

HIDROMETEOROLOŠKI EKSTREMI IN VREDNOTENJE NJIHOVIH SPREMEMB NA OSNOVI MERJENIH PODATKOV

izr. prof. dr. Mojca Šraj, univ. dipl. inž. grad., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

doc. dr. Nejc Bezak, univ. dipl. inž. grad., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Povzetek

Vrednotenje sprememb v okoljskih procesih je pomembno, če želimo vedeti oziroma razumeti kako varni so objekti oz. ukrepi, ki so bili načrtovani v preteklih desetletjih, danes. V primeru, da je za določen proces značilna drugačna dinamika kot v preteklosti, je potrebno varnost objektov, kjer je bil takšen ukrep upoštevan, preveriti. Prispevek tako prikazuje vrednotenje sprememb v hidrometeoroloških ekstremih na podlagi merjenih podatkov. Poudarek je tako na ekstremnih padavinah trajanja 5, 30, 60 in 360 min, erozivnosti padavin, referenčni evapotranspiraciji, nizkih, srednjih in visokih pretokih. Za izvedbo analiz so bile uporabljene sodobne statistične metode. Rezultati so povzeti na podlagi številnih objavljenih znanstvenih člankov v uglednih mednarodnih revijah, ki so bili recenzirani s strani mednarodno priznanih strokovnjakov. Ugotovljeno je bilo, da ekstremni padavinski dogodki v Sloveniji v trajanju med 5 in 360 min v zadnjih letih niso izrazito bolj intenzivni kot so bili približno 50 let nazaj. Po drugi strani pa so bile za nekatere padavinske postaje izračunane relativno velike razlike v projektnih padavinah (t.i. ITP krivuljah). Podobno lahko ugotovimo tudi za erozivnost padavin, ki je eden izmed dejavnikov erozije tal. Vrednosti referenčne evapotranspiracije imajo na večini meteoroloških postaj statistično značilen pozitiven trend, kar je v večji meri posledica naraščajočega trenda temperature zraka. Nadalje se srednji in nizki pretoki večinoma znižujejo. Pri visokih pretokih pa ni mogoče določiti enoznačnega trenda. Podobno kot pri projektnih padavinah je tudi pri projektnih pretokih mogoče določiti nekaj postaj, kjer so razlike v primerjavi s preteklostjo relativno izrazite. Izvedeno vrednotenje nakazuje, da je na območju Slovenije prisotna velika spremenljivost v okoljskih procesih

ter da bi bilo pri načrtovanju smiselno v večji meri upoštevati tudi negotovost.

Uvod

Podnebna spremenljivost, s katero se vse bolj in bolj soočamo, tako ali drugače vpliva na naša življenja (npr. Blöschl et al., 2017; Luke et al., 2017; Blöschl et al., 2019). Podnebne spremembe statistično ugotavljamo oz. jih dokazujemo na podlagi analize preteklih merjenih podatkov (npr. Blöschl et al., 2019) in jih napovedujemo za prihodnost s pomočjo klimatskih modelov.

Kako zanesljivi oz. točni so v resnici ti modeli, bo moč oceniti šele čez nekaj desetletij. Analize preteklih nizov podatkov so verodostojnejše, a morajo biti nizi podatkov dovolj dolgi, kar je lahko pogosto težava (Koutsoyiannis, 2013). Na podlagi sprememb v časovnih vrstah različnih hidrometeoroloških spremenljivk, merjenih v preteklosti, lahko sklepamo o pogostosti ekstremnih meteoroloških in hidroloških dogodkov oz. spremembah, ki so se dogajale v bližnji preteklosti (npr. Blöschl et al., 2019). Prispevek prikazuje rezultate statističnih analiz in vrednotenja trendov in sprememb različnih hidrometeoroloških spremenljivk v Sloveniji, opravljenih v zadnjih nekaj letih na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Kot vhodni podatek so bili v vseh opisanih primerih uporabljeni merjeni podatki Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO).

Padavine

Padavine kot del vodnega oziroma hidrološkega kroga določajo oz. vplivajo tudi na ostale hidrološke procese, kot so prestrezanje padavin, infil-

PADAVINSKA POSTAJA	5 MINUT	30 MINUT	60 MINUT	360 MINUT
RATEČE	0,008	0,064	0,058	0,107
POSTOJNA	-0,126	-0,132	-0,434	-0,044
ŠMARATA	-0,0735	0,040	0,044	0,005
LJUBLJANA	-0,009	0,048	0,022	0,074
ŠMARTNO PRI SG	-0,020	0,072	0,082	0,098
ČRNOMELJ	-0,147	-0,075	-0,088	-0,124
NOVO MESTO	-0,247*	-0,168	-0,221*	-0,085
CELJE	0,106	0,252**	0,254**	0,180
SLOVENSKE KONJICE	-0,325	-0,103	-0,086	0,015
MURSKA SOBOTA	0,012	0,132	0,172	0,290**

Preglednica 1: Rezultati Mann-Kendallovega testa, izračunanega na podlagi letnih maksimumov 5, 30, 60 in 360-minutnih padavin za izbrane postaje. * Označuje statistično značilen negativen trend s stopnjo zaupanja 0,05. ** Označuje statistično značilen pozitiven trend s stopnjo zaupanja 0,05. Prikazani so rezultati za obdobje od 1975 do 2018. Postaje so razvrščene od zahoda proti vzhodu (povzeto Bezak in Mikoš, 2019).

