



Sveučilište  
u Rijeci  
**Građevinski  
fakultet**



Završna konferencija:

Upravljanje krškim priobalnim vodonosnicima  
ugroženima klimatskim promjenama (UKV) –  
KK.05.1.1.02.0022.

# Hidrološko praćenje i modeliranje u odnosu na klimatske promjene

Josip Rubinić, Bojana Horvat, Maja Radišić, Igor Ružić, Duje Kalajžić  
(Građevinski fakultet u Rijeci)

Varaždin, 23.1.2023.



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



REPUBLIKA HRVATSKA  
Ministarstvo regionalnoga razvoja  
i fondova Europske unije



EUROPSKI STRUKTURNI  
I INVESTICIJSKI FONDOVI



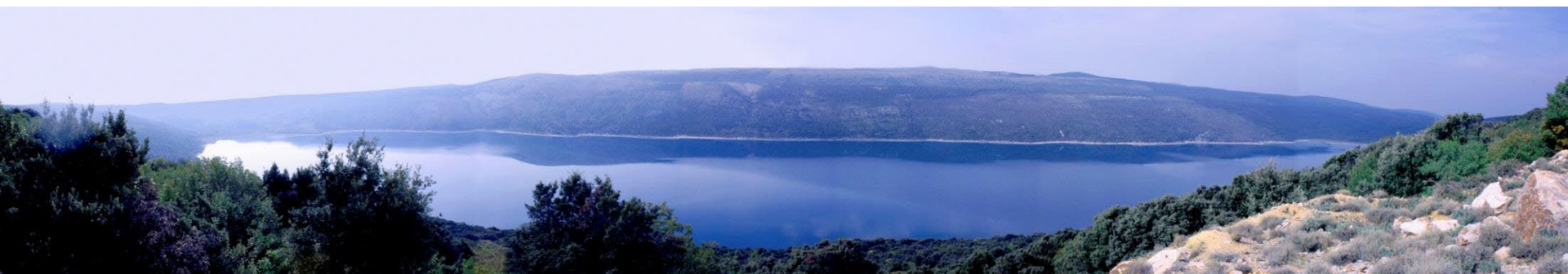
Operativni program  
**KONKURENTNOST  
I KOHEZIJA**



FOND ZA ZAŠTITU OKOLIŠA I  
ENERGETSKU UČINKOVITOST

# Sadržaj:

- Uvod
- Metodologija hidrološkog modeliranja
- Modeliranje bilančnih pokazatelja
  - Pilot područje Bokanjac – Poličnik
  - Pilot područje Vransko jezero na Cresu
  - Pilot područje Blatsko polje na Korčuli
- Modeliranje pojavnosti ekstremnih kratkotrajnih događaja
- Modeliranje temperatura vode



**Manifestacije klimatskih promjena su već dugo prisutne i imaju svekoliki utjecaj na vodne sustave. Njihov je utjecaj, kao i očekivane daljnje promjene, posebno izražen na području Mediterana.**

Taj se utjecaj naročito manifestira **na promjenama u vodnoj bilanci**, kojima mogu biti **ugroženi kako ekosustavi prirodnih vodnih sustava, tako i mogućnosti korištenja voda.**

Zbog toga se već dulji niz godina **s jedne strane prate te negativne manifestacije klimatskih promjena, a s druge strane razvijaju alati za prognozu mogućih promjena u budućnosti kako bi se osigurali odgovarajući upravljački odgovori.**

Ti alati uglavnom su vezani uz klimatološka modeliranja, ali **na osnovu klimatskih modela i njihovih rezultata razvijaju se i hidrološki modeli koji kvantificiraju utjecaje klimatskih promjena** (prije svega promjena temperatura zraka i količina palih oborina) **na hidrološki režim otjecanja.**



United Nations  
Environment  
Programme



SOUTH EAST  
EUROPE  
Transnational Cooperation Programme



CC-WaterS



HGI  
HRVATSKI GEOLOŠKI INSTITUT  
INSTITUTE OF GEOLOGICAL RESEARCH

## MEDITERRANEAN ACTION PLAN

First Meeting of the Task Team on  
Implications of Climatic Changes  
on Cres-Lošinj Islands

Rijeka, 2-3 March 1992

Za spomenuti je i da je **prvo istraživanje utjecaja CC na vodne resurse na području Hrvatske napravljeno upravo na primjeru Cresa i Lošinja.**



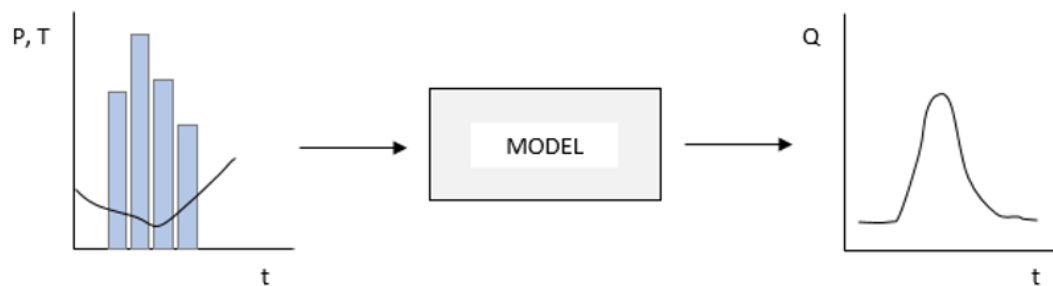
**1992.**

**2011.**

# Metodologija hidrološkog modeliranja

Modeliranje klimatskih promjena:

