

UDK/UDC: 551.583:556.166(26)(497.4Piran)  
Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*  
DOI: [10.15292/acta.hydro.2024.03](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2024.03)

Prejeto/Received: 13.02.2024  
Sprejeto/Accepted: 16.04.2024  
Objavljeno na spletu/Published online: 08.01.2025

## ANALIZA VPLIVA NARAŠČAJOČE GLADINE MORJA NA POPLAVNO OGROŽENOST IN ŠKODO NA OBMOČJU MESTA PIRAN

### ANALYSIS OF THE IMPACT OF RISING SEA LEVELS ON FLOOD RISKS AND ASSOCIATED DAMAGE IN THE TOWN OF PIRAN

Mark Bryan Alivio<sup>1</sup>, Andrej Kryžanowski<sup>1</sup>, Andrej Vidmar<sup>1</sup>, Simon Rusjan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo, Katedra za splošno hidrotehniko

#### Izvleček

V članku analiziramo vpliv različnih scenarijev dviga srednje gladine morja zaradi podnebnih sprememb na poplavno ogroženost in pričakovano škodo zaradi poplav na območju mesta Piran. Ob upoštevanju različnih scenarijev dviga srednje gladine morja smo določili obsege poplavljanja in globine poplavnih voda na obravnavanem obalnem območju. Model KR PAN je bil uporabljen za analizo izpostavljenosti prebivalstva in različnih škodnih elementov na območju mesta Piran ter za oceno škode zaradi poplav za različne scenarije dviga srednje gladine morja. Rezultati kažejo, da se bo pogostost pojavljanja sedanjih ekstremnih morskih poplav na slovenski obali dramatično povečala za približno faktor 2 za vsakih 10 cm dviga morske gladine. Pričakovana letna škoda (PLŠ), ki omogoča upoštevanje povratnih dob poplavnih dogodkov in škode, ki jo poplave povzročijo, je za sedanje stanje ocenjena na pribl. 0,68 milijona EUR/leto. V primeru dviga morske gladine za 30 cm do leta 2100 se bo PLŠ povečala na 2,4 milijona EUR/leto, pri čemer bo večina škode zaradi poplav na stanovanjskih objektih. Če upoštevamo najbolj pesimističen scenarij dviga morske gladine, se bi PLŠ povečala na 10,2 milijona EUR/leto. Ne glede na negotovosti, povezane z napovedanimi dvigi srednje gladine morja v prihodnjih desetletjih, je dejstvo, da se bo brez izvedbe protipoplavnih ukrepov škoda zaradi poplav na območju Pirana v prihodnosti izjemno povečala. Mesto pa se bo moralo soočiti z vse večjimi posledicami poplav, ki bodo močno vplivale na normalno funkcionalno rabo urbanih površin.

**Ključne besede:** poplave morja, podnebne spremembe, dvig srednje gladine morja, poplavna škoda, elementi ranljivosti, pričakovana letna škoda.

#### Abstract

This paper presents analyses of the impact of various scenarios involving increases in mean sea levels due to climate change on the characteristics of sea flooding and the expected flood damage in the area surrounding the town of Piran, Slovenia. Taking into account the various scenarios of mean sea level rise, we have determined the extent of inundated areas and water depth in the coastal area under consideration. The KR PAN model was used to analyze the exposure risks facing the town's residents and some of its spatial elements, as well as to estimate the flood damage for various scenarios of mean sea level rise. The results of the study show

---

<sup>1</sup> Stik / Correspondence: [simon.rusjan@fgg.uni-lj.si](mailto:simon.rusjan@fgg.uni-lj.si)

© Alivio M. B. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

© Alivio M. B. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

a likely dramatic increase in the probability that the current extreme sea flood events on the Slovenian coast will continue to occur, namely an approximately 2-fold increase in probability for every 10 cm of sea level rise. The expected annual damage for the current state is estimated at approximately €0.68 million/year, rising to €2.4 million/year in the event of an increase in the mean sea level of 30 cm by 2100, with most of the damage related to residential facilities. Considering the most pessimistic scenario of sea level rise, the annual damage is expected to increase to €10.2 million/year. Irrespective of the actual magnitude of the imminent mean sea level rise in the coming decades, the fact remains that without flood protection measures, flood damage in the Piran area will increase enormously in the future. The town will have to cope with the increasing consequences of sea flooding, which will have a major impact on the normal functioning of urban areas.

**Keywords:** sea flooding, climate change, mean sea level rise, flood damage, vulnerability elements, expected annual damage.

## 1. Uvod

V svetovnem merilu se vse bolj očitno zaznava dvigovanje srednje gladine morja (SGM), po nekaterih podatkih s pospešeno hitrostjo 5 mm/leto v petletnem obdobju 2014–2019 (WMO, 2019). To je bistveno hitreje od povprečne stopnje 3,2 mm/leto, zabeleženo med letoma 1993 in 2010. Posledice dviga morske gladine se v mnogih delih sveta odražajo v naraščajoči pogostosti in intenzivnosti poplav morja. V prihodnosti se z nadaljnjim dvigovanjem SGM pričakuje še bistveno povečano pogostost poplavljanja morja (Jevrejeva in sod., 2016; Gracia in sod., 2019). Pričakuje se številne negativne vplive na družbene, gospodarske in ekološke razmere. Ugotovitve študije, ki so jo izvedli Vousdoukas in sod. (2020), kažejo, da bi se lahko na območju Evropske skupnosti izognili do 90 % gospodarske škode zaradi poplav morja, če se bodo v bližnji prihodnosti izvedli ustrezni ukrepi za prilagajanje rabe obalnih območij ter ustrezni gradbeni in negradbeni protipoplavni ukrepi.

Podatki o spremembah SGM na slovenski obali iz obdobja 1960–2015 kažejo, da se je srednja gladina morja zviševala s stopnjo 1,7 mm/leto ter da znaša skupni dvig SGM v tem obdobju pribl. 10 cm (Strojan in Robič, 2016). Izrazitejši pozitivni trend naraščanja gladine morja je zaznan od 90. let prejšnjega stoletja, in sicer pribl. 5 mm/leto (Ličer, 2019). Podrobnejše napovedi prihodnjih sprememb SGM vzdolž slovenske obale zaradi podnebnih sprememb zaenkrat niso na voljo, prav tako tudi njihov vpliv do sedaj ni bil podrobneje raziskan. Nekateri avtorji podpirajo razmeroma enotni trend dvigovanja gladine morja na območju severnega

Jadranskega morja (Ličer, 2019; Zanchettin in sod., 2021), pričakovani dvig SGM naj bi do leta 2100 znašal vsaj 30 cm (Ličer, 2019). Glede na scenarij RCP4.5 se predvideva, da se bo Jadransko morje dvignilo za 30 do 40 cm, kar bo ob koncu 21. stoletja po nekaterih ocenah povečalo pogostost poplavljanja morja vzdolž jadranske obale za faktor 26 do 50 (Strojan in Robič, 2016).