POSTAJA/MESEC	OBDOBJE	MAJ	JUNIJ	JULIJ	AVGUST	SEPTEMBER
RATEČE	1975-2016	0,131	0,090	0,038	0,002	0,027
POSTOJNA	1970-2016	0,039	-0,014	0,096	-0,114	0,061
ŠMARATA	1975-2016	0,182	-0,010	0,161	0,123	0,017
LJUBLJANA BEŽIGRAD	1948-2016	-0,004	0,057	0,083	0,047	0,032
NOVO MESTO	1970-2016	0,214**	0,001	-0,091	-0,183	0,056
CELJE	1970-2016	0,202	0,067	0,142	0,085	0,176
SLOVENSKE KONJICE	1975-2016	0,264**	-0,046	-0,264*	0,215	0,015
MURSKA SOBOTA	1970-2016	0,137	0,145	0,087	0,134	0,004
VOGEL	1982-2016	-0,016	0,095	0,032	0,032	0,012
PORTOROŽ	1992-2019	0,203	0,056	0,228	0,088	0,004

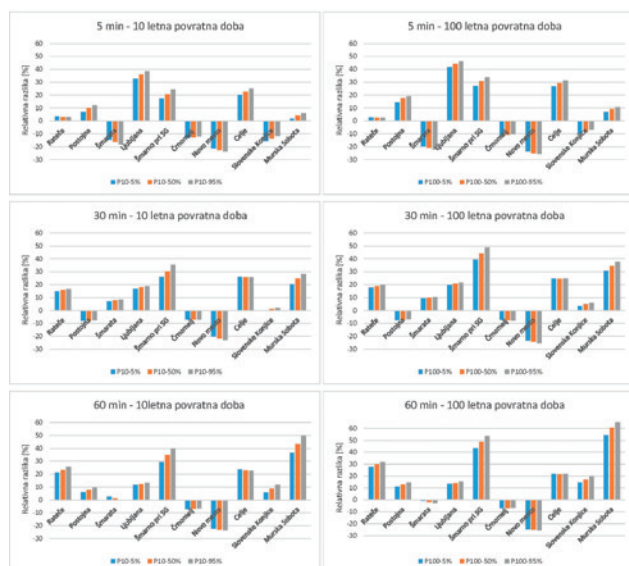
Preglednica 2: Rezultati Mann-Kendallovega testa, izračunanega na podlagi erozivnosti padavin vseh erozivnih dogodkov v različnih mesecih za različna obdobja glede na razpoložljivost 5-minutnih podatkov o padavinah. * Označuje statistično značilen negativen trend s stopnjo zaupanja 0,05. ** Označuje statistično značilen pozitiven trend s stopnjo zaupanja 0,05. Povzeto po Petek et al. (2018).

tracija, podpovršinsko in površinsko pretakanje vode. Z uporabo 5-minutnih podatkov o padavinah, izmerjenih s pluviografi, s katerimi razpolaga ARSO in ki so za nekatere postaje na voljo od leta 1960 naprej (ARSO, 2017a), smo ugotavljali morebitne spremembe v kratkotrajnih nalivih, ki se med drugim uporabljajo tudi npr. za načrtovanje odvodnjavanja s cest ali za načrtovanje razpršenih ukrepov zadrževanja voda v tleh (Steinman in Mikoš, 1993). Preglednica 1 tako prikazuje rezultate Mann-Kendallovega testa, ki je eden izmed najpogosteje uporabljenih statističnih testov za zaznavanje sprememb v okoljskih podatkih (Bezak in Mikoš, 2019). Test smo uporabili na vzorcih

največjih letnih padavin trajanja 5, 30, 60 in 360 minut. V izvedenih analizah je bilo za 10 padavinskih postaj v Sloveniji izbrano obdobje od 1975 do 2018 (t.j. 44 let). Rezultati v preglednici 1 kažejo, da za izbrano obdobje ni veliko trendov, ki bi bili statistično značilni (Bezak in Mikoš, 2019). Za 5-minutno trajanje padavin npr. nobeden izmed trendov ni pozitiven in statistično značilen. Edini statistično značilen trend je negativen (t.j. padavinska postaja Novo mesto). Za daljša trajanja padavin izkazujeta statistično značilen naraščajoč trend postaji Celje (za trajanja padavin 30 in 60 minut) in Murska Sobota (za trajanja padavin 360 minut). Rezultati kažejo, da za različna trajanja

padavin v Sloveniji za obravnavano obdobje 1975-2018 ne moremo določiti enoznačnega časovnega trenda (ali pozitivnega ali negativnega). Poleg tega ne moremo zaznati nobenega sub-regionalnega vzorca; lahko pa vidimo, da so časovni trendi v veliki meri odvisni od lokacije posamezne padavinske postaje (Bezak in Mikoš, 2019).