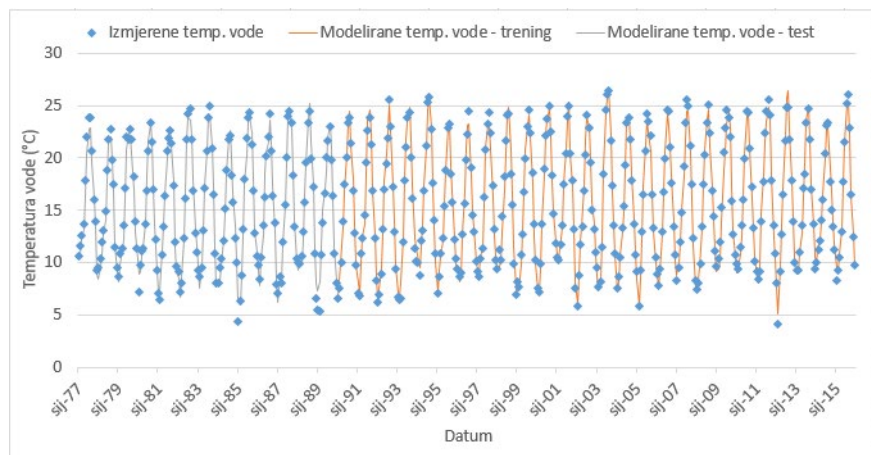
- **Klimatološki modeli** (modeliranje mjesečnih oborina i temperatura za različite klimatske scenarije i različitim tipovima globalnih i regionalnih modela)
- **Hidrološki modeli** (na temelju generiranih oborina i temperatura iz klimatskih modela generirani nizovi protoka i temperatura vode – primjenom modela umjetne inteligencije – **neuronske mreže i regresijska stabla odlučivanja**)



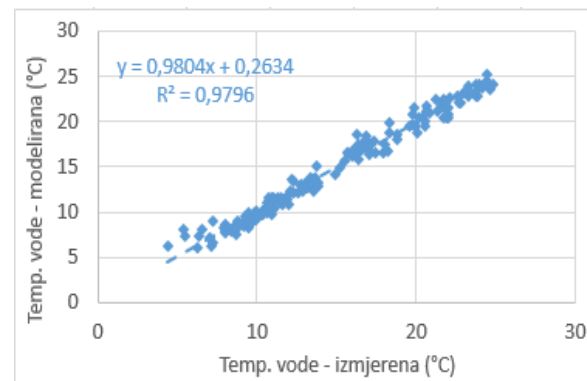
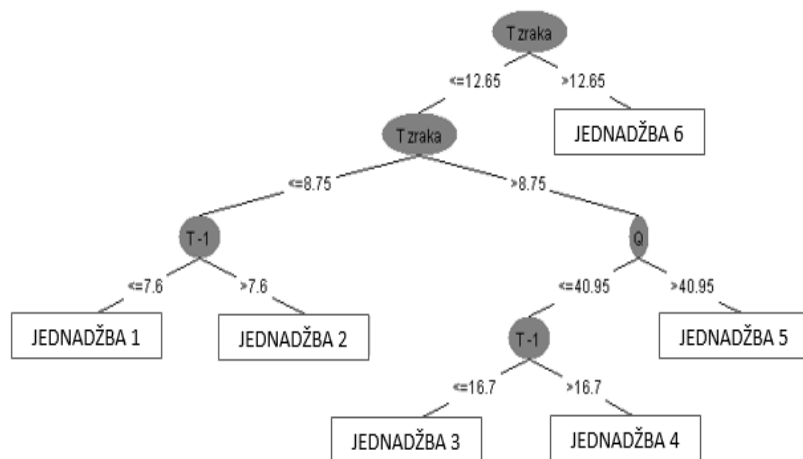
Hidrološka modeliranja u UKV - korištenjem **matematičkih hidroloških modela** s ulaznim podacima – mjerenim i prognoziranim klimatološkim podacima

# Metodologija hidrološkog modeliranja

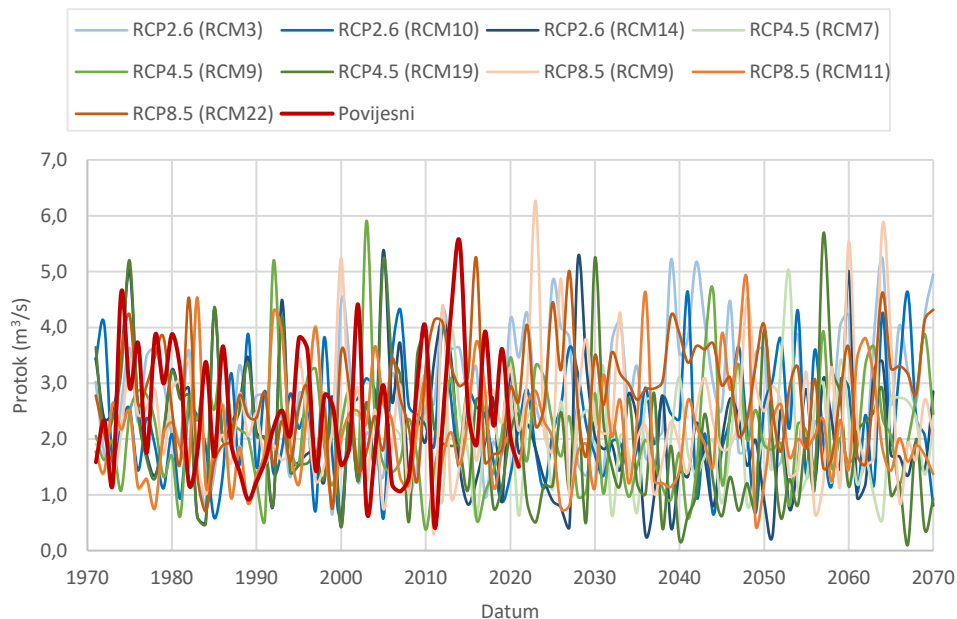
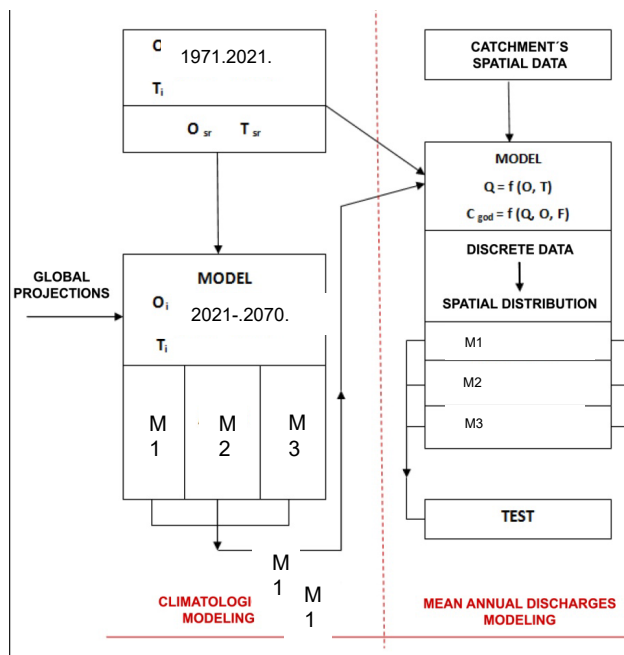
## Primjer modeliranja temp vode Krke