Območje slovenske obale je izjemno pomembno tako z vidika številnih gospodarskih dejavnosti, ohranjanja kulturne dediščine kot tudi z vidika ekološke pestrosti in varovanja narave. Številne dejavnosti, umeščene v sorazmerno ozkem obalnem pasu, se bodo morale neizogibno soočiti s posledicami dvigovanja morske gladine ter pogostejšimi poplavami morja (Kolega, 2006). Območje, ki je na slovenski obali najbolj izpostavljeno poplavljanju morja, je staro jedro mesta Piran (Vahtar, 2006). Mesto je specifično zaradi svoje umestitve v obalni pas na polotoku, ki je izpostavljen poplavam morja in ostalim vremenskim dejavnikom (npr. močnim vetrovom, valovanju). Posledično je škoda na gospodarski javni infrastrukturi in ostalih elementih urbanih površin ob poplavnih dogodkih v kombinaciji z neugodnimi vremenskimi razmerami precejšnja, pogosto je onemogočena normalna funkcionalna raba urbanih površin. Za premišljeno načrtovanje prihodnje rabe prostora, umeščanje različne infrastrukture in dejavnosti na območju mesta Piran bo ključna zagotovitev ustreznih protipoplavnih ukrepov. Ob tem bo treba opraviti poglobljene analize potencialne škode zaradi poplav, ki jo lahko pričakujemo zaradi dviga morske gladine. Rezultati tovrstnih analiz nam podajo vpogled v pričakovani

obseg škode tako pri pogostejših poplavnih dogodkih z manjšim obsegom poplavljanja kot tudi v primeru obsežnejših poplavnih dogodkov z bistveno manjšo verjetnostjo pojava, katerih pojavnost se bo v luči napovedanih dvigov SGM bistveno povečala. Na ta način pridobimo ključne informacije, ki jih bodo deležniki na različnih ravneh upravljanja (od občinske do državne ravni) potrebovali pri iskanju najprimernejših rešitev za zaščito pred poplavami, izvedbo analiz stroškov in koristi s končnim ciljem izboljšanja poplavne varnosti.

## 2. Metode

Ob upoštevanju različnih scenarijev dviga srednje gladine morja (preglednica 1) glede na podnebne scenarije IPCC (2019) smo izvedli analizo pojavnosti poplav morja v prihodnosti ter izračunali pričakovane letne škode (PLŠ). Izvedena je bila statistična analiza povratnih dob poplav morja z upoštevanjem porazdelitvene funkcije GEV in Gumblove porazdelitvene funkcije, ki se v literaturi pogosto uporabljata za analizo povratnih dob gladin morja. Uporabljeni so bili merjeni podatki o najvišjih letnih gladinah morja v obdobju od 1960 do 2020 z mareografske postaje Koper. Na podlagi Akaikejevega informacijskega kriterija (AIC) in Bayesovega informacijskega kriterija (BIC) je bilo za Gumblovo porazdelitev ugotovljeno boljše ujemanje z merjenimi podatki kot v primeru porazdelitvene funkcije GEV. Nadalje so bile statistično iz vrednotene gladine morja z 2-, 5-, 10-, 100-, 500- in 1000-letno povratno dobo z upoštevanjem Gumblove porazdelitvene funkcije, katerim smo prišteli dvige gladine morja glede na upoštevane IPCC-scenarije dviga SGM. Kot osnovni vhodni topografski podatek za obalno območje je bil upoštevan uradni digitalni model reliefa Slovenije, izdelan na osnovi uradnega snemanja LiDAR. Iz vrednoteni nivoji gladine morja za različne kombinacije scenarijev dviga SGM ter povratnih dob poplavnih dogodkov so bili uporabljeni v GIS-orodju za določitev poplavnih poligonov. Pri tem je bil uporabljen statični model poplavljanja morja, torej brez upoštevanja dinamičnih sil zaradi valovanja morja. V nadaljnji analizi PLŠ zaradi poplavljanja morja je bilo

upoštevanih 48 kombinacij vhodnih podatkov v programskem orodju KR PAN (Kumulativni Računi Poplavnih škod in ANalize), ki je bil izdelan v okviru razvoja enotne metode za oceno koristi gradbenih in negradbenih ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti (FGG, 2019). Ob tem velja poudariti, da je bilo programsko orodje KR PAN v osnovi zasnovano za analizo škode zaradi poplav celinskih voda. Za analizo škode zaradi poplav morja smo model KR PAN prilagodili z upoštevanjem prilagojenih škodnih krivulj za poplave morja na podlagi priporočil iz različne literature. Tako smo zajeli vpliv poplavljanja morske vode, ki lahko na različnih škodnih elementih povzroči večji obseg škode (npr. zaradi vdora soli v konstrukcijske elemente objektov, električne inštalacije in druge vode gospodarske javne infrastrukture, čiščenje urbanih površin).

**Preglednica 1:** Scenariji dviga srednje gladine morja, upoštevani pri analizi.

**Table 1:** Considered scenarios of mean sea level rise.

Scenarij	Dvig srednje gladine morja [m]
S1	0,1
S2	0,2
S3	0,3
S4	0,4
S5	0,5
S6	0,84
S7	1,46

S pridobljenimi poplavnimi poligoni ob upoštevanih scenarijih dviga SGM smo prekrili prostorske podatke, vključene v programsko orodje KR PAN. KR PAN prostorske podatke črpa iz različnih baz, med drugim iz katastra stavb, centralnega registra prebivalcev, zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture, poslovnega registra Slovenije, registra kulturne dediščine. Omogoča razčlenitev poplavne škode za različne elemente ranljivosti. Glede na specifične lastnosti mesta Piran so bili v analizi poudarjeni predvsem vidiki poplavne škode na stanovanjskih objektih, javni gospodarski infrastrukturi, gospodarskih dejavnosti, elementih kulturne dediščine ter

morebitni stroški čiščenja in ureditve začasnih nastanitev. Ob upoštevanju trapeznega pravila (Olsen in sod., 2015) ter verjetnosti nastopa posameznih poplavnih dogodkov je bila izračunana PLŠ zaradi poplav morja za različne scenarije dviga morske gladine (enačba 1).

$$PLŠ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{i+1}} \right) (D_i + D_{i+1}) \quad (1)$$

V zgornji enačbi oznake pomenijo naslednje:

PLŠ – pričakovana letna škoda,

$T_i$  –  $i$ -letna povratna doba,

$D_i$  – skupna poplavna škoda pri poplavnem dogodku s povratno dobo  $i$  let.

Metodologija izračuna PLŠ ne upošteva morebitnega sosledja poplavnih dogodkov, kot bi bil primer večkratnega zaporednega poplavljanja morja v primeru visokega plimovanja morja. Informacije o pričakovanih poplavnih škodah so ključnega pomena pri izdelavi analiz stroškov in koristi v procesu načrtovanju protipoplavnih ukrepov (Ward in sod., 2011).

