine (dotoka površinskih voda) prikazane su na Slici 7.3.1 za scenarij „sadašnja klima“ te na Slici 7.3.2 za scenarij „uz klimatske promjene“. U prvom scenariju maksimalno plavljenje do kote +2,49 m n.m. javlja se za razinu mora +0,51 m n.m. i količinu oborine 100 mm trajanja 1 h, dok se u drugom scenariju maksimalno plavljenje do kote +2,52 m n.m. javlja za razinu mora +1,11 m n.m. i količinu oborine 100 mm trajanja 1 h. Na Slici 7.3.3 prikazan je prostorni obuhvat maksimalnih dubina plavljenja za scenarij „sadašnja klima“.

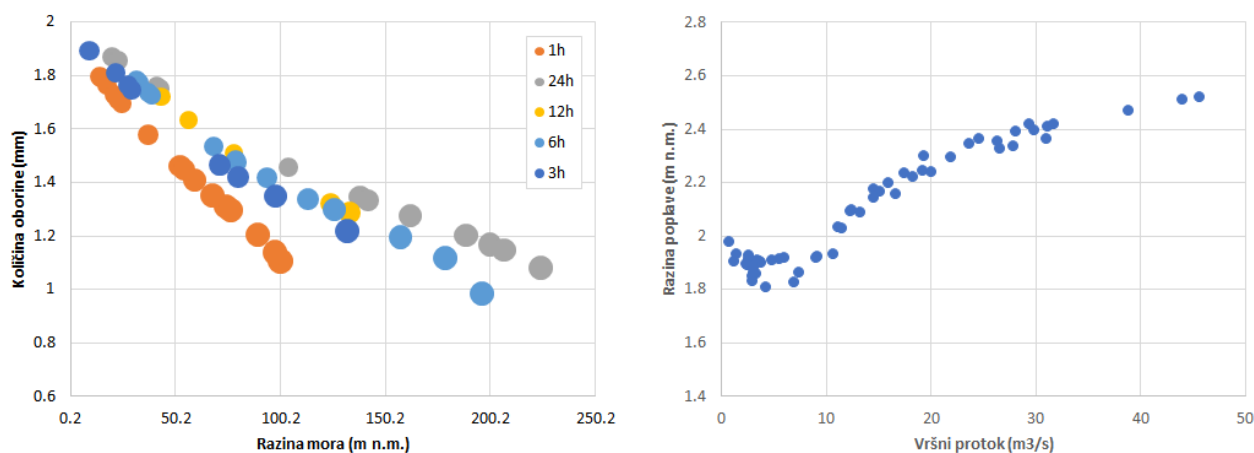
U oba scenarija je primjetno da se maksimalne dubine plavljenja javljaju za maksimalnu vrijednost vršnog dotoka s uzvodnog dijela sliva ( $48 \text{ m}^3/\text{s}$ ), što se može pripisati nedovoljnom protočnom kapacitetu cestovnog propusta za ekstremne oborinske događaje. U ovom kontekstu, visoka razina mora nema posebno naglašen nepovoljan utjecaj na plavljenje jer već sam propust predstavlja „prepreku“ slobodnom istjecanju oborinskih voda iz parka Vruljica u more. Pritom treba napomenuti da visoka razina mora svakako može imati nepovoljan utjecaj pri istjecanju površinskih voda rjeđeg povratnog perioda, odnosno redovnih jakih oborina.

U hidrauličkom smislu, park Vruljica funkcionira kao svojevrsna retencija za prihvat i zadržavanje površinskih voda sa pripadajućeg sliva. Kao moguće rješenje plavljenja parka nameće se

rekonstrukcija cestovnog propusta, odnosno povećanje njegovih dimenzija. Međutim u tom slučaju će visoke razine mora i njihov nepovoljan utjecaj doći do jačeg izražaja te je pri planiranju takvih zahvata neophodno provesti detaljna hidraulička istraživanja potencijalnih varijantnih rješenja uzimajući u obzir vjerojatnost supojave visokih razina mora i jakih oborina.



Slika 7.3.1. Maksimalne razine plavljenja parka Vruljica za: a) različite kombinacije visokih razina mora i jakih oborina (veličina točke odgovara razini plavljenja), b) za vršni protok površinskih voda, prema scenariju "sadašnja klima".



Slika 7.3.2. Maksimalne razine plavljenja parka Vruljica za: a) različite kombinacije visokih razina mora i jakih oborina (veličina točke odgovara razini plavljenja), b) za vršni protok površinskih voda, prema scenariju "uz klimatske promjene".



Slika 7.3.3. Maksimalne dubine poplavljenog područja parka Vruljica za malu vjerojatnost pojavljivanja i scenarij „sadašnja klima“.



## 8 Analiza onečišćenja oborinskih voda

### 8.1 Analiza oborinskih voda na području grada Zadra

#### 8.1.1 Uvodno o analizi oborinskih i slivnih voda

Slivne vode su vode nastale na području zahvaćenom padalinama (kiša i snijeg) ili uslijed djelovanja čovjeka. Prirodnim putem, uslijed gravitacije, otjecanje vode odvija se u pravilu u smjeru nižeg terena gdje je to moguće (ako je podloga nepropusna), gotovo vertikalno u slučaju propusne podloge (npr. ravničarski krški dijelovi) ili se stvaraju kratkotrajna umjetna jezera u slučajevima nepropusne ili slabo propusne podloge na ravnom tlu. U konačnici oborinske/slivne vode završavaju u podzemnim spremnicima, rijekama odnosno u moru.

Otjecanje je izuzetno važno jer ne samo da održava rijeke i jezera punima vode, već također mijenja krajolik djelovanjem erozije. Tekuća voda ima ogromnu moć — može pomicati stijene i izrezbariti kanjone; kao što su kanjoni naših većih krških rijeka Zrmanje, Krke i Cetine.

Najveće površinsko otjecanje se naravno događa tijekom oluja, a puno više vode teče i rijekama (i kao otjecanje) tijekom oluja. Otjecanje, naročito u urbanim sredinama, može pokupiti i taložiti štetne zagađivača poput smeća, kemikalija, ulja i metala iz prometa i prljavštine u potoke, jezera i podzemne vode, te na kraju u more. Ceste, parkirališta, gradilišta, nepropisno uskladišten otpad i ilegalna odlagališta potencijalni su izvori zagađivača oborinskih voda. Naročito su onečišćene prve oborinske vode nakon dužeg sušnog razdoblja.

##### 8.1.1.1 Metali u tragovima

Metali su važan čimbenik svakog vodenog okoliša, jer o njima ovisi bioraznolikost vodenog ekosustava. U okolišu su oduvijek prirodno prisutni, a njihova koncentracija regulirana je prirodnim procesima. Osim za održanje života, metali su prisutni i u mnogim drugim procesima unutar nekog vodenog sustava. Koncentracija metala u vodama kontrolirana je atmosferskom precipitacijom i trošenjem stijena i tla, a razvojem ljudske civilizacije njihova koncentracija raste u vodama. Industrija, otpadne vode, kućanski i industrijski otpad i riječni donos doprinose povećanoj koncentraciji metala u moru. Urbani razvoj sve više rezultira povišenim zagađenjima na lokacijama u blizini velikih gradova/tvornica/luka. Zrakom se također prenosi sve više metala koji se ispuštaju u obliku čestica ili para. Mjerenjem koncentracije metala u tragovima pratimo ljudski utjecaj na

lokalnoj i globalnoj prirodnoj skali, jer su koncentracije mnogih porasle zbog pretjerane ljudske eksploatacije prirode i razvoja industrije. Važno je imati na umu da metali nisu biorazgradivi i da jednom uneseni u okoliš zauvijek ostaju njegov dio.

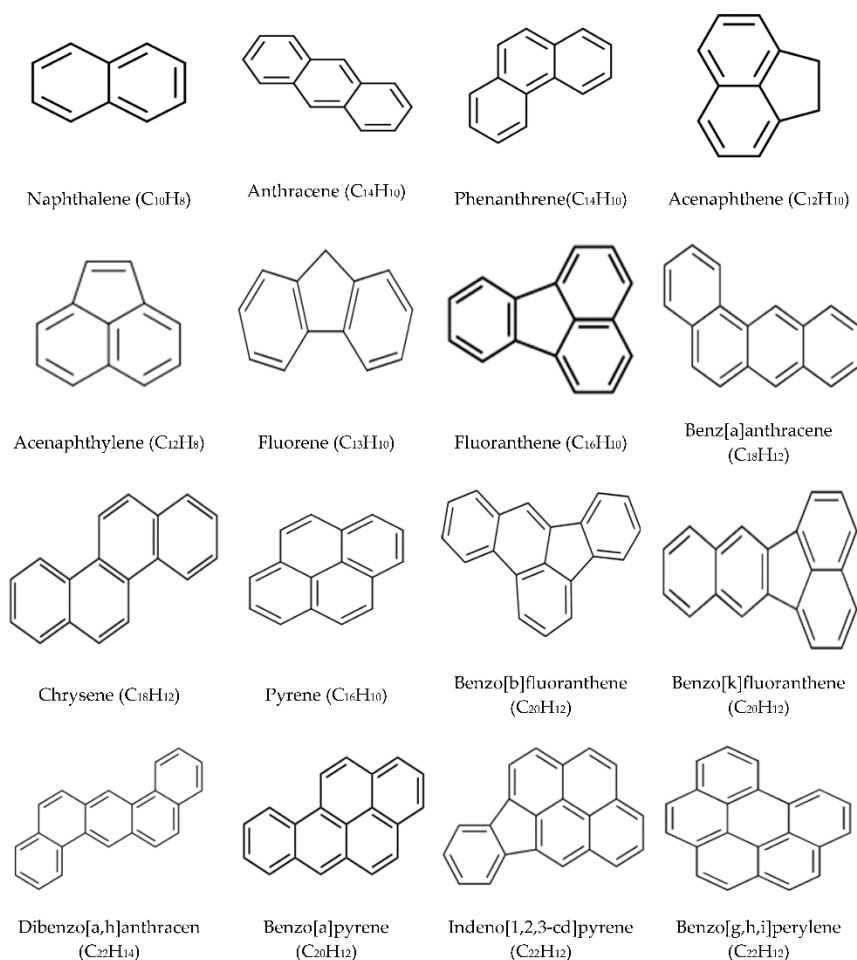
"Ekotoksični metali" su metali koji su u svojoj otopljenoj fazi „otrovni“ za živi svijet. Nekada se više koristio termin „teški metali“, što nije potpuno prikladno, jer su i neki „laki metali“, kao što je recimo Be otrovni, a neki „teški“ kao što je recimo Fe nisu otrovni. Točnije je koristiti izraz „metali u tragovima“ ili „tragovi metala“, jer se nalaze u prirodi u malim koncentracijama ( $< 1 \mu\text{g/L}$ ), važni su za mnoge organizme kao mikronutrijenti, a ako pređu granicu toksičnosti postaju toksični za organizme i tada je prikladniji termin „ekotoksični metali“. Tako npr. kada su Zn i Cu u vodenom sustavu prisutni u tragovima, vrlo su važan faktor u fiziološkom funkcioniranju živih organizama jer reguliraju mnoge biokemijske procese. Međutim, isti metali, ako su prisutni u povećanim koncentracijama mogu imati različite toksične učinke na živa bića unutar vodenog ekosustava, a time posredno i na čovjeka. Neki metali kao što su živa, kadmij i olovo toksični su već kod vrlo niskih koncentracija.

Većina voda sadrži vrlo niske prirodne koncentracije otopljenih metala i svako onečišćenje ugrožava prirodnu ravnotežu vodenog sustava koji uključuje sediment i žive organizme.

#### **8.1.1.2 Polciklički aromatski ugljikovodici - PAU**

Policiklički aromatski ugljikovodici (PAU) ili engleski „*Polycyclic aromatic hydrocarbon*“ (PAH) što je više u svakodnevnoj upotrebi, velika su skupina različitih organskih spojeva koji sadrže dva ili više spojenih aromatskih prstenova u rasponu od naftalena s dva prstena i derivata naftalena do složenih prstenastih struktura koje sadrže do 10 prstenova. PAU-ovi s do šest spojenih aromatskih prstenova često su poznati kao "mali" PAU-ovi, dok se oni koji sadrže više od šest aromatskih prstenova nazivaju "veliki" PAU-ovi. PAU-ovi su također klasificirani u alternativne i nealternativne spojeve. Alternativni PAU-ovi su oni spojevi koji se sastoje isključivo od kondenziranih šesteročlanih benzenskih prstenova, dok nealternativni PAU-ovi sadrže i šesteročlane benzenske i peteročlane ugljikove prstenove. Zajedničke strukturne značajke PAU spojeva ilustrirane su na Slici 8.1.1. Razlike u konfiguraciji prstenova mogu dovesti do razlika u svojstvima. U svom najčišćem obliku, PAU su krute tvari niske hlapljivosti na sobnoj temperaturi i variraju u izgledu od bezbojne do bijele ili blijedo žuto-zelene. Relativno su netopivi u vodi i većina se može fotooksidirati i razgraditi na jednostavnije tvari.

PAU-ovi su jedni od najrasprostranjenijih organskih zagađivala. To su organski spojevi koji nastaju izgaranjem organske tvari tijekom različitih industrijskih procesa i u domaćinstvu, a građeni su od dva ili više aromatskih prstena. Lipofilni su i slabo topljivi u vodi, nestabilni, osjetljivi na svjetlo, a otporni na toplinu i koroziju.



Slika 8.1.1. Strukturne formule prioritarnih PAU-ova

Kao kemijski spoj, PAU je bilo koji spoj građen od ugljika i vodika povezanih u više aromatskih prstenova. Prema tome, spojeva koji su tako građeni može biti beskonačno mnogo. Međutim, samo manji broj pronađen je u prirodi i/ili sintetiziran u laboratoriju, većinom građenih od tri, četiri ili pet prstenova. Iako benzen ima slična kemijska i toksična svojstva kao PAU-ovi, te se može u tom aspektu promatrati kao i PAU-ovi, ne pripada u skupinu PAU spojeva jer ima samo jedan aromatski

prsten. Najjednostavniji složeni aromatski ugljikovodik je naftalen, a građen je od 2 povezana aromatska prstena. Po nekim autorima naftalen također nije PAU spoj, već su to samo oni koji imaju 3 ili više prstenova u strukturi. Fenantren i antracen se sastoje od 3 aromatska prstena pa se smatraju najjednostavnijim PAU-ovima.

### 8.1.1.3 BTEX - Benzen, Toluena, Etilbenzen i ksilen

Mnogi projekti praćenja zahtijevaju praćenje hlapivih organskih spojeva (HOS), (eng. „*Volatile Organic Compounds*“, VOC). VOCs je zajednički naziv za organske spojeve koji imaju visok tlak pare i postaju plinovi pri sobnom tlaku i temperaturama.

HOS-evi se obično nadziru jer su ključni uzročnici fotokemijskog smoga. Mnogi su opasni za ljudsko zdravlje, a neki su klasificirani kao kancerogeni. Ključni izvori HOS-eva su industrijski procesi (posebno oni koji uključuju otapala), emisije vozila, gubici isparavanjem iz skladišta benzina, pa čak i prirodni izvori poput šumskih požara.

Stručnjaci se često odlučuju za mjerenje grupe HOS-eva, zajednički poznatih kao BTEX, koja se sastoji od benzena, toluena, etilbenzena i ksilena (često se izražavaju kao ukupni ksileni (m+p)). BTEX skup je postao popularan jer ih je jednostavno pratiti zajedno, te daju dobro zaokruženu sliku HOS-eva i prisutni su u većini urbanih područja.

**Benzen** - Benzen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) je bistra, bezbojna i zapaljiva tekućina slatkastog mirisa na benzin. Benzen se nalazi u okolnom zraku kao rezultat izgaranja goriva, kao što su ugljen, benzin i drvo. Benzen je uobičajen u bezolovnom gorivu, gdje se dodaje kao zamjena za olovo, omogućujući mirniji rad.

Koncentracije benzena u gorivu nekoć su bile čak 20%, ali su sada smanjene na <1% u mnogim zemljama, zbog štetnih utjecaja na zdravlje. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) i Međunarodna agencija za istraživanje raka (IARC) klasificiraju benzen kao kancerogene skupine jedan. Dugotrajno izlaganje visokim koncentracijama benzena uzrokuje leukemiju i utječe na crvena i bijela krvna zrnca.

Manje ozbiljni učinci na zdravlje mogu se pojaviti pri nižim koncentracijama, uzrokujući glavobolje, mučninu, pospanost, pa čak i nesvjesticu. WHO nije postavio standard za koncentracije benzena u okolini, navodeći da ne postoji sigurna razina izloženosti. Mnoge zemlje koriste godišnji prosječni standard od 3,6 µg m<sup>-3</sup>.

**Toluen** - Toluen (C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>), poznat i kao metilbenzen, je bezbojna tekućina, jakog mirisa nalik otapalu. Toluen je jeftin i jednostavan za proizvodnju, a široko se koristi u industrijskim procesima kao

otapalo. Značajne količine toluena koriste se u industrijskim procesima diljem svijeta, s više od 20 milijardi USD ostvarenih prodajom toluena u 2013.

U neindustrijskoj upotrebi, toluen se može naći u benzinu kao pojačivač oktana te u ljepilima, otapalima i smolama.

**Etilbenzen** - Etilbenzen ( $C_6H_5CH_2CH_3$ ), bezbojna je tekućina, arome poput benzina. Etilbenzol se široko koristi u industrijskim procesima za proizvodnju stirena, koji se zatim koristi za proizvodnju polistirena. Etilbenzen je također prisutan kao otapalo u tintama, bojama i benzinu.

**Ksilen** - Ksilen ( $C_8H_{10}$ ) je izraz koji se koristi za opisivanje tri izomera dimetil benzena; m-ksilen, p-ksilen i o-ksilen. Obično se koncentracije svakog zbrajaju kao ukupni ksileni. Ksilen se rafinira iz sirove nafte i bistra je, masna tekućina. Ksilen se široko koristi u proizvodnji plastičnih boca i odjeće od poliestera te kao otapalo s nizom primjena od čišćenja tiskanih ploča do razrjeđivanja boja i lakova.

BTEX je koristan paket za mjerenje. U tipičnim urbanim sredinama prisutno je mnogo HOS-eva, koje emitira sve, od boje do ispušnih plinova vozila. Tipična GC-MS analiza može odrediti mnoge HOS-eve, neki od njih mogu biti ispod granica detekcije analize.

Često je razumnije biti selektivan i pratiti samo BTEX, te koristiti 4 komponente kao pokazatelje koncentracija HOS-a u cjelini, što je uobičajeni pristup.

BTEX daje izvrsnu indikaciju emisija VOC iz niza izvora. Benzen je, na primjer, uobičajeno prisutan u benzinu, ispušnim plinovima vozila i izgaranju krutih i tekućih goriva. U urbanoj sredini obično je prisutan benzen iz ovih izvora. Daje izvrsnu indikaciju dominacije benzinskih vozila u voznom parku i koristan je kao pokazatelj emisija krutih goriva za grijanje doma.

Ostatak BTEX paketa nalazi se u benzinu, ali njihov najveći izvor su industrijske emisije. U stambenim područjima koja graniče s industrijskim korištenjem zemljišta, BTEX paket je koristan za procjenu utjecaja industrije na druge načine korištenja zemljišta. Industrije obično mjere BTEX na svojoj liniji ograde, kako bi smanjile svoje emisije HOS-eva i njihov utjecaj na okolne zajednice.

U područjima sa značajnom proizvodnom industrijom, posebno onom koja koristi ljepila, otapala i boje, mogu biti prisutne veće koncentracije toluena, etilbenzena i ksilena. Praćenje BTEX-a omogućit će njihovu kvantifikaciju i može se koristiti za prepoznavanje zdravstvenih i sigurnosnih problema, dokazivanje usklađenosti s lokalnim propisima i čak procjenu postoji li curenje u infrastrukturi za skladištenje ili obradu.

## 8.1.2 Metodologija uzorkovanja i mjerenja

U okviru predmetne studije provedeno je uzorkovanje i analiza relevantnih fizikalnih i kemijskih parametara kakvoće oborinskih voda s urbanih površina u slivu Vruljice na području grada Zadra.

### 8.1.2.1 Uzorkovanje

Prvo uzorkovanje obavljeno je na području grada Zadra 31. ožujka 2022. godine nakon gotovo 100 dana bez intenzivnijih padalina. Uzorkovanje je započeto dva sata nakon početka kiše. Postaje uzorkovanja prikazane su na Slici 8.1.2, a odabrane fotografije na mjestima uzorkovanja na Slici 8.1.3. Drugo uzorkovanje je obavljeno nakon ljetnog sušnog razdoblja 1. rujna 2022. na istim postajama.

Tijekom uzorkovanja površinske vode izmjereni su i fizičko kemijski parametri vode multiparametarskom sondom EXO2 (YSI, Xylem) gdje je lokacija to omogućivala. Uzorci su uzeti direktno pomoću šprice ili pomoću teleskopskog štapa u bocu (Slika 8.1.3). Nakon uzorkovanja, 125 mL uzorka je filtrirano preko 0,22  $\mu\text{m}$  celulozno-acetatnog filtra (Minisart, Sartorius) koristeći filtere u kapsuli i uz pomoć šprice. Nakon filtriranja uzorci su zakiseljeni na  $\text{pH} < 2$  dodatkom ultra-čiste  $\text{HNO}_3$  (Carl Roth).