Nadalje smo z uporabo teh padavinskih podatkov primerjali tudi razlike v t.i. projektnih padavinah za različna trajanja (slika 1). To pomeni, da smo obdobje 44 let (t.j. 1975-2018) razdelili na dva enaka dela. Za vsako obdobje smo nato izbrali največji padavinski dogodek v vsakem letu (za obravnavana različna trajanja padavin). Z uporabo verjetnostnih analiz (Gumbelova porazdelitev, kjer so bili parametri ocenjeni z uporabo metode L-momentov) smo določili povezavo med količino padavin in njihovo povratno dobo. Nato smo za različna trajanja padavin primerjali projektne vrednosti padavin obeh 22-letnih obdobj (slika 1). Opazimo lahko, da so razlike med -30% in 60%, kar je z vidika načrtovanja hidrotehničnih inženjerskih objektov gotovo veliko. Obenem pa se je potrebno zavedati, da je obdobje 22 let relativno kratko za zelo zanesljive ocene projektnih dogodkov. Zaradi tega je v primerih tako kratkih nizov podatkov smiselno v proces načrtovanja vključiti tudi tako imenovane intervale zaupanja, ki podajajo mero zanesljivosti ocene projektnega dogodka.



Slika 1: Relativne razlike v 10- in 100-letnih povratnih dobah za različna trajanja padavin med obdobjema podatkov 1975-1996 in 1997-2018 in 1975-1996. Prikazani so rezultati za mediano (50%) in 5% in 95% interval zaupanja (povzeto Bezak in Mikoš, 2019).

V naslednjem koraku smo z uporabo 5-minutnih podatkov o padavinah analizirali tudi trende v erozivnosti padavin (Petek et al., 2018). Erozivnost padavin je namreč eden izmed dejavnikov erozije tal. V tem primeru smo v analizah upoštevali celotno razpoložljivo obdobje meritev na padavin-

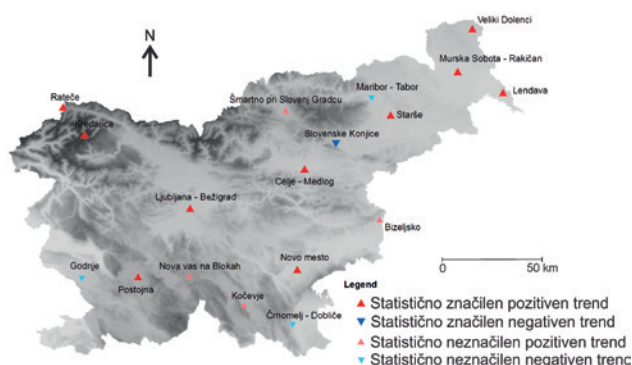
skih postajah. Petek s sodelavci (2018) bolj natančno opisuje sam postopek analize (t.j. določitev erozivnih dogodkov, uporabljene enačbe, itd.). Preglednica 2 prikazuje rezultate Mann-Kendallovega testa, ki je bil izračunan na podlagi mesečnih vrednosti erozivnosti padavin za celotno razpoložljivo obdobje meritev, ki je od padavinske postaje do padavinske postaje različno. Tudi v tem primeru ne moremo določiti enoznačnega trenda mesečne erozivnosti padavin (ali izrazito pozitivnega ali izrazito negativnega). Vidimo lahko, da imajo nekatere padavinske postaje v določenih mesecih statistično značilen pozitiven trend, druge padavinske postaje pa statično značilen negativen trend. Podobno kot pri rezultatih analize intenzitet padavin različnega trajanja (preglednica 1), je tudi v tem primeru večina trendov neznačilnih, kar pomeni, da v teh podatkih oziroma vrednostih ni izrazitih sprememb. Povedano drugače, zadnja leta meritev niso izrazito drugačna kot obdobja, ko so se meritve začele izvajati (t.j. obdobje okrog leta 1970).