### 3. Rezultati in diskusija

Rezultati statistične analize poplav morja ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM kažejo, da bo imelo zvišanje srednje gladine morja zelo velik vpliv na pogostost pojava poplav morja (preglednica 2). Kot primer naj navedemo, da bi se najvišja zabeležena gladina morja 394 cm (poplavni dogodek novembra 1969, katerega povratna doba je glede na statistično analizo merjenih gladin morja ocenjena na pribl. 200 let), v primeru dviga SGM za 10 cm (S1), spremenila v dogodek s povratno dobo pribl. 100 let. Glede na to, da obstaja sorazmerno velika verjetnost dviga gladine morja do leta 2100 za 30 cm (Ličer, 2019), se bo ob takšnem scenariju (S3) povratna doba ekstremnega dogodka iz leta 1969 skrajšala na približno 25 let, kar je štirikratno povečanje pogostosti pojavljanja, 5-letni dogodek

pa bi z vidika verjetnosti pojavljanja postal vsakoletni dogodek do leta 2100. V primeru dviga srednje gladine morja se bodo velike spremembe zgodile tudi v verjetnosti pojavov ekstremnih poplavnih dogodkov. Tako se bo npr. poplava morja s 500-letno povratno dobo ob upoštevanju scenarijev dviga morja S1–S5 (optimistični do zmerni scenariji dviga gladine morja) skrajšala na poplavni dogodek s povratno dobo 13 do 235 let, poplava s 1000-letno povratno dobo pa na poplavni dogodek s 25- do 458-letno povratno dobo. V splošnem ugotovimo, da povečanje verjetnosti poplavnih dogodkov morja sledi trendu, pri katerem se vsakih 10 cm prirasta v nivoju SGM odrazi v pribl. 50 % zmanjšanju povratne dobe dogodka oz. podvojeni verjetnosti pojava poplavljanja morja.

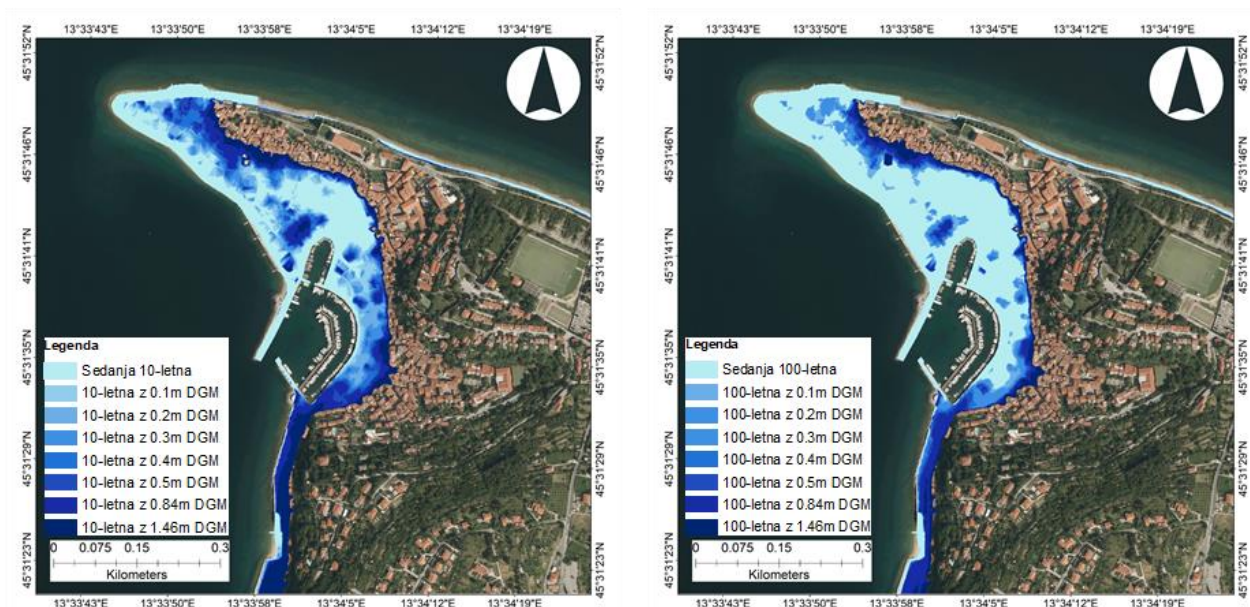
#### 3.1 Območja poplavljanja za različne scenarije dviga srednje gladine

Povečana verjetnost poplav morja se bo odrazila v bistveno povečani izpostavljenosti obalnih območij poplavljanju. Spremenjena časovna dinamika poplavljanja morja zahteva dobro opredelitev pričakovane prostorske razsežnosti poplavljanja morja, podprto s podatki o globinah poplavnih voda. V našem primeru smo območja poplavljanja določili kot kombinacijo različnih scenarijev dviga SGM in povratnih dob gladin morja. Na sliki 1 prikazujemo prostorski obseg poplav morja za primere poplavnega dogodka z 10- in 100-letno povratno dobo in različne scenarije dviga SGM na območju mesta Piran. Iz slike 1 je razvidno, da morje izrazito poplavi predvsem nižje ležeče obalne predele, prostorska razsežnost poplavljanja morja pa je močno odvisna od upoštevanega scenarija dviga SGM. Iz obsega poplavljenih območij je razvidno, da bo naraščajoča pojavnost poplav izrazito ogrozila staro mestno jedro Pirana, kjer je prisotna velika gostota pozidave, spremljajoče urbane infrastrukture, gospodarskih dejavnosti ter objektov kulturne dediščine.

**Preglednica 2:** Spremembe povratnih dob poplavnih dogodkov ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM na območju slovenske obale.

**Table 2:** Changes in the return periods of flood events under various scenarios of mean sea level rise for the Slovenian coastal area

Povratna doba poplave morja [leta] - obstoječe	Višine morja [cm]	Povratna doba poplave morja [leta] ob različnih scenarijih dviga SGM						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
2	328,00	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
5	343,07	2,5	1,2	<1	<1	<1	<1	<1
10	353,05	5,2	2,5	1,2	<1	<1	<1	<1
100	384,29	49,7	24,1	11,7	5,6	2,7	<1	<1
500	405,73	235,0	113,8	55,1	26,7	12,9	1,1	<1
1000	414,96	458,4	222,1	107,6	52,1	25,3	2,1	<1



**Slika 1:** Poplavljenе površine na območju mesta Piran za primer 10- in 100-letnega poplavnega dogodka ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM.

**Figure 1:** Inundated areas of the town of Piran for potential 10- and 100-year flood event, considering various scenarios of mean sea level rise.