Grafički prikaz izmjerenih i modelom regresijskih stabla (Trees M5P) proračunatih vrijednosti srednjih mjesečnih temperatura vode (dolje) za trenirano (1990.-2015.) i testirano razdoblje (1977.-1989.)

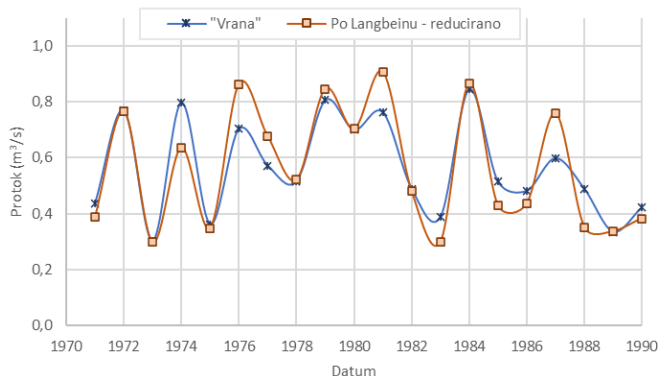


# Metodologija hidrološkog modeliranja

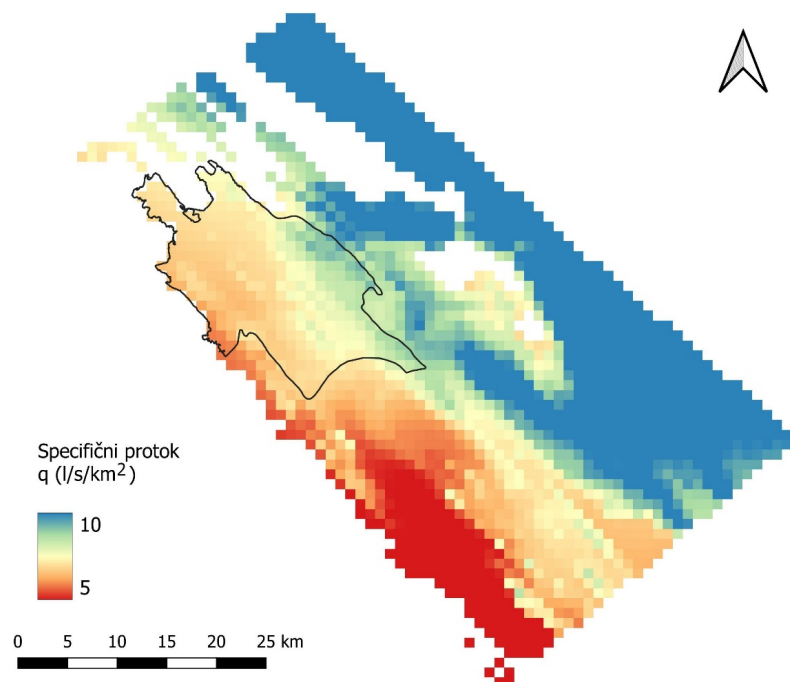


Modeliranje – generiranje sr. god. protoka za različite klimatske scenarije (RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5) i modele unutar njih

Testirano s regionalnim saznanjima o god. otjecajnim koeficijentima ili usporedbom s proračunatim dotocima za povijesni niz dotoka u Vransko jezero



# Modeliranje bilančnih pokazatelja - Pilot područje Bokanjac – Poličnik



Analiza elemenata prostorne raspodjele palih oborina, temperatura i specifičnih protoka po metodi Langbeina, Turca i osrednjenih Lang—Turc (1981.-2010.)