Z uporabo klimatskih modelov je Panagos s sodelavci (2017) poskušali oceniti vrednosti erozivnosti padavin v prihodnosti. Tako so izračunali, da naj bi se erozivnost padavin v Evropi do leta 2050 povečala za 18%. Povečanje naj bi bilo prisotno na 81% obravnavanega območja. Zanimivo je, da je Slovenija v območju, kjer je predvideno zmanjšanje erozivnosti padavin (Panagos et al., 2017). Ugotovili so, da naj bi se erozivnost padavin leta 2050 glede na leto 2010 zmanjšala za 22%, kar je predvsem posledica zmanjšanja erozivnosti padavin v zahodnem delu države, medtem ko naj bi se erozivnost padavin za vzhodni del Slovenije nekoliko povečala (Panagos et al., 2017). Po drugi strani pa je bilo največje povečanje v Evropi napovedano za srednjo in severno Evropo (npr. Danska in Nizozemska 78%). Na dejansko erozijo tal pa imajo poleg erozivnosti padavin vpliv tudi drugi faktorji kot sta pokrovnost tal in erodibilnost tal, ki bosta v prihodnosti prav tako podvržena spremembam.

Evapotranspiracija

Nadalje smo analizirali trende v vrednostih referenčne evapotranspiracije, izračunane z uporabo Penman-Monteithove enačbe (Maček, 2017). Uporabljene so bile dnevne vrednosti referenčne evapotranspiracije z 18 meteoroloških postaj in sicer za obdobje od leta 1961 do 2016 (ARSO, 2017b). Tako smo iskali prisotnost trendov v različnih vzorcih kot so dnevne vrednosti, največje mesečne vrednosti, letne vsote referenčne evapotranspiracije in največje dnevne vrednosti te spremenljivke (Maček, 2017). Ugotovljeno je bilo, da so zaznani trendi večinoma pozitivni in v kar nekaj primerih tudi statistično značilni (slika 2)

(Maček et al., 2018). Statistično značilen naraščajoč trend letnih vsot referenčne evapotranspiracije je bil zaznan za 10 obravnavanih postaj, padajoč pa za eno postajo, in sicer Slovenske Konjice (slika 2). Za 7 analiziranih postaj ni bilo mogoče določiti statistično značilnega trenda. Nadaljnje analize so pokazale, da trendi ekstremnih vrednosti evapotranspiracije (mesečnih in letnih maksimumov) niso tako izraziti kot trendi letnih in dnevnih vsot. Ugotovitev kaže na dejstvo, da se posamezne ekstremne vrednosti evapotranspiracije v opazovanem obdobju niso znatno spremenile, je pa zaznan splošen dvig dnevnih vrednosti evapotranspiracije.



Slika 2: Rezultati Mann-Kendallovega testa za izbrane postaje. Test je bil uporabljen za letne vsote dnevnih vrednosti referenčne evapotranspiracije. Izbrana je bila stopnja značilnosti 0,05. Povzeto po Maček et al. (2018).

Če združimo ugotovitve vseh štirih analiziranih vzorcev vrednosti evapotranspiracije (dnevne vrednosti, največje dnevne vrednosti, mesečne vsote, letne vsote) lahko ugotovimo, da tri meteorološke postaje izkazujejo naraščajoč trend referenčne evapotranspiracije za vse štiri analizirane vzorce podatkov. To sta dve postaji z gorsko klimo (Kredarica in Rateče) in Celje-Medlog z zmerno celinsko klimo. Na drugi strani tri meteorološke postaje (Godnje, Slovenske Konjice in Črnomelj-Dobličice) izkazujejo negativen trend evapotranspiracije za vse štiri vzorce analiziranih vrednosti evapotranspiracije, od katerih prva spada v sub Mediteransko podnebje dve pa v zmerno celinsko. Sicer pa večina postaj v zmernem celinskem podnebju izkazuje naraščajoče trende evapotranspiracije v večini vzorcev. Povečanje evapotranspiracije lahko vodi v zmanjšano napajanje podtalnice in tudi manjši površinski in podpovršinski odtok, kar se odraža v manjših nizkih in srednjih pretokih.

Pretoki

Analizirali smo tudi spremembe v pretokih v slovenskih rekah na podlagi meritev na 40 vodomernih postajah ARSO (ARSO, 2017c). Uporabili smo

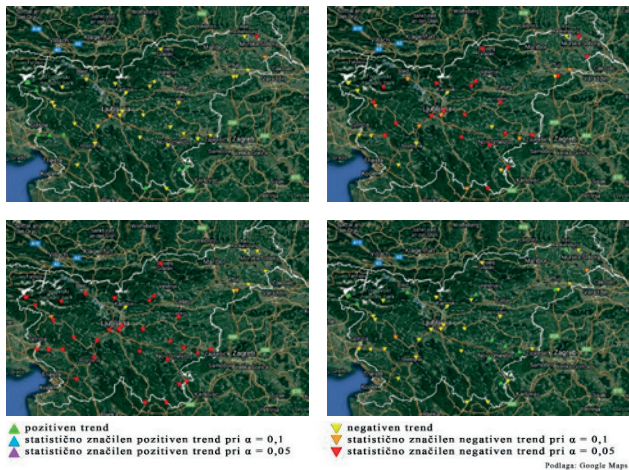
podatke o srednjih dnevni vrednostih pretokov, analizirali pa smo različne vzorce, in sicer srednje sezonske in letne pretoke, največje sezonske in letne pretoke, najmanjše sezonske in 7- ter 30-dnevne pretoke ter sezonske in letne vrednosti pretokov nad izbrano mejo (POT1 in POT3). Slika 3 (Oblak, 2017) prikazuje rezultate Mann-Kendallovega testa za srednje dnevne zimske, pomladanske, poletne in jesenske pretoke rek za obdobje od leta 1961 do 2013. Vidimo lahko, da večina vodomernih postaj izkazuje negativen trend, ponovno pa lahko med postajami opazimo določene razlike. Podobno velja tudi za posamezne letne čase, kjer je npr. poletno upadanje pretokov bolj izrazito kot pa upadanje pozimi (slika 3).