Slika 2 prikazuje naraščanje obsega poplavljenih površin glede na upoštevanj scenarij naraščanja SGM in različne povratne dobe poplavnih dogodkov. V primeru obstoječega stanja in nižjih do zmernih scenarijev dviga SGM lahko opazimo izrazitejše povečanje površine poplavljenih območij pri poplavnih dogodkih s povratnimi dobami do 100 let. Dinamika povečevanja poplavljenih območij je predvsem posledica topografskih lastnosti obravnavanega obalnega območja. Morje pričakovano najprej preplavi nižje ležeča priobalna območja. V razponu nivojev gladin do pribl. 10-

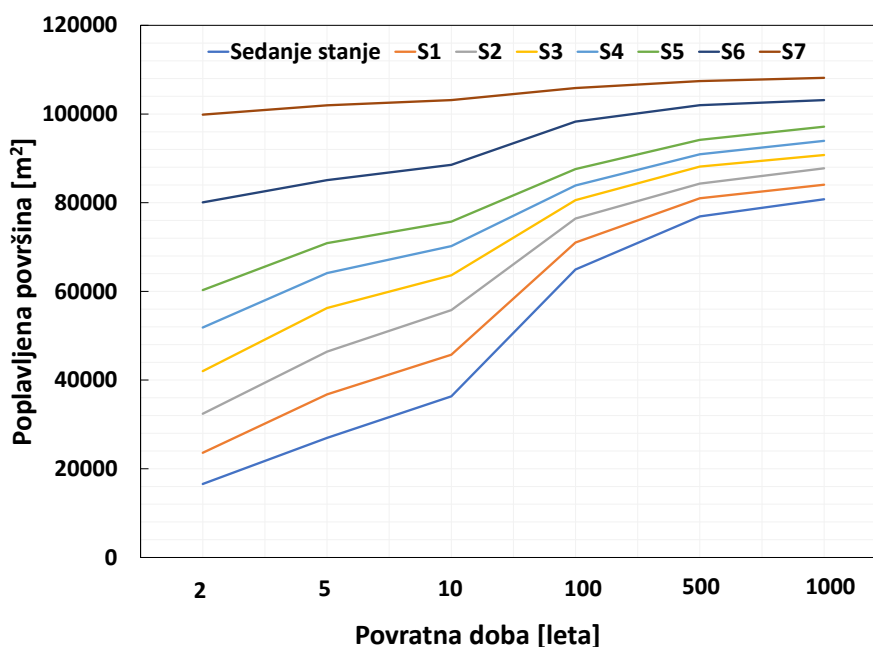
letne povratne se obseg poplavljenih površin poveča za pribl. 9000 m<sup>2</sup> za vsakih 10 cm dviga morske gladine. Pri ekstremnejših poplavnih dogodkih ter upoštevanjih večjih dvigih SGM se širitev obsega poplavljenih površin upočasnjuje. Za te scenarije lahko ugotovimo, da so poplavljena praktično vsa nižje ležeča območja znotraj mesta Piran, nadaljnje obsežnejše širjenje poplavljenih površin pa omejuje hitrejše naraščanje nadmorske višine terena v smeri vzpetine, na kateri je cerkev Sv. Jurija.

Povečanje poplavljenih območij v primeru ekstremnih poplavnih dogodkov znaša pribl. 4000 m<sup>2</sup> za vsakih 10 cm dviga morske gladine. V primeru 30-cm dviga SGM do leta 2100 (glede na opažene trende dviga SGM zelo verjeten scenarij) se predvideva, da bodo izjemno ekstremni poplavni dogodki povsem poplaveli pribl. 20 % celotnega obravnavanega območja mesta Piran, vsa nižje ležeča območja bodo povsem pod vodo. Omeniti velja dejstvo, da poplavni dogodki povratnih dob do pribl. 10 let, ob upoštevanju sedanjih srednjih gladin morja, povzročijo sorazmerno omejen obseg težav z vidika delovanja javne infrastrukture (npr. poplavljenе nekatere ceste, težave z odvodnjo padavinskih voda in podobno). Izrazito povečanje pogostosti poplav ob pričakovanem višanju SGM bo povzročilo, da bodo tovrstni dogodki postali povsem običajni. Kot je razvidno iz preglednice 2, se bodo lahko v povprečju zgodili vsako leto ali celo večkrat letno. Posledično se lahko pričakuje veliko dodatnih težav za prebivalce mesta, številne gospodarske dejavnosti, normalno delovanje in uporabo urbanih površin mesta Piran ter povečano

izpostavljenost različnih elementov kulturne dediščine poplavam morja.

### 3.2 Analiza izpostavljenosti različnih elementov ranljivosti poplavam morja

Določitev območij poplavljanja morja ob upoštevanju različnih kombinacij scenarijev dviga SGM in povratnih dob poplavnih dogodkov, predstavljenih v prejšnjem poglavju, smo uporabili kot vhodni podatek za nadaljnjo analizo izpostavljenosti, ranljivosti in ogroženosti različnih prostorskih elementov na območju mesta Piran, ki so vključeni v prostorskih podatkovnih slojih programskega orodja KRPA (FGG, 2019). Pri tem so bili z vidika lokalne problematike in lastnosti grajenega okolja mesta Piran podrobneje obravnavani vidiki poplavne ogroženosti naslednjih elementov poplavne ranljivosti: število ogroženih prebivalcev, število ogroženih stanovanjskih objektov, prisotnost različnih vrst gospodarske javne infrastrukture na območjih poplavljanja morja.



**Slika 2:** Spremembe v površini poplavljenih območij mesta Piran ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM ter različnih povratnih dob poplav.

**Figure 2:** Changes in the inundated areas of the town of Piran under various scenarios of mean sea level rise and various return periods.

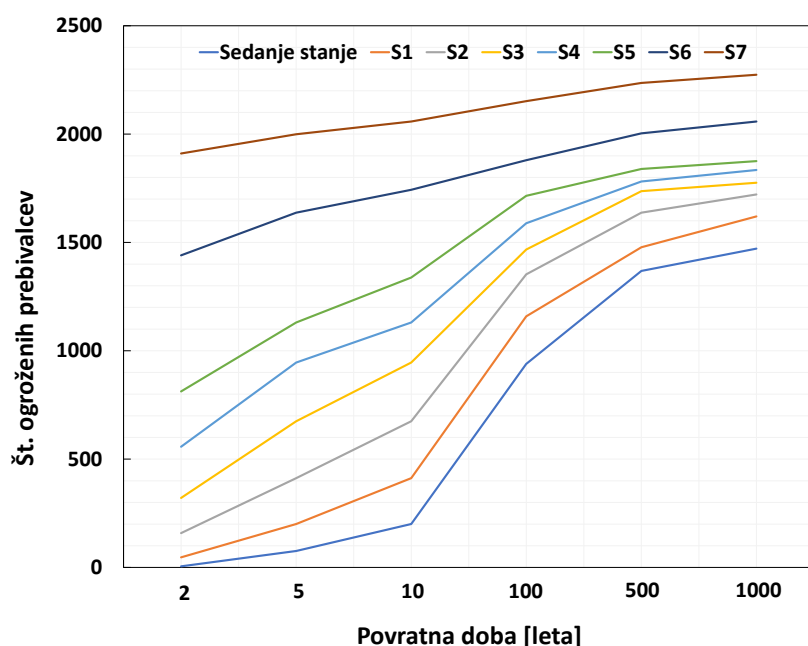
Na slikah 3 do 6 je prikazano izrazito naraščanje izpostavljenosti elementov ranljivosti poplavam morja predvsem v primeru scenarijev dviga SGM med 10 in 50 cm (scenariji S1 do S5). Ob upoštevanju scenarijev dviga SGM se število izpostavljenih elementov ranljivosti izrazito povečuje že v primeru poplavnih dogodkov s sorazmerno kratkimi povratnimi dobami (npr. 2- do 10-letna povratna doba). V primeru ekstremnih dvigov SGM število izpostavljenih elementov ranljivosti zelo naraste, razlike med številom izpostavljenih elementov ranljivosti pri različnih povratnih dobah poplavnih dogodkov pa so manjše, kar je zlasti značilno v primeru scenarijev dviga SGM S6 in S7.