Slika 8.1.2. Satelitska Slika s označenim postajama uzorkovanja.



Slika 8.1.3. Fotografije snimljene na odabranim mjestima uzorkovanja.

### 8.1.2.2 Postupak mjerenja metala u tragovima

Analiza metala u tragovima obavljena je na Institutu Ruđer Bošković, Zavodu za istraživanje mora i okoliša, Laboratoriju za fizičku kemiju tragova.

Koncentracije metala u prvoj seriji uzoraka (ožujak 2022.) izmjerene su masenom spektrometrijom s induktivno spregnutom plazmom visoke rezolucije (HR ICP-MS). Za tu svrhu su uzorci zakiseljeni ultračistom HNO<sub>3</sub> (2% v/v), uz dodatak indija kao internog standarda u koncentraciji od 10 µg/L. Zbog kvara HR ICP-MS instrumenta, koncentracije metala u drugoj seriji uzoraka (rujan 2022) mjerene su elektrokemijski (voltametrijom s akumulacijom), uz postupak opisan u nastavku.

Prije mjerenja su uzorci tijekom 24h bili izloženi UV zračenju kako bi se razorili jaki organski kompleksi metala. Za uzorkovanje i čuvanje uzoraka isključivo su korištene „metal free“ bočice od fluorirane plastike (FEP). Određivanje koncentracije otopljenih metala voltametrijskim tehnikama

izvedeno je na uređaju ECOChemie  $\mu$ AUTOLAB3 multimode potenciostatu (Utrecht, Nizozemska) uz korištenje troelektrodnog sustava Metrohm 663 VA STI (Švicarska).

Mjerenja su izvedena na automatiziranom sustavu koji uključuje uređaj za izmjenu uzoraka (napravljen na LFKT/IRB-u) i birete za doziranje dodataka metala Cavro XE 1000 Modular Digital Pump (Cavro Scientific Instruments, Inc., Sunnyvale, California, SAD), uz pripadajuću software-sku podršku (Slika 8.1.4).



Slika 8.1.4. Automatizirani voltametrijski sustav za određivanje koncentracija Zn, Cd, Pb, Cu, Ni i Co.

Koncentracije Cd, Pb, Cu i Zn određene su metodom diferencijalno pulsne voltametrije s anodnim otapanjem (DPASV). Metoda se temelji na predkoncentriranju metala iz otopine u živinu kap procesom redukcije uz stvaranje amalgama. Koncentracije Ni i Co određene su metodom adsorptivne voltametrije s katodnim otapanjem (AdCSV). Kod ove se metode u uzorak dodaje organski ligi (nioksim ili dimetil-glioksim) poznate koncentracije koji s Ni i Co stvara jaki kompleks koji se adsorbira na živinu kap tijekom faze predkoncentriranja. Nakupljeni kompleksi se potom reduciraju, te se mjere karakteristični signali.

Za određivanje koncentracija metala korištena je metoda dodatka standarda, koja uključuje postupno dodavanje poznate količine metala u otopinu i mjerenje, te kreiranje kalibracijskih pravaca koji služe za konačni izračun koncentracija. Granica određivanja iznosi od 1 do 10 ng/L, ovisno o metalu, a kontrola kvalitete mjerenja se provjerava istovremenim određivanjem metala u certificiranom uzorku morske vode CASS-5 (NRC CNRC).



### **8.1.2.3 Analiza koncentracija PAH i BTEX parametara**

Analiza koncentracije PAH-ova i BTEX parametra obavljena je Nastavnom Zavodu za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije u Zdravstveno-ekološkom odjelu, Odsjeku za kontrolu voda, otpada i ekotoksikologiju, tekućinskom kromatografijom (PAH) i plinskom kromatografijom prema metodi HRN ISO 11423-1:2002 (BTEX).

## **8.1.3 Rezultati analize kakvoće oborinskih voda na području grada Zadra**

### **8.1.3.1 Metali u tragovima**

Koncentracije metala u tragovima izmjerene za dvije serije uzorkovanja dane su u Tablici 8.1.1. Iako oborinske vode ne podliježu kontroli kakvoće sukladno Uredbi o standardu kvalitete voda (NN 96/2019), za usporedbu su u Tablici naznačene njihove prosječne godišnje koncentracije (PGK) za Zn, Cd, Pb, Cu i Ni. U Tablici 8.1.1 su zatamnjena polja u kojima vrijednost koncentracije pojedinog metala prelazi PGK, a za najviše izmjerene koncentracije za Zn, Cd, Pb, Cu, Ni i Co su podebljane.

Usporedni prikazi koncentracija Zn, Cd, Pb, Cu, Ni i Co na mjernim postajama grafički su prikazani na Slici 8.1.5. Najniže koncentracije gotovo svih metala su izmjerene u oba uzorkovanja na nizvodnim postajama, u moru i u blizini utoka u more, postaje: Z1, Z2, Z3 i Z6. Usporedive koncentracije Zn i Cu su nađene za obje serije uzorkovanja na svim postajama, dok su za Cd i Pb koncentracije bile više u rujnu nego u ožujku na postajama Z5, Z7, Z8 i Z9. Obrnuto od Cd i Pb, znatno više koncentracije Ni i Co su nađene na postajama Z4, Z5, Z7 i Z8 u ožujku nego u rujnu 2022.

Da bi se dobio detaljniji uvid u faktor koncentriranja metala u slivnoj vodi, bilo bi potrebno pratiti i koncentraciju tih metala i u samoj kiši, te temeljem toga izračunati geo-akumulacijski indeks i indeks zagađenja (Islam Shajib et al., 2019).

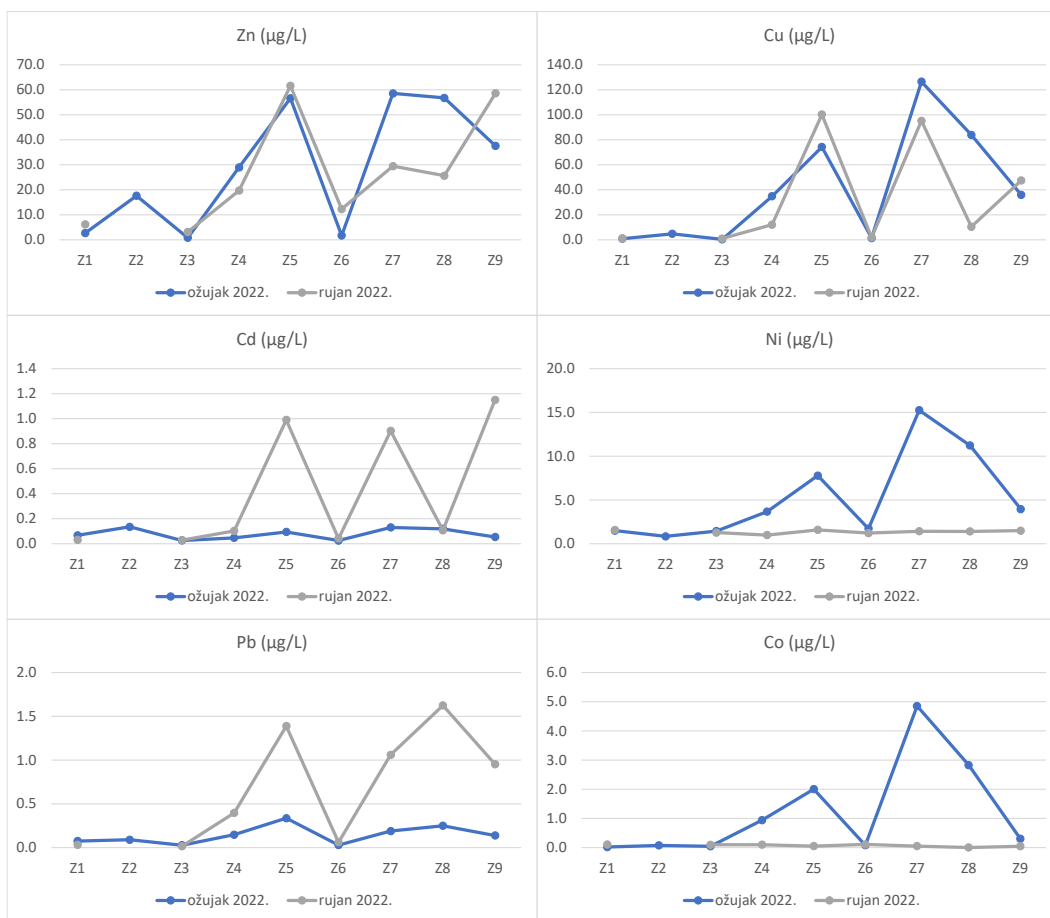
Korelacijska analiza prikazana u Tablici 8.1.2 pokazuje značajne koeficijente korelacije ( $p = 0.05$ ) između navedenih metala, osim za Cd. Prema tome, urbana oborinska voda sakuplja u sličnim omjerima većinu metala koji se smatraju zagađivalima. Pokazano je da Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb i Zn uglavnom potječu od aktivnosti u prometu (Islam Shajib et al., 2019).

Tok vode na „uzvodnim“ postajama nije poznat, te nije moguće odgovoriti na pitanje ima li i koliki je utjecaj slivnih voda na postajama u moru, Z1 i Z2. Utjecaj na uski obalni morski pojas svakako je i pitanje ne samo koncentracije metala nego i količine vode koja dospije u more.

Tablica 8.1.1. Vrijednosti koncentracija otopljenih metala ( $\mu\text{g/L}$ ) izmjerenih u sakupljenim uzorcima na označenim lokacijama. Usporedbe radi, u zagradama su za pojedine metale dane prosječne godišnje koncentracije (PGK) sukladno Uredbi o standardu kakvoće voda NN 96/2019.

Period	Uzorak-> Element	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
31. 3. 2022.	Zn (7,8)	2,67±0,010	17,61±0,654	0,814±0,048	28,97±0,113	56,59±1,643	1,70±0,050	58,55±0,83	56,74±0,298	37,53±0,333
	Cd (0,08)	0,067±0,012	0,135±0,014	0,026±0,001	0,047±0,001	0,094±0,003	0,025±0,004	0,130±0,004	0,119±0,004	0,054±0,003
	Pb (1,2)	0,075±0,004	0,090±0,004	0,027±0,000	0,147±0,001	0,336±0,002	0,029±0,001	0,189±0,000	0,249±0,004	0,138±0,001
	Cu (1,1)	0,894±0,188	4,782±0,268	0,404±0,049	34,81±0,55	74,23±0,51	1,39±0,04	126,47±1,93	83,91±0,86	36,00±0,236
	Ni (4,0)	1,495±0,312	0,839±0,740	1,446±0,006	3,668±0,052	7,786±0,174	1,724±0,049	15,25±0,35	11,22±0,057	3,95±0,012
	Co	0,018±0,014	0,074±0,012	0,046±0,003	0,942±0,014	2,005±0,035	0,081±0,001	4,851±0,071	2,828±0,005	0,31±0,004
	Li	7,55±0,10	45,47±0,17	2,68±0,01	4,63±0,04	7,41±0,017	2,96±0,04	10,28±0,07	9,16±0,06	5,03±0,03
	Rb	4,55±0,07	25,65±0,11	1,91±0,02	4,14±0,02	6,67±0,03	2,18±0,02	9,98±0,01	7,44±0,09	4,76±0,02
	Mo	1,01±0,07	3,56±0,08	0,61±0,02	3,65±0,02	7,70±0,03	0,71±0,01	11,76±0,10	11,04±0,02	4,15±0,03
	Sn	0,015±0,026	0,118±0,032	0,003±0,007	0,177±0,001	0,266±0,003	0,012±0,002	0,170±0,003	0,261±0,005	0,13±0,003
	Sb	0,031±0,010	0,210±0,024	0,033±0,002	1,139±0,004	2,604±0,010	0,063±0,001	3,364±0,007	3,324±0,040	1,31±0,006
	Cs	0,020±0,004	0,084±0,002	0,007±0,000	0,018±0,000	0,030±0,001	0,006±0,000	0,026±0,000	0,042±0,000	0,025±0,001
	Tl	0,066±0,004	0,052±0,002	0,064±0,001	0,023±0,000	0,030±0,000	0,043±0,001	0,033±0,000	0,036±0,001	0,025±0,001
	U	1,084±0,012	1,398±0,014	1,016±0,005	0,549±0,007	0,242±0,002	0,941±0,012	0,623±0,008	0,329±0,001	0,24±0,001
	Al	0,513±0,534	11,04±0,26	3,87±0,09	43,65±0,38	80,42±0,91	3,19±0,2	49,20±1,03	87,67±1,36	69,9±0,83
	Ti	0,104±0,106	0,304±0,074	0,145±0,010	0,730±0,044	1,380±0,050	0,140±0,016	1,836±0,063	1,204±0,047	0,821±0,053
	V	2,012±0,042	4,560±0,224	2,058±0,029	3,205±0,026	5,519±0,136	2,210±0,021	6,307±0,079	8,160±0,045	5,31±0,058
	Sr	424,8±4,8	1807,4±3,7	247,2±2,7	140,4±1,2	98,6±1,6	240,9±0,5	227,3±3,1	123,5±0,70	75,3±0,4
	Ba	22,39±0,19	22,85±0,15	22,94±0,74	42,72±0,64	45,77±0,82	21,08±0,08	72,90±0,93	49,64±0,74	31,8±0,25
Cr	0,539±0,118	0,815±0,080	0,552±0,018	2,196±0,090	4,805±0,084	0,859±0,024	3,274±0,001	3,079±0,052	9,45±0,044	
Mn	1,19±0,09	8,56±0,08	1,07±0,03	69,97±0,88	128,74±1,64	1,87±0,05	274,24±2,38	126,95±0,83	38,12±0,32	
Fe	1,80±0,22	8,30±0,26	3,70±0,09	21,72±0,47	38,78±0,32	2,24±0,07	28,43±0,14	28,26±0,15	16,05±0,05	
As	0,191±0,058	0,640±0,246	0,247±0,076	0,419±0,031	0,808±0,018	0,375±0,065	1,228±0,031	1,049±0,044	0,74±0,083	
1. 9. 2022.	Zn (7,8)	6,200±1,400		3,140±0,120	19,70±1,53	61,59±2,96	12,32±0,59	29,47±0,62	25,63±0,97	58,63±2,03
	Cd (0,08)	0,030±0,004		0,029±0,003	0,102±0,011	0,090±0,009	0,041±0,005	0,109±0,010	0,107±0,019	0,150±0,111
	Pb (1,2)	0,032±0,003		0,015±0,002	0,396±0,018	1,388±0,129	0,061±0,006	1,060±0,094	1,624±0,172	0,953±0,103
	Cu (1,1)	1,115±0,121		1,006±0,074	12,12±1,00	100,25±11,9	1,92±0,17	95,18±4,57	10,41±3,04	47,47±6,92
	Ni (4,0)	1,559±0,188		1,276±0,125	0,987±0,375	1,585±0,325	1,212±0,122	1,421±0,148	1,404±0,378	1,487±0,226
	Co	0,108±0,009		0,097±0,007	0,098±0,023	0,052±0,016	0,109±0,012	0,053±0,013	0,005±0,002	0,046±0,021

U ovim istraživanjima mjerena je koncentracije otopljenih metala (filtrirani uzorak), međutim veće koncentracije se očekuju u čestičnoj frakciji u uzorcima skupljenim na ulici (Islam Shajib et al., 2019). Metali vezani na čestice dodatno se mogu osloboditi u otopljeno stanje dolaskom u morsku sredinu u kojoj je sastav vode drugačiji.



Slika 8.1.5. Usporedni prikaz koncentracija Zn, Cd, Pb, Cu, Ni i Co na mjernim lokacijama dva perioda uzorkovanja: ožujak i rujan 2022.

Tablica 8.1.2. Koeficijenti korelacije za odabrane metale i PAU (ožujak 2022.)

Element	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Co	Al	Mn	Fe	PAU
Zn										
Cd										
Pb	0,908									
Cu	0,929		0,771							
Ni	0,872		0,697	0,985						
Co	0,828			0,972	0,986					
Al	0,916		0,888	0,747	0,682					
Mn	0,847		0,672	0,977	0,966	0,986				
Fe	0,951		0,962	0,859	0,781	0,751	0,893	0,787		
PAU	0,857		0,808	0,794	0,696		0,790	0,744	0,863	

### 8.1.3.2 PAU i BTEXT

Rezultati mjerenja PAU-ova i BTEX koncentracija prikazani su u Tablicama 8.1.3 i 8.1.4. Trend koncentracija PAU-ova po lokacijama uzorkovanja odgovara onima za metale prikazanih na Slici 8.1.5, uz visoki koeficijent korelacije s većinom metala (Tablica 8.1.2). Visoke koncentracije ukupni PAU-ova su izmjerene na lokacijama Z4, Z5, Z7, Z8 i Z9, dok su na postajama Z1, Z3 i Z6 one na razini granice detekcije ili vrlo niske (Z2).

Očekivati je da mjesta s najvećom gustoćom prometa imaju i najviše koncentracije policikličkih aromatskih ugljikovodik, nekih metala povezanih s prometom, alkilfenola i ftalata. Izmjerene koncentracije organskih zagađivala i metala su također i odraz „razrjeđenje“ s obzirom na količinu vode (kiše), te područje sapiranja.

Iako ne bi bilo neočekivano da su u pojedinim uzorcima nađene povišene koncentracije BTEX-a uslijed prometa, izmjerene vrijednosti svih BTEX pokazatelja u svim analiziranim uzorcima su ispod granice detekcije.

Tablica 8.1.3. Koncentracije PAU-ova ( $\mu\text{g/L}$ ) izmjerenih u sakupljenim uzorcima na označenim lokacijama (ožujak 2022.).

Naziv uzorka	granica kvantifikacije	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
<u>Naftalen</u>	<0,0002	<0,0002	0,00053	<0,0002	0,0034	0,0067	<0,0002	0,028	0,0084	0,023
<u>Acenaften</u>	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,00097	<0,0002	0,003	0,0011	0,0017
<u>Fluoren</u>	<0,0005	<0,0005	0,00065	<0,0005	0,014	0,04	<0,0005	0,029	0,0066	0,038
<u>Fenantren</u>	<0,0002	0,00053	0,00073	<0,0002	0,039	0,14	0,00046	0,17	0,11	0,12
<u>Antracen</u>	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,0011	0,0031	<0,0005	0,0083	0,0043	0,0054
<u>Fluoranten</u>	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	0,011	0,043	<0,001	0,17	0,095	0,071
<u>Piren</u>	<0,0002	0,00026	0,0034	<0,0002	0,013	0,054	0,00021	0,16	0,11	0,075
<u>Benzo(a)antracen</u>	<0,0002	<0,0002	<0,00020	<0,0002	<0,0002	0,0018	<0,0000	0,0047	0,0029	0,004
<u>Krizen</u>	<0,0002	<0,0002	<0,00020	<0,0002	0,00034	0,0034	<0,0002	0,023	0,017	0,011
<u>Benzo(b)fluoranten</u>	<0,0005	<0,0005	<0,00050	<0,0005	0,00087	0,0062	<0,0005	0,063	0,034	0,037
<u>Benzo(k)fluoranten</u>	<0,0002	<0,0002	<0,00020	<0,0002	<0,0002	0,00065	<0,0002	0,013	0,007	0,0086
<u>Benzo(a)piren</u>	<0,00005	<0,00005	<0,000050	<0,00005	<0,00005	0,0011	<0,00005	0,02	0,0066	0,0096
<u>Dibenzo(a,h)antracen</u>	<0,0002	<0,0002	<0,00020	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,00062	0,0009	<0,0002
<u>Benzo(g,h,i)perilen</u>	<0,00005	<0,00005	<0,000050	<0,00005	<0,00005	0,00095	<0,00005	0,013	0,0082	0,0064
<u>Indeno(1,2,3cd)piren</u>	<0,0001	<0,0001	<0,00010	<0,0001	<0,0001	0,00068	<0,0001	0,0022	0,0026	0,00061
<u>Acenaftilen</u>	<0,010	<0,010	0,10	<0,010	0,69	2,15	<0,010	1,36	0,37	1,33
<b>UKUPNO</b>		<b>0,001</b>	<b>0,101</b>	<b>0,000</b>	<b>0,773</b>	<b>2,453</b>	<b>0,001</b>	<b>2,068</b>	<b>0,785</b>	<b>1,741</b>

Tablica 8.1.4. BTEX koncentracije ( $\mu\text{g/L}$ ) u rujnu 2022.