Analize srednjih letnih pretokov so pokazale, da njihove letne vrednosti upadajo na vseh obravnavanih postajah. Za ekstremne in največje pretoke pa ni enoznačne ugotovitve, saj na nekaterih postajah upadajo in na drugih naraščajo. Za najnižje pretoke pa lahko ugotovimo, da v Črnomorskem povodju in pri polovici postaj v Jadranskem povodju statistično značilno upadajo. Izjema so vodotoki z zaledjem v Alpah (Oblak, 2017).

Podobno je ugotovila tudi Jelen (2019), ki je analizirala pretoke v 14 kraških izviroh v Sloveniji. Tako se je srednji letni pretok v 12 izmed 14 primerov kraških izvirov statistično značilno zmanjševal (Jelen, 2019). Nadalje pa je bil statistično značilen trend zaznan tudi v primeru 11 izmed 14 izvirov pri analizah najmanjših letnih pretokov. Ta ugotovitev je še posebej pomembna, ker kraški vodonošniki v sušnih mesecih (t.j. poleti) skladiščijo tudi do dve tretjini zaloga pitne vode (Ravbar, 2010). Zaradi povečanega razvoja turizma in števila nočitev lahko tako v prihodnosti ob nadaljnjem upadanju nizkih in srednjih pretokov pričakujemo še izrazitejšo težavo z oskrbo s pitno vodo v določenih delih Slovenije. Ob zmanjšanju poletnih padavin bi se lahko v prihodnosti zmanjšali tudi nizki pretoki, kar nakazujejo izračuni klimatskih modelov (Sapač et al., 2019).

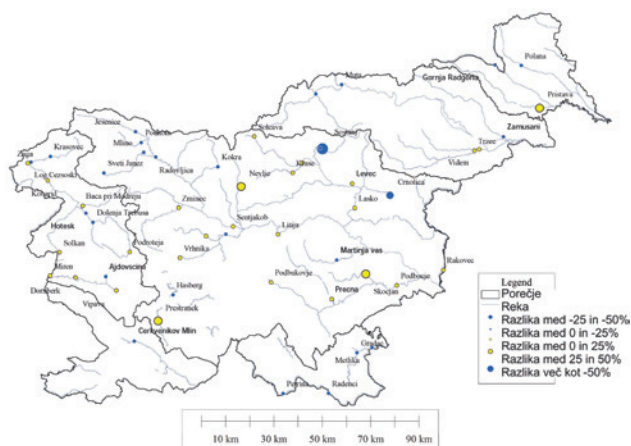
Ker zaznane spremembe v največjih pretokih vplivajo na rezultate verjetnostnih analiz, s katerimi najpogosteje določamo projektne pretoke, smo v različnih študijah analizirali tudi spremembe v projektih pretokih (Menih, 2014; Šraj et al., 2016a; Šraj et al., 2016b). Preučevali smo spreminjanje največjih letnih pretokov (ARSO, 2017c) in projektih pretokov v obdobju od leta 1961 do 2010 (Šraj et al., 2016a). Tako je bilo z uporabo Mann-Kendallovega testa ugotovljeno, da so vrednosti največjih letnih pretokov statistično značilno naraščajoče z izbrano stopnjo značilnosti za približno 5% izmed 55 obravnavanih vodomernih postaj (Šraj et al., 2016a). Za večino vodomernih postaj (45 od 55) je bil trend statistično neznačilen. Izvedli pa smo tudi primerjavo med projektimi pretoki z 10-letno povratno dobo, izračunanimi z uporabo podatkov od leta 1981 do 2010 in projek-

tnimi pretoki, določenimi na podlagi podatkov iz obdobja 1961-1990. Slika 4 tako prikazuje razlike med projektnimi pretoki dveh 30-letnih obdobj za 55 vodomernih postaj (Šraj et al., 2016a). Podobno kot pri Mann-Kendallovem testu tudi v tem primeru ni bilo mogoče ugotoviti splošnega izrazitega povečanja ali izrazitega zmanjšanja v vrednostih projektnih pretokov v obdobju 1981-2010 glede na obdobje 1961-1990. Nekatere postaje izkazuje povečanje in spet druge zmanjšanje ocenjenih vrednosti projektnih pretokov. Izpostavimo pa lahko, da so bile razlike za nekatere vodomerne postaje večje kot 50% (slika 4).