Rezultati analize izpostavljenosti prebivalcev mesta Piran poplavam morja (slika 3) kažejo, da pride do izrazitejšega povečanja števila ogroženih

prebivalcev pri poplavnem dogodku s 100-letno povratno dobo že v primeru sedanje SGM. Z vidika pričakovanih dvigov SGM se jasno pokaže, da se bo povratna doba poplav s 100- oz. 1000-letno povratno dobo v primeru 30-cm dviga SGM do leta 2100 skrajšala na pribl. 10- oz. 100-letno povratno dobo (preglednica 2). To bo predstavljajo veliko povečanje poplavne ogroženosti prebivalcev.

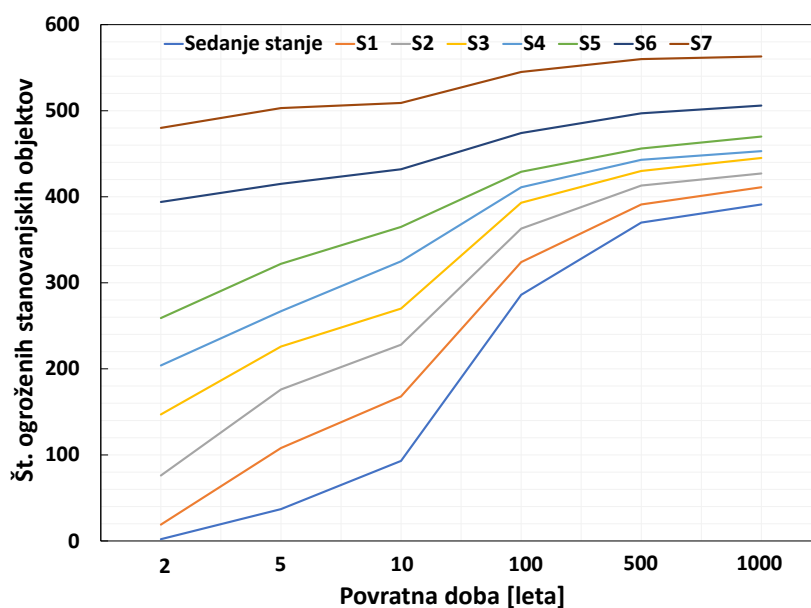
Na sliki 4 je prikazano število ogroženih stanovanjskih objektov za posamezne scenarije dviga SGM in povratne dobe poplavnih dogodkov.

Stanovanjski objekti so prostorski elementi, ki so na obravnavanem območju mesta Piran najbolj poplavno izpostavljeni. Že ob sedanjem stanju je v primeru nastopa poplavnega dogodka z višino nad 3. visokovodno višino morja 350 cm, določeno s strani ARSO (Ličer, 2019), poplavljenih 93 stanovanjskih in 21 nestanovanjskih objektov.



**Slika 3:** Število poplavno ogroženih prebivalcev mesta Piran v odvisnosti od upoštevanega scenarija dviga SGM in povratne dobe poplavnega dogodka.

**Figure 3:** Population at risk of flooding in Piran, depending on the mean sea level rise scenario and the return period of the flood event.



**Slika 4:** Število ogroženih stanovanjskih objektov v mestu Piran v odvisnosti od upoštevane scenarija dviga morske gladine in povratne dobe poplavnega dogodka.

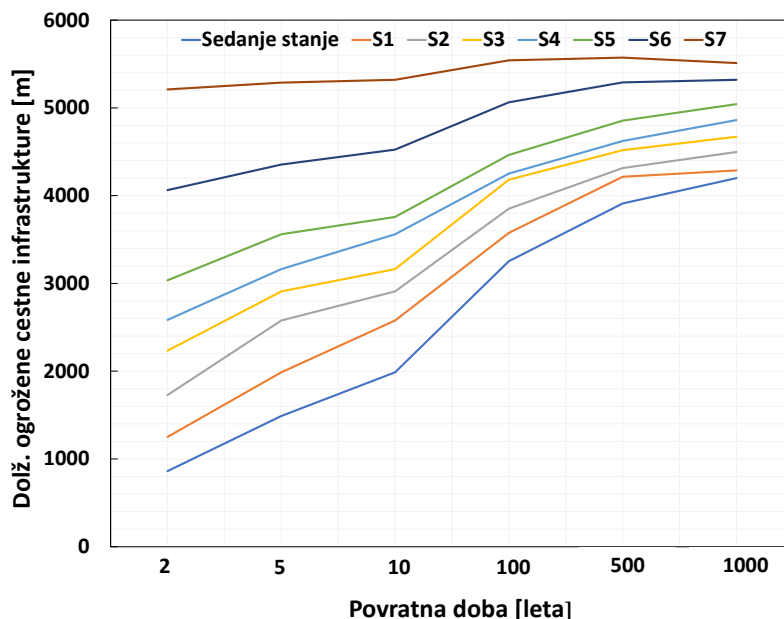
**Figure 4:** Number of flooded residential buildings in Piran depending on the mean sea level rise scenario and the return period of the flood event.

Znotraj obravnavanega območja, prikazanega na sliki 1, je skupno 1231 objektov, od tega je 1024 stanovanjskih in 207 nestanovanjskih objektov. V primeru dviga SGM za 30 cm do leta 2100 bo pri poplavi z 2-letno povratno dobo poplavljenih 14 % stanovanjskih objektov, v primeru ekstremnejših poplavnih dogodkov bo poplavam morja izpostavljenih več kot 40 % stanovanjskih objektov znotraj obravnavanega območja. Večina poplavljenih nestanovanjskih objektov je namenjenih turističnim dejavnostim. Z vidika poplavne ogroženosti so zaskrbljujoči podatki o obsegu gospodarske javne infrastrukture, ki bo v primeru dviga SGM vse pogosteje izpostavljena poplavam morja. Gospodarska javna infrastruktura mora biti v primeru poplav obravnavana kot kritična infrastruktura, saj nedelovanje ali moteno delovanje

tovrstne infrastrukture predstavlja grožnjo za javno zdravje, varnost in delovanje številnih gospodarskih dejavnosti (Chisolm in Matthews, 2012; Arrighi in sod., 2021). Na obravnavanem območju mesta Piran potekajo številni vodi javne komunalne infrastrukture. Podatki o dolžinah poplavljenih cestne infrastrukture na območju mesta Piran ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM in različnih povratnih dobah poplav so prikazani na sliki 5. Na sliki 6 so prikazane dolžine vodov sistema za odvodnjo odpadnih in padavinskih voda znotraj poplavno ogroženega območja mesta Piran.