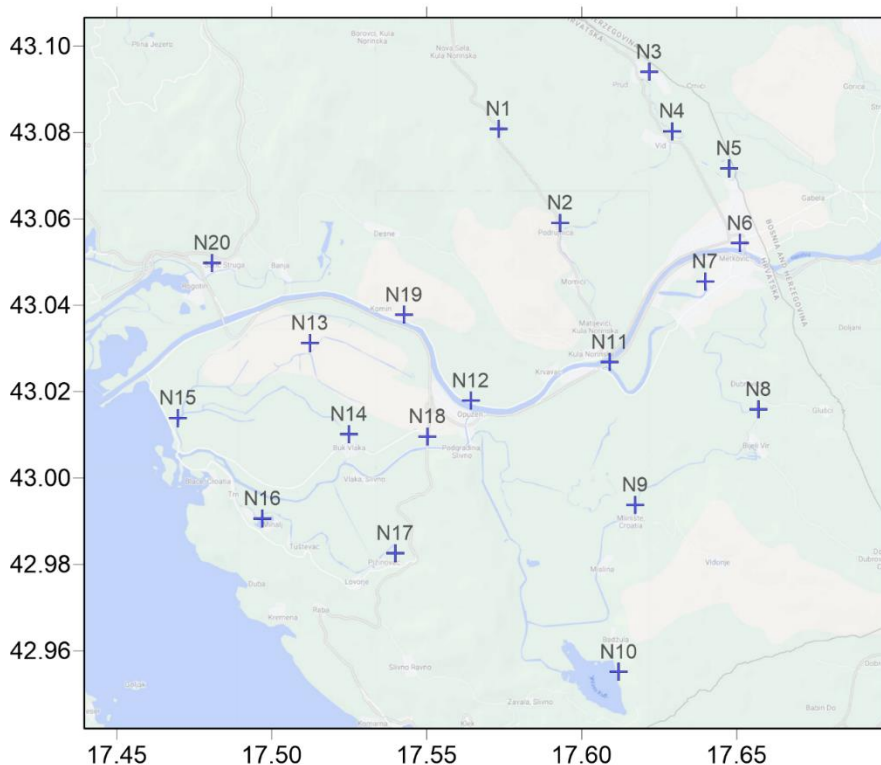
BTEX	Z1	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Benzen	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030
Toulen	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Ksilen (-p,-m)	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020	<0,0020
Ksilen (-o)	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Etilbenzen	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
UKUPNO	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030	<0,00030

## 8.2 Istraživanje metala u tragovima u vodama donjeg toka rijeke Neretve

Uz istraživanja kakvoće oborinskih voda na području grada Zadra, u proljeće i ljeto 2022. godine provedena su i istraživanja prostorne raspodjele metala u tragovima u području donjeg toka rijeke Neretve i njenih pritoka (vezano uz pilot područje Metković).

### 8.2.1 Uzorkovanje

Prostorna raspodjela lokacija uzorkovanja prikazana je na Slici 8.2.1. Uzorci površinske vode su uzeti teleskopskim štapom. Nakon uzorkovanja, 125 mL uzorka je filtrirano preko 0,22  $\mu\text{m}$  celulozno-acetatnog filtra (Minisart, Sartorius) koristeći filtere u kapsuli i uz pomoć šprice. Nakon filtriranja uzorci su u laboratoriju zakiseljeni na  $\text{pH} < 2$  dodatkom ultra-čiste  $\text{HNO}_3$  (Carl Roth).



Slika 8.2.1. Područje istraživanja rijeke Neretve i njenih pritoka s označenim pozicijama postaja za uzorkovanje vode

## 8.2.2 Postupak mjerenja metala u tragovima

Analiza metala u tragovima obavljena je na Institutu Ruđer Bošković, Zavodu za istraživanje mora i okoliša, Laboratoriju za fizičku kemiju tragova.

Koncentracije metala u prvoj seriji uzoraka (svibanj 2022.) izmjerene su masenom spektrometrijom s induktivno spregnutom plazmom visoke rezolucije (HR ICP-MS). Za tu svrhu su uzorci zakiseljeni ultračistom HNO<sub>3</sub> (2% v/v), uz dodatak indija kao internog standarda u koncentraciji od 10 µg/L.

Zbog kvara HR ICP-MS instrumenta, koncentracije metala u drugoj seriji uzoraka (kolovoz 2022.) mjerene su elektrokemijski (voltametrijom s akumulacijom), uz postupak opisan u nastavku.

Prije mjerenja su uzorci tijekom 24h bili izloženi UV zračenju kako bi se razorili jaki organski kompleksi metala. Za uzorkovanje i čuvanje uzoraka isključivo su korištene „metal free“ bočice od fluorirane plastike (FEP). Određivanje koncentracije otopljenih metala voltametrijskim tehnikama izvedeno je na uređaju ECOChemie µAUTOLAB3 multimode potencijostatu (Utrecht, Nizozemska). Mjerenja su izvedena na automatiziranom sustavu koji uključuje uređaj za izmjenu uzoraka (napravljen na LFKT/IRB-u) i birete za doziranje dodataka metala Cavro XE 1000 Modular Digital Pump (SAD), (Slika 8.1.4).

Koncentracije Cd, Pb, Cu i Zn određene su metodom diferencijalno pulsne voltametrije s anodnim otapanjem (DPASV), dok su koncentracije Ni i Co određene su metodom adsorptivne voltametrije s katodnim otapanjem (AdCSV).

## 8.2.3 Rezultati analize metala u vodama donjeg toka rijeke Neretve

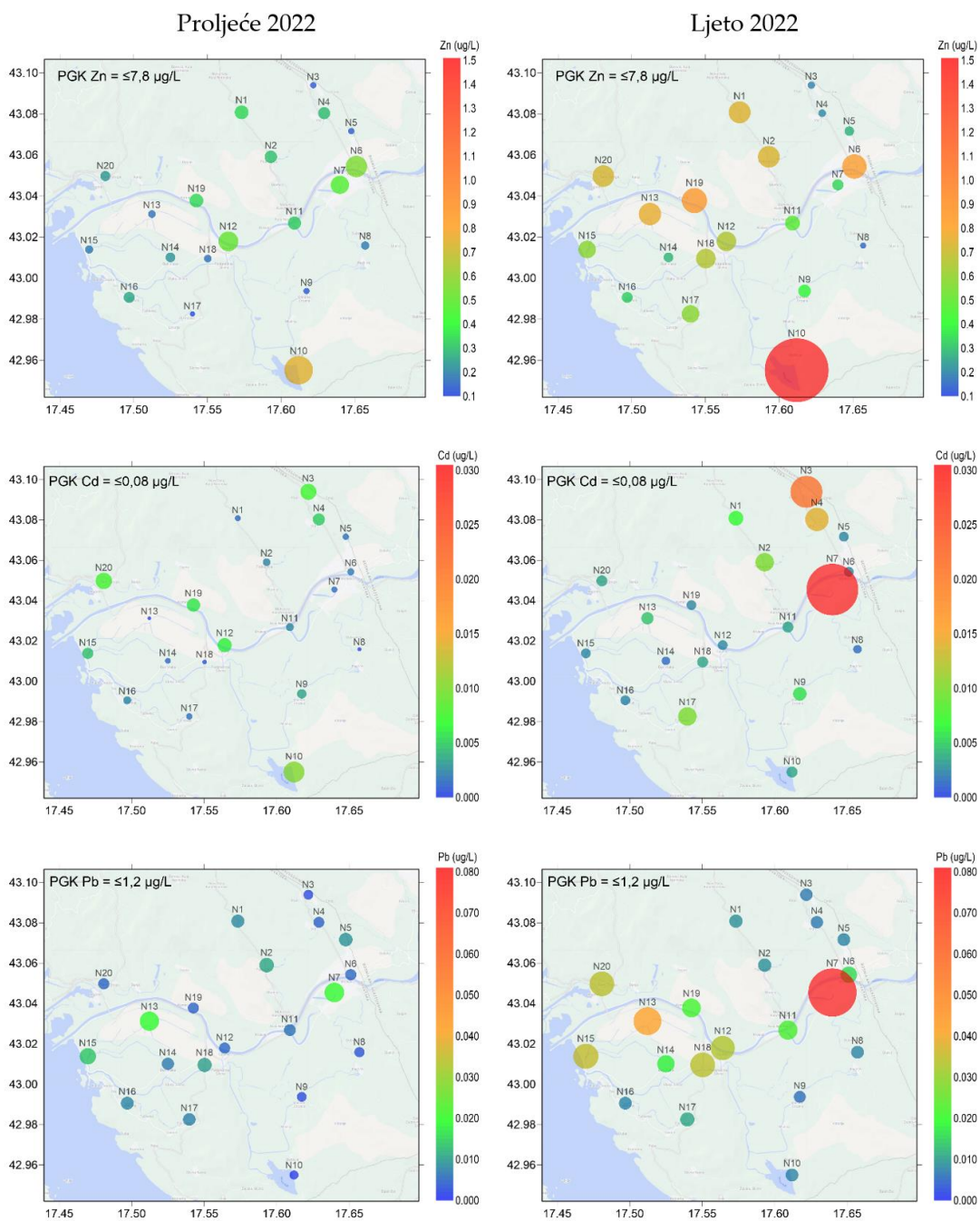
Brojčane vrijednosti koncentracija metala u tragovima izmjerene na odabranim lokacijama za dva perioda uzorkovanja dane su Tablici 8.2.1, dok su prostorne raspodjele koncentracija za odabrani set metala (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni i Co) prikazane na Slikama 8.2.2 i 8.2.3.

Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da su u odnosu na prosječne godišnje koncentracije (PGK) propisane u Uredbi o standardu kakvoće voda (NN 96/2019), izmjerene koncentracije svih metala značajno ispod tih vrijednosti. Prema tome, može se konstatirati da su vode donjeg toka rijeke Neretve i njenih pritoka iznimno čiste s obzirom na sadržaj metala u tragovima.

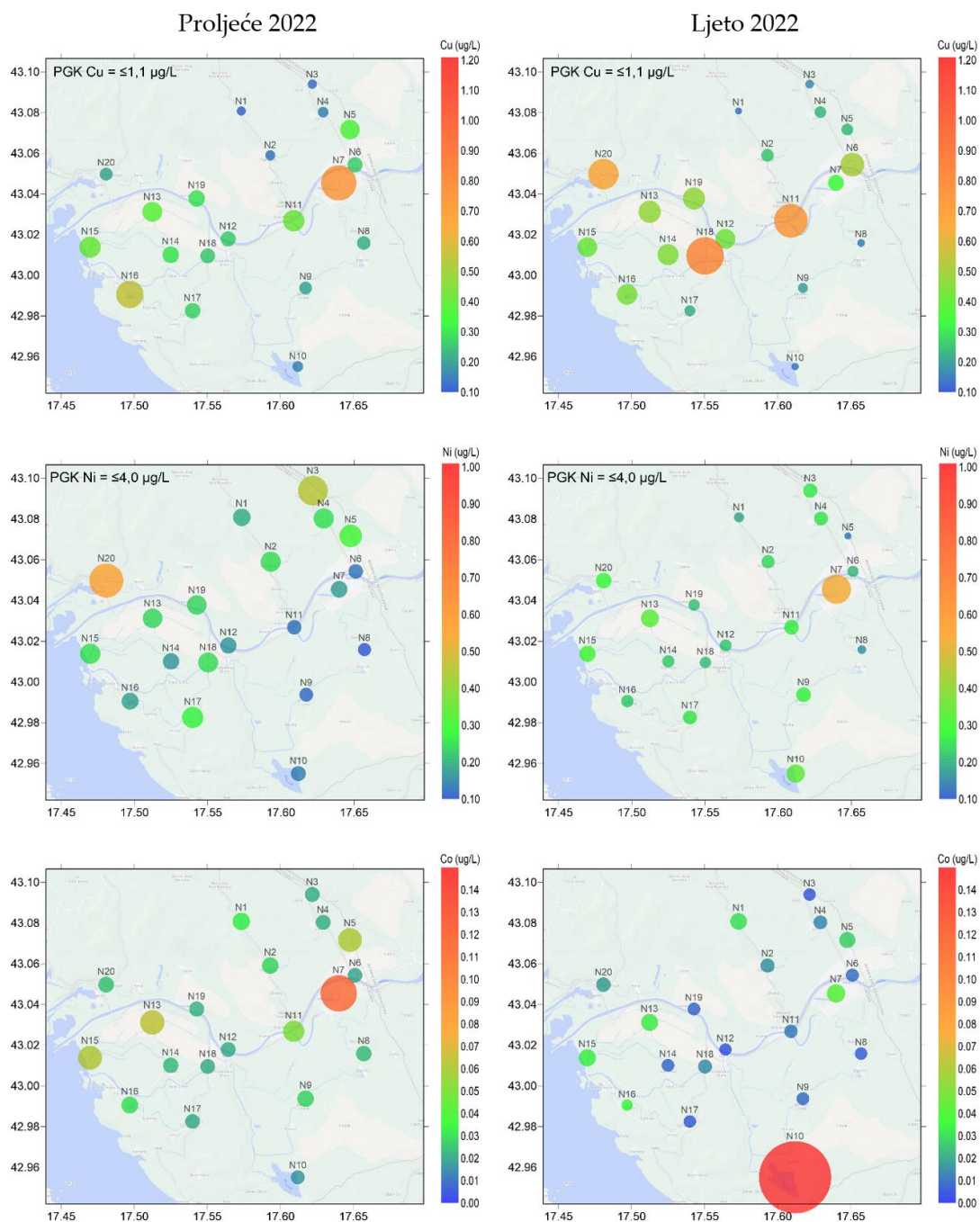
Tablica 8.2.1. Koncentracije otopljenih metala izmjerenih u sakupljenim uzorcima na označenim lokacijama.

	Uzorak -> Element	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	
svibanj 2022.	Zn	0.336±0.015	0.296±0.015	0.123±0.013	0.288±0.016	0.125±0.004	0.551±0.040	0.461±0.024	0.181±0.006	0.121±0.011	0.748±0.006	
	Cd	0.002±0.001	0.000±0.001	0.008±0.001	0.006±0.002	0.002±0.001	0.003±0.001	0.002±0.001	0.001±0.000	0.004±0.001	0.011±0.001	
	Pb	0.008±0.000	0.011±0.000	0.003±0.000	0.005±0.000	0.009±0.001	0.005±0.000	0.020±0.001	0.004±0.000	0.003±0.000	0.002±0.000	
	Cu	0.116±0.014	0.139±0.013	0.121±0.014	0.154±0.012	0.365±0.029	0.263±0.004	0.741±0.032	0.221±0.010	0.201±0.006	0.155±0.012	
	Ni	0.231±0.058	0.283±0.049	0.482±0.049	0.286±0.049	0.335±0.026	0.171±0.065	0.214±0.039	0.141±0.003	0.157±0.039	0.178±0.023	
	Co	0.033±0.001	0.029±0.002	0.022±0.001	0.022±0.001	0.061±0.002	0.020±0.002	0.118±0.003	0.024±0.000	0.029±0.002	0.017±0.001	
	Li	3.100±0.025	2.614±0.018	3.358±0.026	3.202±0.046	4.034±0.038	2.113±0.045	4.433±0.032	0.623±0.007	2.146±0.011	0.196±0.008	
	Rb	0.657±0.004	0.739±0.001	0.650±0.015	0.660±0.007	2.143±0.034	0.574±0.000	4.910±0.025	0.622±0.007	1.210±0.012	0.392±0.001	
	Mo	1.343±0.029	1.641±0.003	1.716±0.012	1.624±0.014	1.138±0.010	0.428±0.002	0.512±0.003	0.705±0.012	0.717±0.005	0.415±0.009	
	Sn	0.004±0.001	0.006±0.001	0.019±0.004	0.005±0.002	0.002±0.002	0.003±0.001	0.004±0.001	0.004±0.001	0.005±0.002	0.006±0.001	
	Sb	0.036±0.001	0.039±0.001	0.036±0.001	0.037±0.001	0.130±0.000	0.044±0.002	0.150±0.002	0.033±0.002	0.034±0.001	0.065±0.008	
	Cs	0.022±0.001	0.002±0.000	0.011±0.000	0.008±0.000	0.022±0.003	0.004±0.000	0.006±0.000	0.001±0.000	0.009±0.000	0.001±0.000	
	Tl	0.005±0.000	0.008±0.000	0.008±0.000	0.008±0.000	0.007±0.000	0.004±0.000	0.001±0.000	0.009±0.000	0.008±0.000	0.005±0.000	
	U	0.679±0.004	0.817±0.009	0.853±0.018	0.815±0.011	0.751±0.008	0.355±0.006	0.397±0.006	0.556±0.005	0.546±0.012	0.420±0.003	
	Al	1.728±0.044	3.992±0.837	0.712±0.027	0.919±0.068	2.190±1.628	3.687±0.302	1.762±0.128	0.935±0.134	1.367±0.221	1.560±1.195	
	Ti	0.099±0.006	0.021±0.008	0.010±0.007	0.035±0.011	0.106±0.015	0.036±0.029	0.109±0.033	0.027±0.013	0.042±0.010	0.009±0.010	
	V	1.544±0.014	1.495±0.007	1.344±0.013	1.444±0.027	0.474±0.012	0.649±0.018	0.362±0.010	1.208±0.013	1.030±0.016	0.825±0.023	
	Sr	975.9±13.5	923.1±4.2	901.6±12.5	905.0±22.1	771.0±4.5	345.8±12.2	301.5±1.2	130.6±1.7	222.7±0.6	66.0±1.8	
	Ba	11.820±0.085	12.245±0.384	11.904±0.320	11.999±0.294	26.751±0.194	14.100±0.378	40.121±0.617	6.588±0.053	8.750±0.116	5.432±0.213	
	Cr	0.152±0.006	0.312±0.003	0.080±0.075	0.320±0.004	0.080±0.003	0.284±0.019	0.040±0.003	0.186±0.004	0.182±0.011	0.199±0.002	
Mn	13.994±0.098	8.522±0.678	0.113±0.030	5.611±0.019	7.279±0.085	2.593±0.041	7.940±0.173	18.139±0.200	15.487±0.140	2.590±0.056		
Fe	14.490±2.411	7.171±0.402	0.024±0.008	4.666±0.053	26.181±1.015	3.126±0.078	30.667±3.291	6.580±0.047	11.917±5.063	12.128±2.054		
As	0.192±0.042	0.204±0.022	0.671±0.053	0.193±0.012	0.777±0.033	0.179±0.017	1.079±0.017	0.180±0.017	0.274±0.020	0.121±0.020		
kolovoz 2022.	Zn	0.743±0.052	0.734±0.054	0.188±0.021	0.199±0.017	0.272±0.015	0.834±0.061	0.332±0.042	0.139±0.020	0.391±0.078	2.333±0.182	
	Cd	0.008±0.001	0.011±0.001	0.022±0.001	0.015±0.002	0.004±0.001	0.004±0.001	0.038±0.004	0.003±0.000	0.007±0.002	0.005±0.002	
	Pb	0.010±0.001	0.010±0.005	0.008±0.002	0.008±0.002	0.009±0.003	0.017±0.003	0.087±0.008	0.009±0.003	0.007±0.003	0.009±0.002	
	Cu	0.129±0.026	0.256±0.025	0.165±0.032	0.233±0.047	0.236±0.034	0.508±0.053	0.331±0.076	0.146±0.015	0.198±0.078	0.138±0.027	
	Ni	0.179±0.017	0.237±0.024	0.257±0.012	0.252±0.023	0.123±0.017	0.202±0.021	0.530±0.096	0.155±0.016	0.267±0.019	0.331±0.022	
	Co	0.036±0.003	0.022±0.003	0.012±0.001	0.020±0.001	0.033±0.002	0.016±0.002	0.046±0.003	0.013±0.002	0.015±0.002	0.349±0.027	
	svibanj 2022.	Zn	0.317±0.005	0.504±0.012	0.163±0.030	0.220±0.011	0.176±0.015	0.258±0.008	0.094±0.015	0.160±0.014	0.335±0.035	0.231±0.014
		Cd	0.003±0.001	0.007±0.001	0.001±0.001	0.002±0.000	0.005±0.001	0.003±0.002	0.002±0.001	0.001±0.001	0.006±0.001	0.008±0.001
Pb		0.006±0.001	0.005±0.000	0.019±0.000	0.007±0.000	0.014±0.000	0.008±0.000	0.008±0.000	0.010±0.000	0.005±0.000	0.005±0.000	
Cu		0.410±0.006	0.258±0.007	0.375±0.028	0.293±0.009	0.405±0.013	0.552±0.017	0.270±0.017	0.254±0.016	0.293±0.016	0.207±0.011	
Ni		0.168±0.013	0.205±0.034	0.275±0.056	0.207±0.023	0.290±0.049	0.219±0.032	0.309±0.055	0.282±0.035	0.273±0.116	0.574±0.027	
Co		0.051±0.002	0.022±0.002	0.064±0.002	0.024±0.001	0.062±0.002	0.031±0.002	0.021±0.003	0.021±0.001	0.023±0.004	0.026±0.001	
Li		4.417±0.050	9.536±0.076	4.572±0.029	2.386±0.018	4.927±0.018	4.303±0.023	2.700±0.041	1.575±0.002	12.309±0.106	31.100±0.148	
Rb		2.250±0.015	4.748±0.024	2.333±0.015	1.522±0.013	2.667±0.001	2.602±0.021	1.814±0.010	1.047±0.004	6.179±0.037	16.259±0.012	
Mo		0.746±0.014	1.002±0.019	0.851±0.007	0.787±0.010	0.882±0.003	0.846±0.004	0.569±0.007	0.782±0.006	1.169±0.006	2.366±0.016	
Sn		0.003±0.001	0.006±0.002	0.004±0.002	0.004±0.002	0.002±0.001	0.005±0.001	0.002±0.001	0.004±0.002	0.006±0.002	0.011±0.001	
Sb		0.073±0.002	0.062±0.002	0.075±0.003	0.047±0.001	0.078±0.001	0.062±0.002	0.056±0.002	0.043±0.001	0.065±0.001	0.098±0.001	
Cs		0.005±0.000	0.015±0.001	0.005±0.000	0.006±0.000	0.005±0.000	0.007±0.000	0.004±0.000	0.005±0.000	0.018±0.000	0.044±0.000	
Tl		0.003±0.000	0.004±0.000	0.005±0.000	0.007±0.000	0.004±0.000	0.006±0.000	0.006±0.000	0.007±0.000	0.004±0.000	0.005±0.001	
U		0.523±0.007	0.514±0.006	0.671±0.002	0.590±0.003	0.643±0.009	0.602±0.008	0.510±0.001	0.619±0.003	0.579±0.005	0.866±0.004	
Al		1.159±0.123	3.755±0.079	1.505±0.047	1.642±0.056	1.651±0.837	1.206±0.102	1.329±0.063	2.631±0.564	4.512±0.070	4.108±0.139	
Ti		0.035±0.006	0.021±0.011	0.127±0.005	0.040±0.015	0.076±0.008	0.076±0.026	0.075±0.009	0.087±0.009	0.056±0.060	0.038±0.006	
V		0.535±0.006	0.734±0.015	0.738±0.008	0.830±0.015	0.588±0.007	0.705±0.015	0.654±0.011	0.925±0.014	0.727±0.017	2.228±0.332	
Sr		385.7±6.6	632.9±9.7	348.2±0.7	217.8±1.4	387.3±4.2	303.1±3.4	221.7±0.8	164.2±0.3	716.2±8.3	1432.0±7.5	
Ba		18.473±0.184	13.995±0.309	11.897±0.270	7.904±0.199	17.354±0.384	12.191±0.024	7.154±0.177	7.688±0.007	13.992±0.126	13.020±0.063	
Cr		0.163±0.009	0.291±0.009	0.094±0.005	0.135±0.010	0.097±0.003	0.096±0.003	0.073±0.012	0.122±0.010	0.313±0.008	0.278±0.005	
Mn	1.967±0.043	3.037±0.077	32.454±0.113	3.442±0.042	37.971±0.678	1.936±0.035	2.905±0.036	3.333±0.035	3.352±0.027	3.648±0.029		
Fe	3.868±0.079	2.562±0.032	13.115±0.070	4.687±0.008	12.730±0.402	3.445±0.086	3.086±0.144	4.907±0.048	2.336±0.011	2.284±0.014		
As	0.314±0.010	0.251±0.030	0.416±0.041	0.230±0.025	0.445±0.022	0.322±0.027	0.278±0.005	0.213±0.015	0.243±0.027	0.300±0.033		
kolovoz 2022.	Zn	0.478±0.042	0.653±0.047	0.759±0.061	0.277±0.027	0.577±0.015	0.325±0.034	0.576±0.042	0.657±0.044	0.863±0.088	0.728±0.067	
	Cd	0.005±0.001	0.004±0.001	0.006±0.001	0.003±0.001	0.004±0.002	0.004±0.002	0.011±0.002	0.005±0.001	0.004±0.001	0.005±0.001	
	Pb	0.023±0.003	0.034±0.003	0.042±0.002	0.019±0.002	0.036±0.003	0.009±0.004	0.012±0.007	0.035±0.005	0.022±0.005	0.035±0.009	
	Cu	0.731±0.053	0.420±0.079	0.473±0.061	0.448±0.040	0.412±0.038	0.434±0.062	0.218±0.069	0.814±0.071	0.469±0.132	0.657±0.152	
	Ni	0.265±0.021	0.215±0.033	0.323±0.025	0.220±0.024	0.294±0.022	0.224±0.024	0.252±0.027	0.204±0.043	0.208±0.021	0.281±0.032	
	Co	0.018±0.001	0.011±0.002	0.038±0.003	0.014±0.002	0.039±0.003	0.006±0.003	0.013±0.004	0.021±0.004	0.014±0.001	0.024±0.002	
	svibanj 2022.	Zn	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20
		Cd	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20
Pb		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Cu		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Ni		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Co		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Li		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Rb		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Mo		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Sn		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	
Sb		N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	