Pokazatelj	Oborine (mm)	Temperat ure (°C)	Spec. protoci - po Langbeinu (l/s/km <sup>2</sup> )	Spec. protoci - po Turcu (l/s/km <sup>2</sup> )	Spec. protoci - osrednjeno Lang-Turc (l/s/km <sup>2</sup> )
MIN	873,3	13,9	3,88	7,82	5,85
MAX	1017,2	15,3	7,37	11,63	9,5
SR	935	14,8	5,24	9,51	7,38
MEDIJAN	930,2	14,9	5,01	9,3	7,15
1. KVARTIL (25 %)	915,2	14,6	4,78	8,98	6,89
3. KVARTIL (75 %)	949,8	15,1	5,55	9,9	7,71
STDEV	28	0,32	0,7	0,77	0,73
RASPON	143,9	1,37	3,49	3,82	3,65

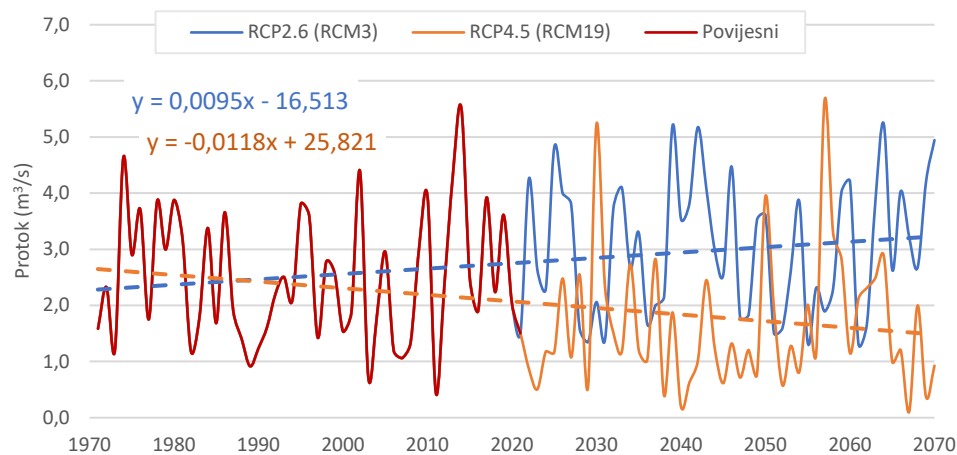
# Modeliranje bilančnih pokazatelja - Pilot područje Bokanjac – Poličnik

Klimatski scenarij	Povijesni niz	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		RCM3	RCM10	RCM14	RCM7	RCM9	RCM19	RCM9	RCM11	RCM22
<b>Razdoblje 1971. - 2021.</b>										
Homogenost u odnosu na povijesni		H	H	H	H	H	H	H	H	H
SR (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)	2,47	2,46	2,23	2,36	2,06	2,16	2,28	2,24	2,08	2,55
Max (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)	5,52	4,44	4,32	5,38	4,52	5,90	5,21	5,23	4,54	5,24
Min (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)	0,433	0,665	0,575	0,426	0,591	0,379	0,419	0,312	0,607	0,705
<b>Razdoblje 1971. - 2070.</b>										
Trend (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		0,0102	0,0029	-0,0074	-0,0003	0,0002	-0,0106	0,0029	0,0016	0,0076
SR (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		2,75	2,29	2,13	2,04	2,13	1,97	2,37	2,11	2,80
Max (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		5,23	4,63	5,38	4,97	5,90	5,66	6,26	4,81	5,24
Min (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		0,665	0,575	0,266	0,552	0,379	0,103	0,312	0,489	0,705
<b>Razdoblje Kombinacija povijesni niz 1971. - 2021. te 2022. - 2070.</b>										
Trend (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		0,0095	-0,0009	-0,0076	-0,0066	-0,0039	-0,0118	-0,0007	-0,0048	0,0084
Homogenost povijesni 1971. - 2021. u odnosu na 2022. - 2070.		NeH	H	NeH	H	H	NeH	H	H	NeH
SR (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		2,76	2,41	2,19	2,25	2,29	2,07	2,48	2,31	2,76
Max (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	5,66	6,26	5,52	5,52
Min (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		0,433	0,433	0,266	0,433	0,433	0,103	0,433	0,433	0,433
<b>Razdoblje 1981. - 2010.</b>										
SR (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		2,20	2,23	2,25	2,21	2,26	2,27	2,20	2,22	2,23
Max (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		4,44	4,32	5,38	4,52	5,90	5,21	5,23	4,54	4,53
Min (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		0,665	0,575	0,426	0,846	0,379	0,419	0,748	0,848	0,705
<b>Razdoblje 2041. - 2070.</b>										
SR (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		3,11	2,43	1,95	2,00	2,29	1,67	2,44	2,24	2,97
Max (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		5,23	4,63	5,01	4,97	4,64	5,66	5,84	4,81	4,63
Min (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /god)		1,32	0,648	0,266	0,574	0,573	0,103	0,681	0,489	1,49
<b>Odnos 2041. - 2070. / 1981. - 2010.</b>										
SR (%)		29%	8%	-15%	-10%	2%	-36%	10%	1%	25%
Max (%)		15%	7%	-7%	9%	-27%	8%	10%	6%	2%
Min (%)		50%	11%	-60%	-47%	34%	-307%	-10%	-73%	53%