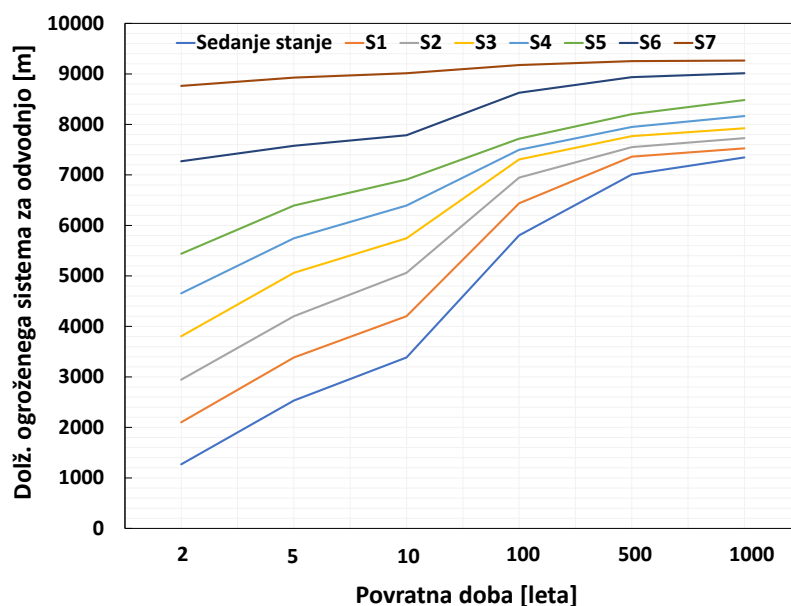
Sistem za odvodnjo odpadnih in padavinskih voda je na poplave morja izjemno ranljiv, v preteklosti je že večkrat prišlo do vdorov morske vode v odvodne sisteme.





**Slika 5:** Dolžina ogrožene cestne infrastrukture na območju mesta Piran v odvisnosti od upoštevane scenarija dviga morske gladine in povratne dobe poplavnega dogodka.

**Figure 5:** Length of the flooded road infrastructure in the Piran area depending on the mean sea level rise scenario and the return period of the flood event.



**Slika 6:** Dolžina ogroženega sistema za odvodnjo odpadnih in padavinskih voda znotraj poplavljenih območij ob upoštevanju različnih scenarijev dviga SGM in povratne dobe poplavnega dogodka.

**Figure 6:** The length of the wastewater and stormwater conveyance system within the flooded areas, taking into account the various sea level rise scenarios and the return period of the flood event.

Voda iz sistema za odvodnjo odpadnih in padavinskih voda ne more odtekat, posledično pride do razlivanja onesnaženih odpadnih voda po mestnih površinah. Številne vode gospodarske

javne infrastrukture na območju mesta Piran bo treba v bližnji prihodnosti posodobiti in nadgraditi, če se bodo želeli doseči cilji razvoja mesta Piran v

naslednjih desetletjih, predvsem v smeri butičnih turističnih dejavnosti.

Tovrstni rezultati analiz izpostavljenosti vodov gospodarske javne infrastrukture poplavam morja ob upoštevanju pričakovanih dvigov SGM bodo predstavljali ključne vhodne podatke za prihodnje načrtovanje tovrstne infrastrukture. Dodatno velja poudariti, da so številni stanovanjski in nestanovanjski objekti ter mnogi drugi sestavni deli urbanih površin mesta Piran pod kulturno spomeniškim varstvom. Na podlagi rezultatov analize obsega razlivanja poplav morja smo v primeru ekstremnih poplavnih dogodkov in scenarija dviga SGM S7 identificirali 65 stavb in spomenikov, ki so uvrščeni v register kulturne dediščine. Za ohranjanje tovrstnih objektov bo v prihodnosti treba sprejeti načrte, ki bodo morali upoštevati neizbežno povečano izpostavljenost poplavam morja.

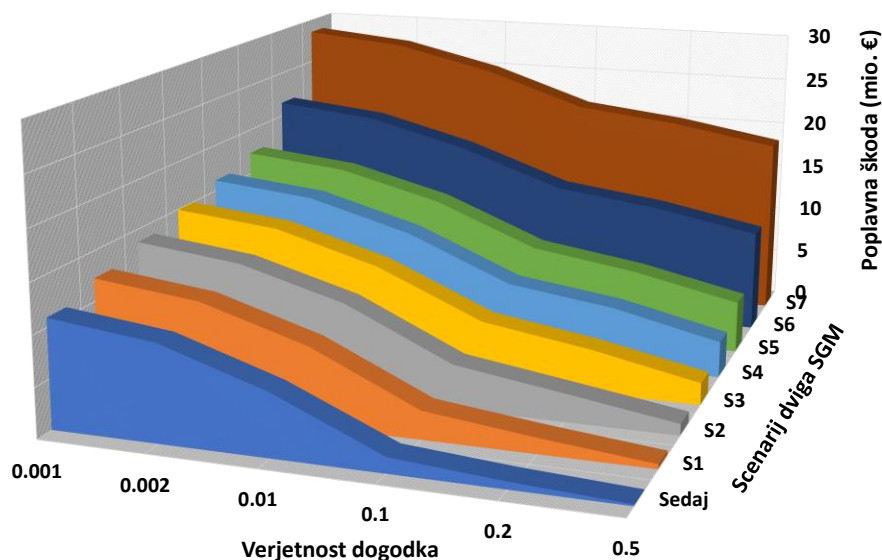
### 3.3 Analiza škode zaradi poplav

Ocenjena poplavna škoda za različne elemente poplavne ranljivosti na območju mesta Piran

predstavlja predvsem neposredno materialno škodo, katere obseg v veliki meri definira površina poplavljenih območij ter globina poplavnih voda na lokacijah različnih elementov ranljivosti prostora. Slika 7 prikazuje povezavo med verjetnostjo poplavnega dogodka in izračunano škodo za različne scenarije dviga SGM. Poleg naraščanja poplavne škode v primeru manj verjetnih (ekstremnejših) poplavnih dogodkov je jasno razviden velik vpliv upoštevanega scenarija dviga SGM na obseg škode pri isti verjetnosti poplavnega dogodka.

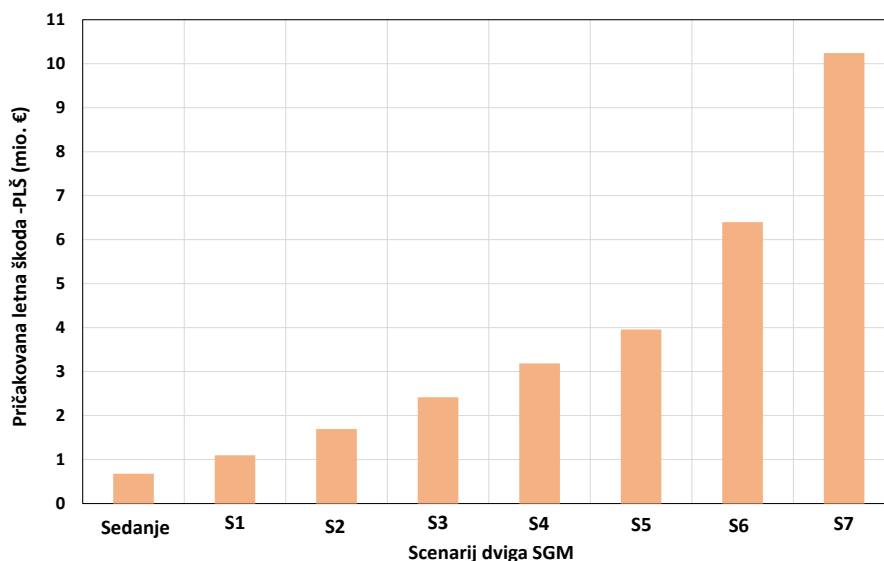
Ocenjene vrednosti pričakovanih letnih škod (PLŠ) zaradi poplav na območju mesta Piran za različne scenarije dviga SGM so prikazane na sliki 8. Viden je izrazit dvig obsega PLŠ v odvisnosti od upoštevanega scenarija dviga SGM. Dvig SGM namreč povzroči izrazito povečanje površine pod krivuljami, ki predstavljajo povezavo med povratno dobo dogodka in obsegom poplavne škode (slika 7).