Slika 8.2.2. Razine koncentracija Zn, Cd i Pb u istraživanom području za proljetni i ljetni period. Na grafovima su dane vrijednosti prosječne godišnje koncentracije (PKG) sukladno Uredbi o standardu kakvoće voda, NN 96/2019



Slika 8.2.3. Razine koncentracija Cu, Ni i Co u istraživanom području za proljetni i ljetni period. Na grafovima su dane vrijednosti prosječne godišnje koncentracije (PGK) sukladno Uredbi o standardu kakvoće voda, NN 96/2019.

S obzirom na članke u novinama i portalima (<https://slobodnadalmacija.hr/vijesti/regija/uzbuna-u-bih-neretva-kod-konjica-zatrovana-teskim-metalima-kakva-je-situacija-u-hrvatskoj-629265>; <https://bljesak.info/gospodarstvo/flash/u-neretvi-pronadena-visoka-kolicina-teskih-metalna/289409>) da je rijeka Neretva u gornjem toku kod grada Konjica zagađena teškim metalima (Cu, Zn i Ni), sa sigurnošću možemo ustvrditi da nema naznaka da su Cu, Zn i Ni povišeni u vodi rijeke Neretve koja utječe u Republiku Hrvatsku. Izmjerene vrijednosti su na razinama uobičajenim za čista krška područja (npr. rijeka Krka i , voda u NP Plitvička jezera).

Detaljni uvid u prostornu raspodjelu koncentracija metala u tragovima (Slike 8.2.2 i 8.2.3) vidljivo je da su sve vrijednosti u „plavom“ i „zelenom“ području, što ukazuje na njihove **iznimno niske koncentracije**. Sporadično se vide blago više koncentracije pojedinih metala na određenim postajama, N7 (Jezero Kutu) i N10 (Jezerce u području grad Metković) u odnosu na ostatak postaja. **Međutim, te su koncentracije daleko ispod PGK, i mogu se okarakterizirati kao vrlo blago povišene.**

Iako je u navedenom području vrlo izražena poljoprivredna aktivnost, vrijednosti izmjerenih koncentracija metala ne pokazuju da te aktivnosti imaju utjecaj na kvalitetu vode istraživanog područja.

## 9 Sustavi prognoziranja poplava u RH

Sustav prognoziranja i upozoravanja odnosno rane najave opasnih vremenskih prilika jedna je od temeljnih komponenata smanjenja rizika od prirodnih nepogoda te jačanja otpornosti na društva na vremenske i klimatske ekstreme. Osnovna namjena takvih sustava je zaštita ljudi, imovine i dobara s ciljem smanjenja šteta od meteoroloških i hidroloških nepogoda koje u Hrvatskoj u prosjeku čine više od 80 % svih šteta i ekonomskih gubitaka od prirodnih nepogoda. Najveći udio šteta u razdoblju do 1981.-2011. godine (44%) odnosi se na sušu i olujne nepogode i tuču (20%). Nakon 2012. godine povećava se udio poplava uzrokovanih ekstremnom oborinom u uzrocima šteta. Primjerice, štete od poplave 2014. godine prelazile su milijardu kuna i bile su najveće u posljednjih 30 godina. U zadnje vrijeme svake godine svjedočimo i poplavlivanju obalnih područja visokim razinama mora što predstavlja rizik za obalna područja kako urbanog tako i poljoprivrednog karaktera. S klimatskim promjenama raste intenzitet ekstremne oborine, razina mora, te posljedično i rizik od poplava, što ukazuje na važnost daljnjeg unapređenja sustava prognoziranja i upozoravanja.

### 9.1 Sustav prognoziranja i upozoravanja na opasne vremenske prilike

Jedna od temeljnih zadaća DHMZ je upozoravanje na opasne vremenske prilike. Za potrebe rane najave opasnih vremenskih, klimatskih i hidroloških uvjeta, DHMZ provodi prognostičke proračune modelskim sustavom ALADIN-HR koji se koriste kao podloga za sustav upozoravanja i uzbunjivanja, izradu informacija o vremenu te pravovremenu najavu ekstremnih vremenskih uvjeta. Stoga se proces sustava prognoziranja i upozoravanja na DHMZ-u može podijeliti na dvije osnovne komponente:

- Izrada prognoza prognostičkim sustavom ALADIN-HR
- Izrada upozorenja na opasne vremenske prilike

Osnovna komponenta prognostičkog sustava DHMZ-a je numerički model ALADIN (Airee Limiteé Adaptation Dynamique développement InterNational (ALADIN International Team, 1997). ALADIN je spektralni model sa hibridnom vertikalnom koordinatom, koji koristi semi-implicitnu semi-lagrangijansku shemu integracije s dva vremenska koraka. Postoji nekoliko konfiguracija ALADIN modela na DHMZ-u. Osnovna konfiguracija ALADIN-HR4 (Slika 9.1.1) je na horizontalnom koraku mreže od 4 km sa 72 vertikalna nivoa koja od fizikalnih parametrizacija koristi „ALARO paket“ parametrizacija (Termonia, i sur., 2017) koji je razvijen za razlučivost modela koja omogućuje

simulacije konvektivnih procesa („convection permitting resolution“). Takva konfiguracija modela prilagođena je pojavi jake oborine u Hrvatskoj, posebno epizodama kratkotrajnih konvektivnih oborinskih događaja. Vezana za ALADIN-HR4 konfiguraciju je tzv. dinamička adaptacija, konfiguracija koja se izvodi na horizontalnom koraku mreže od 2 km. Model dinamičke adaptacije je osnovni model koji se koristi za operativnu prognozu smjera i brzine prizemnog vjetra.

Sve prognoze modela ALADIN-HR operativno se izrađuju na superračunalu DHMZ-a. Da bi se numeričkim modelom proračunala prognoza za idućih nekoliko dana unaprijed potrebno je poznavati trenutno stanje atmosfere odnosno početne uvjete koji se određuju metodom asimilacije podataka. U postupku asimilacije podataka koriste se brojna meteorološka mjerenja i motrenja nad područjem Hrvatske i okolnih zemalja: prizemna mjerenja (na 2m i 10m), avionska mjerenja, mjerenja polarnih i geostacionarnih satelita te mjerenja meteorološkim balonom (radiosondažna mjerenja). Dnevno na DHMZ za potrebe izrade prognoze vremena modelom ALADIN-HR dolazi oko 400.000 mjernih zapisa. Budući je u modelu ALADIN-HR područje prognoziranja prostorno ograničeno, za proračun su potrebni i meteorološki uvjeti izvan njegove domene (rubni uvjeti) koji se dobivaju od globalnog prognostičkog modela IFS Europskog centra za srednjoročne prognoze vremena (ECMWF).

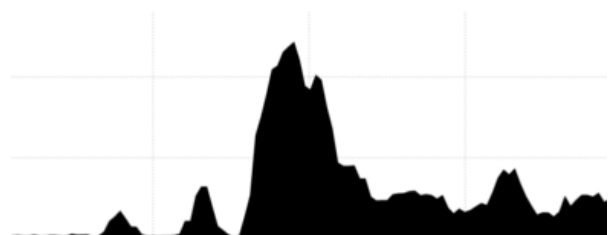
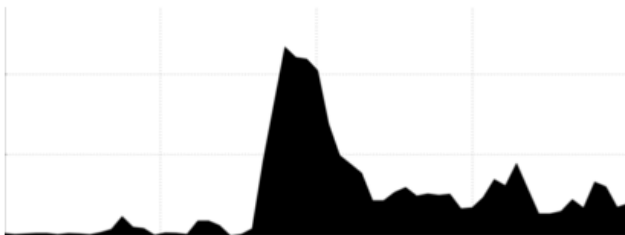
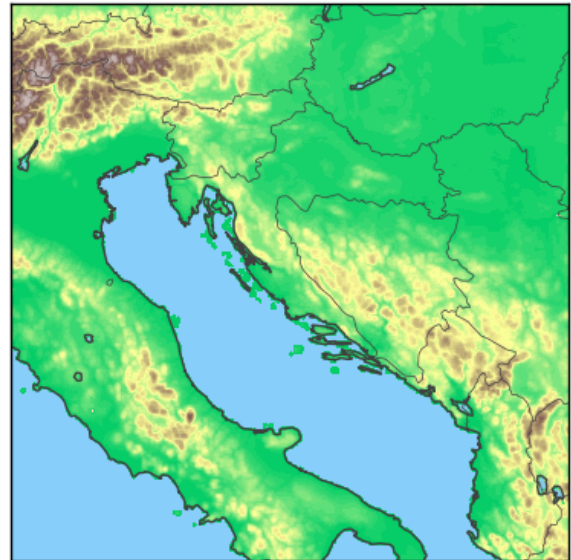
U operativnoj primjeni proračun modela izvršava se četiri puta dnevno, sa vremenom inicijalizacije 00, 06, 12 i 18 UTC (koordinirano svjetsko vrijeme), te prognostičkih razdoblje od 72 sata unaprijed. Točnost, pravovremenost i pouzdanost se pritom smatraju glavnim odrednicama modela. Na DHMZ-u se najveća moguća točnost osigurava kontinuiranim razvojem i usporedbom modela s mjerenjima, pravovremenost prioritarnim i automatiziranim izvršavanjem operativnih procedura na superračunalu, a visoka pouzdanost stalnim dežurstvom 0-24h svaki dan u tjednu tijekom cijele godine.

U Hrvatskoj su uloge i odgovornosti državnih tijela u kriznim situacijama definirane državnim planom i zakonom, a podrazumijevaju suradnju i koordinaciju između DHMZ-a i Operativnog centra civilne zaštite (OCCZ) primjenom Standardnoga operativnog postupka (SOP) za korištenje vremenskih prognoza DHMZ-a (SOP 2006, NN 174/04)(Renko i sur., 2019). U slučaju vremenske nepogode ili bilo koje druge katastrofe SOP-om se regulira sadržaj prognoza i upozorenja te njihovo prosljeđivanje i interpretacija.

ALADIN-HR4



ALADIN-HR2



Slika 9.1.1. Područja (domene) za koje se radi proračun prognoze modelom ALADIN-HR te vertikalni presjek kroz planinu Velebit za dvije konfiguracije modela na različitim horizontalnim razlučivostima.

Osim prema OCZZ-u, upozorenja na opasne vremenske prilike se izdaju prema građanima preko web stranice meteo.hr te preko sustava METEOALARM. METEOALARM je projekt europskih meteoroloških službi udruženih u EUMETNET grupaciji koji putem svog web portala objedinjuje službene prognoze i najave opasnih vremenskih pojava 37 nacionalnih meteoroloških službi za potrebe upozoravanja javnosti. Sustav je namijenjen svima koji borave na području Europe, ali i svijetu te je dostupan na 33 jezika. Upozorenja koja DHMZ šalje u međunarodnu razmjenu, ponajprije sustavom METEOALARM, pripremaju se u digitalnom formatu CAP (Common Alerting Protocol) formatu. CAP je digitalni format za slanje upozorenja koji omogućuje istovremenu distribuciju upozorenja putem više komunikacijskih kanala (mobilne mreže, telefaks, radio, televizija

i ostale vrste digitalne komunikacije putem interneta). Kroz METEOALARM upozorenja se izdaju za sljedeće pojave: jaka kiša, snijeg i led, magla, grmljavinska oluja, olujni udari, toplinski valovi, požari, ekstremna hladnoća s mećavom, lavine te visoki valovi.

U Hrvatskoj se odnedavno izdaju i upozorenja na bujične i urbane poplave. Prvo takvo upozorenje izdano je prije poplave u Zagrebu 24.-25. srpnja 2020. godine (Slika 9.1.2). U svojoj operativnoj prognostičkoj službi DHMZ koristi dva hidrološka prognostička sustava za prognozu i ranu najavu bujičnih poplava: Southeast Europe Flash Flood Guidance System (SEEFFGS) i European Flood Awareness System (EFAS). SEEFFGS prognostički sustav pokreće se redovito 4 puta dnevno u Regionalnom centru projekta SEEFFGS-a. U okviru implementacije Globalnog FFGS-a uspostavljeno je 16 regionalnih projekata. Hrvatska sudjeluje u South East Europe FFGS-u koji je nastao suradnjom WMO-a, DHMZ-a i ostalih nacionalnih hidrometeoroloških službi Jugoistočne Europe. EFAS je operativni europski hidrološki prognostički sustav razvijen s ciljem osiguravanja vremena za provedbu pripremnih mjera prije velikih poplava posebice u velikim transnacionalnim riječnim slivovima. Valja spomenuti i model Sava SM2 - operativni hidrološki prognostički sustav upozorenja na poplave za sliv rijeke Save od granice s Republikom Slovenijom do granice s Republikom Srbijom.



Slika 9.1.2. Meteorološko upozorenje na obilnu oborinu tijekom poplave u Zagrebu 24-25. srpnja 2022.

Upozorenja za pojavu bujičnih poplava na DHMZ-u izrađuju se četiri puta dnevno do 6 sati unaprijed i prosljeđuju se nadležnim tijelima za obranu od poplava. Rezultati mjerenja se dijele na dijagnostičke produkte koji su namijenjeni analizi hidrometeorološke situacije svakog sliva, prognostičke produkte koji daju prognoziranu količinu oborine za pojedino slivno područje i smjernicu na bujičnu poplavu, produkte alarma na bujičnu poplavu i dodatne produkte poput količina vode u snijegu i količina otopljenog snijega na svakom pojedinom slivu. Konačno, upozorenja za visoke razine mora se na DHMZ-u službeno ne izdaju, no u takvim se meteoroloških situacijama kroz medije najavljuje mogućnost njihova učinka.

Boje na kodiranoj karti za upozorenja predstavljaju razinu rizika. Crvena naznačuje vrlo opasne vremenske pojave koje mogu prouzročiti veliku materijalnu štetu i opasne su za živote, potom slijede narančasta i žuta ovisno o intenzitetu nepogode, a zelena znači da se ne previđaju opasne vremenske neprilike. Granice razina se razlikuju od regije do regije, obzirom da vremenske neprilike ne uzorkuju jednake poremećaje i štete na svim područjima. Isto tako postoje razlike između razina upozorenja obalnih i kopnenih područja budući da se vrednuju drugačiji kriteriji i njima popratne posljedice.

## 9.2 Unapređenje sustava prognoziranja i upozoravanja

S obzirom da su upozorenja na opasne vremenske prilike jedna od temeljnih zadaća DHMZ-a, sustav prognoziranja i upozoravanja sustavno se unapređuje. Velik dio razvojnih aktivnosti provodi se u okviru znanstvene jedinice DHMZ-a koji je osim operativne i akreditirana znanstvena organizacija (u registru znanstvenih organizacija od 1976. godine). Temeljna aktivnost znanstvene jedinice DHMZ-a, u kontekstu sustava prognoziranja i upozoravanja, je razvoj modela ALADIN-HR u okviru ACCORD (A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development) konzorcija. ACCORD je u osnovi je projekt suradnje zemalja članica na području numeričke prognoze vremena (NWP). Osnovni zadaci projekta su: (i) razvoj NWP sustava i njegova primjena na ograničenom geografskom području, (ii) rad na maloj domeni i velikoj prostornoj rezoluciji kako bi se prognozirali atmosferski procesi značajni za finu skalu (npr. kratkotrajne oborine i grmljavinska nevremena, lokalni vjetar, zone konvekcije), te (iii) razvoj vrhunskog modela za operativnu numeričku prognozu vremena tako da svi partneri učestvuju u istraživanju i razvoju modela sa svrhom da svaki učesnik projekta može koristiti dobivene rezultate.



Područje Sredozemlja, karakterizirano specifičnim i kompleksnim orografskim obalnim karakteristikama te smješteno na raskrižju dominantnih vremenskih sustava (ciklona), posebno je podložno utjecaju klimatskih promjena. To se ujedno manifestira kroz velik broj i intenzitet lokalnih oluja te grmljavinskih nevremena kojima svjedočimo. Kao njihova posljedica, nerijetko dolazi do značajne materijalne štete na gradskim infrastrukturama uslijed plavljenja uzrokovanog ekstremnim količinama oborine ili zbog udara olujnog vjetra. Atmosferske strukture odgovorne za takve ekstremne meteorološke uvjete nerijetko su dimenzija nekoliko kilometara ili manje te nisu razlučive s trenutnom konfiguracijom ALADIN modela (horizontalna razlučivost 4 km). Da bi se takve pojave mogle adekvatno prognozirati, potrebno je povećati horizontalnu razlučivost ALADIN modela s 4 km na barem 1 km što uzrokuje potrebu za povećanjem računalnih resursa. Trenutno superračunalo DHMZ-a BullSequana XH2000 nabavljeno 2020. godine ima od oko 11.000 jezgri, no u kontekstu prognoze i upozorenja pokriva samo 8% potreba. Značajno povećanje računalnih resursa planira se realizirati kroz financijsku omotnicu 2021-2027.