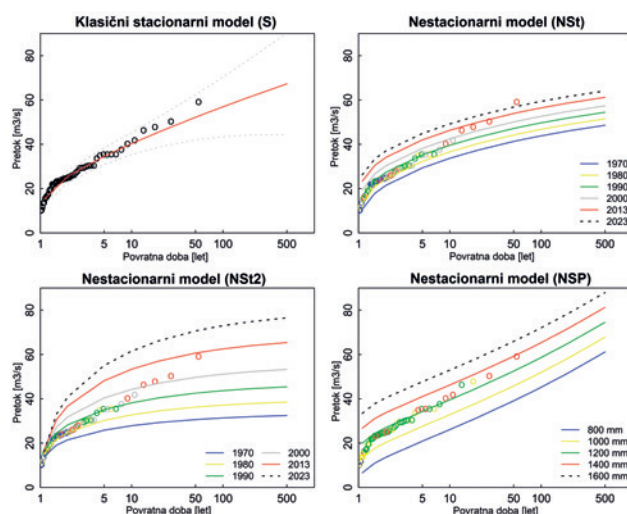
Slika 3: Rezultati Mann-Kendallovega testa za srednje zimske (levo zgoraj), pomladne (desno zgoraj), poletne (levo spodaj) in jesenske (desno spodaj) pretoke. Uporabljene so bili podatki od leta 1961 do 2013. Povzeto po Oblak (2017).

V tem smislu so zanimive tudi ugotovitve pan-Evropske raziskave, kjer avtorji za zadnje 50-letno obdobje niso mogli določiti enoznačnega trenda za celotno Evropo, so pa izločili tri značilne regionalne trende (Blöschl et al., 2019). Tako se poplave v severo-zahodni Evropi zaradi povečanja jesenskih in zimskih padavin povečujejo, v območju Mediterana oziroma južne Evrope zaradi zmanjšanja padavin in povečane evapotranspiracije zmanjšujejo ter v vzhodni Evropi zaradi zmanjšanja snežnih padavin in snežne odeje, kar je posledica povečanja temperature, zmanjšujejo. Slovenija se nahaja prav na meji med dvema zaznanima območjema (Blöschl et al., 2019), kar še enkrat potrjuje naše ugotovitve o mešanih trendih. Poleg sprememb v magnitudah pretokov, pa so bile ugotovljene tudi spremembe v času nastopa poplav (Blöschl et al., 2017). Za Slovenijo tudi v tem primeru ni bil ugotovljen enoznačen trend. Primerjava klasičnih verjetnostnih analiz z novimi t.i. nestacionarnimi pristopi je pokazala, da klasične verjetnostne analize brez upoštevanja podnebne spremenljivosti lahko v posameznih primerih znatno podcenijo projektne pretoke (Šraj et al., 2016b). Na sliki 5 so prikazani rezultati štirih pristopov določanja projektnih pretokov za



Slika 4: Razlike v projektnih pretokih z 10-letno povratno dobo v primeru, da je za analize uporabljeno obdobje od leta 1981-2010 glede na obdobje 1961-1990. Povzeto po Šraj et al. (2016a).

primer postaje Škocjan na Radulji (1961-2013), ki je izkazala statistično značilen naraščajoč trend visokovodnih konic, in sicer klasični pristop (S), dva nestacionarna pristopa z upoštevanjem trenda konic (NSt in NSt2) ter nestacionarni pristop z upoštevanjem letne količine padavin (NSP). Vsi modeli temeljijo na generalizirani porazdelitvi ekstremnih vrednosti (GEV). Kot je razvidno iz slike 5, klasični model podcenjuje pretekle visokovodne dogodke. Tudi nestacionarni model (NSt) podceni najvišji izmerjeni pretok iz leta 2010, čeprav že upošteva trende visokovodnih konic. Šele upoštevanje trenda v obeh parametrih porazdelitve izboljša rezultate. Iz slike 5 je razvidno, da 100-letni pretok po klasičnem pristopu ustreza 20-letnemu pretoku nestacionarnega modela (NSt2). Ali drugače povedano, če želimo danes zagotoviti varnost pred 100-letno poplavo, bi ob upoštevanju podnebne spremenljivosti morali v tem primeru



Slika 5: Primerjava ocen projektnih pretokov za različne povratne dobe z uporabo klasičnega pristopa in treh nestacionarnih pristopov z upoštevanjem podnebne spremenljivosti. Primer je narejen za vodomerno postajo Škocjan na Radulji za podatke obdobja 1961-2013. Povzeto po Šraj et al. (2016b).

uporabiti pretok z 230-letno povratno dobo klasičnega modela. Ker pa težko zagotovimo, da se bo ugotovljeni trend visokovodnih konic točno v enaki meri nadaljeval tudi v prihodnosti, še največ obeta model z upoštevanjem padavin. V tem primeru smo v model vgradili odvisnost od letnih količin padavin (NSP) (Šraj et al., 2016b). Ob uporabi takih modelov pa so bistvenega pomena zanesljivejše napovedi padavin za prihodnost (klimatski modeli). Več o rezultatih raziskave lahko najdete v Šraj in sodelavci (2016b).