Izračuni PLŠ kažejo, da so skupni stroški škode zaradi poplav ob upoštevanju sedanjih srednjih gladin morja okoli 0,68 milijona EUR/leto.



*Slika 7: Poplavna škoda v odvisnosti od scenarija dviga SGM in verjetnosti poplavnega dogodka.*

*Figure 7: Flood damage depending on the mean sea level rise scenario and the probability of a flood event.*



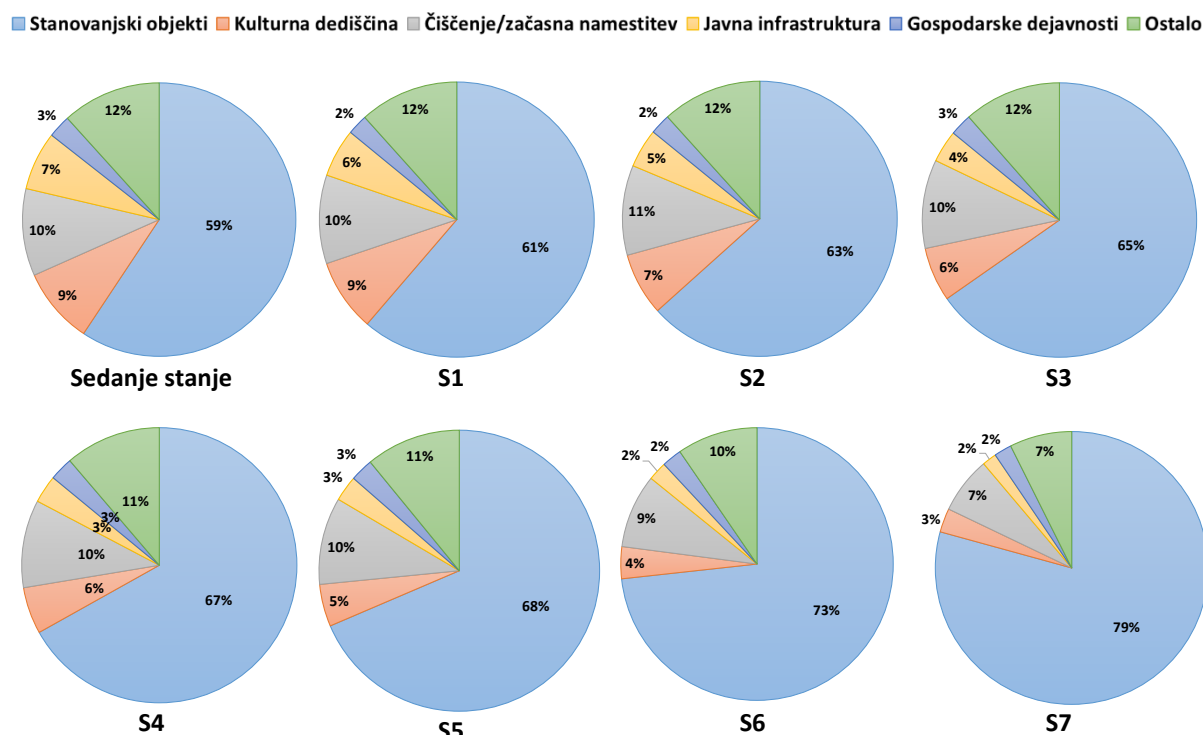
**Slika 8:** Pričakovana letna škoda na območju mesta Piran za različne scenarije dviga SGM.

**Figure 8:** Expected annual flood damage in the town of Piran for various scenarios of mean sea level rise.

V primeru zelo verjetnega scenarija dviga gladine morja za 30 cm do leta 2100 (Ličer, 2019) bi PLŠ narasla na pribl. 2,4 milijona EUR/leto. Dinamika dviga PLŠ v odvisnosti od scenarija dviga SGM kaže, da bo za vsakih 10 cm prirasta SGM v razponu od 30 cm do 50 cm prirast v PLŠ dokaj konstanten in bo znašal pribl. 0,76 milijona EUR/leto. Ob upoštevanju najbolj črnogledega scenarija dviga SGM za 1,46 m bi PLŠ narasla na kar 10,2 milijona EUR/leto. V primeru ekstremnih scenarijev dviga SGM S6 oz. S7 in poplavnih dogodkov z majhno verjetnostjo pojava bodo PLŠ bistveno večje od sedanjih vrednosti, in sicer za faktor približno 9 oz. 15.

Podrobnejša razčlenitev škode po posameznih prostorski elementih (slika 9) razkriva, da ima škoda na stanovanjskih objektih, ki vključuje predvsem škodo na konstrukcijskih elementih stavb in notranji opremi, prevladujoči delež v ocenjeni skupni PLŠ za vse scenarije dviga SGM, in sicer od 59 do 79 % celotne škode zaradi poplav. Drugi največji obseg škode je pričakovati na premični lastnini. Na obravnavanem območju mesta Piran prevladujejo strnjene urbane površine, prevladujoča raba stavb je za stanovanjske namene. Predvidevamo, da bodo stroški čiščenja po poplavnem dogodku in stroški zagotovitve začasnih nastanitev za prizadete prebivalce znašali 7 do 12 % celotne PLŠ. Škodo na

objektih kulturne dediščine je v splošnem težko oceniti, saj je ta škoda zelo specifična. Glede na splošne škodne krivulje, ki smo jih uporabili v naši analizi, je ocenjeni obseg škode na elementih kulturne dediščine 3 do 9 % celotne poplavne škode. Škodo na objektih kulturne dediščine bo treba v prihodnje bolj poglobljeno analizirati. Pričakuje se, da bo skupna poplavna škoda na elementih kulturne dediščine večja od naših ocen, saj odprava škode na tovrstnih objektih zahteva posebna restavratorska znanja. Kljub turističnemu značaju mesta Piran ima poslovna kategorija manjši delež v skupni ocenjeni vrednosti PLŠ, čeprav je večina turističnih dejavnosti skoncentriranih v poplavno najbolj ranljivih delih starega mestnega jedra. Zaradi spomeniškega varstva starega mestnega jedra Pirana so v mestu gospodarske dejavnosti prisotne v majhnem obsegu in njihovo delovanje izrazito pogojeno s turistično sezono. Želeli bi poudariti, da je škoda na gospodarskih dejavnostih glede na privzeta metodološka izhodišča najverjetneje podcenjena, saj naša analiza ne upošteva posredne škode za različne gospodarske dejavnosti. Enako bi lahko ugotovili tudi za element gospodarske javne infrastrukture.