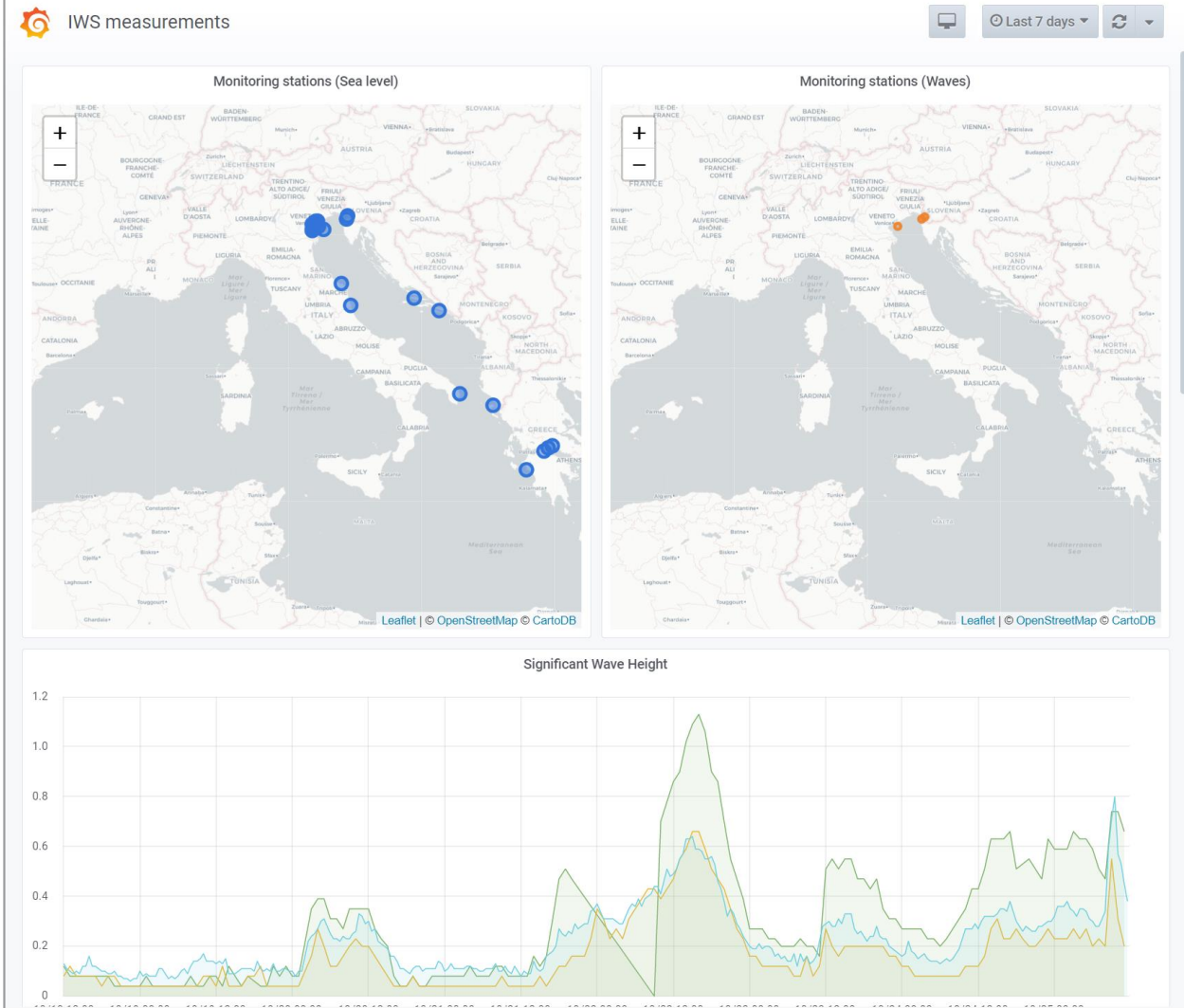
Osim unapređenja samog modela, nekoliko komponenti razvoja prognostičkog sustava ima potencijal značajno poboljšati numeričku prognozu vremena. Posebno se tu ističe važnost novih radarskih mjerenja, koja od 2022. godine pokrivaju područje cijele Hrvatske. Ta mjerenja će omogućiti će bolje početne uvjete za numeričku prognozu putem asimilacije podataka te direktno utjecati na točnost prognoze oborine u iduća 3 dana. Zatim, radarskim mjerenjima imaju svoju moguću primjenu i za metode neposrednog praćenja i vrlo kratkoročne prognoze vremena (npr. nekoliko sati unaprijed) kao i metoda naknadne obrade (*postprocessinga*, kalibracije) za dodatno lokaliziranje prognoze, što su razvojni pravci DHMZ-a za idućih nekoliko godina.

U području Hrvatske za točnost numeričke prognoze ključan je i razvoj združenih komponenti atmosfera-tlo-more. Naime, kako stanje tla (npr. vlažnost tla, sastav) utječe na otjecanje oborine i poplave na kopnu, tako i stanje mora (razina mora, valovi) utječe na poplavljanje obalnog područja. Trenutno su u završnoj fazi razvoja dvije združene komponente novog prognostičkog sustava koje će se implementirati u operativnu primjenu: 1) model valova Wind Wave Model te u kasnijoj fazi model Wave Watch 2) model tla SURFEX koji npr. značajno unapređuje opis urbanog krajobraza. Znanje i iskustva sa korištenjem modela olujnog uspora za simuliranje razine mora u Hrvatskoj postoje u više istraživačkih grupa, no nedostaju aktivnosti vezane za punu operativnu primjenu ovih modela. Slično je i sa uspostavom oceanografskog sustava na skali Jadrana i priobalnih područja hrvatskog dijela Jadrana oceanografskim modelima, te sa uspostavom modela drifta i dinamike naftnog zagađenja.

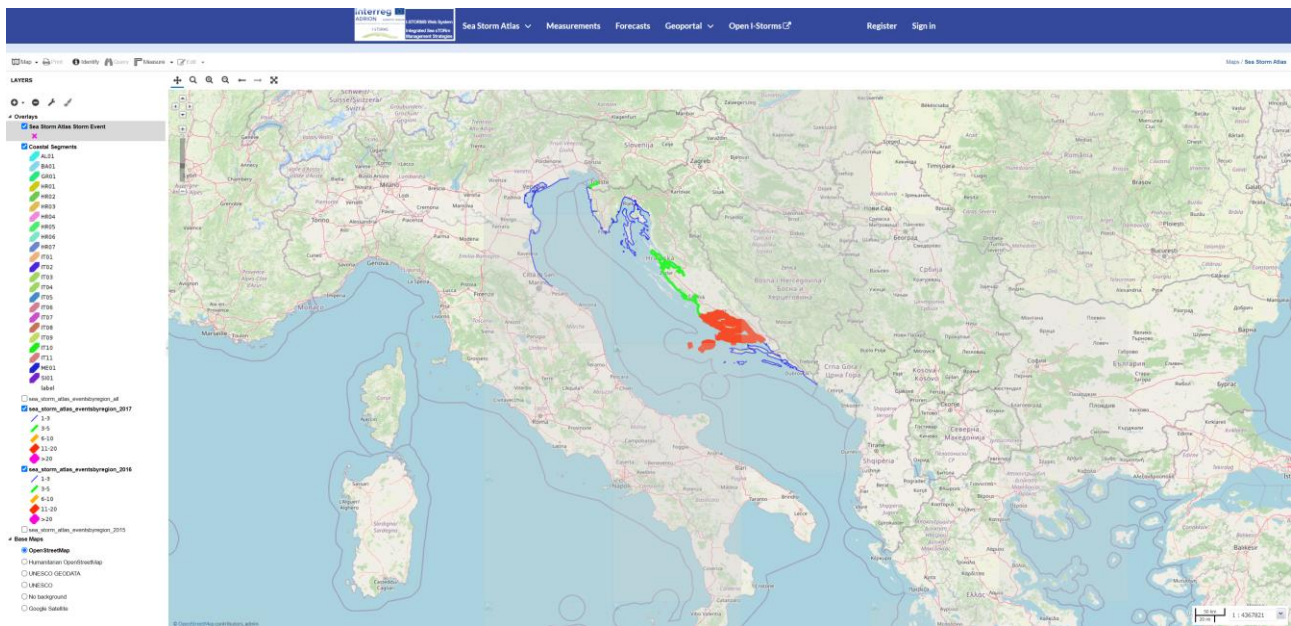
Korak naprijed prema operativnoj primjeni ovih modela napravio je projekt I-STORMS koji je razvio interoperabilnu informacijsku platformu - geoportal za oceanografska mjerenja i prognostičke modele cirkulacije mora za potrebe ranih upozorenja na mogućnosti plavenja mora (<https://istorms.adrioninterreg.eu/>). Navedeni geoportal sastoji se od centralnog I-STORMS portala (<https://www.seastorms.eu/>, Slika 9.2.1), portala s mjerenjima IWS Measurements (<https://iws.seastorms.eu/dashboards/>, Slika 9.2.2) u kojem su dani povijesni i aktualni podaci o razinama mora i valovima, atlasa Sea Storm ([https://iws.seastorms.eu/sea\\_storm\\_atlas/map](https://iws.seastorms.eu/sea_storm_atlas/map), Slika 9.2.3) koji sadrži katastar povijesnih poplava s mora, te prognostičkog modula TMES u kojem su dane prognoze oceanografskih parametara (<https://iws.seastorms.eu/tmes/>, Slika 9.2.4).



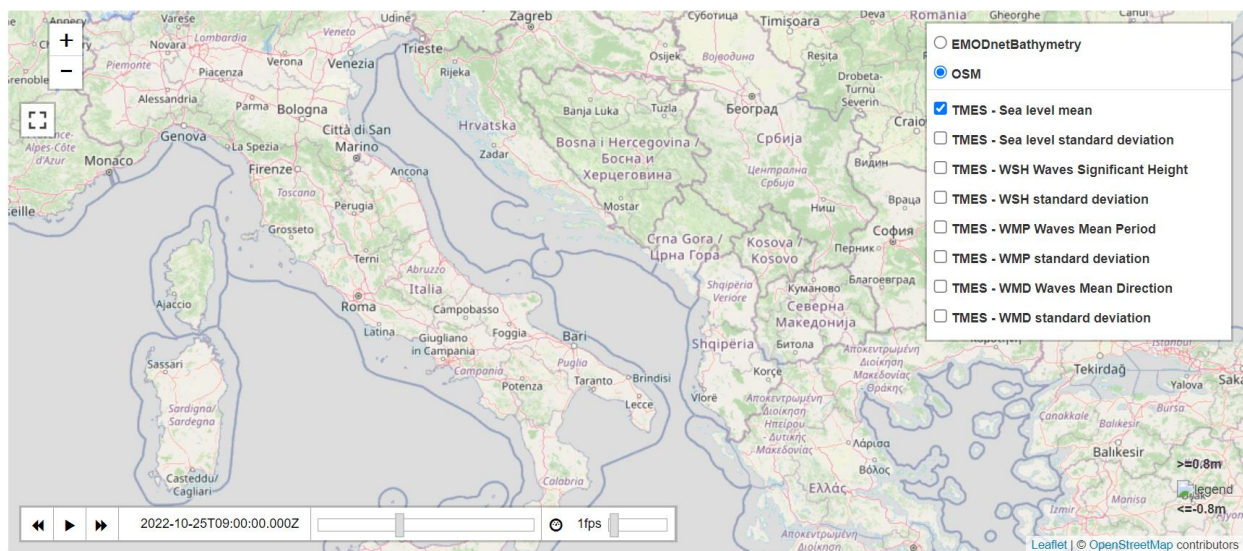
Slika 9.2.1. I-STORMS geoportal (<https://www.seastorms.eu>)



Slika 9.2.2. Geoportal IWS Measurements (<https://iws.seastorms.eu/dashboards/>)



Slika 9.2.3. Sea Storm Atlas ([https://iws.seastorms.eu/sea\\_storm\\_atlas/map](https://iws.seastorms.eu/sea_storm_atlas/map))



This map viewer is based on Leaflet JS and Leaflet Time Dimension.

Slika 9.2.4. Prognostički modul TMES (<https://iws.seastorms.eu/tmes/>)

Što se tiče sustava prognoziranja i upozoravanja, jedan od razvojnih ciljeva je povećati broj regija za koja se izdaju upozorenja (sada osam), odnosno uskladiti regije upozorenja s administrativnih granicama županija i pripadnih civilnih službi. Drugo, kako bi mogli poduzeti odgovarajuće mjere za smanjenje rizika od vremenskih i hidroloških pojava, nadležne službe i javnost trebaju razumjeti na koji način predstojeća vremenska nepogoda može utjecati na njihov život, imovinu te infrastrukturu i ekonomiju zajednice (Renko et al., 2019). Kvalitetnija veza između same meteorološke pojave i razumijevanja što ona može prouzročiti na određenom prostoru i u određeno vrijeme može se premostiti izdavanjem upozorenja koja će se zasnivati na mogućem utjecaju opasne vremenske pojave na društvo, ljudske živote, imovinu i gospodarstvo, tzv. *impact-based* upozorenja. Pri tome, učinke ekstremnih vremenskih prilika treba promatrati kako u fizikalnom tako i socio-ekonomskom kontekstu. Primjer takvog upozorenja utjecaja predstavlja utjecaj obilne i intenzivne kiše na promet tijekom prometne gužve u urbanom području. Usmjeravanje sustava upozoravanja prema takvim vrstama upozorenja koja imaju veći potencijal da umanje posljedice opasnih vremenskih prilika je već u tijeku i nastavit će se idućih godina.

## 10 Probabilistički model prognoziranja pluvijalnih poplava u Zadru

### 10.1 Uvodno o modelima prognoziranja pluvijalnih poplava

Jedan od ciljeva projekta STREAM je razviti model prognoziranja pluvijalnih poplava za urbano područje Grada Zadar. Prognostički model temelji se na 20-godišnjim podacima prikupljenim iz novinskih izvješća i kontinuiranim meteorološkim podacima visoke razlučivosti. U tu svrhu provedena je analiza dva pristupa izradi modela za prognoziranje pluvijalnih poplava:

- Model koji se temelji na definiranju praga kritičnih količina oborine te
- Model koji se temelji na strojnom učenju.

U prvom pristupu definira se prag količine oborina za različita trajanja koji opisuje kritične vrijednosti koje ako budu nadmašene mogu uzrokovati plavljenje urbanog područja. U drugom pristupu koriste se različiti modeli strojnog učenja čiji osnovni zadatak je da skupove količine oborina različitog trajanja klasificiraju u događaje koji uzrokuju plavljenje (poplavni događaji) i događaje koji ne uzrokuju plavljenje (neplavni događaji).

Za početak daje se pregled novinskih izvještaja po pluvijalnim poplava na području Zadra, nakon toga daje se pregled osnovnih sezonskih (međugodišnjih) karakteristika oborina u Zadru, potom pregled potencijalnih rješenja i pristupa te rezultati analize točnosti i pouzdanosti predloženih rješenja za prognoziranje pluvijalnih poplava.

Treba napomenuti da su u okviru testiranja predloženih rješenja korišteni izmjereni podaci o oborinama, ali je model namijenjen da koristi meteorološke prognoze, što može umanjiti učinkovitost modela. Prognoze za koji je postavljen predloženi pristup temelji se na modelu ALADIN Državnog hidrometeorološkog zavoda, čiji proizvodi uključuju, među ostalim, XML datoteke meteograma (vremenskog tijeka meteoroloških parametara) koji su dostupni 72 sata unaprijed za sve veće gradove u Republici Hrvatskoj.



### 10.2.2 Obrada podataka

Količine oborina u Zadaru mjere se službenim ombrografom na meteorološkoj postaji Zadar. Podaci imaju vremensku rezoluciju od 5 minuta i preciznost 0,1 mm. U svrhu predmetne analize korišteni su kontinuirani vremenski zapisi 5-minute količine oborine zabilježeni u razdoblju od 2000. – 2020. Pritom su određene i satne, dnevne i mjesečne količine oborina za preliminarnu analizu oborinskog režima na predmetnom području.

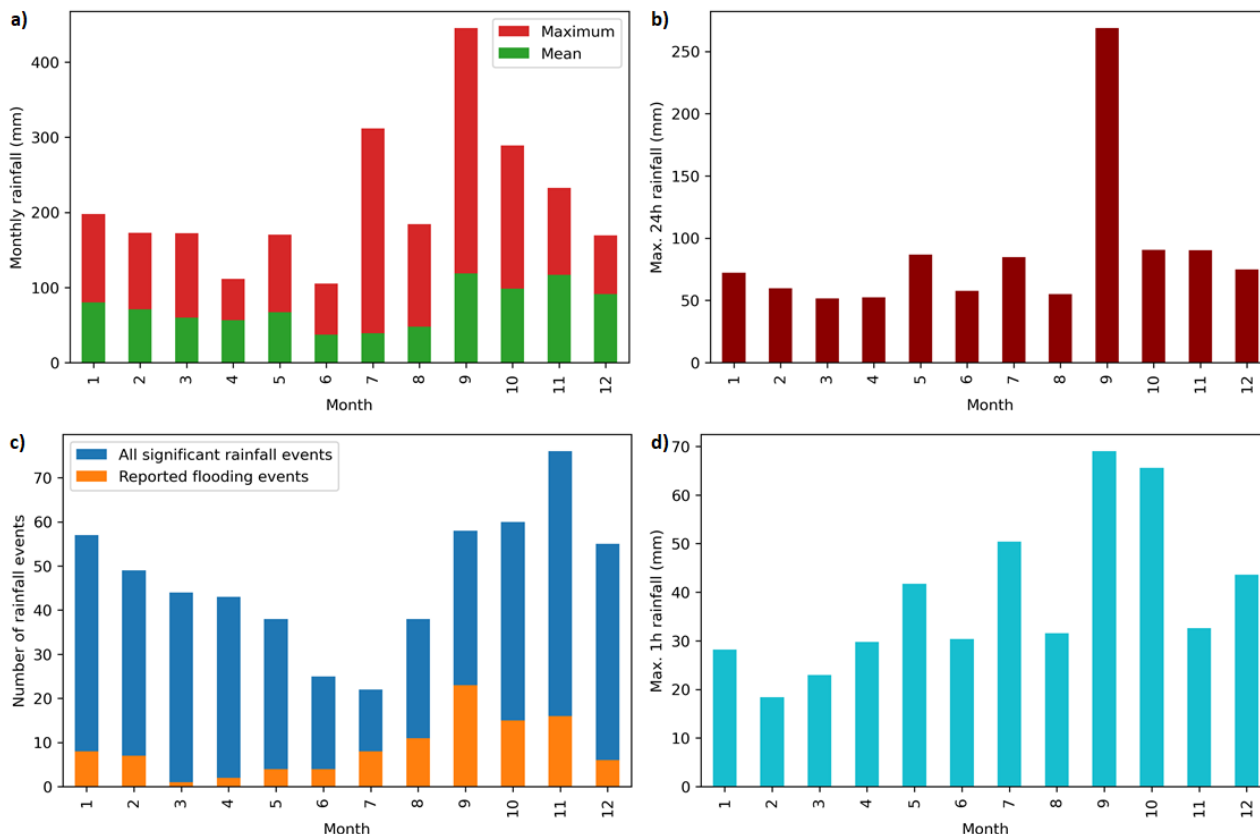
Na Slici 10.2.2. prikazana je međugodišnja raspodjela maksimalnih (i srednjih) mjesečnih, dnevnih i satnih oborina, kao i broj poplava evidentiranih u Biltenu. Srednje mjesečne oborine imaju najviše vrijednosti tijekom jeseni (rujan – prosinac), dok se maksimalne mjesečne vrijednosti uz jesen javljaju i tijekom ljeta (srpanj). Maksimalne dnevne oborine su relativno ravnomjerno raspoređene po mjesecima, pritom se svakako ističe ekstremni događaj iz rujna 2017. godine, koji je izazvao velik poplave te uzrokovao znatnu materijalnu štetu ([https:// www.eumetsat.int/flash-floods-zadar-and-surrounding-areas](https://www.eumetsat.int/flash-floods-zadar-and-surrounding-areas)). Kada se promatraju maksimalne satne oborine, tada se najveće vrijednosti javljaju tijekom rujna, listopada i srpnja., što pokazuje određenu međusobnu povezanost s maksimalnih mjesečnim količinama.

Promatrajući broj kišnih događaja, može se općenito zaključiti kako se najveći broj kišnih događaja u promatranom razdoblju dogodio u studenom te ostalim jesenjim mjesecima (rujan do prosinac), međutim promatrajući broj jakih kišnih događaja koji su rezultirali poplavama, najveći broj se događa u rujnu te potom u listopadu i studenom. Prema Biltenu gotovo svake godine jedna poplava u rujnu prouzroči pluvijalnu poplavu u Zadru.

Ombrografski podaci su potom obrađeni za daljnju analizu – prognozu poplava. U prvom koraku izdvojeni su pojedinačni pljuskovi (kišni događaji) koji su identificirani kao kišni događaji omeđeni razdobljem od 12 sati bez oborine. Iz niza kišnih događaja za daljnju analizu odabrani su oni događaji koji sadrže barem 10 mm oborine. Nakon navedena dva korak preostalo je 565 relevantnih oborina od ukupno 1456 kišnih događaja koji su zabilježeni tijekom razdoblja od 2000. do 2020. godine. Na Slici 10.2.3 prikazani su sve zabilježene i odabrane oborine s prikazom histograma i odnosa između količine oborine i trajanja oborine. Treba naglasiti da kišni događaji mogu potrajati i po nekoliko dana, iako je većina trajanja ispod 12 sati. Kao i prethodno, jedan događaj koji odskače od preostalih s gotovo 300 mm oborine u nešto manje od 40 sati je ekstremna oborina iz rujna 2017. godine.