Vse te ugotovitve bi bilo zagotovo potrebno upoštevati tudi pri postopkih določanja projektnih pretokov. Več skupin znanstvenikov je poskušalo opredeliti družbeno izpostavljenost vse večjim poplavam v 21. stoletju in ocenilo, da bo v primeru, da se spremembam ne prilagodimo, globalna škoda do leta 2050 znašala 1 trilijon \$ na leto (Luke et al., 2017). Nekatere države (npr. Avstrija, Norveška, Belgija, Nemčija, Velika Britanija) so tako zaradi vpliva podnebnih sprememb oziroma podnebne spremenljivosti pri načrtovanju že vpele v prakso tako imenovane klimatske varnostne faktorje, ki znašajo do 30 % (Madsen et al., 2014; Luke et al., 2017).

Zaključki

Prispevek prikazuje rezultate analiz in vrednotenja trendov in sprememb v različnih merjenih hidrometeoroloških spremenljivkah v Sloveniji. Tako npr. ugotavljamo, da ekstremni padavinski dogodki v trajanju med 5 in 360 minut v zadnjih letih niso izrazito bolj intenzivni kot so bili približno 50 let nazaj. Se pa kažejo razlike med padavinskimi postajami, saj nekatere kljub vsemu izkazujejo statistično značilne pozitivne ali negativne trende. Podobno lahko ugotovimo za erozivnost padavin, ki je eden izmed dejavnikov erozije tal. Ta se niti značilno ne povečuje niti zmanjšuje. Vrednosti referenčne evapotranspiracije, ki ima pomemben vpliv na agrometeorološke razmere, imajo na večini meteoroloških postaj statistično značilen pozitiven trend, kar je v večji meri posledica naraščajočega trenda temperature zraka. Analize trendov srednjih pretokov rek na večini vodomernih postaj izkazujejo negativen trend. Ta je še posebej izrazit za kraške vodotoke (tudi za nizke pretoke) in kraške izvire. Nekoliko drugačna slika se kaže v primeru velikih pretokov, ki na večini postaj ne izkazujejo statično značilnega trenda, je pa nekaj vodomernih postaj z značilnim naraščajočim ali padajočim trendom. Podobno raznolikost smo ugotovili za projektne pretoke z 10- in 100-letno povratno dobo. Večinoma se njihove vrednosti izrazito ne zvišujejo, so pa prisotne vodomerne postaje z značilnim naraščanjem ali padanjem projektnih pretokov, kar je bilo za Slovenijo ugotovljeno tudi v sklopu analiz pretokov rek na

širšem območju Evrope. V splošnem lahko ugotovimo, da v Sloveniji zaradi njene pestre podnebne raznolikosti lahko pričakujemo zelo različne odzive hidro-meteoroloških spremenljivk na prihodnje podnebne spremembe oziroma naravno spremenljivost podnebja, čemur se bomo morali prilagoditi tudi pri upravljanju z vodami.

Dodatno se je treba tudi zavedati, da so meritve različnih hidro-meteoroloških spremenljivk bolj intenzivno izvajajo v zadnjih 30, morda 50 letih. V primeru, da imamo za analize na razpolago 100 let podatkov, lahko to privzamemo kot zelo dolg niz, v primeru 150 let govorimo že o ekstremno dolgih nizih. Koutsoyiannis (2013) tako prikazuje verjetno najdaljši hidrološki niz podatkov in sicer največje in najmanjše letne gladine reke Nil v obdobju več kot 700 let (slika 9 v Koutsoyiannis, 2013). Ugotovil je izredno veliko variabilnost med posameznimi obdobji meritev. Koutsoyiannis (2013) tako spreminjanje gladin opiše s t.i. Hurst-Kolmogorovim procesom, ki nakazuje, da so spremembe v daljših obdobjih bolj pogoste in intenzivne kot pogosto pričakujemo, da se podobne vrednosti pogosto pojavljajo v skupnih intervalih ter da je bolj oddaljena prihodnost pogosto precej negotova in ne-napovedljiva z upoštevanjem preteklih podatkov.