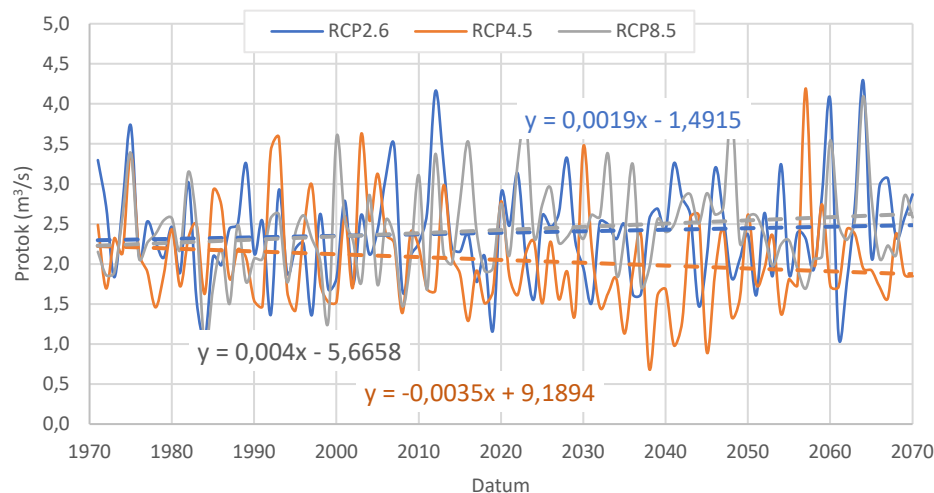
\* H = homogen, NeH = nehomogen

Karakteristični pokazatelji generiranih nizova podataka o srednjim godišnjim protocima na pilot području Bokanjac – Poličnik (1971.-2070.) prema različitim klimatskim scenarijima i modelima

# Modeliranje bilančnih pokazatelja - Pilot područje Bokanjac – Poličnik



Prikaz izdvojenih nizova podataka srednjih godišnjih potoka za dva granična slučaja iskazanih trendova odabranih scenarija i modela na pilot području Bokanjac – Poličnik (1971.-2070.)

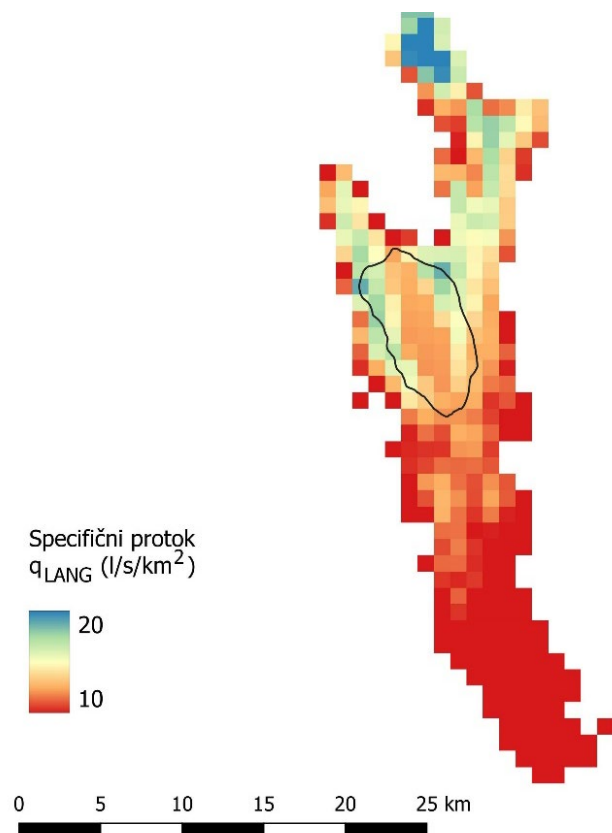


Prikaz osrednjenih nizova podataka srednjih godišnjih potoka za odabrane klimatske scenarije na pilot području Bokanjac – Poličnik (1971.-2070.)

**Scenarij RCP4.5 najkritičniji po bilanci srednjih godišnjih protoka** iz razloga što je kod njega iskazan trend opadanja protoka.

Za napomenuti je da se radi o srednjim godišnjim protocima i da na korištenje voda utječe ne samo globalna raspoloživost voda, nego i unutar godišnja raspodjela protoka, no koji element, zbog nedostatka mjerenih podataka o istjecanjima podzemnih voda na analiziranom prostoru, nije mogao kvantificirati.

Stoga unatoč okolnosti da se po nekim klimatskim scenarijima i modelima u budućnosti očekuje čak i povećanje srednjih godišnjih protoka, **preporuka je da se radi sigurnosti ipak više vodi računa o kritičnijim prognoziranim vrijednostima protoka.**

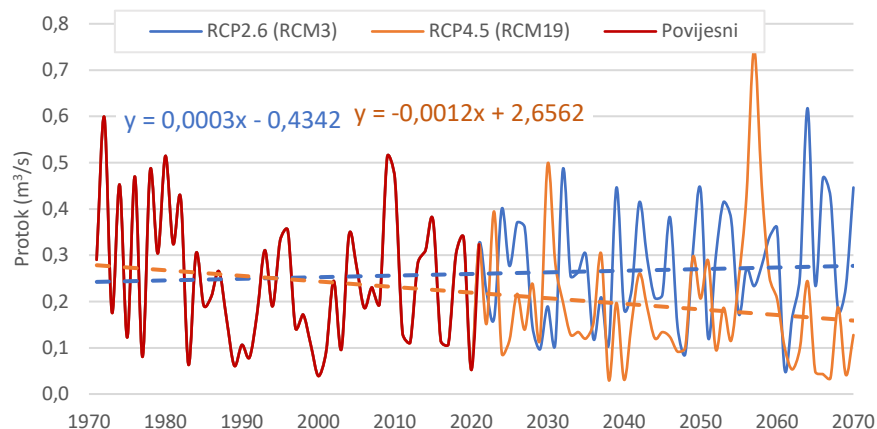
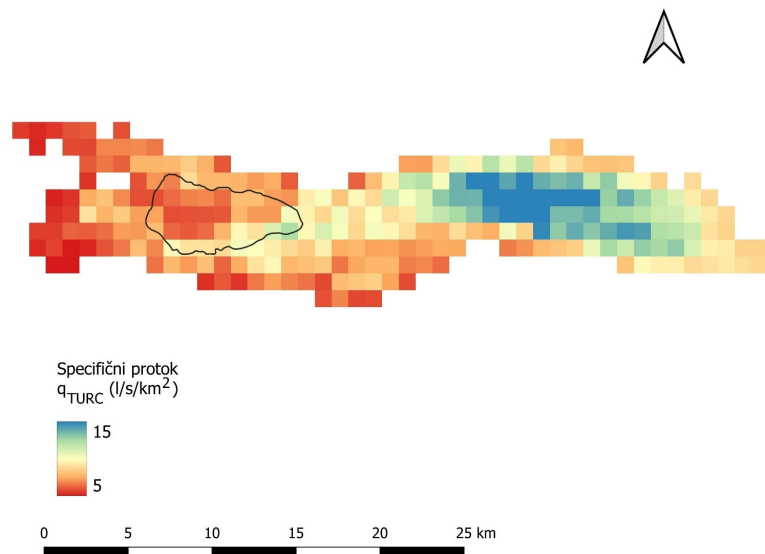