Zadar (2000.-2020.)

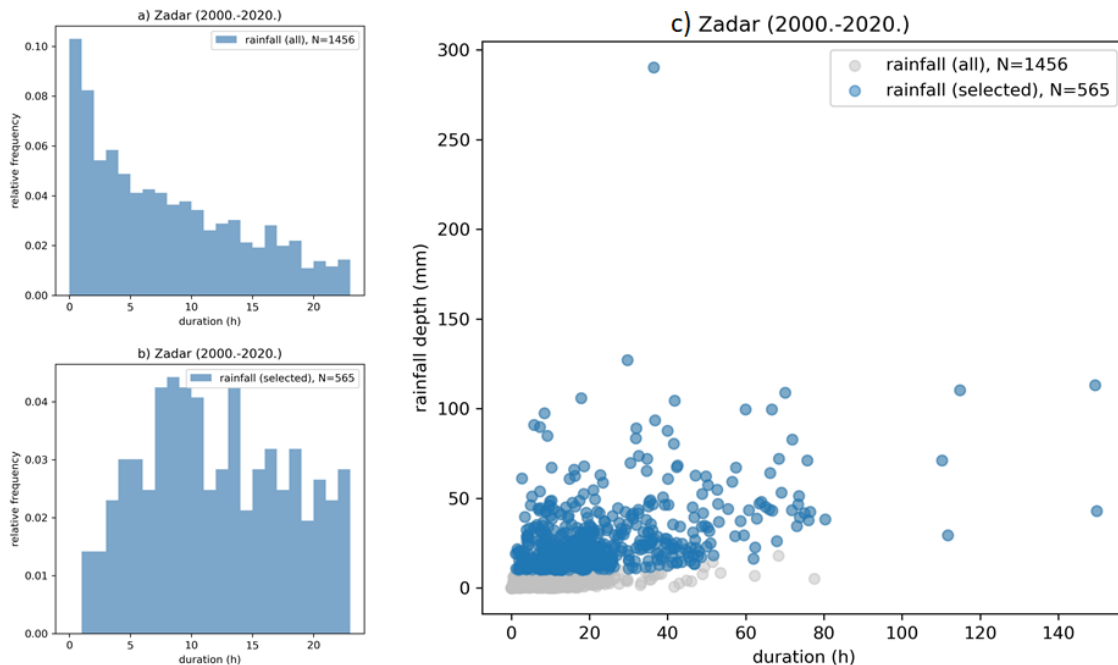


Slika 10.2.2. Međugodišnja statistika oborina u Zadru (2000.-2020.): a) srednja i maksimalna mjesečna količina oborine, b) maksimalna dnevna količina oborine, c) broj svih događaja i onih koji su prouzročili poplavu te d) maksimalna jednosatna količina oborine.

Za svaki odabrani kišni događaj, maksimalna dubina padalina  $H_{max}(t)$  za svako razmatrano trajanje  $t$  (vremenska skala) izračunata je pomoću sljedećeg izraza:

$$H_{max}(t) = \max_j \left\{ \sum_{k=1}^{t/5} H_5(k), \dots, \sum_{k=1+j}^{t/5+j} H_5(k), \dots, \sum_{k=1+(1440-t)/5}^{1440/5} H_5(k) \right\} \quad (10.1)$$

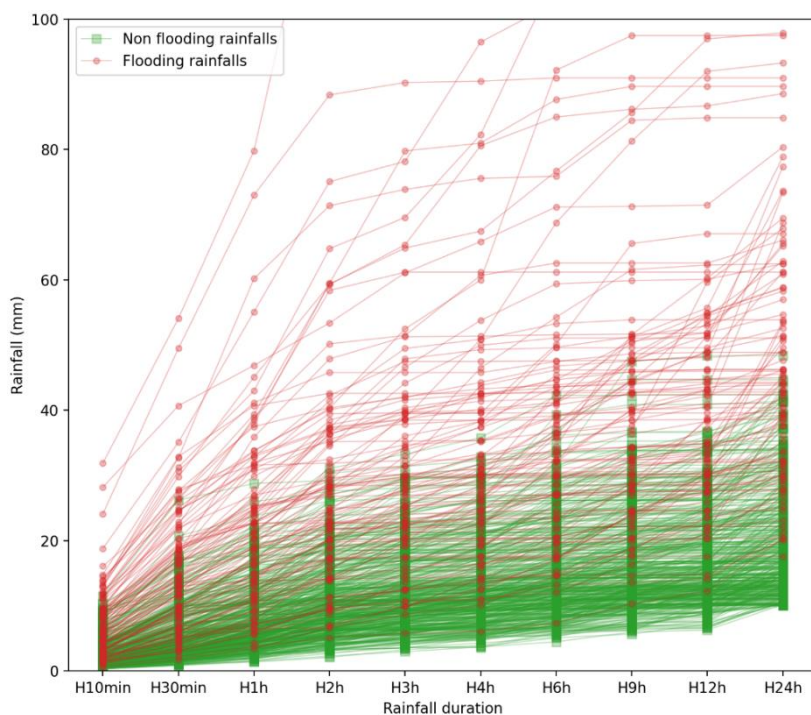
gdje  $j = 0, 1, \dots, N$ , s  $N = (1440-t)/5$  broj sumiranih količina oborina za svako trajanje,  $H_5$  je dubina oborina od 5 minuta, a  $t$  su trajanja oborina. Treba naglasiti da svaka stavka u zagradi jednadžbe (10.1) predstavlja  $t$ -min količinu oborina akumuliranu iz  $k$  5-minutnih količina, a  $H_t$  je tada najveća vrijednost svih kumulativnih oborina za odabrano trajanje.



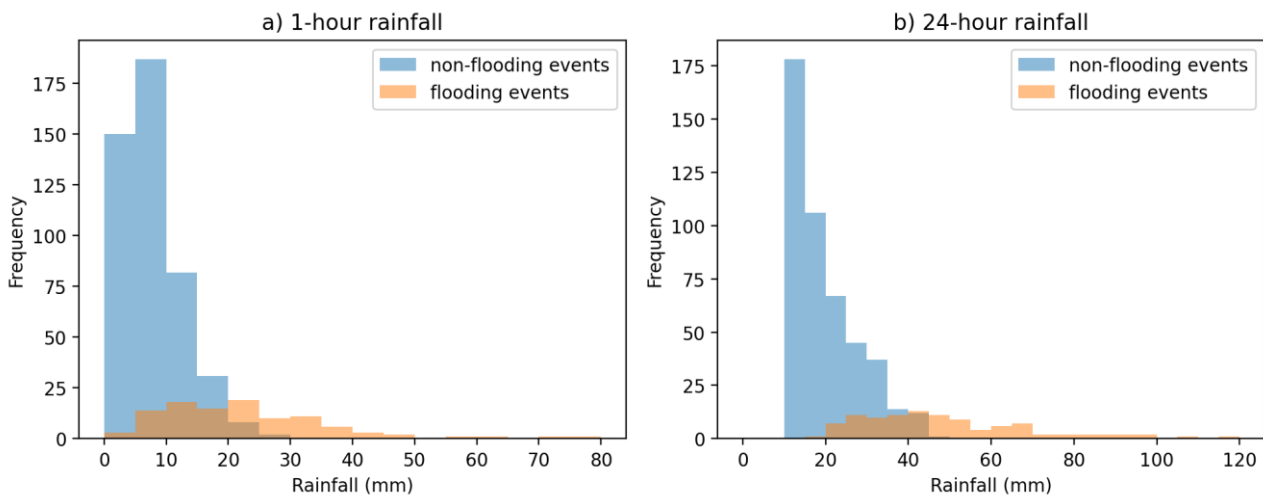
Slika 10.2.3. Pojedinačni oborinski događaji u Zadru (2000.-2020.): a) histogram trajanja za sve oborinske događaje, b) histogram trajanja za značajne (odabrane) oborinske događaje i c) ukupna dubina oborina u odnosu na trajanje za sve i odabrane oborinske događaje.

Slika 10.2.4 prikazuje krivulje dubine i trajanje za sve odabrane kišne događaje različitog trajanja klasificirane kao poplavni ili neplavni događaji na temelju prikupljenih i obrađenih vijesti. Glavni izazov kod klasificiranja ovih događaja na temelju količine oborina je visok postotak preklapanja poplavnih i neplavnih događaja za sva razmatrana trajanja. Ovo je dodatno ilustrirano na Slici 10.2.5 histogramima količina oborina za reprezentativno kratko trajanje (1 sat) i dugo trajanje (24 sata). Prikazani rezultati sugeriraju da se i poplavni i neplavni događaji mogu dogoditi kada je 1-satna količina padalina u rasponu od 0-30 mm, a 24-satna dubina oborina u rasponu od 20-50 mm, što otežava odabir odgovarajućeg praga za prognožiranje poplava na temelju količine oborine.

Za daljnju analizu, odnosno model prognoze pluvijalnih poplava, koriste se oborine trajanja 3, 6, 12 i 24 sata, s obzirom da DHMZ javno objavljuje prognoze u koracima od 3 sata ([https://meteo.hr/proizvodi.php?section=podaci&param=xml\\_korisnici](https://meteo.hr/proizvodi.php?section=podaci&param=xml_korisnici)).



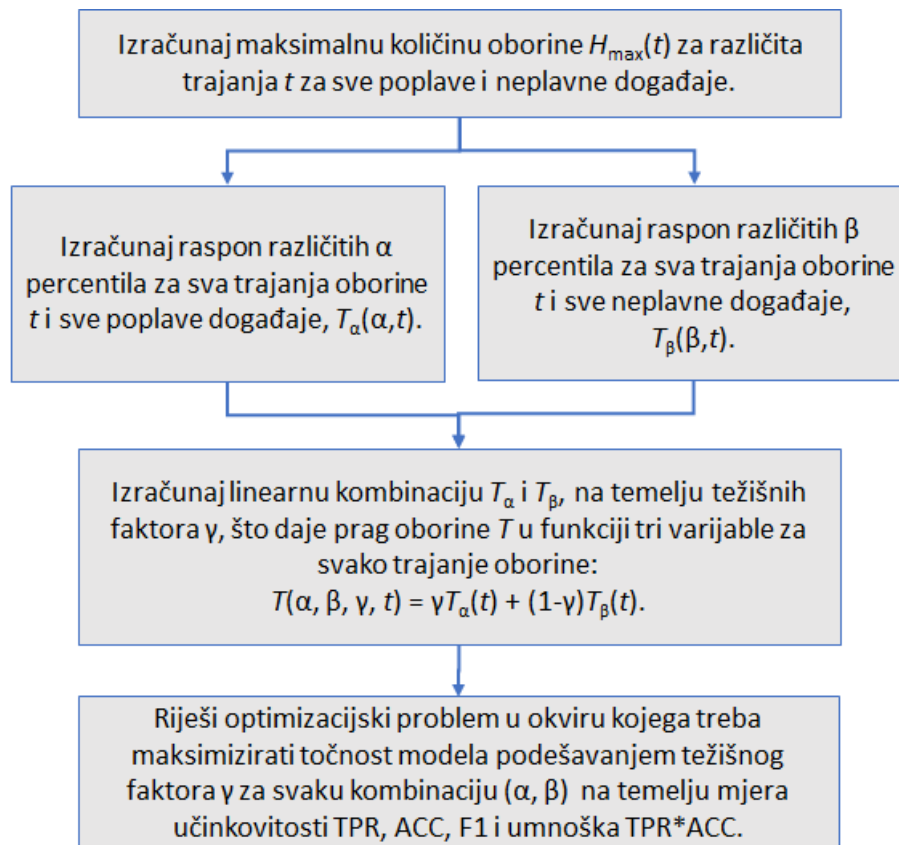
Slika 10.2.4. Krivulje trajanja i dubine za sve odabrane kišne događaje različitog trajanja klasificirane kao poplavni (crvena boja) i neplavni (zelena boja) događaji na temelju novinskih izvješća iz Biltena.



Slika 10.2.5. Histogram poplavnih i neplavnih količina oborina trajanja 1 i 24 sata.

### 10.2.3 Pristup 1: Model praga kritične količine oborina

Konvencionalan i jednostavan pristup za prognozu poplava je prag kritične količine oborine (eng. *critical rainfall threshold*) (Martina i sur., 2006; Yang i sur., 2016; Tian i sur. sur., 2019; Ke i sur., 2020.). Prag kritične količine oborine definiran je jednom količinom oborine ili nekoliko različitih količina za različita trajanja oborine (tzv. krivulja praga kritične količine oborine), iznad koje se smatra da je izgledno da će doći do poplave (Ke i sur., 2020). Navedeni pristup učestalo se koristi za predviđanje klizišta (Giannecchini i sur., 2012; Hong i sur., 2018), pronosa nanosa (Pan i sur., 2018) i bujičnih poplava (Zhai i sur., 2018). Uobičajeni pristup je da se prognozirana količina oborine uspoređuje s unaprijed definiranim pragom; u slučaju da količina oborine prelazi prag proglašava se upozorenje na poplave.



Slika 10.2.6. Dijagram toka za procjenu krivulje praga kritične količine oborina za pluvijalne poplave (modificirano prema Ke i sur., 2020.)

U predmetnoj studiji koristi se metodologija autora Ke i sur. (2020) za prognoziranje pluvijalnih poplava uz neke manje izmjene. Krivulja praga kritičnih količina oborine definirana je maksimalnim količinama oborine za različita odabrana trajanja. Treba naglasiti da dobivene krivulja nije kumulativne krivulja oborine, već niz diskretnih vrijednosti maksimalnih količina za svako trajanje (slično standardnim HTP krivuljama). Nadalje, usvojena je pretpostavka da će se pluvijalna poplava dogoditi kada promatrana maksimalna količina oborine bilo kojeg razmatranog trajanja premaši krivulju praga kritične količine oborina. Dijagram toka s glavnim koracima za procjenu krivulje praga kritičnih oborina prikazan je na Slici 10.2.6. Konkretno, u ovoj analizi, parametri  $\alpha$  i  $\beta$  u rasponu su od 0,0 – 0,5 odnosno 0,5 – 1,0, dok je  $\gamma$  u rasponu od 0,0 – 1,0.

#### 10.2.4 Pristup 2: Model strojnog učenja

Metode strojnog učenja (eng. *Machine Learning*, ML), posebno metode nadziranog učenja, su algoritmi koji se treniraju na podskupu podataka, a zatim testiraju na drugom podskupu podataka kako bi se potvrdila njihova točnost za buduće podatke. Općenito, nadzirane metode ML koriste se za klasifikaciju (prepoznavanje kategorije kojoj objekt pripada) ili probleme regresije (predviđanje međuodnosna između dviju vrijednosti). Predviđanje poplava tipičan je problem klasifikacije – procjena pripada li pojedinačna oborina (ili širi skup hidroloških varijabli) kategoriji „poplavnih događaja“ ili „neplavnih događaja“, odnosno prognozira se hoće li određena oborina uzrokovati plavljenje ili neće. S obzirom na veličinu podataka (količine oborina) i binarni ishod, u predmetnoj analizi odabrano je testirano 10 klasifikacijskih ML algoritama iz pet glavnih ML kategorija: a) linearni modeli, b) strojevi s potpornim vektorima (eng. *Support Vector Machines*, SVM), c) diskriminantna analiza (eng. *Discriminant Analysis*, DA), d) stabla odlučivanja (eng. *Decision Trees*, DT), i e) najbliži susjedi (eng. *Nearest Neighbours*, NN) (vidi Tablicu 10.2.1). Svi ML algoritmi implementirani su u Python programskom jeziku koristeći paket *scikit-learn* (Pedragosa i sur., 2011.).

#### 10.2.5 Kriteriji za procjenu točnosti modela

Za sve razmatrane pristupe skup podataka je slučajnim odabirom podijeljen na podskupove za treniranje i testiranje u omjeru 70:30, što je rezultiralo s 395 događaja za treniranje i 170 događaja za testiranje.

Točnost i pouzdanost oba modela ocijenjena je pomoću nekoliko pokazatelja. Budući da se radi o problemu binarne klasifikacije, očekuju se samo četiri moguća ishoda:

- Stvarno pozitivan (TP) – model je ispravno identificirao poplavni događaj

- Stvarno negativan (**TN**) – model je ispravno identificirao događaj bez poplave
- Lažno pozitivno (**FP**) – događaj koji nije uzrokovao poplavu je pogrešno identificiran kao poplavni događaj
- Lažno negativan (**FN**) – poplavni događaj pogrešno identificiran kao događaj bez poplave

Na temelju broja ova četiri ishoda nadalje se računa nekoliko pokazatelja:

- Osjetljivosti **TPR** =  $TP / (TP + FN)$
- Specifičnost **TNR** =  $TN / (TN + FP)$
- Pozitivna prediktivna vrijednost **PPR** =  $TP / (TP + FP)$
- Negativna prediktivna vrijednost **NPR** =  $TN / (TN + FN)$
- Preciznost **ACC** =  $(TN + TP) / (TN + TP + FN + FP)$
- F1 rezultat **F1** =  $2 * (TPR * PPR) / (TPR + PPR)$

Uz ove klasične pokazatelje bodovanja, također je proračunat i umnožak osjetljivosti i preciznosti TPR i ACC kao kombiniranu mjeru TP R\_ACC.

Tablica 10.2.1. Metode strojnog učenja primijenjene za prognozu pluvijalnih poplava

Br.	Kategorija modela	Model	Parametri
0	Linearni model	<i>Logistička regresija</i>	Bez penala
1	Strojevi s potpunim vektorima	<i>Klasifikacija pomoću potpornih vektora</i>	Linearni kernel
2			Kvadratni kernel
3			Kubni kernel
4	Diskriminantna analiza	<i>Linearna</i>	SVD rješavač
5		<i>Kvadratna</i>	-
6	Stabla odlučivanja	<i>Klasifikacija pomoću stabla odlučivanja</i>	8 čvorova
7			18 čvorova
8	Najbliži susjedi	<i>Klasifikacija pomoću k-broja susjeda</i>	3 susjeda
9			15 susjeda
			Euklidska udaljenost

## 10.3 Rezultati modela prognoziranja pluvijalnih poplava u Zadru

### 10.3.1 Točnost model praga kritične količine oborina

Koristeći podskup podataka za treniranje koji se sastoji od 76 kišnih događaja koji su uzrokovali plavljenje i 319 događaja koji nisu uzrokovali plavljenje provedena je Monte Carlo analiza različitih kombinacija parametara  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ . Iz skupa od nekoliko tisuća kombinacija odabrane su tri najbolje krivulje praga kritične količine oborina, koje imaju najbolju vrijednost prema jednoj od promatranih mjera točnosti. Vrijednosti najbolje tri krivulje za trajanja 3, 6, 12 i 24 sata prikazane su u Tablici 10.3.1. Ove tri krivulje su potom primijenjene na podskupu za testiranje koji se sastoji od 29 kišnih događaja koji su uzrokovali plavljenje i 141 kišnog događaja koji nisu uzrokovali plavljenje. Točnost svake od triju odabranih krivulja procijenjena je pomoću prethodno navedenih mjera točnosti, što je zbirno prikazano matricom zabune (eng. *confusion matrix*) na Slici 10.3.1. Uz to, usporedba krivulja količine i trajanja oborine (poplavni i neplavni događaji) s tri izvedene krivulje praga kritične količine oborine ilustrirana je na Slici 10.3.2.