Iz prikaza analiz sledi, da je vsekakor pri načrtovanju inženirskih gradenj in objektov na vodotokih oziroma vodarskih ukrepov nasploh treba upoštevati negotovost, ki se je pri nas ne upošteva dovolj. Negotovost lahko izhaja ali iz same spremenljivosti naravnih procesov ali je morda tudi posledica podnebnih sprememb, ki so v javnosti pogosto izpostavljene kot izrazito negativne - moramo dodati, da so lahko posledice v nekaterih primerih tudi pozitivne, podobno kot so bile nekoč poplave reke Nil pravzaprav osnova oziroma pomemben del poljedelstva v starem Egiptu. Za oceno negotovosti pri projektnih pretokih in tudi pri projektnih padavinah se lahko uporabijo taki imenovani intervali zaupanja, ki podajajo mero zanesljivosti določene ocene hidro-meteorološke spremenljivke (npr. Šraj et al., 2016a; Bezak et al., 2017). Druga možnost pa je uporaba t.i. nestacionarnih modelov, ki upoštevajo podnebno spremenljivost. So pa ti modeli trenutno še v fazi intenzivnih raziskav in se v praksi po nam znanih podatkih še ne uporabljajo.

Zahvala

Agenciji RS za okolje (ARSO) se zahvaljujemo za posredovanje merjenih podatkov. Prispevek je nastal v okviru dela na raziskovalnem programu P2-0180 »Vodarstvo in geotehnika: orodja in metode za analize in simulacije procesov ter razvoj tehnologij«, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost (ARRS). Zahvaljujemo se tudi študentom Vodarstva in okoljskega inženirstva, ki

so v okviru svojih diplomskih in magistrskih nalog (navedenih v referencah) analizirali različne podatke.

Viri

- ARSO. 2017a. Prošnja za posredovanje podatkov s pluviografom. Poslano: Vičar, Z., 2017. Osebna komunikacija.
- ARSO. 2017b. Referenčna evapotranspiracija in padavine. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/> (pridobljeno 25. 8. 2017).
- ARSO. 2017c. Arhiv hidroloških podatkov. <http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/> (pridobljeno 2. 1. 2017)
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. 2017. Vpliv padavin na projektne pretoke. *Gradbeni vestnik*, 66, 241-248.
- Bezak, N., Mikoš, M. 2019. Investigation of Trends, Temporal Changes in Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves and Extreme Rainfall Events Clustering at Regional Scale Using 5 min Rainfall Data. *Water*, 11(10), 2167.
- Blöschl et al. 2017. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357, 588-590.
- Blöschl et al. 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, 108-111.
- Jelen, M. 2019. Hidrološka analiza kraških izvirov v Sloveniji. Magistrsko delo UL FGG.
- Koutsoyiannis, D. 2013. Hydrology and Change. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1177-1197.
- Luke, A., Vrugt, J.A., AghaKouchak, A., Matthew, R., Sanders, B.F. 2017. Predicting nonstationary flood frequencies: Evidence supports an updated stationarity thesis in the United States, *Water Resources Research*, 53(7), 5469–5494.
- Maček, U. 2017. Analiza trendov evapotranspiracije v Sloveniji. Diplomsko delo UL FGG.
- Maček, U., Bezak, N., Šraj, M. 2018. Reference evapotranspiration changes in Slovenia, Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261, 183-192.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3635–3650.
- Menih, M. 2014. Analiza vpliva izbranega obdobja meritev na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic. Diplomsko delo UL FGG.
- Oblak, J. 2017. Analiza sezonske spremenljivosti pretokov rek v Sloveniji. Magistrsko delo UL FGG.
- Panos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., Borelli, P. 2017. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology*, 548, 251-262.
- Petek, M. 2017. Analiza erozivnosti padavin v Sloveniji. Magistrsko delo UL FGG.
- Petek, M., Mikoš, M., Bezak, N. 2018. Rainfall erosivity in Slovenia: Sensitivity estimation and trend detection. *Environmental Research*, 167, 528-535.
- Ravbar, N. 2010. Lokalna vodooskrba na Krasu. *Razgledi, Dela* 34, 223-233.
- Sapač, K., Medved, A., Rusjan, S., Bezak, N. 2019. Investigation of Low- and High-Flow Characteristics of Karst Catchments under Climate Change. *Water*, 11, 925.
- Steinman, F., Mikoš, M. 1993. Zadrževanje voda v Sloveniji. Mišičev vodarski dan ,93, 95-99. Dostopno na: <http://www.mvd20.com/LET01993/R15.pdf> (pridobljeno 28. 9. 2019)
- Šraj, M., Menih, M., Bezak, N. 2016a. Climate variability impact assessment on the flood risk in Slovenia. *Physical Geography*, 37(1), 73-87.
- Šraj, M., Viglione, A., Parajka, J., Bloeschl, G. 2016b. The influence of non-stationarity in extreme hydrological events on flood frequency estimation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(4), 426–437.