**Scenarij RCP4.5 i tu kritičniji po bilanci srednjih godišnjih protoka** iz razloga što je jedino kod njega iskazan trend opadanja protoka.

Prema scenariju RCP8.5 srednji godišnji protoci mogli bi imati čak i trend porasta, a kod scenarija RCP2.6 stagnacije.

Generalno, dobivene procjene u sklopu predmetnog UKV projekta za buduće stanje (2041-2070.), govore da bi se, **u slučaju ostvarenja modela koji daju najkritičnije hidrološke procjene srednjih godišnjih protoka, one mogle u prosjeku smanjiti do oko 20% u odnosu na razdoblje 1981.-2010.**, s time da dobar dio modela pokazuje i moguće povećanje sr. god. protoka. Te su procjene **dvostruko blaže nego li procjene dane u okviru prethodnog projekta CCWaterS.**

# Modeliranje bilančnih pokazatelja - Pilot područje Blatsko polje/Korčula



U slučaju ostvarenja modela koji daju najkritičnije hidrološke procjene srednjih godišnjih protoka, **one mogle u prosjeku smanjiti do oko 15% u odnosu na razdoblje 1981.-2010.**, s time da neki od modela pokazuju čak i moguće povećanje sr. god. protoka. Te su procjene **višestruko blaže nego li procjene dane u okviru prethodnog projekta CCWaterS** gdje je kao referentno razdoblje buduće klime uzeto zadnjih 30 godina u 21. stoljeću.

No, problem je mogućnost pojava **iznimno sušnih godina kakve do sada nisu bile zabilježene tijekom kojih može ozbiljno biti ugrožena mogućnost osiguranja vodoopskrbe.**

# Modeliranje pojavnosti ekstremnih kratkotrajnih događaja

Klimatske promjene uvjetuju i **učestalije i intenzivnije pojave velikih voda.**

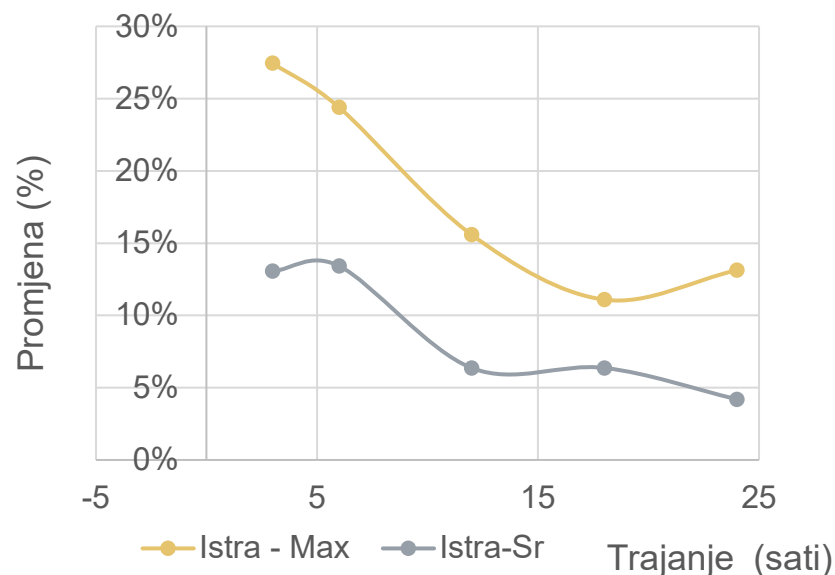
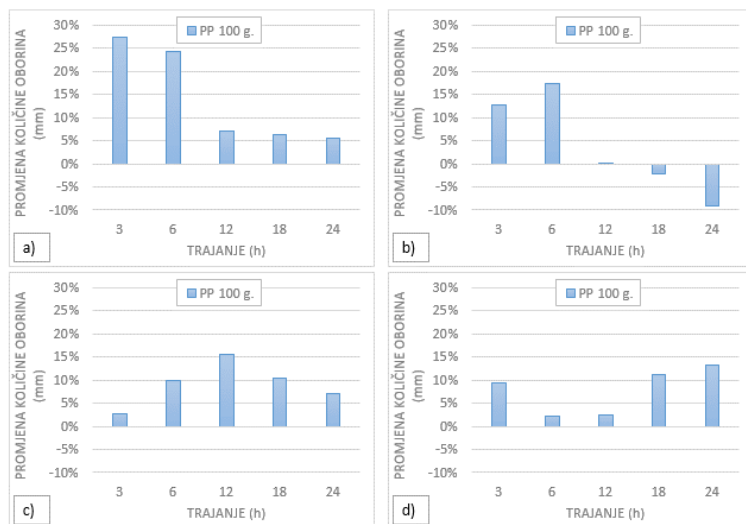
To ima utjecaja i na nagle promjene kakvoće voda, prije svega mutnoća na krškim izvorima.