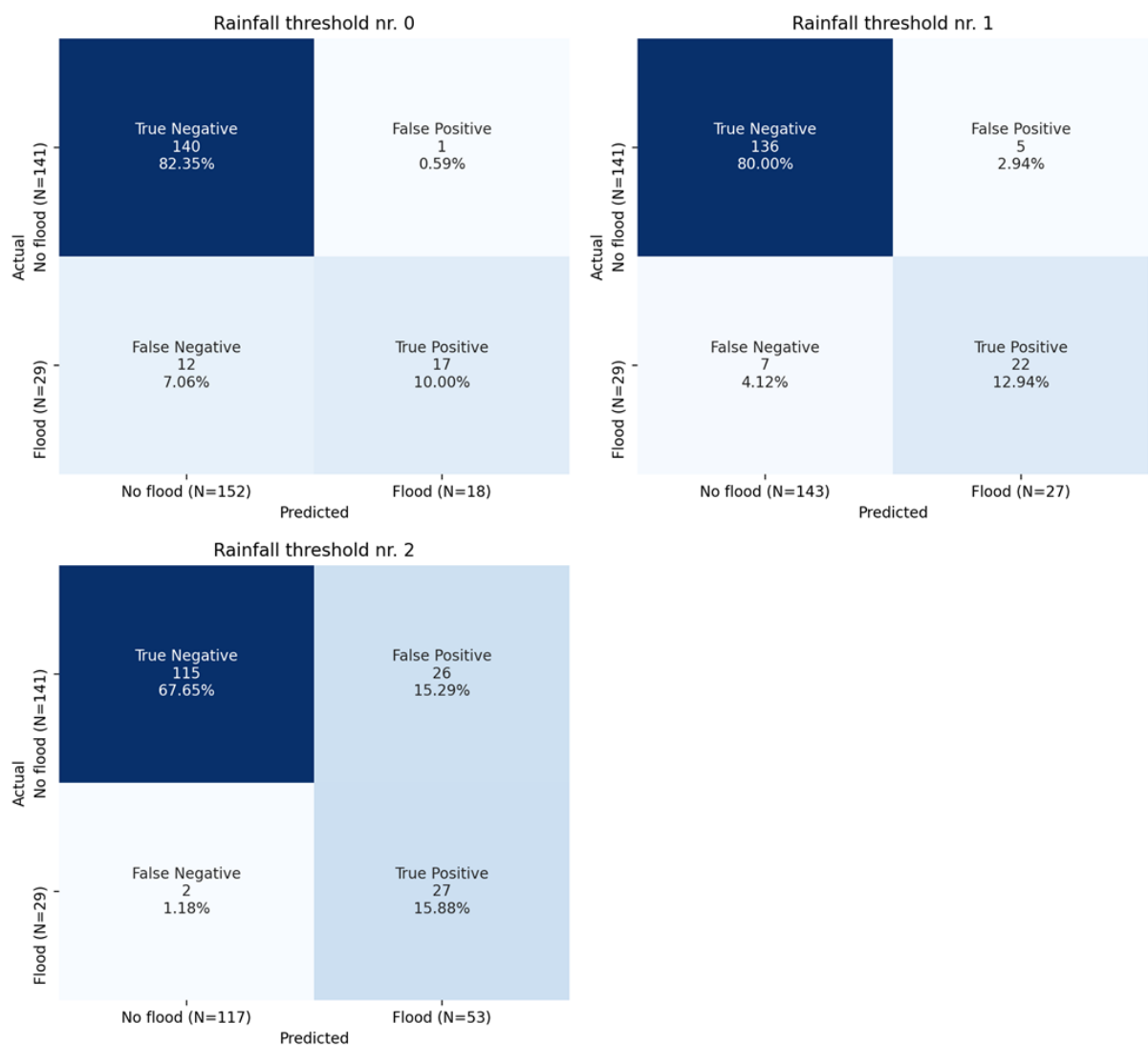
Sve tri krivulje imaju točnost (ACC) između 0,84 i 0,93 (Tablica 10.3.2). Krivulja br. 0 ima najbolju specifičnost (TNR) i pozitivnu prediktivnu vrijednost (PPR), međutim ima nisku osjetljivost. Krivulja br. 1 ima najveću točnost (ACC) i F1 rezultat, međutim ima nešto nižu pozitivnu prediktivnu vrijednost (PPR). Krivulja br. 2 ima najvišu osjetljivost i negativnu prediktivnu vrijednost te kombiniranu ocjenu. Pojednostavljeno rečeno, krivulja br. 0 ima visoko postavljen prag, stoga ako se dogodi oborina iznad tog praga vrlo je velika vjerojatnost da će se poplava i dogoditi, međutim također je i znatan broj događaja kada se poplava može dogoditi, a ovim pragom ona neće biti predviđena. S druge strane, krivulja br. 2 ima nisko postavljen prag i daje konzervativne prognoze, vrlo je visoka vjerojatnost da će svaka poplava biti predviđena ovom krivuljom, međutim u osom slučaju moguć je visok broj „lažnih uzbuna“. Krivulja br.1 ima prag postavljen između druge dvije krivulje, što je čini svojevrsnim kompromisom između „lažnih uzbuna“ i „propuštenih poplava“. Treba također istaknuti da i za najviši prag količine oborina imaju povratni period manji od jedne godine.

Tablica 10.3.1. Pragovi kritične količine oborine (mm) različitog trajanja za najbolje tri krivulje.

Krivulja	H <sub>3h</sub>	H <sub>6h</sub>	H <sub>12h</sub>	H <sub>24h</sub>
0	33.3	42.3	44.7	44.7
1	28.5	34.7	38.7	39.2
2	18.8	25.3	29.4	31.4

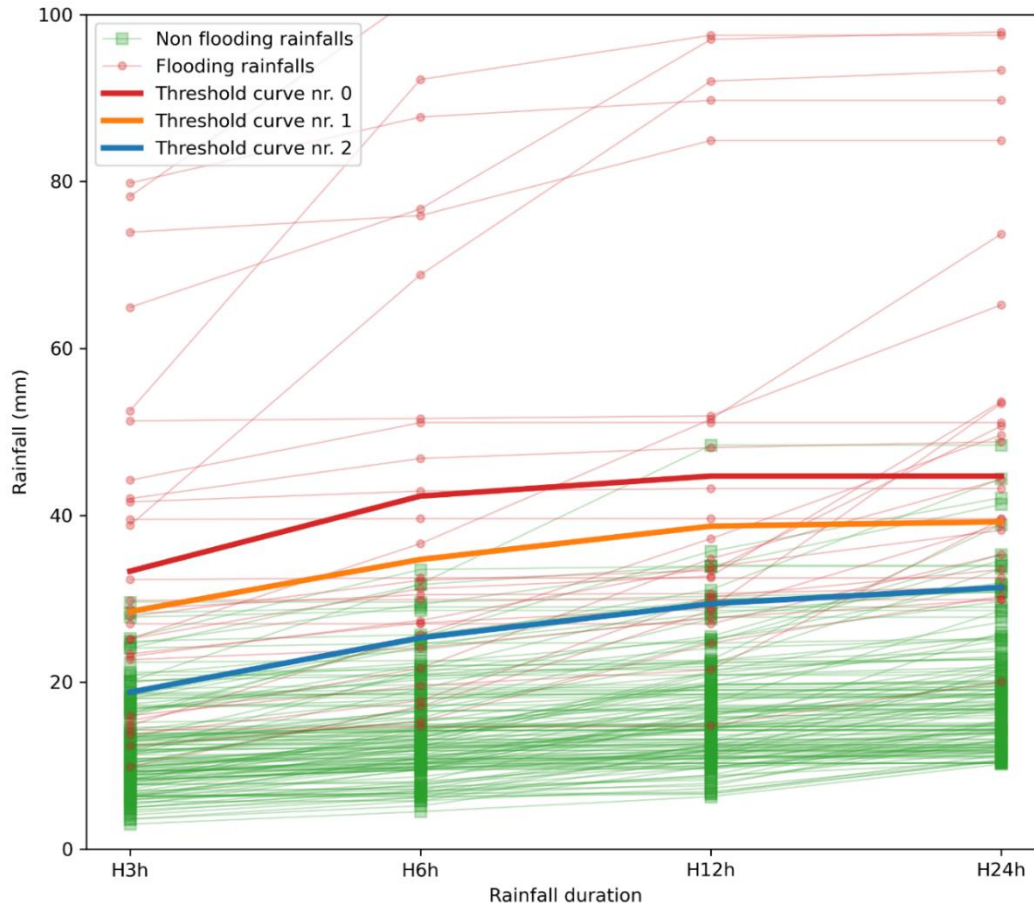
Tablica 10.3.2. Parametri i mjere točnosti za najbolje tri krivulje praga kritične količine oborine.

Krivulja	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	TPR	TNR	PPR	NPR	ACC	F1	TPR_ACC
0	0.0	1.0	0.0	0.59	<b>0.99</b>	<b>0.94</b>	0.92	0.92	0.72	0.54
1	0.18	1.0	0.35	0.76	0.96	0.81	0.95	<b>0.93</b>	<b>0.79</b>	0.71
2	0.1	1.0	0.7	<b>0.93</b>	0.82	0.51	<b>0.98</b>	0.84	0.66	<b>0.78</b>





Slika 10.3.1. Matrica zabune za tri najbolje krivulje praga kritične količine oborine.



Slika 10.3.2. Krivulje praga kritične količine oborine za različita trajanja i poplavni i neplavni događaji.

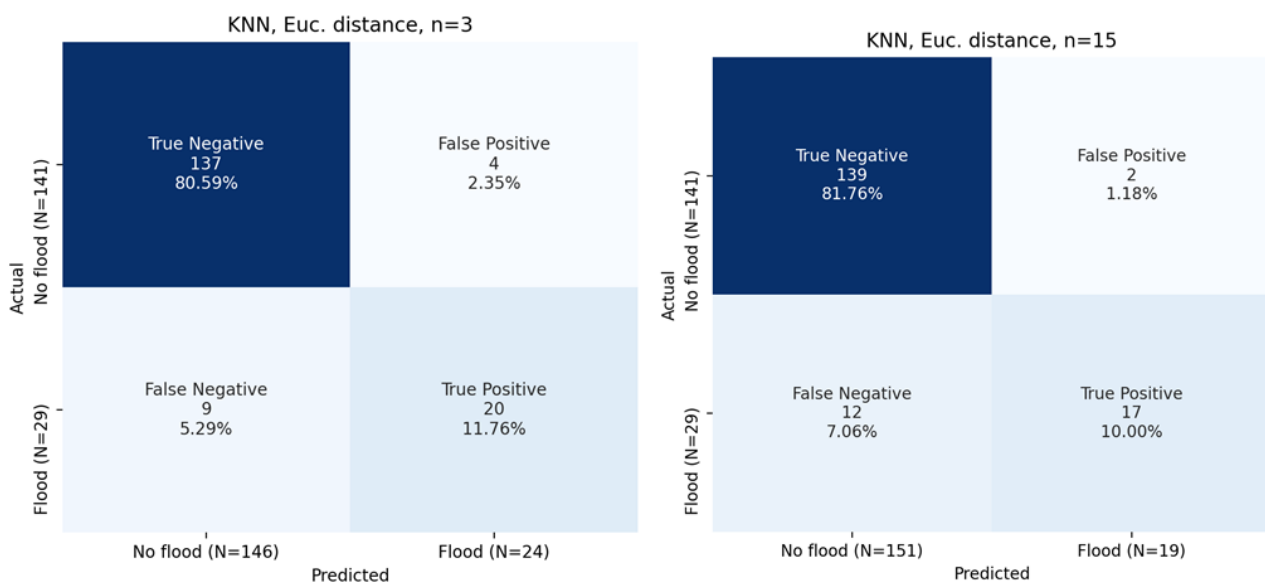
### 10.3.2 Točnost modela strojnog učenja

Modeli strojnog učenja (ML) trenirani su i testirani pomoću istog skupa podataka kao i model kritičnog praga. Nakon treniranja, učinkovitost svakog modela procijenjena je prema mjerama točnosti. Matrice zabune za sve modele prikazane su na Slikama 10.3.3 – 10.3.5, a mjere točnosti dane su u Tablici 10.3.3. Učinkovitost svih modela temeljenih na kombinaciji mjera ACC i TPR prikazana je na Slici 10.3.6. Svi ML modeli imaju točnost između 0,87 i 0,94, što je vrlo slično točnosti modela praga kritičnih količina oborine. Tri najbolja modela ML-a su diskriminantna analiza

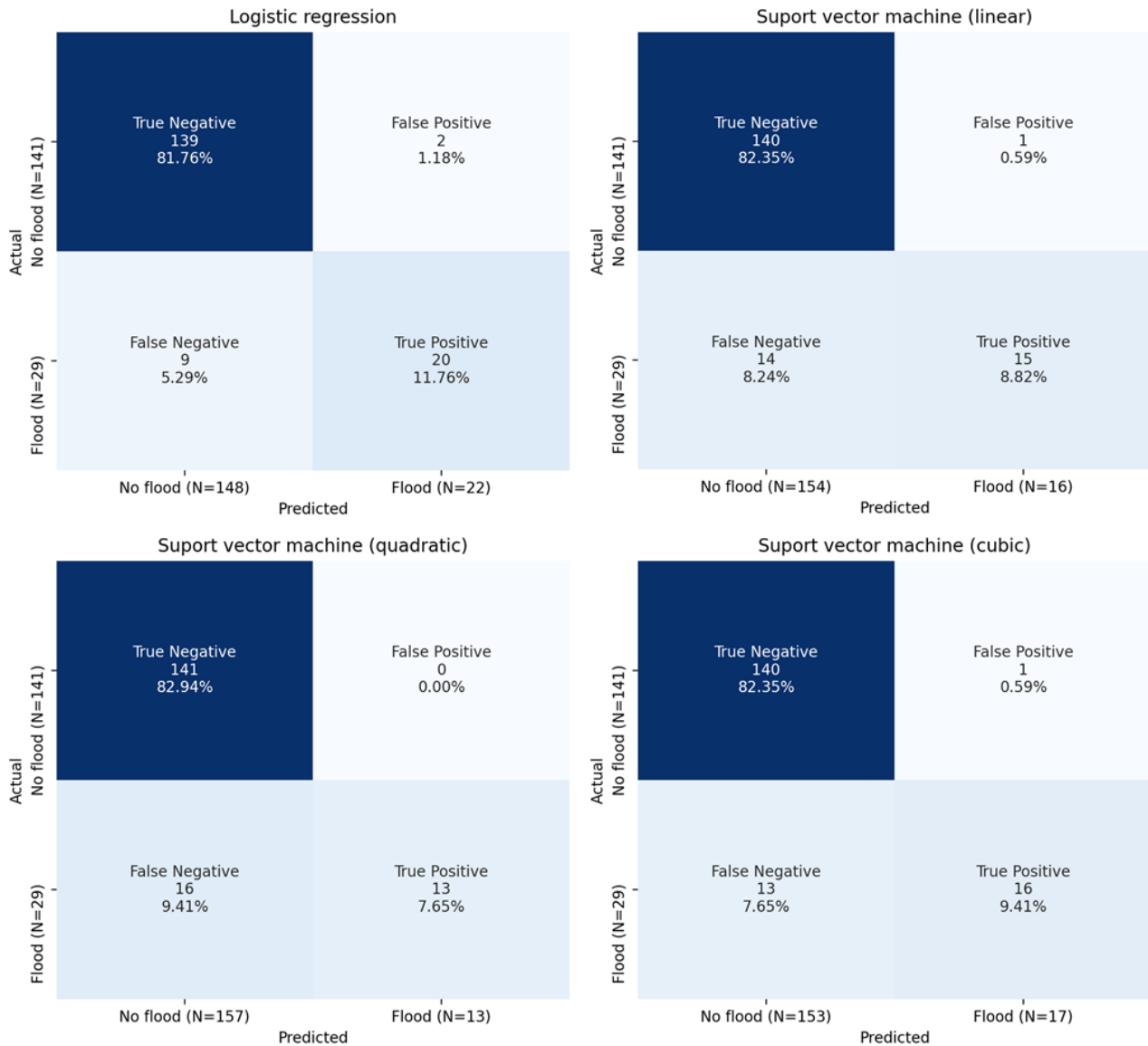
(kvadratna), logistička regresija i najbliži susjedi (0, 5 i 8). **Najbolji model je kvadratna diskriminativna analiza** s točnošću od 0,94 i rezultatom F1 od 0,89. Ovaj model je imao 24 pogotka (TP), 5 promašaja (FN) i samo 5 lažnih alarma (FP), što implicira da se 83% poplava može točno predvidjeti pomoću ovog modela. U usporedbi s klasičnim pristupom krivulje praga kritičnih količina oborine, pristup strojnog učenja pokazao se kao bolje i pouzdanije rješenje.

Tablica 10.3.3. Mjere točnosti za različite tipove i modele strojnog učenja.

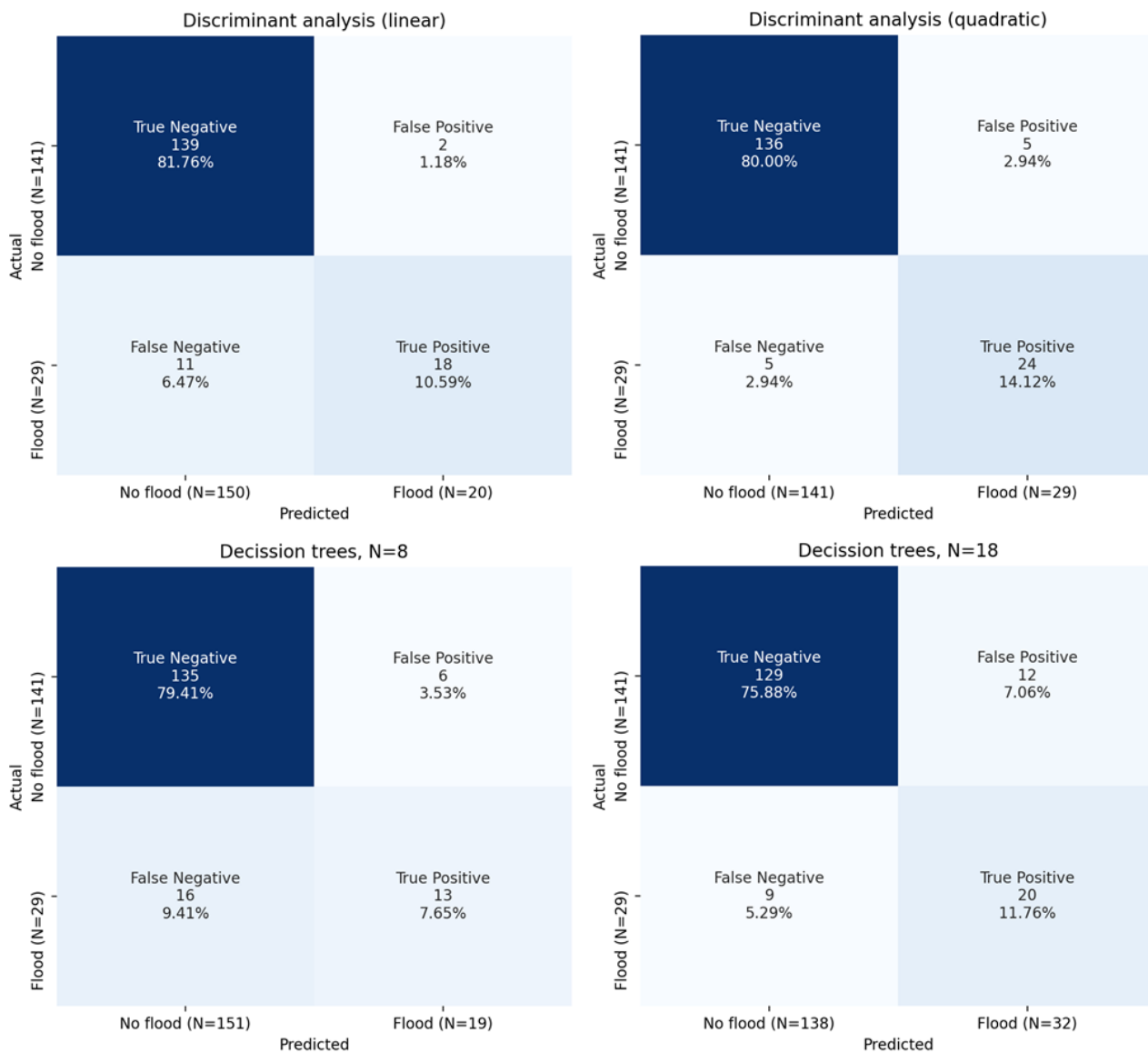
ML model	FN	FP	TN	TP	TPR	PPR	ACC	F1	TPR_ACC
0 Logistička regresija	9	2	139	20	0.69	0.99	<b>0.94</b>	0.81	0.65
1 SVM (linearni)	14	1	140	15	0.52	0.99	0.91	0.68	0.47
2 SVM (kvadratni)	16	0	141	13	0.45	1.00	0.91	0.62	0.41
3 SVM (kubni)	13	1	140	16	0.55	0.99	0.92	0.71	0.51
4 Diskriminantna analiza (linearna)	11	2	139	18	0.62	0.99	0.92	0.76	0.57
<b>5 Diskriminantna analiza (kvadratna)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>136</b>	<b>24</b>	<b>0.83</b>	<b>0.96</b>	<b>0.94</b>	<b>0.89</b>	<b>0.78</b>
6 Stabla odlučivanja, N=8	16	6	135	13	0.45	0.96	0.87	0.61	0.39
7 Stabla odlučivanja, N=18	9	12	129	20	0.69	0.91	0.88	0.79	0.60
8 Najbliži susjedi, k=3	9	4	137	20	0.69	0.97	0.92	0.81	0.64
9 Najbliži susjedi, k=15	12	2	139	17	0.59	0.99	0.92	0.74	0.54



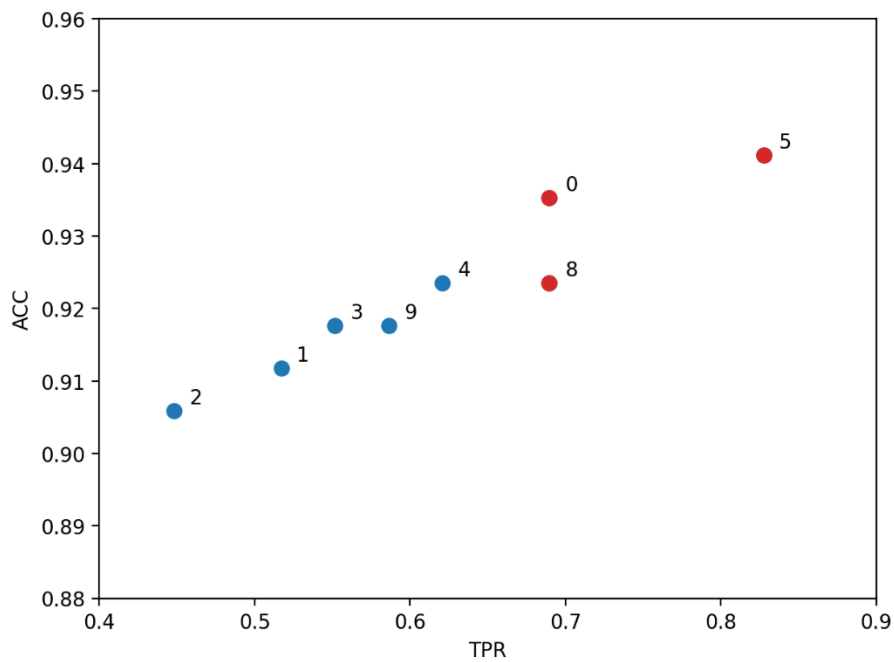
Slika 10.3.3. Matrica zabune za najbliže susjede (eng. *Natural Neighbours*).