**Slika 9:** Deleži škode na posameznih prostorskih elementih v primeru obstoječega stanja in po različnih scenarijih dviga SGM.

**Figure 9:** Proportions of damage to various spatial elements for the existing situation and for various scenarios of raising the SGM.

Neposredna škoda, povzročena na gospodarski javni infrastrukturi, znaša le 2 do 7 % skupne ocenjene vrednosti PLŠ. Posredna škoda nedvomno predstavlja bistveno večji delež v primerih npr. nedelovanja določene gospodarske javne infrastrukture, kar posledično vpliva na obseg neposredne in posredne škode v številnih drugih škodnih kategorijah.

Iz analize poplavne škode v primerih dogodkov z višjimi verjetnostmi pojavljanja (npr. ob povratnih dobah, krajših od 10 let, ali ob verjetnosti pojava dogodka, večji od 0,1) je razvidno (slika 7), da znaten delež škode v skupni PLŠ prispevajo dogodki, ki že ob obstoječi SGM sorazmerno pogosto preplavijo najnižje ležeče predele mesta Piran. Že majhen dvig SGM bo povzročil, da bodo nižje ležeči predeli mesta Piran poplavljeni še bistveno pogosteje, to pa bo vplivalo na povečano PLŠ.

Posledice spremenjene dinamike poplavljanja morja bodo katastrofalne tako z vidika onemogočenega normalnega delovanja mesta kot tudi težko predstavljivega povečanja obsega poplavnih škod, kot za nekatera druga območja opozarjajo Azevedo in sod. (2016).

#### 4. Zaključek

V prispevku smo analizirali vpliv pričakovanega dviga SGM na ogroženost različnih elementov ranljivosti v prostoru in pričakovano poplavno škodo na območju Pirana, tj. najbolj poplavno ogroženega dela slovenske obale. Verjetnostna analiza povratnih dob poplavnih dogodkov po različnih scenarijih dviga SGM je pokazala, da se bo pogostost poplavnih dogodkov v povprečju povečala za pribl. faktor 2 na vsakih 10 cm dviga SGM. Pri analizi sicer nismo upoštevali vplivov spremljajočih vremenskih pojavov (npr. močnega valovanje morja, intenzivnejših padavin, močnih

vetrov in razmer nizkega zračnega tlaka), ki naj bi bili po številnih napovedih posledic podnebnih sprememb bolj intenzivni in bodo v kombinaciji z dvigom morske gladine nedvomno predstavljali dodatno grožnjo pogostejših poplav na območju Pirana. Učinek kombinacije visokega plimovanja morja, dolgotrajnih vetrov in posledičnega valovanja morja se je na žalost izkazal za zelo uničujočega ob zadnjem večjem poplavnem dogodku jeseni 2023 (ARSO, 2023).

Pričakovana letna škoda zaradi poplav morja v Piranu kaže izraziti trend naraščanja s pričakovanim dvigom SGM z ocenjene vrednosti 0,68 milijona EUR/leto v sedanjih razmerah do približno 10,2 milijona EUR/leto v primeru najbolj ekstremnega upoštevanega scenarija dviga SGM. Poplavam so najbolj izpostavljeni stanovanjski objekti, problematično pa bo tudi povečanje poplavne škode na ostalih elementih ranljivosti, kot so npr. različni objekti gospodarske javne infrastrukture. Ne glede na obravnavani scenarij dviga morske gladine je več kot očitno, da bo odprava škode zaradi poplav na območju Pirana v bližnji prihodnosti predstavljala vse večje finančno breme za prebivalce in lokalno skupnost. Zato je nujno čim prej celovito pristopiti k načrtovanju protipoplavniških ukrepov, s katerimi bi naraščanje škode zaradi poplav morja omejili.

## Financiranje

Raziskava je bila izvedena v sklopu ciljnih raziskovalnih projektov V2-2371 in V2-2369, ki ju sofinancira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

## Viri

Arrighi, C., Pregnoletto, M., Castelli, F. (2021). Indirect flood impacts and cascade risk across interdependent linear infrastructures. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **21**(6), 1955–1969. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1955-2021>.

ARSO (2023). Poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023. Poročilo o poplavah Agencije RS za okolje. [https://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave\\_Slovenija\\_okt-nov\\_2023.pdf](https://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave_Slovenija_okt-nov_2023.pdf).

Azevedo de Almeida, B., Mostafavi, A. (2016). Resilience of Infrastructure Systems to Sea-Level Rise in Coastal Areas: Impacts, Adaptation Measures, and Implementation Challenges. *Sustainability* **8**(11), 1115. <https://doi.org/10.3390/su8111115>.

Chisolm, E. I., Matthews, J. C. (2012). Impact of Hurricanes and Flooding on Buried Infrastructure. *Leadership and Management in Engineering* **12**(3), 151–156. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000182).

FGG (2019). Razvoj enotne metode za oceno koristi gradbenih in negradbenih ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti. Končno poročilo CRP projekta V2-1733.

Gracia, V., Sierra, J. P., Gómez, M., Pedrol, M., Sampé, S., García-León, M., Gironella, X. (2019). Assessing the impact of sea level rise on port operability using LiDAR-derived digital elevation models. *Remote Sensing of Environment* **232**, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111318>.

IPCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 1155.

Jevrejeva, S., Jackson, L. P., Riva, R. E. M., Grinsted, A., Moore, J. C. (2016). Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**(47), 13342–13347. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605312111>.

Kolega, N. (2006). Slovenian coast sea floods risk. *Acta geographica Slovenica - Geografski zbornik* **46**., 143–167. <https://doi.org/10.3986/AGS46201>

Ličer, M. (2019). Podnebne spremembe in naraščanje gladine morja v Severnem Jadranu (Climate change and sea level rise in the North Adriatic). National Institute of Biology – Marine Biological Station Piran.

Olsen, A., Zhou, Q., Linde, J., Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water*, **7**(12), 255–270. <https://doi.org/10.3390/w7010255>

Strojan, I., Robič, M. (2016). Sea level data. Slovenian Environment Agency.

Ward, P. J., de Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2011). How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? *Natural Hazards and Earth System Sciences* **11**(12), 3181–3195. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3181-2011>.

WMO (2019). The Global Climate in 2015–2019. Geneva, Switzerland.

Vahtar, M. (2006). Institute for Integral Development and Environment. EuroSION case study on the Slovenian coast, EuroSION project.

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Hinkel, J., Ward, P. J., Mongelli, I., Ciscar, J. C., Feyen, L. (2020). Economic motivation for raising coastal flood defenses in Europe. *Nature communications* **11**(1), 2119. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15665-3>.

Zanchettin, D., Bruni, S., Raicich, F., Lionello, P., Adloff, F., Androsov, A., ... Zerbini, S. (2021). Sea-level rise in Venice: historic and future trends. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **21**(8), 2643-2678. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2643-2021>.