U sklopu istraživanja provedenih u sklopu projekta „**Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama**“ provedene su od strane DHMZ-a i projekcije pojavnosti kratkotrajnih jakih oborina (za trajanja 3-24 sata) u uvjetima klimatskih promjena. **Klimatske promjene u budućnosti modelirane su prema RCP4.5 scenariju**, po kojem se očekuje umjereni porast stakleničkih plinova do konca 21. stoljeća.

Rezultati numeričkih integracija određeni su kao **srednjak ansambla iz četiri individualne integracije RegCM modelom.**

# Modeliranje pojavnosti ekstremnih kratkotrajnih događaja



Povećanje intenziteta oborina čak samo i po prosječnom scenariju mogućih promjena 5-10% uglavnom **generira dvostruko veće promjene** u maksimalnim protocima.

Kada se javljaju **intenzivne oborine i protoci nakon dugog sušnog razdoblja**, u krškim vodonosnicima se **pokreće i ranije sedimentirani nanos**, te se javljaju **povećane mutnoće koje mogu nositi i zdravstvene rizike** jer su one dobar sorbent kemijskog i mikrobiološkog onečišćenja.

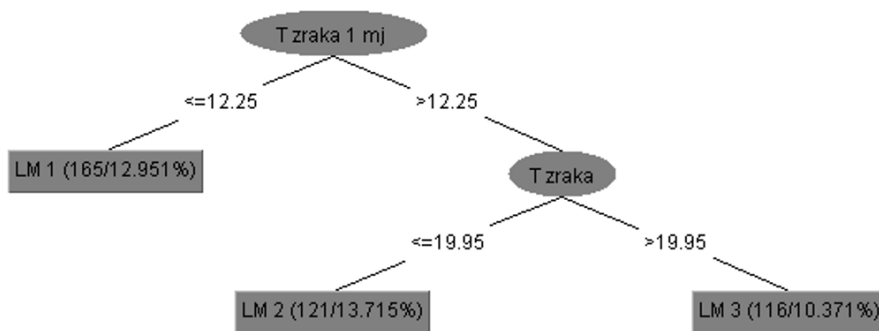
# Modeliranje temperature vode

Na primjeru Vranskog jezera na Cresu gdje se temp.površinskog sloja vode uz vodozahvat prate od 1979.

Niz podataka za treniranje (1987.-2021.)  
Verifikacija na nezavisnom nizu podataka (1979.-1986.)

Vrijednosti koeficijenta korelacije, srednje apsolutne greške i relativne apsolutne greške

	Koeficijent korelacije	Srednja apsolutna pogreška (NTU)	Relativna apsolutna pogreška (%)
Trees.M5P	0,993	0,590	10,8%
<u>Multilayer perceptron</u>	0,993	0,616	11,2%



$$LM 1 = 0.4146 * T \text{ zraka} + 0.3009 * T \text{ zraka 1 mj} + 0.1521 * T \text{ zraka 2 mj} + 0.004 * T \text{ zraka 4 mj} + 0.004 * \text{Oborine} + 1.681$$

$$LM 2 = 0.4673 * T \text{ zraka} + 0.318 * T \text{ zraka 1 mj} + 0.0712 * T \text{ zraka 2 mj} - 0.0485 * T \text{ zraka 3 mj} + 0.0055 * T \text{ zraka 4 mj} + 0.0016 * \text{Oborine} + 3.6723$$

$$LM 3 = 0.4673 * T \text{ zraka} + 0.318 * T \text{ zraka 1 mj} + 0.0712 * T \text{ zraka 2 mj} - 0.0485 * T \text{ zraka 3 mj} + 0.0055 * T \text{ zraka 4 mj} + 0.0016 * \text{Oborine} + 3.6723$$

Slika 4.4-1. Regresijsko stablo odlučivanja za procjenu srednjih mjesečnih temperatura vode ( $T \text{ zraka}$  = temperatura zraka,  $T \text{ zraka 1 mj}$  = temperatura zraka prethodni mjesec) i njegove formule

# Modeliranje temperature vode

Na primjeru Vranskog jezera na Cresu gdje se temp.površinskog sloja vode uz vodozahvat prate od 1979.

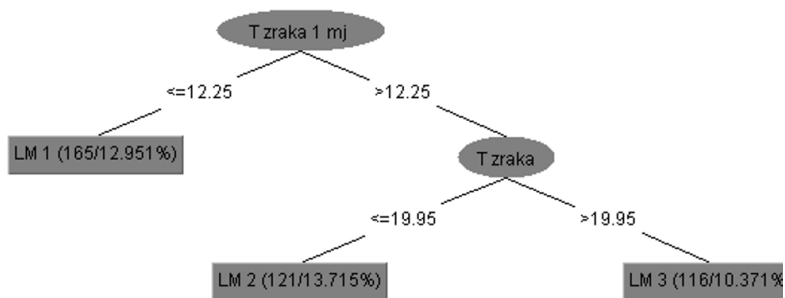
Niz podataka za treniranje (1987.-2021.)  
Verifikacija na nezavisnom nizu podataka (1979.-1986.)