Slika 10.3.4. Matrica zabune za logističku regresiju (eng. *logistic regression*) i različite tipove strojeva potpornih vektora eng. (*Support Vector Machine*).



Slika 10.3.5. Matrica zabune za dva tipa modela diskriminantne analize (Eng. *Discriminant analysis*) i dva tipa stabala odlučivanja (eng. *Decission trees*).



Slika 10.3.6. Omjer između preciznosti i osjetljivosti za različite tipove ML modela.

## 11 Zaključci i preporuke

U okviru predmetne studije provedena je sveobuhvatna analiza urbanih poplava u Zadru kroz sljedeće grupe analiza:

- Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u urbanom dijelu naselja Zadar.
- Analiza opasnosti i rizika od poplava s mora u priobalnom dijelu naselja Zadar.
- Analiza opasnosti i rizika od pluvijalnih poplava u slivu Vruljica.
- Analiza složenih poplava u Zadru i dijelu sliva Vruljice.
- Analiza onečišćenja oborinskih voda na području naselja Zadar.
- Prognoziranje pluvijalnih poplava na području naselja Zadar.

Iz provedenih i prikazanih analiza proizlaze sljedeći zaključci:

- Analiza urbanih poplava na podlogama više razlučivosti i veće detaljnosti rezultirale su znatno preciznijim i pouzdanijim kartama opasnosti i rizika od poplava. Stoga se predlaže da se i na ostalim pilot područjima provedu detaljnije analize opasnosti i rizika od poplava na podlogama visoke rezolucije, prvenstveno na digitalnom modelu terena minimalno rezolucije 1,0 m ili bolje.
- U budućim analizama poplava na pilot područjima projekta STREAM, ali i na cjelokupnom području Republike Hrvatske preporuča se korištenje digitalnog modela reljefa (DMR) dobivenog iz LiDAR snimaka, koje se za područje Hrvatske biti uskoro dostupne kroz projekt *Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa*.
- Za preciznije i pouzdanije modeliranje pluvijalnih poplava preporuča se instalacija nekoliko meteoroloških postaja s automatskim ombrografima ujednačeno raspodijeljenim po slivu kako bi se dobila preciznija slika oborinskog režima na području grada Zadra. Ista preporuka vrijedi i za ostala pilot područja, ali i za cjelokupno područje Republike Hrvatske.
- Analize opasnosti od poplava u urbanim područjima mogu se dodatno unaprijediti uključivanjem sustava za odvodnju otpadnih voda u spregnuti 1D/2D hidraulički model kojim će se simulirati kombinirano površinsko tečenje i tečenje u cjevima.

- Analize rizika od poplava se mogu unaprijediti uključivanjem i sagledavanjem društvenih aspekata poplava (raspodjela stanovništva, demografske i ekonomske karakteristike), kao i sagledavanjem okolišnih aspekata poplava (potencijalni izvori onečišćenja i njihovo širenje te utjecaj na vodne resurse). Također, procjene šteta bi se mogle unaprijediti s detaljnijom prostornom bazom podataka o industrijskim i komercijalnim objektima.
- Vežano uz poplava s mora nužno je nastaviti s mareografskim mjerenjima na postojećim mareografskim postajama za što precizniju informaciju o epizodama ekstremnih razina mora. Sadašnja mjerenja provode se u inkrementima od 1 h. Predlaže se unapređenje monitoringa na mareografskim postajama uz vremenski inkrement mjerenja od 1 min, a što bi omogućilo praćenje i modeliranje meteoroloških tsunamija (ščiga) na Jadranu.
- Upotrebom novih satelitskih snimaka Sentinel misija moguće je razviti model za prostorno mjerenje razine mora na području cijelog Jadrana u blizu realnom vremenu. Pristup navedenim satelitskim snimcima potpuno je besplatan. Predlaže se razvoj i implementacija sustava prostornog monitoringa razine mora u blizu realnom vremenu, a koji će biti integralni dio sustava ranog upozorenja od poplave mora za područje cijelog Jadrana. Implementacija autonomnog sustava znatno će unaprijediti razinu spremnosti i mogućnost pravovremenog odgovora na krizna stanja na moru i kopnu.
- Procjene poplava s mora, pogotovo u pogledu prelijevanja ekstremnih valova mogle bi se unaprijediti s pouzdanijim podacima izmjerenih visina valova na moru. U okviru projekta METMONIC, DHMZ trenutno postavlja pet meteorološko-oceanografskih plutača na području Jadrana (Kvarner, Blitvenica, Viški kanal, Palagruža, Molunat), što će svakako unaprijediti buduće analize poplava mora. Predlaže se provesti analize opasnosti i rizika od poplava mora za preostala tri priobalna pilot područja projekta STREAM.
- Analiza složenih poplava je omogućila sagledavanje svih potencijalnih uzroka poplava te njihovog međudjelovanja. Predlaže se na svim pilot područjima projekta STREAM provesti analize složenih poplava vezano uz sustave za odvodnju oborinskih voda te visoke razine vode u recipijentima (mora u slučaju Poreča, Zadra, Biograda na Moru i Splita, rijeke Like u slučaju Gospića, odnosno mora i rijeke Neretva u slučaju Metkovića).
- Aktivnosti provedene u okviru ove studije prikazale su mogućnost razvoja sustava prognoziranja poplava na temelju novinskih članaka i prognoziranih oborina. Međutim, navedeni model omogućava samo prognoziranje vjerojatnosti pojave poplave. Stoga se

predlaže razviti prognostički model na temelju niza modelskih analiza pri čemu će se korištenjem metoda strojnog učenja omogućiti prognoziranje detaljnijih informacija, kao što su prostorni obuhvata poplave te dubine i brzine vode za svaku prognoziranu oborinu.

- Provedene analize kakvoće vode pokazale su relativno niske koncentracije onečišćujućih tvari, stoga se preporuča nastaviti redovni monitoring kakvoće površinskih voda s različitih tipova urbaniziranih površina (stambene, komercijalne, industrijske) u različitim dijelovima godine kako bi se dobio detaljniji uvid u kakvoću vode i razinu onečišćenja. Posebnu pažnju posvetiti tzv. prvom pljuskaju koji nosi najveće koncentracije onečišćenja. Također, preporuča se povezati kakvoću vode s količinama pale oborine putem modelskih analiza. Na ovaj način omogućit će se i pouzdanije planiranje i upravljanje oborinskom odvodnjom te odabir optimalnih mjera za ublažavanje posljedica pluvijalnih poplava prema integralnom pristupu.



## 12 Literatura

- ALADIN Consortium web page, <http://www.umar-cnrm.fr/aladin/spip.php?article36>, 29-12-2021
- ALADIN International Team, (1997). The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. WMO Bull., 46, p. 317–324.
- Andročec, V., Beg-Paklar, G., Dadić, V., Djakovac, T., Grbec, B., Janeković, I., Krstulović, N., Kušpilić, G., Leder, N., Lončar, G., Marasović, I., Precali, R., Šolić, M. (2009): The Adriatic Sea Monitoring Program - Final Report, Zagreb.
- Babister M. & Barton C. (2012): Australian Rainfall & Runoff: Project 15 - Two Dimensional Modelling in Urban and Rural Floodplains.
- Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E., Sclavo, M. (2012.): Wave climate of the Adriatic Sea: a future scenarij simulation, Natural Hazards and Earth System Science, 12(6), str. 2065–2076.
- Berbić, J., Ocvirk, E., Carević, D., Lončar, G. (2016.): Application of neural networks and support vector machine for significant wave height prediction, Oceanologia, 59 (3), str. 331-349.
- Bonaldo D, Bucchignani E, Pomaro A, Ricchi A, Sclavo M, Carniel S. (2020.): Wind waves in the Adriatic Sea under a severe climate change scenarij and implications for the coasts, Int. J. Climatol., 40, str. 5389-5406. <https://doi.org/10.1002/joc.6524>
- Bretschneider, C., L. (1952.): The generation and decay of wind waves in deep water, Trans. Am. Geophys. Union, 33(3), str. 381-389.
- Brunner, G.W. (2021): HEC-RAS 6.0 2D User's Manual.
- Brzović, N. (1999.): Factors affecting the Adriatic cyclone and associated windstorms, Contributions to Atmospheric Physics, str. 72, 51-65.
- Brzović, N., Strelec-Mahović, N. (1999.): Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic, Physics and Chemistry of the Earth (B), 24, str. 653-657.
- Burek P., Binachi A., Gentile A (2014): A Pan-European Dana Set for hydrological modelling, JRC.
- Cardona, O. D., Van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., Mc Gregor, G., Rosa, P., ... & Thomalla, F. (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. In Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 65-108). Cambridge University Press.
- Conte, D., Lionello, P. (2013.): Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios, Global and Planetary Change, 111, str. 159–173.
- Cordoneanu, E., Geleyn, J.F. (1998.): Application to local circulation above the Carpathian-Black Sea area of a NWP-type meso-scale model, Contributions to Atmospheric Physics, 71, str. 191-212.

- Courtier, P.C., Freydier, J.F., Geleyn, F., Rochas, M. (1991.): The ARPEGE project at METEO-FRANCE, Proceedings from the ECMWF workshop on numerical methods in atmospheric models, str. 193-231.
- Croatian Meteorological and Hydrological Service, <https://meteo.hr/>, 29-12-2021
- DHMZ (2022): Meteorološki i hidrološki bilten, Državni hidrometeorološki zavod [http://meteo.hr/proizvodi.php?section=publikacije&param=publikacije\\_publicacije\\_dhmz&el=bilteni](http://meteo.hr/proizvodi.php?section=publikacije&param=publikacije_publicacije_dhmz&el=bilteni)
- Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2007. godine o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima
- Donelan, M.,A. (1977.): A simple numerical model for wave and wind stress prediction, National Water Research institute manuscript, Berlington, Canada, 28 str.
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J. T., Perales-Momparler, S., and Morales-Torres, A. (2011): SUFRI methodology for pluvial and river flooding risk assessment in urban areas to inform decisionmaking, SUFRI project, WP3, final report.
- EUMETSAT, Flash floods in Zadar and surrounding areas, <https://www.eumetsat.int/flash-floods-zadar-and-surrounding-areas>, 29-12-2021
- EXCIMAP (2007): Handbook on good practices for flood mapping in Europe, European exchange circle on flood mapping.
- Giannecchini, R., Galanti, Y., & D'Amato Avanzi, G. (2012). Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 829-842.
- Giorgi, F., Lionello, P. (2008.): Climate change projections for the Mediterranean region, *Global and Planetary Change*, 63, str. 90–104.
- Građevinski fakultet u Zagrebu (2022.): Studija upravljanja rizicima od poplava mora (VEPAR), Zagreb.
- Gräler, B., Van Den Berg, M. J., Vandenberghe, S., Petroselli, A., Grimaldi, S., De Baets, B., & Verhoest, N. E. C. (2013). Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), 1281-1296.
- Hercbach, H., Janssen, P., A., E. (1999.): Improvement of the short-fetch behaviour in the Wave Ocean Model (WAM), *J. Atmos and Ocean Tech.*, 16, str. 884-892.
- Hidroprojekt-ing (2014): Hidrološko-hidraulička analiza s konceptijskim varijantnim rješenjima, studija, Zagreb.
- Hidroprojekt-ing (2018): Hidrološka analiza događaja 11.9.2017. na potoku Ričina u Zadru, stručni elaborat, Zagreb.
- Hong, Y., & Adler, R. F. (2008). Estimation of global SCS curve numbers using satellite remote sensing and geospatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2), 471-477.

- Hong, M., Kim, J., & Jeong, S. (2018). Rainfall intensity-duration thresholds for landslide prediction in South Korea by considering the effects of antecedent rainfall. *Landslides*, 15(3), 523-534.
- Hrvatske vode (2022): Nacrt plana upravljanja vodnim područjima, Zagreb.
- Huizinga, J., De Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines (No. JRC105688). Joint Research Centre (Seville site).
- Hydroexpert (2005.): Studija vjetrovalne i valne klime ispred luke Zadar - Gaženica, Zagreb, 2005.
- Institut IGH (2018): Regulacija vodotoka Ričine u Zadru – IV faza, Glavni projekt, Split.
- Ivatek-Šahdan, S.; Tudor, M. (2004.): Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies, *Meteorol. Z.*, 13, str. 99-108.
- Janssen, P., A., E., M. (1991.): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography*, 21, str. 1631-1642.
- Janssen, P., A., E., M. (1992): Experimental evidence of the effect of surface waves on the airflow, *Journal of Physical Oceanography*, 22, str. 1600-1604.
- Janssen, P., A., E., M. (1998): On the effect of ocean waves on the kinetic energy balance and consequences for the initial dissipation technique, *Journal of Physical Oceanography*, 30, str. 1743-1756.
- Johnson, H., K. (1998.): On modeling wind-waves in shallow and fetch limited areas using method of Holthuijsen, Booij and Herbers, *Journal of Coastal Research*, 14(3), 917-932.
- Johnson, H., K., Kofoed-Hansen (2000.): Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling, *Journal of Physical Oceanography*, 30, str. 1743-1756.
- Kahma, K., K., Calkoen, C., J., (1992.): Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, *Journal of Physical Oceanography*, 22(12), str. 1389-1405.
- Kalin, K. C., Nimac, I., Patalen, L., & Pasaric, Z. (2021). Spatio-temporal analysis of short-term rainfall extremes in Croatia (No. EMS2021-311). Copernicus Meetings.
- Katalinić, M. (2019.): Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 131 str.
- Ke, Q., Tian, X., Bricker, J., Tian, Z., Guan, G., Cai, H., ... & Liu, J. (2020). Urban pluvial flooding prediction by machine learning approaches—a case study of Shenzhen city, China. *Advances in Water Resources*, 145, 103719.
- J., Cavaleri, M., Donelan, K., Hasselman, S., Hasselman, K., Janssen, P., A., E., M. (1994.): Dynamic of modeling of ocean surface waves, Cambridge university press, Cambridge, 532 str.
- Lamb, H. (1932): *Hydrodynamic*, 6th edn, Dover publications, New York, pp738.
- Lončar, G., Leder, N., Duplančić Leder, T., Carević, D. (2019a.): Wave Energy Disbalance as Generator of Extreme Wave Occurrence in Semi-Enclosed Coastal Waters (Example of Rijeka Bay—Croatia), *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 420, 15 str.

- Lončar, G., Šreng, Ž., Miličević, H., Ostojić, S. (2019b.): Increase of wave height due to transition in wind direction – example: Rijeka bay, *Electronic journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek - e-GFOS*, 18, str. 57-70
- Lončar, G., Carević, D., Ocvirk, E., (2011.): Numerical and physical modelling studies for the port of Split”, *Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering*, 164 (3), str. 95-114
- Lončar, G., Ocvirk, E., Andročec, V. (2010a.): Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrovnih valova”, *Građevinar*, 62(3), str. 45-55.
- Lončar, G., Ocvirk, E., Kunštek, D. (2010b.): Numerical analysis of significant wave height of 5-year return period in the southern Adriatic, *Tehnički vjesnik*, 17 (4), str. 389-395.
- Lončar, G., Ocvirk, E., Andročec, V. (2010c.): Analiza generiranja površinskih vjetrovnih valova u kanalskom području istočnog Jadrana, *Hrvatske vode*, 18 (72), str. 117-128.
- Martina, M. L. V., Todini, E., & Libralon, A. (2006). A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrology and earth system sciences*, 10(3), 413-426.
- Maxime L. D. Nicolas. (2022). *pycop: a Python package for dependence modeling with copulas (0.0.7)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7030034>
- Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In *Flood risk management in Europe* (pp. 231-251). Springer, Dordrecht.
- METEOALARM, <https://meteoalarm.org/>, 29-12-2021
- Miles, O., M. (1957.): On the generation of surface waves by shear flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 3, str. 185-204.
- NRCS (2016): Manning's n Values for Various Land Covers to use for Dam Breach Analyses by NRCS in Kansas.
- Ocvirk, E. (2010.): Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 229 str.
- Oesper, L., Merico, D., Isserlin, R., & Bader, G. D. (2011). WordCloud: a Cytoscape plugin to create a visual semantic summary of networks. *Source Code for Biology and Medicine*, 6(1), 7.
- Pan, H. L., Jiang, Y. J., Wang, J., & Ou, G. Q. (2018). Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(5), 1395-1409.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
- Phillips, O., M. (1957.): On the generation of waves by turbulent wind, *Journal of Fluid Mechanics*, 2, str. 417-445.
- Provedbeni planovi obrane od poplava, Hrvatske vode, <https://www.voda.hr/hr/provedbeni-planovi-obrane-od-poplava>, pristupljeno 30. svibnja 2022.

RAINMAN (2020): Policy brief - Integrating pluvial flood risk management into flood risk management plans according to the EU Floods Directive and beyond.

Registar poplavnih događaja, Hrvatske vode, <https://www.voda.hr/hr/registar-poplavnih-dogadaja>, pristupljeno 30. svibnja 2022.

Renko, T., Mikuš Jurković, P., Kalin, L., Hojsak, T., Mokorić, M. i Kozarić, T. (2019). Sustav upozorenja na opasne vremenske pojave u Sektoru za vremenske i pomorske analize i prognoze Državnog hidrometeorološkog zavoda. Hrvatski meteorološki časopis, 54/55 (54/55), 3-23.  
<https://doi.org/10.37982/hmc.54.55.1.1>

Samuels, P., Gouldby, B. (2009). Language of risk: project definitions. T32-04-01.

Sauer, A., Olfert, A., Korte, L, Neubert, M, Ortlepp, R (2019): Joint definitions and analytical framework, RAINMAN. Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development.

Tariqul Islam Shajib, Hans Christian BruunHansen, Tao Liang, Peter E.H olm, (2019): Metals in surface specific urban runoff in Beijing, Environmental Pollution, 248, 584-598

Te Chow, V. (2010). Applied hydrology. Tata McGraw-Hill Education.

Termonia, P. i dr., 2017. The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. Geoscientific Model Development Discussions, 2017, p. 1–45.

Three common types of flood explained, <https://www.zurich.com/en/knowledge/topics/flood-and-water-damage/three-common-types-of-flood>, pristupljeno 30. svibnja 2022.

Tian, X., Schleiss, M., Bouwens, C., & van de Giesen, N. (2019). Critical rainfall thresholds for urban pluvial flooding inferred from citizen observations. Science of the Total Environment, 689, 258-268.

Tootoonchi, F., Sadegh, M., Haerter, J. O., Rätty, O., Grabs, T., & Teutschbein, C. (2022). Copulas for hydroclimatic analysis: A practice-oriented overview. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 9(2), e1579.

Vincze, G., Moulin, C., Schlacher, C., Wubbels, T. (2014): Glavni elementi pripreme karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava. Izvješće o Komponenti 3.

WorldPop ([www.worldpop.org](http://www.worldpop.org) - School of Geography and Environmental Science, University of Southampton; Department of Geography and Geosciences, University of Louisville; Departement de Geographie, Universite de Namur) and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University (2018). Global High Resolution Population Denominators Project - Funded by The Bill and Melinda Gates Foundation (OPP1134076).  
<https://dx.doi.org/10.5258/SOTON/WP00675>

USACE (2021): Creating Land Cover, Manning's N Values, and % Impervious Layers. US Army Corps of Engineers.

UNISDR (2009): Terminology on Disaster Risk Reduction, UN, Geneva, Switzerland.

UNISDR Terminology, <https://www.undrr.org/terminology>, pristupljeno 30. Svibnja 2022.

USDA (2017): Part 630 Hydrology: National Engineering Handbook, Chapter 9: Hydrological Soil-Cover Complexes.

Yang, T. H., Hwang, G. D., Tsai, C. C., & Ho, J. Y. (2016). Using rainfall thresholds and ensemble precipitation forecasts to issue and improve urban inundation alerts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(12), 4731-4745.

Zhai, X., Guo, L., Liu, R., & Zhang, Y. (2018). Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern. *Natural Hazards*, 94(2), 605-625.

Zakon o vodama, Narodne novine 19/2022, 84/2021