Vrijednosti koeficijenta korelacije, srednje apsolutne greške i relativne apsolutne greške

	Koeficijent korelacije	Srednja apsolutna pogreška (NTU)	Relativna apsolutna pogreška (%)
Trees.M5P	0,993	0,590	10,8%
<u>Multilayer perceptron</u>	0,993	0,616	11,2%

Tablica 4.4-2. Rangiranje atributa pri modeliranju mjesečnih temperatura vode u Vranskom jezeru na Cresu

Redni broj	Rangiranje atributa pri modeliranju mjesečnih temperatura vode
1	Temperature zraka
2	Temperature zraka prethodni mjesec
3	temperature zraka četiri mjeseca prije
4	temperature zraka dva mjeseca prije
5	temperature zraka tri mjeseca prije
6	Oborine



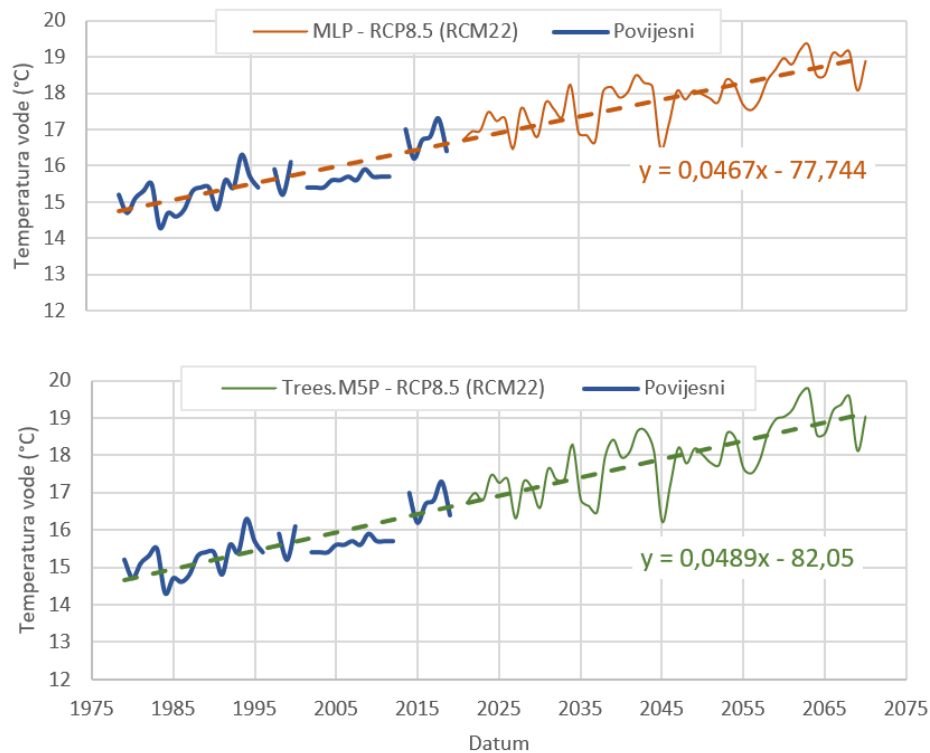
$$LM 1 = 0.4146 * T \text{ zraka} + 0.3009 * T \text{ zraka } 1 \text{ mj} + 0.1521 * T \text{ zraka } 2 \text{ mj} + 0.004 * T \text{ zraka } 4 \text{ mj} + 0.004 * \text{Oborine} + 1.681$$

$$LM 2 = 0.4673 * T \text{ zraka} + 0.318 * T \text{ zraka } 1 \text{ mj} + 0.0712 * T \text{ zraka } 2 \text{ mj} - 0.0485 * T \text{ zraka } 3 \text{ mj} + 0.0055 * T \text{ zraka } 4 \text{ mj} + 0.0016 * \text{Oborine} + 3.6723$$

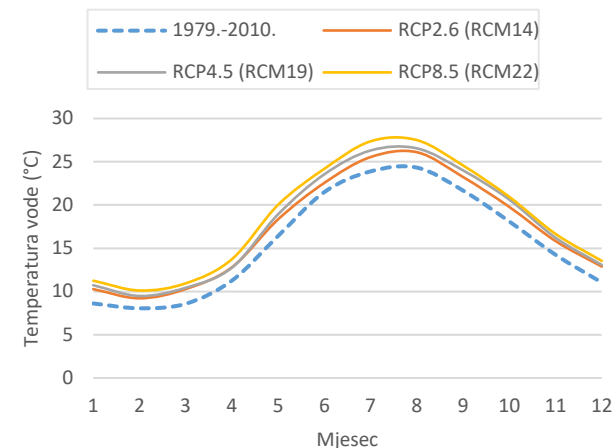
$$LM 3 = 0.4673 * T \text{ zraka} + 0.318 * T \text{ zraka } 1 \text{ mj} + 0.0712 * T \text{ zraka } 2 \text{ mj} - 0.0485 * T \text{ zraka } 3 \text{ mj} + 0.0055 * T \text{ zraka } 4 \text{ mj} + 0.0016 * \text{Oborine} + 3.6723$$

Slika 4.4-1. Regresijsko stablo odlučivanja za procjenu srednjih mjesečnih temperatura vode (T zraka = temperatura zraka, T zraka 1 mj = temperatura zraka prethodni mjesec) i njegove formule

# Modeliranje temperature vode



Prikaz povijesnih i prema modelu RCP8.5 (RCM22) generiranih sintetičkih serija srednjih godišnjih temperatura vode (1979.-2070.) s pripadajućim trendovima prema: MLP (gore) i Trees.M5P (dole)



**Svi modeli prognoziraju povećanje srednjih godišnjih temperatura vode i to za čak  $3^{\circ}\text{C}/100$  god prema modelu RCP2.6 (RCM14),  $3,8^{\circ}\text{C}/100$  god prema modelu RCP4.5 (RCM19), te za čak  $4,9^{\circ}\text{C}$  prema najkritičnijem modelu RCP8.5 (RCM22).**